

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

浮游生物 *Tetraselmis* sp. 於微流元件中對溫度梯度之運動

行為探討

On the motility response of *Tetraselmis* sp. in a
microchannel with a temperature gradient

康聖捷

Sheng-Jie Kang

指導教授：孫珍理 博士

Advisor: Chen-li Sun, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July 2023

口試委員會審定書



國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

浮游生物 *Tetraselmis* sp. 於微流元件中對溫度梯度之運動行為
探

On the motility response of *Tetraselmis* sp. in a microchannel with
a temperature gradient

本論文係康聖捷 (R10522036) 在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 112 年 7 月 28 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Mechanical Engineering on 28/7/2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by Sheng-Jie Kang (R10522306) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

孫玲麗

(指導教授 Advisor)

黃士豪

陳品鈞

系主任/所長 Director:

林沛群

誌謝



來台北求學的碩士生活，轉眼間即將邁入尾聲，何其有幸能夠在學術資源豐富的台灣大學就讀，研究過程中所遭遇的挫折與困難將化為養分，讓我茁壯為紮實的碩士生。

首先，感謝孫珍理老師這兩年的提攜和指導，甫升上研究所的暑假期間，老師即分配實驗與文獻供我們實作和閱讀，以厚植我們的研究能力；在碩二密集進行研究的過程中，縱使老師身處國外，仍舊不厭其煩地和我討論實驗的結果以及建議數據的分析方式，使我在茫茫的研究路途中能夠往正確的方向航行；於撰寫論文期間，也十分感謝老師在百忙之中撥冗批改論文，進而讓我注意到寫作的細節並時刻督促自己的進度，最終得以順利完成論文。老師的身教與言教使我獲益良多，在往後的人生階段中，我將銘記在心。再來，感謝父母親一路上的用心栽培，讓我可以心無旁騖地專注於學業。我是個幸運且幸福的人，若沒有父母親給予的支持與鼓勵，我無法如此順利地完成學業，期許未來的發展能讓父母親感到驕傲。

感謝一同奮鬥的同期好夥伴啟玄、淳民以及逸軒，猶記得碩一繁忙的修課期間，大家都會主動討論課業與分擔雜務，使我得以在兩門必修課程中安全下庄；在閒暇之餘，我們也時常關注運動賽事，共同見證勇士隊的驚奇奪冠之旅與阿根廷隊拿下睽違已久的世界盃冠軍，這些點點滴滴將永存在心中，在此祝福各位畢業快樂，鵬程萬里；感謝大學長書齊與中研院助理令偉的協助，兩位總是熱心地傳授浮游生物的相關實驗手法和培養方式；感謝學長穎希、家弘、泓宇以及育誠的提點，使我們能夠迅速瞭解實驗室生態；感謝學弟妹其安、明諺、神瑋以及子淇幫忙處理實驗室的日常雜務，讓我們能夠埋首於研究之中。最後，我想感謝女朋友冠臻從大學至研究所為期將近五年的陪伴，謝謝妳陪我走遍台南和台北的各大景點與品嚐各地美食、推薦許多好聽的獨

立音樂以及提供不同社會議題的觀點，這些珍貴的回憶讓平淡的生活增添許多色彩，很喜歡脆樂團寫的一段歌詞想分享給你：「如果說這一生有一件事最幸運，就是賭中億分之一的機率遇見你。」，有妳的陪伴真好。



摘要

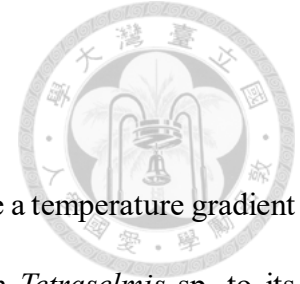


本研究利用溫控平台系統在一字型微流道內產生水平方向的溫度梯度，藉由分析各溫度區間的浮游生物族群密度與運動特徵，探討浮游生物 *Tetraselmis* sp. 於不同溫度梯度與環境溫度下的趨溫性行為。

實驗結果顯示，當浮游生物處於不同冷熱端溫差和環境溫度之下，會有各自對應的偏好溫度區間。當溫度梯度為 $1.28\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 時，介於 10°C 與 35°C 之間的环境下，浮游生物會聚集至 22.1°C 、 23.6°C 以及 25°C 區間；當溫度梯度為 $1.06\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 時，介於 15°C 與 35°C 之間的环境下，浮游生物會集中至 24.2°C 和 25.4°C 區間，而當溫度梯度為 $1.21\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 時，介於 10°C 與 30°C 之間的环境下，浮游生物則明顯往 20.6°C 與 21.9°C 區間聚集，並且遠離 16.6°C 和 17.9°C 區間；當溫度梯度同為 $0.83\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 時，介於 20°C 與 35°C 之間的环境下，浮游生物會聚集至 26.2°C 、 28°C 以及 29°C 區間，而介於 15°C 與 30°C 之間的环境下，浮游生物則會往 23.3°C 與 24.3°C 區間集中；當溫度梯度為 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 時，介於 20°C 與 30°C 之間的环境下，浮游生物會傾向聚集至 25.3°C 和 25.9°C 區間。在冷熱端溫差為 10°C 至 25°C 之情況下，均可發現浮游生物在高環境溫度處的平均游動速率較快，其中最高溫區間之游動速率較最低溫區間增加 5.7% 至 30.2%，且游動速率均會隨時間增加而逐漸降低，代表浮游生物在長時間的觀測過程中會漸漸降低活動力。此外，除在熱端 30°C 、冷端 10°C 之條件外，皆可觀察到在族群密度顯著增加的溫度區間中，浮游生物亦具備較高之轉彎機率，代表當浮游生物處於偏好的溫度區間時，便會提高自身的轉彎機率，以延長停留於該區間的時間。

關鍵字：微流道、溫度梯度、浮游生物運動、扁藻、趨溫性

Abstract



In this study, we utilized a thermally-controlled stage to generate a temperature gradient in a microchannel, in which the motility response of the plankton *Tetraselmis* sp. to its ambient thermal environment was investigated.

The experimental results indicated that the plankton exhibited a preference for a specific temperature range. Under different temperature gradients, the plankton tended to aggregate in regions with a temperature between 22°C and 25°C. However, with a lower temperature gradient of 0.83 °C mm⁻¹, when the two ends of the microchannel are set to 20°C and 35°C, the plankton showed a tendency to concentrate in warmer regions around 28°C and 29°C. Despite the temperature gradients, we observed that the plankton tended to move faster at warmer water, but their motility generally decreased with time. The mean planktonic speed in the warmest region was 5.7% to 30.2% higher than that in the coldest region. Apart from a temperature range between 10°C and 30°C, the aggregation of the plankton is attributed to the increase in the probability of turning. Regions with significant enhancements in the cell density were highly correlated to higher probability of turning for the plankton.

Keywords: microchannel, temperature gradient, planktonic locomotion, *Tetraselmis* sp., thermotaxis

目錄



口試委員會審定書.....	i
誌謝.....	ii
摘要.....	iv
Abstract	v
目錄.....	vi
符號索引	x
表目錄.....	xiii
圖目錄.....	xiv
第一章 導論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.2.1 <i>Tetraselmis</i> sp.	2
1.2.2 探討趨溫性之微流元件設計	4
1.2.3 趨溫性對浮游生物與細菌之影響	5
1.3 研究動機.....	8
第二章 實驗架構與不確定性分析.....	9
2.1 微流元件設計與製作	9
2.1.1 母模設計	9
2.1.2 PDMS 製程	9
2.2 實驗架構.....	11
2.2.1 溫控平台系統	11



2.2.2 流體驅動裝置	12
2.2.3 光學影像系統	13
2.2.4 溫度擷取系統	13
2.3 實驗程序.....	14
2.3.1 浮游生物培養	14
2.3.2 浮游生物濃縮	16
2.3.3 實驗步驟.....	16
2.4 實驗數據分析.....	18
2.4.1 流體溫度梯度計算.....	18
2.4.2 分析區間溫度計算.....	19
2.4.3 浮游生物追蹤與計數程序	19
2.4.4 浮游生物之族群密度與個數淨變化率分析	21
2.4.5 浮游生物之運動行為分析	22
2.5 不確定性分析	24
2.5.1 量測溫度之不確定性.....	25
2.5.2 溫度梯度之不確定性.....	26
2.5.3 分析區間溫度之不確定性	27
2.5.4 體積流率之不確定性.....	27
2.5.5 浮游生物族群密度之不確定性	28
2.5.6 浮游生物正規化族群密度之不確定性.....	29
2.5.7 浮游生物個數淨變化率之不確定性.....	30
2.5.8 浮游生物位移之不確定性	31



2.5.9 浮游生物速度之不確定性	32
2.5.10 浮游生物運動方向之不確定性	32
2.5.11 浮游生物轉彎角度之不確定性.....	33
第三章 實驗結果	34
3.1 浮游生物於冷熱端溫差 25°C之運動行為分析	34
3.1.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度	34
3.1.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析.....	35
3.1.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布	37
3.2 浮游生物於冷熱端溫差 20°C之運動行為分析	38
3.2.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度	39
3.2.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析.....	40
3.2.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布	44
3.3 浮游生物於冷熱端溫差 15°C之運動行為分析	46
3.3.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度	47
3.3.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析.....	48
3.3.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布	52
3.4 浮游生物於冷熱端溫差 10°C之運動行為分析	54
3.4.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度	54
3.4.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析.....	55
3.4.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布	57
第四章 結論與建議.....	59
4.1 結論	59

4.2 建議.....	61
參考文獻.....	62
附表.....	66
附圖.....	73



符號索引



a_0	迴歸線截距 intercept of regression line ($^{\circ}\text{C}$)
a_1	迴歸線斜率 slope of regression line ($^{\circ}\text{C mm}^{-1}$)
d	相鄰區間之水平距離 horizontal distance between adjacent regions (mm)
d_s	針筒內徑 inner diameter of syringe (mm)
D	族群密度 cell density (ml^{-1})
D_{normal}	正規化族群密度 normalized cell density
D_t	時間 t 的族群密度 cell density at time t (ml^{-1})
$f(x)$	機率質量函數 probability mass function
h	流道深度 depth of flow channel (mm)
I_b	背景影像之灰階像素值 gray level value of background image
I_{normal}	正規化影像之灰階像素值 gray level value of normalized image
I_p	含浮游生物影像之灰階像素值 gray level value of plankton image
l	分析區間之長度 length of analyzed region (mm)
N	總樣本數 total sample size
N_p	浮游生物平均個數 average number of plankton
$\dot{N}_p$	浮游生物個數淨變化率 net change rate of number of plankton (min^{-1})
$N_{p,t}$	時間 t 的浮游生物個數 number of plankton at time t
N_s	直行次數 number of moving straight
N_t	轉彎次數 number of turning
$\dot{Q}$	體積流率 volume flow rate ($\mu\text{l min}^{-1}$)
R_t	轉彎機率 probability of turning



S_p	浮游生物位移 displacement of plankton (μm)
t	時間 time (s)
t_{tot}	總觀測時間 total observation time (s)
Δt	時間間隔 time interval (s)
T_c	冷卻塊溫度 temperature of cold block ($^{\circ}\text{C}$)
T_f	流體溫度 temperature of fluid ($^{\circ}\text{C}$)
T_h	加熱塊溫度 temperature of hot block ($^{\circ}\text{C}$)
T_R	分析區間之溫度 temperature of analyzed region ($^{\circ}\text{C}$)
∇T	溫度梯度 temperature gradient ($^{\circ}\text{C mm}^{-1}$)
ΔT_{hc}	加熱塊與冷卻塊溫差 temperature difference between hot block and cold block ($^{\circ}\text{C}$)
u_p	浮游生物游動速度 x 分量 planktonic velocity in x direction ($\mu\text{m s}^{-1}$)
u_s	浮游生物直行速率 planktonic speed along straight trajectories ($\mu\text{m s}^{-1}$)
u_{sp}	注射幫浦推進速率 pushing speed of syringe pump (m s^{-1})
u_t	浮游生物轉彎速率 planktonic speed at turns ($\mu\text{m s}^{-1}$)
v_p	浮游生物游動速度 y 分量 planktonic velocity in y direction ($\mu\text{m s}^{-1}$)
V_p	浮游生物游動速度 planktonic velocity ($\mu\text{m s}^{-1}$)
w	分析區間之寬度 width of analyzed region (mm)
x_p	浮游生物 x 軸座標位置 planktonic coordinate of x axis (μm)
x_R	分析區間 x 軸座標位置 coordinate of analyzed region in x direction (mm)
x_{tc}	熱電偶 x 軸座標位置 coordinate of thermocouple in x direction (mm)
y_p	浮游生物 y 軸座標位置 planktonic coordinate of y axis (μm)



希臘符號

θ_h 浮游生物游泳角度 swimming angle of plankton ($^{\circ}$)

θ_t 浮游生物轉彎角度 turning angle of plankton ($^{\circ}$)

上標符號

k 連續拍攝照片之編號 sequence of consecutive images

下標符號

b 背景 background

f 流體 fluid

h 水平方向 horizontal direction

$\max$ 最大值 maximum

normal 正規化 normalization

p 浮游生物 plankton

ran 隨機 random

R 分析區間 analyzed region

s 直行 straight

sp 注射幫浦 syringe pump

sys 系統 systematic

t 轉彎 turning

tc 熱電偶 thermocouple

表目錄



第二章附表

表 2.1 PDMS 製程參數.....	66
表 2.2 加熱塊與冷卻塊設定溫度	66

第三章附表

表 3.1 熱端 35°C、冷端 10°C之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差 ...	67
表 3.2 熱端 35°C、冷端 15°C之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差 ...	68
表 3.3 熱端 30°C、冷端 10°C之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差 ...	69
表 3.4 熱端 35°C、冷端 20°C之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差 ...	70
表 3.5 熱端 30°C、冷端 15°C之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差 ...	71
表 3.6 熱端 30°C、冷端 20°C之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差 ...	72

圖目錄



第二章附圖

圖 2.1 母模尺寸 (unit: mm).....	73
圖 2.2 實驗架構	74
圖 2.3 (a)溫控盤尺寸 (b)溫控盤間隙寬度示意圖 (unit: mm).....	75
圖 2.4 熱電偶與微流元件擺放位置示意圖 (unit: mm).....	76
圖 2.5 浮游生物濃縮流程 (a)過濾浮游生物培養液 (b)收集已濃縮之浮游生物培養液	77
圖 2.6 影像拍攝範圍.....	78
圖 2.7 浮游生物分析區域.....	78
圖 2.8 流體溫度與熱電偶擺放位置之線性擬合圖.....	79
圖 2.9 浮游生物運動軌跡追蹤與計數示意圖 (a)背景影像 (b)含浮游生物之影像 (c) 去除背景與正規化之影像 (d)二值化影像 (e)浮游生物軌跡位置 (f)生物個 數統計結果.....	80
圖 2.10 浮游生物轉彎角度示意圖.....	81

第三章附圖

圖 3.1 熱端 35°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化	82
圖 3.2 熱端 35°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化	82
圖 3.3 熱端 35°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比 較	83
圖 3.4 熱端 35°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比	

較	83
圖 3.5 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較	84
圖 3.6 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化	85
圖 3.7 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較	86
圖 3.8 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡	87
圖 3.9 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較	88
圖 3.10 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化	89
圖 3.11 熱端 35°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化	90
圖 3.12 熱端 35°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化	90
圖 3.13 熱端 30°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化	91
圖 3.14 熱端 30°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化	91
圖 3.15 熱端 35°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較	92
圖 3.16 熱端 35°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較	92
圖 3.17 熱端 35°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之	

比較	93
圖 3.18 熱端 35°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化	94
圖 3.19 熱端 35°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較	95
圖 3.20 熱端 35°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物游動軌跡	96
圖 3.21 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較	97
圖 3.22 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較	97
圖 3.23 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較	98
圖 3.24 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化	99
圖 3.25 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較	100
圖 3.26 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物游動軌跡	101
圖 3.27 熱端 35°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較	102
圖 3.28 熱端 35°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化.....	103
圖 3.29 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不	

同時間下之比較.....	104
圖 3.30 熱端 30°C、冷端 10°C之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化.....	105
圖 3.31 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化	106
圖 3.32 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化	106
圖 3.33 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化	107
圖 3.34 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化	107
圖 3.35 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較	108
圖 3.36 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較	108
圖 3.37 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較	109
圖 3.38 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化	110
圖 3.39 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較	111
圖 3.40 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物游動軌跡	112
圖 3.41 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較	113

圖 3.42 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較	113
圖 3.43 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較	114
圖 3.44 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化	115
圖 3.45 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較	116
圖 3.46 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物游動軌跡	117
圖 3.47 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較	118
圖 3.48 熱端 35°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化.....	119
圖 3.49 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較	120
圖 3.50 熱端 30°C、冷端 15°C之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化.....	121
圖 3.51 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化	122
圖 3.52 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化	122
圖 3.53 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較	123

圖 3.54 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較	123
圖 3.55 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較	124
圖 3.56 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化	125
圖 3.57 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較	126
圖 3.58 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物游動軌跡	127
圖 3.59 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較	128
圖 3.60 熱端 30°C、冷端 20°C之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化.....	129



第一章 導論

1.1 前言

浮游植物 (phytoplankton) 為懸浮於透光帶的微型藻類，可透過光合作用來獲取生長所需之能量，多數的浮游植物為單細胞生物，大小介於 $0.4\sim 200\ \mu\text{m}$ 之間 [1]。在生態系統中，浮游植物扮演著不可或缺的角色，除了作為初級生產者以外，也是海洋食物網的建構基礎 [2]。浮游植物對全球的碳循環 (carbon cycle) 有著舉足輕重的影響，雖然只佔全球植物總量的 $1\sim 2\%$ ，每年卻可固定 $300\sim 500$ 億公噸的碳，約為總固碳量的 40% [3]。浮游植物藉由消耗海水中的二氧化碳，促使更多的二氧化碳從大氣層擴散至海洋，進而降低大氣中的碳含量，被浮游植物所吸收的碳元素則轉化成有機物質，作為甲殼類、魚類以及其他海洋生物的養分來源 [4]。

在影響浮游植物的眾多環境因素 (environmental factor) 中，溫度佔據不容忽視的地位，於生理學方面，溫度會直接影響浮游植物的代謝，包括光合作用與呼吸作用 [5]，在光線飽和的情況下，光合速率會隨溫度上升而提高 [6]。由於氣候變遷日益加劇，浮游植物的季節性變化、物種組成以及族群大小將受到影響 [7]，因此對於溫度變化的行為反應就顯得格外重要。趨溫性 (thermotaxis) 係指生物根據環境溫度之差異所形成靠近或遠離熱刺激 (thermal stimulus) 的遷徙行為，此行為可幫助生物棲息在溫度合適的環境，以促進其生長與代謝。趨溫性可劃分為正趨溫性 (positive thermotaxis) 與負趨溫性 (negative thermotaxis)，正趨溫性為順著溫度梯度 (temperature gradient) 往高溫處移動的行為；而負趨溫性為逆著溫度梯度往低溫處移動的行為 [8]。展現正趨溫性的例子，如哺乳動物的精子 (spermatozoon) 會往溫度較高的區域移動，使其在雌性的生殖道內尋找到合適的受精 (fertilization) 位置 [9]；而展現負趨溫性的例子，



如萊茵衣藻 (*Chlamydomonas reinhardtii*) 在 10~30°C 的溫度區間下，會聚集至低溫的區域，以避開不利於生存的環境 [10]。趨溫性對生物的重要程度不言而喻，研究此行為有助於瞭解何種溫度範圍和溫度梯度為適合生物的生長條件。

微流控 (microfluidics) 是利用微米尺度之流道來準確操控微量流體的一門技術，此技術最早源自於化學領域的微量分析法，並且經由生物防禦、分子生物學以及微電子學等領域的需求與應用而漸趨完備 [11]。受惠於軟微影技術 (soft lithography) 的研發，微流元件 (microfluidic device) 的製作變得更為簡易，進而讓微流控的應用範疇迅速擴展 [12]。相較於傳統的桌上型分析儀器，微流元件具備諸多面向的優點，包含快速的反應效率、高度的便攜性、微小的樣本消耗量及較少的分析時間與成本 [13]。近年來，微流元件逐步應用於微生物生態學的研究，並在現有的研究中，展現極大的潛力 [14]。在微生物學的領域中，PDMS (polydimethylsiloxane) 為最常被用來製作微流元件的原料，具有良好的彈性、生物相容性、化學惰性、光線穿透性以及透氣性 [15]。

本研究將利用 PDMS 製作微流元件，並於微流道中產生溫度梯度，以觀察浮游生物在不同溫度區間的運動情形與族群密度，藉此釐清溫度梯度對浮游生物的影響。

1.2 文獻回顧

本節將各別介紹實驗所使用之微藻 *Tetraselmis* sp. 特徵與習性、研究趨溫性之相關微流元件設計以及趨溫性對浮游生物和細菌之影響。

1.2.1 *Tetraselmis* sp.

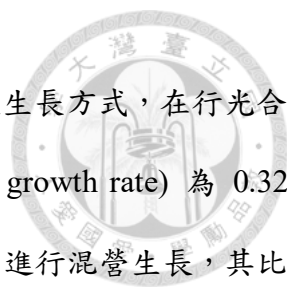
Tetraselmis sp. 為可行光合作用的單細胞綠色海洋微藻，在生物分類階層 (taxonomic rank) 中，屬於綠藻植物門 (Chlorophyta)、綠枝藻綱 (Chlorodendrophyceae)、



綠枝藻目 (Chlorodendrales)、綠枝藻科 (Chlorodendraceae) 及扁藻屬 (*Tetraselmis*) [16]。取決於品系 (strain) 的種類, *Tetraselmis* sp.的細胞大小介於 10~20 μm , 其運動細胞 (motile cell) 外型通常呈扁平狀, 其他種類則呈橢圓體或圓柱狀, *Tetraselmis* sp. 具有四條等長的鞭毛 (flagellum), 鞭毛自細胞前緣的凹陷處長出且成對分布於細胞的兩側 [17]。 *Tetraselmis* sp.的生活史 (life history) 由三個階段組成, 分別為鞭毛期 (flagellate stage)、不具運動性之增殖期 (non-motile vegetative phase) 以及附有厚殼之囊胞期 (cyst stage), 其中增殖期佔據大部分的生命週期, 此階段會生成新細胞壁並去除舊細胞壁, 細胞壁將以同心環的形式聚集在細胞周圍或累積在細胞的某一側, 以形成莖狀結構 [18]。

Salisbury 和 Floyd [19] 探討 *Tetraselmis* sp.的鞭毛擺動型式與其游泳行為之間的關係, 研究發現 *Tetraselmis* sp.以蛙泳 (breaststroke) 的方式進行游動, 其鞭毛會先利用近似划槳的動作向後擺動, 再藉由鞭毛本身的彎曲向前回復到初始位置。*Tetraselmis* sp.在游動的同時, 會沿著細胞的長軸旋轉, 且多數物種的游泳軌跡皆以直線為主, 在不停止游動的情況下, 可迅速改變行進方向 [18]。Sirico 等人 [20] 使用數位全像顯微鏡 (digital holographic microscopy) 來觀察 *Tetraselmis* sp.的游泳行為, 研究顯示在三維空間中, 其游泳路徑呈螺旋狀, 並在游動的過程中, 以 $49.8 \pm 2.8 \text{ rad s}^{-1}$ 之角速度繞著自身的質心旋轉, 此外其曲線運動速度 (curvilinear velocity, VCL) 最快可達到 $119.71 \mu\text{m s}^{-1}$ 。

由於 *Tetraselmis* sp.為廣鹽性 (euryhaline) 與廣溫性 (eurythermal) 生物, 因此可在鹽度 (salinity) 和溫度變化極大的水域之中生存 [21, 22], Arora 等人 [23] 發現 *Tetraselmis indica* 可完好生長在鹽度介於 35~350 psu, 溫度介於 28~48°C 的鹽田 (salt pan) 內。根據營養模式 (mode of nutrition) 的分類, *Tetraselmis* sp.具備自營



(autotrophic)、異營 (heterotrophic) 以及混營 (mixotrophic) 三種生長方式，在行光合作用的情況下，即採取自營生長模式，其比生長速率 μ (specific growth rate) 為 0.32 day^{-1} [24]，而在行光合作用與攝取現成有機物並行的狀況下，即進行混營生長，其比生長速率 μ 可提高至 0.9 day^{-1} [25]。*Tetraselmis* sp.的應用層面相當廣泛，在水產養殖 (aquaculture) 領域，經常作為魚類、軟體動物 (mollusc)、甲殼動物 (crustacean) 等其他水生動物的飼料 [26, 27]，而在製藥 (pharmaceutical) 方面的應用，其擁有各式各樣的生物分子 (biomolecule)，因此具備抗氧化與抗菌的功用 [28]。

1.2.2 探討趨溫性之微流元件設計

為了在微流道內形成穩定的溫度梯度場，Fu 等人 [29] 設計出一長條狀流道，並利用電阻線當作加熱器，流道內的液體溫度則透過螢光染劑來量測。其中，微流元件一共嵌入兩種不同類型的加熱器，根據其外型可劃分為條狀式 (line heater) 和點狀式 (point heater)，兩者分別位於流道的兩側且距離其壁面 $250 \mu\text{m}$ 。此外，研究團隊亦利用 ANSYS Fluent 軟體建構相對應的模型，以模擬液體達到穩態的溫度曲線 (temperature profile) 並和實驗量測值比對。實驗結果發現，在條狀式加熱器的使用下，溫度分布會呈半橢圓狀，沿著流道長度方向形成一段恆溫區，其後溫度將線性遞減，而沿著流道寬度方向，溫度同樣呈線性遞減；在點狀式加熱器的使用下，溫度分布則呈半圓狀，溫度會沿著流道長度、寬度方向線性遞減。當輸入功率從 25.8 mW 提高至 99.2 mW 時，兩種加熱器均可在 $550 \mu\text{m}$ 的流道寬度內產生約 10°C 的溫差，進而產生相當大的溫度梯度。此微流元件的優點在於可形成穩定的溫度場以及線性的溫度梯度，但缺點為加熱器的形狀製作與定位程序較為困難。

Salman 等人 [30] 採用水循環式 (water circulation) 的加熱塊與冷卻塊，設計出



能產生一維溫度梯度的微流元件，以研究大腸桿菌 (*Escherichia coli*) 對溫度梯度的反應。其中，加熱塊與冷卻塊分別擺放在載玻片的兩端，暴露於空氣的 PDMS 材料則使用玻璃纖維覆蓋，進而達到絕熱的效果。在加熱塊維持 45°C、冷卻塊保持 10°C 的條件下，將會在流道長度方向產生大小為 8 °C cm⁻¹ 的線性溫度梯度場。Demir 等人 [31] 則以 Salman 等人 [30] 的架構為雛形，設計出能形成恆溫和產生溫度梯度的微流元件。在建構均質溫度場 (homogeneous temperature) 的部分，研究團隊利用熱電裝置 (Peltier device) 搭配導熱效果良好的薄鋁板，使得載玻片及微流道皆能維持恆溫，以探討細菌於不同溫度的游動速度；而創造溫度梯度場的部分，則透過紅外線雷射與水循環式鋁塊來達成。其中，紅外線雷射聚焦在流道正中央，形成約 30°C 的高溫，鋁塊則擺放於載玻片兩端，使流道周圍維持在 18°C，此配置可在半徑 50 μm 的區域內產生類似高斯曲線 (Gaussian-shaped) 的溫度分布。

Demir 和 Salman [32] 根據先前的實驗配置 [31] 做了些微調整，設計出能在短距離內產生線性溫度梯度場的微流元件。微流元件總共包含兩個熱電裝置，兩者間隔 10 mm 並藉由薄銅板與載玻片接觸，進而在流道兩側形成高溫端和低溫端，暴露於空氣的 PDMS 材料與部分載玻片則使用壓克力板包覆，以減少和外界的熱交換。實驗結果顯示，該微流元件可形成大小為 2 °C mm⁻¹ 的溫度梯度。

1.2.3 趨溫性對浮游生物與細菌之影響

Clegg 等人 [33] 研究五種淡水浮游植物受溫度梯度的影響，並以群體分布、游動方向及平均泳速來探討其行為。實驗結果顯示，在 9.8°C 至 15.1°C 的溫度區間內，角藻屬 (*Ceratium furcoides*)、衣藻屬 (*Chlamydomonas moewusii*)、錐囊藻屬 (*Dinobryon sertularia*) 以及隱藻屬 (*Plagioselmis nannoplanctica*) 均呈現往高溫端聚



集的趨勢，展現出正趨溫性的行為；而裸藻屬 (*Euglena gracilis*) 則是集中在低溫端，表現出負趨溫性的行為。此外，根據藻類的游動軌跡，學者進一步使用環狀直方圖來分析其游泳方向，結果指出在不同的溫度區間內，角藻屬、衣藻屬、錐囊藻屬與隱藻屬皆朝高溫處方向游動，裸藻屬則是朝低溫處方向游動。研究團隊認為，當藻類遷徙至溫度適宜的環境時，便會降低泳速並增加轉彎率，以延長停留在此區域的時間；反之，當藻類處於不利生存的溫度區間時，則會提高泳速並調降轉彎率，以迅速遠離此環境。上述和游泳速度相關的行為稱作 ortho-thermokinesis，和轉彎率相關的行為則稱作 klino-thermokinesis。

Sekiguchi 等人 [10] 研究萊茵衣藻於不同溫度梯度的趨溫性行為，並探討其培養溫度、細胞內氧化還原狀態 (intracellular redox condition) 以及突變個體 (mutant) 是否對趨溫性的表現有所影響。實驗結果發現，在 10°C 到 30°C 的溫度區間中，藻類會移動至低溫的區域，且不隨培養溫度調整而改變。細胞的氧化還原狀態為代謝作用所生成的活性氧 (reactive oxygen species) 與抗氧化系統所清除的活性氧數量之平衡 [34]，此狀態會對藻類的趨溫性造成顯著的影響，研究顯示當培養溫度為 20°C，細胞處於還原狀態 (reducing condition) 時，即細胞內之分子獲得電子 (electron)，藻類會表現正趨溫性，而細胞處於氧化狀態 (oxidizing condition) 時，即細胞內之分子失去電子，則會顯現負趨溫性。此外，在 *ppr2* 和 *ppr3* 的突變個體中，皆觀察不到趨溫性現象，學者推論此現象的成因為突變個體無法在鞭毛內生成鈣離子 (Ca^{2+})，使其缺乏反向游動的能力。相較於突變個體，一般藻類能透過刺激鞭毛薄膜 (flagellar membrane)，有效減少往後游動的頻率，進而聚集在溫度合適的環境。

Saito 等人 [35] 研究海星屬 (*Patiria pectinifera*) 浮游幼體的趨溫性行為，並針對生物內部的瞬時受體電位離子通道 (TRP ion channel) 與趨溫性之間的關係作探討。



研究結果顯示，在 15°C 至 30°C 的溫度區間內，海星幼體會表現出正趨溫性，往高溫端游動，而在 26°C 到 36°C 的溫度區間中，幼體同樣顯現正趨溫性，但多數會停頓在溫度為 33°C 的區域，超過此溫度將導致幼體停止游動甚至死亡。研究團隊利用基因敲落與救援 (gene knockdown and rescue) 實驗，發現 TRPA1 通道具備感知溫度的能力，可調節海洋無脊椎動物 (marine invertebrate) 於幼體階段對溫度變化的反應。

除了浮游生物以外，細菌同樣會展現趨溫性行為。Salman 等人 [30] 將大腸桿菌放置在具有溫度梯度的環境中，發現大腸桿菌會透過自身的趨溫性，以 $0.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 之泳速游動至低溫的區間，當此區間的生物密度超過 $10^8 \text{ cells cm}^{-3}$ 時，將衍生出不同的遷徙模式，周遭的大腸桿菌會以更高的泳速 $3.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 集中到該區間，此現象即為細菌聚集的正回饋 (positive feedback) 機制。Demir 等人 [31] 接續探討大腸桿菌在微小溫度梯度下的行為表現，研究顯示生物密度於細菌的遷移行為中扮演著重要的角色，在生物密度為 $5 \times 10^6 \text{ cells cm}^{-3}$ 的條件下，大腸桿菌會在 15 分鐘內聚集至高溫區間，當總時間經過 32 分鐘後，大腸桿菌則逐漸從高溫區間遷移至低溫區間，該現象的成因為當高溫區間的生物密度提高時，養分的消耗會隨代謝率上升而變快，並於 50 分鐘內形成與溫度梯度方向相反的養分梯度 (nutrient gradient)，促使大腸桿菌往低溫區間移動，而在生物密度為 $0.5 \times 10^6 \text{ cells cm}^{-3}$ 的條件下，則無法觀察到上述現象。Demir 和 Salman [32] 進一步分析大腸桿菌的游動速度與細胞內酸鹼值 (intracellular pH) 對趨溫性的影響，研究指出在養分貧瘠的環境中，細菌的酸鹼值會隨溫度上升而降低，導致其泳速下降，細菌將於 22 分鐘內緩慢地往高溫端移動。若在溶液中添加濃度大於 $300 \mu\text{M}$ 的絲胺酸 (serine)，酸鹼值的提升將促使細菌的泳速伴隨溫度一同增加，細菌會在 19 分鐘內游動至低溫處。

1.3 研究動機

經由以上文獻回顧的內容，可得知溫度梯度對浮游生物的重要影響。本研究將利用溫控平台系統於微流道製造出一維線性溫度梯度場，並比較 *Tetraselmis* sp. 在不同溫度區間的平均泳速、族群密度隨時間之變化，以釐清該浮游生物的趨溫性行為，並探討其游泳行為與溫度梯度場的關係。

第二章 實驗架構與不確定性分析



本章將依序介紹實驗所使用的微流元件、實驗設備與架構，並針對實驗流程、數據分析作說明，最後則探討實驗過程中的不確定性對實驗結果的影響。

2.1 微流元件設計與製作

本節將劃分成兩個部分描述微流道的製作，首先為金屬母模的設計，其次為 PDMS 的翻模製程。

2.1.1 母模設計

本研究的微流道是由 PDMS 翻模製作而成，其中母模選用鋁合金 (6061) 作為加工素材，並利用 CNC (Computer Numerical Control) 銑床進行銑削，母模結構以及詳細尺寸如圖 2.1 所示。

金屬母模包含兩個主架構，其一為長 30 mm、寬 1 mm、深 0.15 mm 的流道結構，此結構將用來製作一字型長條狀的微流道，以裝填與觀測浮游生物；其二為七個長 10 mm、寬 1 mm、深 1.5 mm 的通道結構，置於母模中央的五個通道彼此的間隔為 1.1 mm，而最左側、最右側的通道則分別距離其鄰近通道 2.3 mm，這些通道將作為熱電偶的擺放空間，以估計流道內部的流體溫度，進而計算浮游生物所經歷的環境溫度梯度。

2.1.2 PDMS 製程

PDMS 的製作參數如表 2.1 所示，以下將詳述製作步驟:

(a) PDMS 調製 (PDMS mixing)



將矽樹脂 (silicone resin, PM5040C A, BingBond) 與固化劑 (curing agent, PM5040C B, BingBond) 以 8:1 的重量比加入透明塑膠杯，並利用玻璃攪拌棒使其混合均勻。

(b) PDMS 注模 (PDMS pouring)

清洗玻璃培養皿並使用擦拭紙 (delicate task wiper, 34155, Kimtech Science) 擦乾後，將清潔劑塗抹在培養皿內側和底部以利於脫模，再把金屬母模置於培養皿中央，注入已調配的 PDMS 溶液至厚度 10 mm。

(c) 真空抽氣 (vacuum processing)

將盛裝 PDMS 溶液之培養皿放入真空乾燥器 (vacuum desiccator, 554, Kartell) 內，並連接真空泵 (vacuum pump, ROA-V210-AA, Gast Manufacturing) 以去除 PDMS 內部的氣泡，抽氣時間約為 30 分鐘。

(d) 固化成型 (PDMS curing)

將培養皿放置於加熱板 (digital hot plate, YS-200S+, YOTEC)，並利用水平儀 (spirit level, PTM 5 20, SOLA) 確認加熱板表面是否水平，以避免 PDMS 厚度不均勻，其中加熱板溫度為 85°C，加熱時間為 2 小時，以加速 PDMS 的固化。

(e) PDMS 脫模 (PDMS peeling off)

使用美工刀沿培養皿內壁切割固化的 PDMS，並將其從金屬母模剝除。

(f) 流道鑽孔 (through hole drilling)

利用美工刀將 PDMS 裁切至適當大小，以直徑 2.1 mm 不鏽鋼管 (stainless steel tube, HD05-0048, Hobby Design) 於流道的入口及出口處穿孔。

(g) 流道清潔 (microchannel cleaning)

將 PDMS 與載玻片放進盛裝酒精 (alcohol, 95%, TTL) 的玻璃密封罐，以超音波



洗淨器 (ultrasonic cleaner, CPX2800, Branson Ultrasonics) 清潔 15 分鐘。

(h) 玻璃接合 (glass bonding)

利用氧電漿清洗機 (high power expanded plasma cleaner, PDC-001-HP, Harrick Plasma) 清潔 PDMS 流道面和載玻片表面，以提升表面接合強度，其中功率設定為 45 W，操作時間為 3 分鐘，清洗完畢後將已結合的微流元件放置於加熱板，以 85°C 加熱 2 小時，並取一重物加壓，即完成微流元件的製作。

2.2 實驗架構

本研究之實驗架構如圖 2.2 所示，整體架構可劃分為溫控平台系統、流體驅動裝置、光學影像系統以及溫度擷取裝置。本實驗利用溫控平台系統於溫控盤兩側形成加熱端與冷卻端，藉由此溫差產生溫度梯度，再透過流體驅動裝置將浮游生物推送至微流道內，並使用光學影像系統來擷取影像，以分析浮游生物於不同溫度區間的數量分布與運動情形。

2.2.1 溫控平台系統

溫控平台系統 (thermally-controlled stage, SG-THM1030, Sage Vision) 由溫控盤、熱水主機、冷水主機以及矽膠管組成。如圖 2.3 (a) 所示，溫控盤包含兩個長 50 mm、寬 95 mm、高 17 mm 的黑色陽極鋁塊，鋁塊的工作區域為 50 mm × 50 mm，其中一塊為加熱塊，另一塊為冷卻塊。加熱塊與冷卻塊之距離可透過手擰螺絲、滑軌元件及厚薄規來進行調整，間隙寬度的可調控範圍為 0~12 mm，如圖 2.3 (b) 所示。加熱塊和冷卻塊內部皆配置白金薄膜測溫元件 (Platinum thin film temperature element, PTFD101T1A0, TE Connectivity)，藉由電阻隨溫度變化之特性來得知鋁塊的溫度。



為了讓溫控盤的熱平衡達到最佳效率，熱水主機與冷水主機皆使用最大電壓 24 V、最大電流 4 A 以及最大致冷功率 55.4 W 的熱電致冷晶片 (thermoelectric cooler, TES1-198.40, TANDE) 來加熱與冷卻工作流體，且分別連接輸出電壓 24 V、輸出電流 5 A 之電源供應器 (power supply, GST120A24, MEAN WELL) 與輸出電壓 19 V、輸出電流 6.32 A 之電源供應器 (power supply, FSP120-AAB, FSP Group)。致冷晶片內部由多組 P 型與 N 型半導體組成，在輸入電流的情況下可透過帕帖爾效應 (Peltier effect) 形成吸熱端與放熱端。熱水主機的致冷晶片即採用正負極反接的模式運作，使得原本的吸熱面轉換為放熱面，達到加熱的效果。

溫控平台系統所使用的工作流體為水箱精 (coolant)，水箱精的主要成分為乙二醇 (ethylene glycol)，另外還有添加防鏽劑與染料，該流體可提高水的沸點、降低水的熔點以及抑制水垢生成。本實驗的水箱精含有綠色染料，因此可清楚辨識主機內部的液面高度與觀察管路中的流體輸送情形，熱水主機和冷水主機皆以透明矽膠管來輸送水箱精，並由蠕動幫浦 (peristaltic pump, 293KC, JIHPUMP) 驅動。此外，配置於冷水主機的矽膠管材須包覆隔熱泡棉，以降低工作流體與外界的熱交換，進而提升冷卻塊的降溫速度。本實驗所設定的加熱塊溫度、冷卻塊溫度以及兩者之溫差如表 2.2 所示。

2.2.2 流體驅動裝置

流體驅動裝置由注射幫浦 (syringe pump, Fusion 200, Chemyx)、3 ml 塑膠針筒 (disposable syringe, MDSS03L, Terumo)、鐵氟龍管 (Teflon tube, 1/16" × 0.8mm 50', Supelco) 及三通閥 (three-way valve, 56142, Supelco) 所構成。其中，針筒經由鐵氟龍管連接至微流道入口，注射幫浦則以固定流率將針筒內的流體推送至流道中，微流道出口亦透過鐵氟龍管連通至 50 ml 的低型燒杯 (low form beaker, 14000-50, Kimble)，

以排放流道內之廢液。



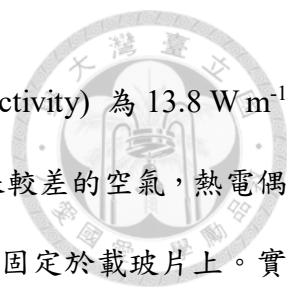
2.2.3 光學影像系統

本研究使用的光學影像系統包含正立式金相顯微鏡 (upright metallurgical microscope, BX51M, Olympus) 、LED 燈箱 (LED illuminator, LumiCite 1000, Oplenic) 以及高速攝影機 (high-speed camera, NX7-S1, IDT)，實驗將利用此架構來觀察浮游生物與擷取影像。其中，正立式顯微鏡的光源為 LED 燈箱，光線透過物鏡由上往下照射至微流元件，被微流元件所反射的光線則會重新進入物鏡，並於目鏡或光速攝影機的位置成像。

本實驗使用 2.5 倍物鏡 (objective, MPLAPO2.5X, Olympus) 搭配 1 倍轉接環 (adapter, U-CMAD3 & U-TV1X-2, Olympus) 來拍攝浮游生物之運動影像。在放大倍率為 1 倍的情況下，影像中 1 pixel 所對應的實際長度為 $7.24\ \mu\text{m}$ ，而經由高速攝影機所拍攝的放大倍率為 2.5 倍，故影像的解析度為 $2.896\ \mu\text{m pixel}^{-1}$ 。高速攝影機透過相機控制軟體 (Motion Studio, MotionPro X Studio 2.16.06, IDT) 來操控，此軟體可設定拍攝幀率、曝光時間、影像大小以及拍攝張數。實驗期間所採用的拍攝幀率為 30 fps，曝光時間為 $170\ \mu\text{s}$ ，影像大小為 $1920 \times 1080\ \text{pixels}$ ，拍攝張數為 750 frame。

2.2.4 溫度擷取系統

本研究的溫度擷取系統包括 K-type 熱電偶 (thermocouple, TT-K-30-SLE-1000, Omega Engineering)、連接盒 (20-channel multiplexer module, DAQM901A, Keysight Technologies) 以及資料擷取器 (data acquisition system, DAQ973A, Keysight Technologies)。實驗的熱電偶擺放位置和編號如圖 2.4 所示，其中熱電偶皆擺放於微



流元件的柱狀通道中，通道內另填充熱傳導係數 (thermal conductivity) 為 $13.8 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 之導熱膏 (thermal paste, TF8, Thermalright)，以取代導熱效果較差的空氣，熱電偶本身則使用耐高溫膠帶 (polyimide tape, 12 mm $\times$ 27 m, Koptan) 固定於載玻片上。實驗總共配置七個溫度量測點，其中兩個量測點位於加熱塊和冷卻塊上方，以監測靠近加熱端和冷卻端之流體溫度，而其餘五個量測點則分布於溫控盤間隙上方，以計算溫度梯度。

熱電偶藉由電壓訊號，將其量測資訊傳送至連接盒與資料擷取器，並搭配 BenchVue (BenchVue, 2022.1, Keysight Technologies) 軟體來即時監控和記錄溫度。實驗過程之穩態溫度量測頻率為 1 Hz，紀錄時間為 30 分鐘，後續將每個量測點的 1800 筆數據取平均，即為流道內不同位置的流體溫度。

2.3 實驗程序

本節將詳述實驗進行的前置作業，涵蓋浮游生物之培養與浮游生物濃縮液之調配，並針對主要的實驗步驟進行介紹。

2.3.1 浮游生物培養

浮游生物須培養於無菌的環境中，盛裝海水與養殖浮游生物之容器皆需要利用高壓滅菌釜 (autoclave, TM-320, Tomin) 來進行消毒，以避免其生長受到污染。首先，使用去離子水 (deionized water, BH-1, Maxpure) 清洗容器，待容器完全乾燥後，於瓶口處蓋上螺旋蓋但不鎖緊，以防止容器在滅菌期間因內外壓力差而導致變形或破裂，再將鋁箔紙包覆於螺旋蓋外側與上半部瓶身，避免螺旋蓋與瓶口的接縫處受到污染，最後貼上高壓蒸氣滅菌指示帶 (steam indicator tape, 1322-12MM, 3M)，將容器放進高



壓滅菌釜並添加約 1.1 L 的自來水，以 117.7 kPa 之操作壓力和 121°C 之消毒溫度進行滅菌，其中玻璃容器的滅菌時間為 35 分鐘，塑膠容器的滅菌時間則為 25 分鐘，殺菌過後即可檢查滅菌指示帶，當膠帶顯現出黑色斜條紋，即完成滅菌之流程。

培養浮游生物之海水須藉由過濾裝置來去除雜質，過濾裝置包含過濾漏斗 (filter holder, LF 3a, Rocker Scientific)、孔徑 0.22 μm 之濾膜 (membrane filter, GVWP04700, Durapore) 以及真空泵。海水一共需要過濾兩次，初次過濾先將海水過濾至 500 ml 玻璃瓶 (laboratory bottle, 218014459, Duran)，以濾除海水中的雜質，再透過高壓滅菌釜殺菌 35 分鐘，待其冷卻至常溫後便進行二次過濾，此次將過濾至 1000 ml 玻璃瓶 (laboratory bottle, 218015455, Duran)，以濾除海水因加熱所形成之矽酸鹽，經由以上完整的過濾程序即可得到乾淨的海水。養殖浮游生物的营养鹽為 f/2-Si (Guillard's (F/2) marine water enrichment solution, G0154-500ml, Sigma-Aldrich)，須冷凍保存於 -20°C，以避免其遭受汙染，營養鹽的配置方法可從 NCMA (National Center for Marine Algae and Microbiota) 取得，網站內部有詳細記載營養鹽的調配方式 [36]。

浮游生物培養液由營養鹽與乾淨海水以 1:50 之體積比調配，並添加至 250 ml 窄口方瓶 (narrow-mouth square bottle, 2015-0250, Thermo Fisher Scientific)。進行培養前，須透過浮游生物計算盤 (counting chamber, 0611400, Marienfeld) 確認浮游生物的生長情形，依照培養經驗，在此定義成熟期之浮游生物密度為 15~20 μl^{-1} 。每次培養時，皆以 10 ml 塑膠針筒 (disposable syringe with needle, MDSS10L2238, Terumo) 自兩批成熟且不同培養時間之浮游生物各抽取 3 ml 轉移至已盛裝 150 ml 培養液之窄口方形瓶中，再輕微搖晃瓶身，使浮游生物培養液混合均勻，最後放入生長箱 (growth chamber, GC-110, Firstek Scientific) 進行培養，生長箱的環境溫度為 25°C，日照時數為 12 小時，從上午 6 時開始照光。



2.3.2 浮游生物濃縮

為使流道內具有充足的浮游生物量，以利於分析其運動狀態與數量分布，實驗操作前須濃縮浮游生物培養液，提高其族群密度。考量流道尺寸與觀測範圍，浮游生物培養液需要濃縮約 10 倍，才能達到可信的樣本數。此外，浮游生物的培養時間會影響其生長情形和活動力，因此須挑選培養天數固定的浮游生物培養液來進行濃縮，本實驗即選用培養天數為 7~8 天的浮游生物。

濃縮程序同樣利用過濾裝置來進行。首先，將過濾漏斗安裝至 1000 ml 玻璃瓶以盛裝過濾之培養液，並鋪上孔徑 $0.22\ \mu\text{m}$ 之濾膜，再以 50 mm Hg 之工作壓力來操作真空泵，如圖 2.5 (a) 所示，避免浮游生物於過濾期間破裂死亡，濃縮過程藉由浮游生物大於濾膜孔隙之特性，使其沉澱在濾膜上。為準確控制濃縮倍率，可根據瓶身的標示刻度將 50 ml 之培養液倒入 125 ml 窄口方瓶 (narrow-mouth square bottle, 2015-0125, Thermo Fisher Scientific)，再將方瓶內之培養液倒進過濾漏斗，由於漏斗的容量上限約為 25 ml，故須分批傾倒培養液並適時補充，以防止真空泵將其抽乾，當培養液濃縮至 5 ml 時，即可關閉真空泵並輕微搖晃過濾漏斗，讓附著在濾膜的浮游生物能均勻混合於濃縮液中，最後將濃縮液傾倒至 50 ml 尖底離心瓶 (conical centrifuge tube, ET5050-12, Bioman Scientific)，如圖 2.5 (b) 所示，即完成濃縮程序。若濃縮液體積少於 5 ml，代表濃縮倍率過高，此時可使用滴管抽取乾淨海水並添加至離心瓶，以達到稀釋的作用，透過該作法即可精確調控浮游生物之濃縮倍率。

2.3.3 實驗步驟

本實驗所拍攝的影像範圍如圖 2.6 所示，以下將詳述主要的實驗步驟以及相關的參數設定：



(a) 定位微流元件與設定溫控盤溫度

首先，利用游標卡尺 (digmatic absolute caliper, CD-8"CSX, Mitutoyo) 固定長度為 12 mm 之距離，使游標卡尺的內測定面 (internal jaw) 貼緊加熱塊與冷卻塊邊緣，以調整溫控盤的間隙寬度，當間隙固定後即可鎖緊手擰螺絲。接著，以隱形膠帶 (magic tape, 810, 3M) 將微流元件的四個角落固定於溫控盤上，使微流元件的最左側、最右側通道分別位於加熱塊、冷卻塊邊緣向內 1 mm 處，如圖 2.4 所示。定位完畢後，便開啟熱水與冷水主機，各別設定加熱塊與冷卻塊溫度，當溫控盤感測溫度在設定值的 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 內震盪時，即代表溫度達到穩態。

(b) 清洗流道與擷取背景

此步驟一共需要兩支 3 ml 針筒，第一支針筒注滿酒精，第二支針筒則裝滿營養鹽，兩針筒依序安裝於注射幫浦並連接至流道入口，以 $1000\ \mu\text{l min}^{-1}$ 之流率進行輸送，出口端則連通至燒杯，以排除流道內之廢液。在抽取酒精和營養鹽的過程中，容易有空氣跑進針筒內，故抽取完工作流體時，須將針筒垂直朝上並輕敲針筒壁，讓內部的空氣上浮至針筒前端，最後再推動針筒即可排除空氣。此外，針筒在更換期間也可能產生氣泡，殘留於流道中的氣泡會影響到實驗的拍攝，為避免此情形起初須手動推動針筒，並調節三通閥使流體和氣泡排放至燒杯，待鐵氟龍管充滿工作流體後，即可將針筒安裝於注射幫浦，並調整三通閥將流體導入流道。流道清洗完成後，便使用高速攝影機以拍攝幀率 30 fps、曝光時間 $170\ \mu\text{s}$ 來拍攝 30 張流道影像，作為乾淨之背景，以利於後續的影像處理。

(c) 注入浮游生物與進行實驗

利用 3 ml 針筒抽取已濃縮的浮游生物培養液，並卸下清洗完流道的空針筒，抽取浮游生物與替換針筒的過程中，則同樣採取前一步驟所提及的方式來排除空氣和氣

泡。當針筒安裝於注射幫浦後，便開啟 BenchVue 軟體以記錄流體溫度。由於本研究所使用的浮游生物 *Tetraselmis* sp. 於靜止的流場中會出現附著的情形 [23]，故此處將提供微小的流場作為刺激源，以延長 *Tetraselmis* sp. 的游動時間。首先，以 $300 \mu\text{l min}^{-1}$ 之流率注入培養液，待觀測區域出現浮游生物，即停止幫浦的運轉並靜置約 2 分鐘，使流體溫度回復穩定，再開啟幫浦並將流率調降至 $4 \times 10^{-3} \mu\text{l min}^{-1}$ ，以製造微小的擾動流場，當幫浦持續運作 2 分鐘且流場與溫度皆達到穩定後，即可開始拍攝影像。

本實驗的操作時間為 30 分鐘，過程中使用高速攝影機來記錄影像，從時間 0 開始，每隔 5 分鐘以拍攝幀率 30 fps 與曝光時間 170 μs 拍攝 750 張影像，總共拍攝 7 組影像。本研究將影像中的流道區域依溫度量測點劃分成 5 等分，如圖 2.7 所示，以作為統計浮游生物數量與探究其運動行為的分析區間。

2.4 實驗數據分析

本節主要分成兩大部分進行探討，第一部分為流體的溫度梯度與分析區間的溫度計算，第二部分為影像前處理及分析，以獲得浮游生物在各區間內的族群密度和游動行為，並藉由比較不同區間之差異來釐清浮游生物對於環境溫度的行為響應。

2.4.1 流體溫度梯度計算

本實驗於距離微流道側壁 1.1 mm 處，配置 7 個熱電偶，用來記錄流體溫度隨時間的變化，並採用線性迴歸 (linear regression) 擬合溫度與熱電偶位置以獲得溫度梯度，如式 (2.1) 所示。

$$T_f(x_{tc}) = a_1 x_{tc} + a_0 \quad (2.1)$$

其中 T_f 為流體溫度， x_{tc} 為熱電偶的 x 軸座標， a_0 為迴歸式截距， a_1 為迴歸式斜率，



此處取迴歸式斜率之絕對值 $|a_1|$ 作為溫度梯度 ∇T 。不同實驗條件的線性擬合如圖 2.8 所示，其中決定係數 R^2 (coefficient of determination) 皆大於 0.99。

2.4.2 分析區間溫度計算

影像之分析區間如圖 2.7 所示，每個區間的大小為 384×345 pixels，其實際大小為 $1112 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ ，共有 5 個分析區間。其中，區間三的 x 軸座標位置與通道四的 x 軸座標相同，而其餘四個區間的 x 軸座標則以區間三為基準來做計算，此處定義通道一的左下角為座標原點，向右為 $+x$ 方向。各分析區間的 x 軸座標如式 (2.2) 至式 (2.6) 所示。

$$x_{R,1} = x_{R,3} - 2d \quad (2.2)$$

$$x_{R,2} = x_{R,3} - d \quad (2.3)$$

$$x_{R,3} = x_4 \quad (2.4)$$

$$x_{R,4} = x_{R,3} + d \quad (2.5)$$

$$x_{R,5} = x_{R,3} + 2d \quad (2.6)$$

其中 x_4 為通道四的 x 軸座標位置， d 為兩相鄰區間中心的水平距離。

得到所有區間的 x 軸座標後，即可將座標值代入 2.4.1 節所擬合之線性迴歸式來計算區間溫度，各分析區間的溫度如式 (2.7) 所示。

$$T_{R,i}(x_{R,i}) = a_1 x_{R,i} + a_0, \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (2.7)$$

2.4.3 浮游生物追蹤與計數程序

浮游生物的追蹤與計數共包含 4 個步驟，主要可分為扣除背景與正規化、影像二值化、追蹤浮游生物絕對位置以及統計浮游生物個數，浮游生物的軌跡追蹤與計數流



程如圖 2.9 所示。上述之流程需透過自行撰寫的 MATLAB [37] 程式與影像軟體 Fiji-ImageJ [38] 進行處理，本節將詳述各步驟。

影像分析的第一道程序為去除背景與正規化，首先利用 MATLAB 以自行撰寫之程式，將含有浮游生物之影像扣除 2.3.3 節所擷取的乾淨背景，再進行灰階值正規化，如圖 2.9 (c) 所示。相較於含有浮游生物之影像，乾淨的背景具備較高的灰階值，故灰階值正規化以式 (2.8) 進行計算。

$$I_{\text{normal}}^k(i, j) = \frac{I_b(i, j) - I_p^k(i, j)}{\left[I_b(i, j) - I_p^k(i, j) \right]_{\max}} \cdot 255 \quad (2.8)$$

其中 I_b 為背景影像之灰階值， I_p 為含有浮游生物影像之灰階值， i, j 分別為影像 x, y 方向的像素座標值，上標 k 為連續拍攝影像的第 k 張。影像的座標原點位於左上角，向右為 $+x$ 方向，向下為 $+y$ 方向。

第二道程序為影像二值化，此流程經由 Fiji-ImageJ 匯入已正規化之影像，並採用軟體內建的 Otsu's method [39] 進行二值化處理，如圖 2.9 (d) 所示，以降低背景雜訊之影響。

第三道程序為浮游生物的追蹤，此部分透過 Fiji-ImageJ 的套件 TrackMate [40] 進行探測與追蹤，該套件運用機器視覺演算法 SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [41] 來尋找物體的特徵點，並藉由判斷同一特徵點於不同時間之座標，以得到浮游生物的絕對位置 $(x_p(t), y_p(t))$ ，如圖 2.9 (e) 所示。在放大倍率為 2.5 倍的情況下，浮游生物於影像中的大小約為 5 pixel，後續分析便以此作為探測直徑來追蹤浮游生物的軌跡。針對浮游生物的運動行為分析，我們將制定以下篩選條件來剔除資料點，以增進統計結果的可信度。首先，為降低影像處理與雜訊所造成的影響，依據觀察經驗把單位時間 $\Delta t = 1/30$ s 內移動超過全身長之浮游生物視為不合理的位移，即去除游動速度

大於 $435 \mu\text{m s}^{-1}$ 之浮游生物。再來，浮游生物於實驗過程中會發生死亡或活動力降低的情形，故在影像拍攝期間 25 s 內，全程總位移未達半身長之浮游生物將不列入後續分析，即游動速度小於 $0.29 \mu\text{m s}^{-1}$ 之浮游生物。最後，位置資料少於 3 筆之浮游生物同樣不列入分析，即出現總時間不超過 0.1 s 之浮游生物，不具備統計上的意義。

最後一道程序為浮游生物的計數，此部分利用 Fiji-ImageJ 的分析工具 Analyze Particles [42] 來統計浮游生物個數，按照經驗將尺寸大於 10 pixel^2 且真圓度大於 0.5 之浮游生物納入採計，如圖 2.9 (f) 所示，以降低雜訊的干擾。

2.4.4 浮游生物之族群密度與個數淨變化率分析

統計浮游生物個數之區間如圖 2.7 所示，每個分析區間的長度與寬度分別為 $1112 \mu\text{m}$ 與 $1000 \mu\text{m}$ ，流道深度則為 $150 \mu\text{m}$ ，將區間面積乘以流道深度即為該區域的溶液體積。Fiji-ImageJ 可統計單張照片的細胞個數，由於每組影像皆包含 750 張照片，故此處便將該 750 張影像的細胞統計個數取平均，以表示分析區間的浮游生物個數。浮游生物的族群密度如式 (2.9) 所示。

$$D = \frac{N_p}{l \cdot w \cdot h} \quad (2.9)$$

其中 N_p 為浮游生物的平均個數， l 為區間長度， w 為區間寬度， h 為流道深度。

為了觀察浮游生物在同一分析區間內隨時間改變之密度變化，以探討溫度的影響，我們在此定義正規化族群密度，如式 (2.10) 所示。

$$D_{\text{normal}} = \frac{D_t}{D_{t=0}} \quad (2.10)$$

其中 D_t 為時間 t 的浮游生物族群密度， $D_{t=0}$ 為時間 0 的浮游生物族群密度。

由於每個分析區間的初始族群密度不盡相同，故正規化族群密度只能針對同一分析區間進行比較，為觀察不同分析區間的浮游生物增減情形，我們可根據浮游生物的



個數淨變化量，即時間為 t_{tot} 的浮游生物個數減去時間為 0 的浮游生物個數，來定義浮游生物的個數淨變化率，如式 (2.11) 所示。

$$\dot{N}_p = \frac{N_{p,t=t_{\text{tot}}} - N_{p,t=0}}{t_{\text{tot}}} \quad (2.11)$$

其中 $N_{p,t=t_{\text{tot}}}$ 為時間 t_{tot} 的浮游生物個數， $N_{p,t=0}$ 為時間 0 的浮游生物個數， t_{tot} 為總觀測時間，此處 $t_{\text{tot}} = 30 \text{ min}$ 。

2.4.5 浮游生物之運動行為分析

本節將介紹浮游生物的運動分析，其中涵蓋位移與速度之計算、轉彎角度之計算與判定、游動速度與運動方向之機率質量分布。首先，由 TrackMate 的分析可獲得浮游生物的座標位置 $(x_p(t), y_p(t))$ ，接著便可透過式 (2.12)、式 (2.13) 以及式 (2.14) 來計算分析區間內的浮游生物位移 S_p 和 x 、 y 方向游動速度 u_p 、 v_p 。

$$S_p(t) = \left\{ \left[x_p(t + \Delta t) - x_p(t) \right]^2 + \left[y_p(t + \Delta t) - y_p(t) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.12)$$

$$u_p(t) = \frac{x_p(t + \Delta t) - x_p(t)}{\Delta t} \quad (2.13)$$

$$v_p(t) = \frac{y_p(t + \Delta t) - y_p(t)}{\Delta t} \quad (2.14)$$

其中 Δt 為高速攝影機拍攝之時間間隔，此處 $\Delta t = 1/30 \text{ s}$ 。

浮游生物的游動速度向量 $\mathbf{V}_p$ 與游動速率 $|\mathbf{V}_p|$ ，可表示成

$$\mathbf{V}_p(t) = u_p(t)\mathbf{i} + v_p(t)\mathbf{j} \quad (2.15)$$

$$|\mathbf{V}_p(t)| = \left\{ \left[u_p(t) \right]^2 + \left[v_p(t) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.16)$$

計算完浮游生物的游動速度後，即可藉由速度向量 $\mathbf{V}_p$ 與 x 方向單位向量 $\mathbf{i}$ 來決定浮游生物的游泳角度 θ_h ，定義如式 (2.17) 所示。



$$\theta_h(t) = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{V}_p(t) \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{V}_p(t)| |\mathbf{i}|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{u_p(t)}{|\mathbf{V}_p(t)|} \right) \quad (2.17)$$

得到浮游生物於每個時間點的游泳角度後，便可藉由相鄰兩個時間點之游泳角度來進一步計算轉彎角度 θ ，如式 (2.18) 所示。浮游生物的轉彎示意圖如圖 2.10 所示。

$$\theta_t(t) = |\theta_h(t + \Delta t) - \theta_h(t)| \quad (2.18)$$

後續分析將以 $\theta_t = 30^\circ$ 作為臨界值來判斷浮游生物是否轉向，當轉彎角度大於 30° ，則視為轉彎，而當轉彎角度小於 30° ，則視為直行。經由上述之定義，我們可統計單隻浮游生物沿移動路徑的轉彎次數 $N_{t,i}$ 與直行次數 $N_{s,i}$ ，並進一步計算該浮游生物的轉彎機率 $R_{t,i}$ ，最後再將同一分析區間內每隻浮游生物的轉彎機率取平均，即可得到整體浮游生物的轉彎機率 R_t ，轉彎機率的定義與計算如式 (2.19)、式 (2.20) 所示。

$$R_{t,i} = \frac{N_{t,i}}{N_{t,i} + N_{s,i}} \quad (2.19)$$

$$R_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{t,i} \quad (2.20)$$

其中 n 為浮游生物的總個數。

針對浮游生物的游動速率，我們另有計算轉彎速率與直行速率，其運算方式和轉彎機率的算法相同，首先分別計算單隻浮游生物的轉彎速率 $u_{t,i}$ 、直行速率 $u_{s,i}$ ，再將每隻浮游生物的轉彎速率、直行速率取平均，便可獲得整體浮游生物的轉彎速率 u_t 與直行速率 u_s ，轉彎速率和直行速率之計算可表示如式 (2.21) 至式 (2.24) 所示。

$$u_{t,i} = \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} u_{t,i,j} \quad (2.21)$$

$$u_{s,i} = \frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} u_{s,i,j} \quad (2.22)$$

$$u_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{t,i} \quad (2.23)$$

$$u_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{s,i} \quad (2.24)$$

其中 N_t 為單隻浮游生物的總轉彎次數， N_s 為單隻浮游生物的總直行次數， n 為浮游生物的總個數。

為探討環境溫度與溫度梯度對浮游生物的影響，我們將計算機率質量函數 $f(x)$ (probability mass function, PMF) 來觀察浮游生物於不同溫度下的運動分布，PMF 的定義如式 (2.25) 所示。

$$f(x) = \frac{N(x)}{N} \quad (2.25)$$

其中 N 為總樣本個數， $N(x)$ 為各個區間所對應的樣本數量，本研究中變數 x 為游動速度與游泳角度的劃分區間。

2.5 不確定性分析

實驗結果之誤差會受到實驗過程中的諸多因素所影響，因此須透過不確定分析來計算量測數據的誤差，以驗證實驗結果的可信度。實驗誤差可依照其來源區分為系統誤差 (systematic error) 與隨機誤差 (random error)，造成系統誤差的主要原因來自於量測儀器的精確度，可藉由校正儀器來降低系統誤差，而隨機誤差則受觀察者的判讀誤差與量測儀器的微小擾動等不可預期之因素所影響，可透過反覆量測取平均值來降低隨機誤差。量測數值的總不確定性 (total uncertainty) 與其系統誤差、隨機誤差之關係如式 (2.26) 所示。

$$\delta z_{\text{tot}} = \left[(\delta z_{\text{sys}})^2 + (\delta z_{\text{ran}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

其中 δz_{tot} 為量測值的總不確定性， δz_{sys} 為量測值的系統誤差， δz_{ran} 為量測值的隨機誤



差。

大多數的實驗數據須透過不同的量測物理量來做計算，兩者之關係可表示為 $Z = f(z_1, z_2, \dots, z_n)$ ，其中 Z 代表實驗數據， $z_1, z_2, \dots, z_n$ 則代表計算 Z 的量測物理量。在運算過程中，實驗數據會受各量測物理量自身的不確定性影響，而形成誤差傳遞 (error propagation)，當量測物理量的不確定性彼此獨立且隨機時，則 Z 的相對系統誤差與相對隨機誤差可表示如式 (2.27)、式 (2.28) 所示。

$$\frac{\delta Z_{\text{sys}}}{Z} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial z_i} \frac{\delta z_{i,\text{sys}}}{Z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

$$\frac{\delta Z_{\text{ran}}}{Z} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial z_i} \frac{\delta z_{i,\text{ran}}}{Z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

其中 $\delta z_{i,\text{sys}}$ 為各量測物理量的系統誤差， $\delta z_{i,\text{ran}}$ 為各量測物理量的隨機誤差。

量測物理量 z_i 的隨機誤差可表示為式 (2.29)。

$$\delta z_{i,\text{ran}} = \frac{\sigma_{z_i}}{N^{1/2}} \quad (2.29)$$

其中 σ_{z_i} 為 z_i 量測 N 次後所求得的标准差 (standard deviation)，標準差的定義如式 (2.30) 所示。

$$\sigma_{z_i} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (z_{i,j} - \bar{z}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2.30)$$

其中 $\bar{z}_i$ 為量測物理量的平均值。

本節將討論實驗過程中的各項量測誤差並計算實驗數據的不確定性。

2.5.1 量測溫度之不確定性

本實驗使用 K-type 熱電偶來量測流道內的流體溫度，此類型熱電偶的系統誤差

δT_{sys} 為 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ [43]。當流體溫度達到穩態時，以取樣頻率 1 Hz、取樣時間 30 min 來記錄溫度，故一共具有 1800 筆量測數據，取完數據的標準差並將其代入式 (2.29)，便可計算出所有實驗組別的熱電偶隨機誤差 δT_{ran} 為 $\pm 4 \times 10^{-4}^\circ\text{C} \sim \pm 0.002^\circ\text{C}$ ，將上述數值代入式 (2.26)，可得到溫度量測之不確定性 δT 為 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ 。由於實驗中的溫度量測範圍 T 為 $10^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ ，故量測溫度之相對不確定性 $\delta T/T$ 為 $\pm 3.1\% \sim \pm 11\%$ 。

2.5.2 溫度梯度之不確定性

流體的溫度梯度是利用量測溫度 T_f 與熱電偶擺放位置 x_{tc} 進行線性擬合所得，其線性迴歸式為 $T_f = a_1 x_{\text{tc}} + a_0$ ，故溫度梯度 ∇T 即為其斜率之絕對值 $|a_1|$ 。斜率之不確定性 δa_1 與截距之不確定性 δa_0 可表示為式 (2.31) 以及式 (2.32)。

$$\delta a_1 = \sigma_{T_f} N^{1/2} \left[N \sum_{i=1}^N x_{\text{tc},i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_{\text{tc},i} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.31)$$

$$\delta a_0 = \sigma_{T_f} \left(\sum_{i=1}^N x_{\text{tc},i}^2 \right)^{1/2} \left[N \sum_{i=1}^N x_{\text{tc},i}^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_{\text{tc},i} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (2.32)$$

$$\sigma_{T_f} = \left[\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (T_{f,i} - a_1 x_{\text{tc},i} - a_0)^2 \right]^{1/2} \quad (2.33)$$

其中 σ_{T_f} 為量測溫度 T_f 的不確定性， N 為溫度擬合曲線的量測點個數。

透過式 (2.33) 之計算，可得到所有實驗條件的量測溫度不確定性 σ_{T_f} 為 $\pm 0.075^\circ\text{C} \sim \pm 0.44^\circ\text{C}$ ，而量測點個數 N 為 7，故斜率之不確定性 δa_1 為 $\pm 0.006^\circ\text{C mm}^{-1} \sim \pm 0.03^\circ\text{C mm}^{-1}$ 。本實驗的斜率 a_1 為 $-1.3^\circ\text{C mm}^{-1} \sim -0.6^\circ\text{C mm}^{-1}$ ，即溫度梯度 ∇T 為 $0.6^\circ\text{C mm}^{-1} \sim 1.3^\circ\text{C mm}^{-1}$ ，因此溫度梯度之相對不確定性 $\delta \nabla T / \nabla T$ 為 $\pm 1\% \sim \pm 3\%$ 。



2.5.3 分析區間溫度之不確定性

分析區間的溫度計算如式 (2.7) 所示，因此 $T_R = f(a_1, a_0, x_R)$ ，分析區間溫度之不確定性可表示為式 (2.34)。

$$\begin{aligned}\delta T_R &= \left[\left(\frac{\partial T_R}{\partial a_1} \cdot \delta a_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial T_R}{\partial a_0} \cdot \delta a_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial T_R}{\partial x_R} \cdot \delta x_R \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[(x_R \cdot \delta a_1)^2 + (\delta a_0)^2 + (a_1 \cdot \delta x_R)^2 \right]^{1/2}\end{aligned}\quad (2.34)$$

其中 δT_R 為分析區間溫度之不確定性， δa_1 為斜率之不確定性， δa_0 為截距之不確定性， δx_R 為分析區間位置之不確定性。

藉由 2.5.2 節的分析結果，可得知斜率之不確定性 δa_1 為 $\pm 0.006^\circ\text{C mm}^{-1} \sim \pm 0.03^\circ\text{C mm}^{-1}$ ，斜率 a_1 為 $-1.3^\circ\text{C mm}^{-1} \sim -0.6^\circ\text{C mm}^{-1}$ ，而截距之不確定 δa_0 則透過式 (2.32) 求得，經計算可得到 δa_0 為 $\pm 0.055^\circ\text{C} \sim \pm 0.32^\circ\text{C}$ 。本實驗所使用的微流道由 PDMS 翻模而成，金屬母模則是透過 CNC 銑床進行加工，因 CNC 銑床的加工公差為 $\pm 0.02\text{ mm}$ ，故分析區間位置之不確定性 δx_R 為 $\pm 0.02\text{ mm}$ ，而分析區間位置 x_R 為 $5.8\text{ mm} \sim 10.2\text{ mm}$ 。將以上各項數值代入式 (2.34)，可算出分析區間溫度之不確定性 δT_R 為 $\pm 0.066^\circ\text{C} \sim \pm 0.48^\circ\text{C}$ ，而所有實驗組別的分析區間溫度 T_R 為 $16.6^\circ\text{C} \sim 29^\circ\text{C}$ ，因此分析區間溫度之相對不確定性 $\delta T_R/T_R$ 為 $\pm 0.26\% \sim \pm 2.3\%$ 。

2.5.4 體積流率之不確定性

本實驗利用注射幫浦來輸送針筒內的酒精、營養鹽以及浮游生物，因此體積流率 $\dot{Q}$ 的定義如式 (2.35) 所示。

$$\dot{Q} = \frac{\pi d_s^2}{4} \cdot u_{sp}\quad (2.35)$$

其中 d_s 為針筒內徑， u_{sp} 為注射幫浦的推進速率。由於 $\dot{Q} = f(d_s, u_{sp})$ ，故體積流率之相



對不確定性可表示為式 (2.36)。

$$\frac{\delta \dot{Q}}{\dot{Q}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial d_s} \cdot \frac{\delta d_s}{\dot{Q}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{Q}}{\partial u_{sp}} \cdot \frac{\delta u_{sp}}{\dot{Q}} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(2 \frac{\delta d_s}{d_s} \right)^2 + \left(\frac{\delta u_{sp}}{u_{sp}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.36)$$

其中 $\delta \dot{Q}$ 為體積流率之不確定性， δd_s 為針筒內徑之不確定性， δu_{sp} 為注射幫浦推進速率之不確定性。

此處使用游標卡尺來量測針筒內徑，3 ml 針筒內徑 d_s 為 9 mm，游標卡尺的最小刻度為 0.01 mm，故 $\delta d_{s,sys}$ 為 ± 0.005 mm，而重複量測同一支針筒內徑十次，並取標準差可得到隨機誤差 $\delta d_{s,ran}$ 為 ± 0.02 mm，將以上數值代入式 (2.26) 即可求得 δd_s 為 ± 0.02 mm，最後計算出針筒內徑之相對不確定性 $\delta d_s/d_s$ 為 $\pm 0.2\%$ 。當針筒內徑 d_s 為 9 mm 時，注射幫浦的最小體積流率為 $3.2 \times 10^{-3} \mu\text{l min}^{-1}$ ，其推進速率相當於 $8.4 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ ，故 δu_{sp} 為 $\pm 4.2 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ ，而實驗中的幫浦推進速率 u_{sp} 分別為 10^{-9} m s^{-1} 、 $7.9 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ 及 $2.6 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ，因此注射幫浦推進速率之相對不確定性 $\delta u_{sp}/u_{sp}$ 為 $\pm 42\%$ 、 $\pm 5.3 \times 10^{-4}\%$ 以及 $\pm 1.6 \times 10^{-4}\%$ 。最後將以上所計算之數值代入式 (2.36)，可得體積流率之相對不確定性 $\delta \dot{Q}/\dot{Q}$ 為 $\pm 42\%$ 、 $\pm 0.4\%$ 以及 $\pm 0.4\%$ 。

2.5.5 浮游生物族群密度之不確定性

浮游生物的族群密度定義如式 (2.9) 所示，因此 $D = f(N_p, l, w, h)$ ，族群密度的相對不確定性便可表示為式 (2.37)。

$$\begin{aligned} \frac{\delta D}{D} &= \left[\left(\frac{\partial D}{\partial N_p} \cdot \frac{\delta N_p}{D} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial l} \cdot \frac{\delta l}{D} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial w} \cdot \frac{\delta w}{D} \right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial h} \cdot \frac{\delta h}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{\delta N_p}{N_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l} \right)^2 + \left(\frac{\delta w}{w} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.37)$$

其中 δD 為浮游生物族群密度之不確定性， δN_p 為浮游生物個數之不確定性， δl 為區間



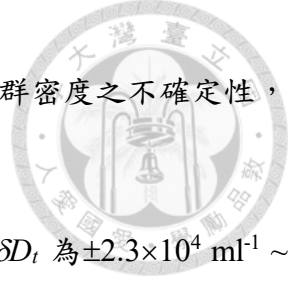
長度之不確定性， δw 為區間寬度之不確定性， δh 為流道深度之不確定性。

本研究利用 Fiji-ImageJ 來統計浮游生物個數，分析工具 Analyze Particles 的最小計數單位為 1，故 $\delta N_{p,sys}$ 為 ± 0.5 ，而實驗所記錄的每組影像皆含有 750 幀，因此總共有 750 筆浮游生物個數資料，取其標準差並代入式 (2.29) 即可獲得隨機誤差 $\delta N_{p,ran}$ ，最後代入式 (2.26) 便可計算出 δN_p ，所有實驗組別的浮游生物個數之不確定性 δN_p 為 $\pm 0.5 \sim \pm 0.6$ ，而浮游生物個數 N_p 為 $81 \sim 275$ ，故浮游生物個數之相對不確定性 $\delta N_p/N_p$ 為 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.6\%$ 。分析區間之範圍係由 Fiji-ImageJ 進行劃分，由於影像像素的最小單位為 1 pixel，故區間長度、區間寬度之不確定性 δl 、 δw 皆為 ± 0.5 pixel，而區間長度 l 為 384 pixel，區間寬度 w 為 345 pixel，因此區間長度之相對不確定性 $\delta l/l$ 為 $\pm 0.13\%$ ，區間寬度之相對不確定性 $\delta w/w$ 為 $\pm 0.14\%$ 。流道深度則是使用游標卡尺來量測，流道深度 h 為 0.15 mm，游標卡尺的最小刻度為 0.01 mm，故 δh_{sys} 為 ± 0.005 mm，而重複量測流道深度十次，並取標準差可得到 δh_{ran} 為 ± 0.005 mm，經由以上數值可算出 δh 為 ± 0.007 mm，因此流道深度之相對不確定性 $\delta h/h$ 為 $\pm 4.7\%$ 。將上述各項數值代入式 (2.37)，即可得到浮游生物族群密度之相對不確定性 $\delta D/D$ 為 $\pm 4.7\% \sim \pm 4.8\%$ 。

2.5.6 浮游生物正規化族群密度之不確定性

經由式 (2.10) 可得知浮游生物的正規化族群密度定義，因此 $D_{normal} = f(D_t, D_{t=0})$ ，正規化族群密度的相對不確定性可表示如式 (2.38) 所示。

$$\begin{aligned} \frac{\delta D_{normal}}{D_{normal}} &= \left[\left(\frac{\partial D_{normal}}{\partial D_t} \cdot \frac{\delta D_t}{D_{normal}} \right)^2 + \left(\frac{\partial D_{normal}}{\partial D_{t=0}} \cdot \frac{\delta D_{t=0}}{D_{normal}} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{\delta D_t}{D_t} \right)^2 + \left(\frac{\delta D_{t=0}}{D_{t=0}} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.38)$$



其中 δD_{normal} 為正規化族群密度之不確定性， δD_t 為時間 t 的族群密度之不確定性， $\delta D_{t=0}$ 為時間 0 的族群密度之不確定性。

所有實驗組別的浮游生物於時間 t 的族群密度不確定性 δD_t 為 $\pm 2.3 \times 10^4 \text{ ml}^{-1} \sim \pm 7.7 \times 10^4 \text{ ml}^{-1}$ ，而浮游生物於時間 t 的族群密度 D_t 為 $4.9 \times 10^5 \text{ ml}^{-1} \sim 1.7 \times 10^6 \text{ ml}^{-1}$ ，故時間 t 的族群密度之相對不確定性 $\delta D_t/D_t$ 為 $\pm 4.6\% \sim \pm 4.7\%$ 。浮游生物於時間 0 的族群密度不確定性 $\delta D_{t=0}$ 為 $\pm 2.3 \times 10^4 \text{ ml}^{-1} \sim \pm 5.5 \times 10^4 \text{ ml}^{-1}$ ，而浮游生物於時間 0 的族群密度 $D_{t=0}$ 為 $4.9 \times 10^5 \text{ ml}^{-1} \sim 1.2 \times 10^6 \text{ ml}^{-1}$ ，因此時間 0 的族群密度之相對不確定性 $\delta D_{t=0}/D_{t=0}$ 為 $\pm 4.6\% \sim \pm 4.7\%$ 。最後將以上數值代入式 (2.38) 即可計算出浮游生物正規化族群密度之相對不確定性 $\delta D_{\text{normal}}/D_{\text{normal}}$ 為 $\pm 6.6\% \sim \pm 6.7\%$ 。

2.5.7 浮游生物個數淨變化率之不確定性

浮游生物的個數淨變化率定義如式 (2.11) 所示，可進一步將此公式簡化成式 (2.39)。

$$\dot{N}_p = \frac{N_{p,t=t_{\text{tot}}} - N_{p,t=0}}{t_{\text{tot}}} = \frac{\Delta N_p}{t_{\text{tot}}} \quad (2.39)$$

其中 ΔN_p 為浮游生物的個數淨變化量。

經由式 (2.39) 可得知 $\dot{N}_p = f(\Delta N_p)$ ，故個數淨變化率之相對不確定性可表示為式 (2.40)。

$$\frac{\delta \dot{N}_p}{\dot{N}_p} = \left[\left(\frac{\partial \dot{N}_p}{\partial \Delta N_p} \cdot \frac{\delta \Delta N_p}{\dot{N}_p} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{\delta \Delta N_p}{\Delta N_p} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.40)$$

其中 $\delta \dot{N}_p$ 為浮游生物個數淨變化率之不確定性， $\delta \Delta N_p$ 為浮游生物個數淨變化量之不確定性。

透過 2.5.5 節的計算結果，可得到所有實驗組別在時間 t_{tot} 的浮游生物個數不確定性 $\delta N_{p,t=t_{tot}}$ 為 $\pm 0.5 \sim \pm 0.6$ ，時間 0 的浮游生物個數不確定性 $\delta N_{p,t=0}$ 為 $\pm 0.5 \sim \pm 0.6$ ，由於 $\Delta N_p = N_{p,t=t_{tot}} - N_{p,t=0}$ ，因此浮游生物個數淨變化量之不確定性 $\delta \Delta N_p = \left[(\delta N_{p,t=t_{tot}})^2 + (\delta N_{p,t=0})^2 \right]^{1/2}$ ，即 $\pm 0.7 \sim \pm 0.8$ ，而所有實驗組別的浮游生物個數淨變化量 ΔN_p 為 $-41 \sim 98$ ，故浮游生物個數淨變化量之相對不確定性 $|\delta \Delta N_p / \Delta N_p|$ 為 $\pm 0.8\% \sim \pm 25\%$ 。將以上數值代入式 (2.40)，即可求得浮游生物個數淨變化率之相對不確定性 $\delta \dot{N}_p / \dot{N}_p$ 為 $\pm 0.8\% \sim \pm 25\%$ 。

2.5.8 浮游生物位移之不確定性

浮游生物的位移定義如式 (2.12) 所示，可進一步簡化為式 (2.41)。

$$\begin{aligned} S_p &= \left\{ \left[x_p(t + \Delta t) - x_p(t) \right]^2 + \left[y_p(t + \Delta t) - y_p(t) \right]^2 \right\}^{1/2} \\ &= \left[(\Delta x_p)^2 + (\Delta y_p)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.41)$$

其中 Δx_p 為浮游生物之 x 方向位移， Δy_p 為浮游生物之 y 方向位移。

本研究利用 Fiji-ImageJ 來追蹤浮游生物的位置，而 TrackMate 套件所計算的座標最小單位為 10^{-3} pixel，故 x 方向、 y 方向位置座標之系統不確定性 $\delta x_{p,sys}$ 、 $\delta y_{p,sys}$ 均為 $\pm 5 \times 10^{-4}$ pixel。由於 $\Delta x_p = x_p(t + \Delta t) - x_p(t)$ 、 $\Delta y_p = y_p(t + \Delta t) - y_p(t)$ ，故 x 方向、 y 方向位移之系統不確定性 $\delta \Delta x_{p,sys} = \sqrt{2} \delta x_{p,sys}$ 、 $\delta \Delta y_{p,sys} = \sqrt{2} \delta y_{p,sys}$ ，即 $\pm 7.1 \times 10^{-4}$ pixel。在放大倍率為 2.5 倍的情況下，分析一隻具備 748 筆資料且停止游動的浮游生物，以釐清雜訊對浮游生物追蹤之影響，透過分析可得到 $\Delta x_p = 0.049$ pixel、 $\Delta y_p = 0.076$ pixel，最終可計算出浮游生物位移之系統不確定性 $\delta S_{p,sys}$ 為 $\pm 7.2 \times 10^{-4}$ pixel，而位移之隨機不確定性亦選用同一隻浮游生物做分析，取其位移標準差並代入式 (2.29) 即可得到 $\delta S_{p,ran}$ 為 ± 0.0061 pixel，經由以上之數值便可算出浮游生物位移之不確定性 δS_p 為 ± 0.0061 pixel。



按照 2.4.3 節制定的篩選條件，浮游生物於單位時間內的最大位移 S_p 為 5 pixel，則浮游生物位移之相對不確定性 $\delta S_p/S_p$ 為 $\pm 0.12\%$ 。

2.5.9 浮游生物速度之不確定性

浮游生物的速度定義如式 (2.16) 所示，因此 $|\mathbf{V}_p| = f(\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta t)$ ，其速度之相對不確定性可表示為式 (2.42)。

$$\begin{aligned} \frac{\delta |\mathbf{V}_p|}{|\mathbf{V}_p|} &= \left[\left(\frac{\partial |\mathbf{V}_p|}{\partial \Delta x_p} \cdot \frac{\delta \Delta x_p}{|\mathbf{V}_p|} \right)^2 + \left(\frac{\partial |\mathbf{V}_p|}{\partial \Delta y_p} \cdot \frac{\delta \Delta y_p}{|\mathbf{V}_p|} \right)^2 + \left(\frac{\partial |\mathbf{V}_p|}{\partial \Delta t} \cdot \frac{\delta \Delta t}{|\mathbf{V}_p|} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[\left(\frac{\delta S_p}{S_p} \right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta t} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.42)$$

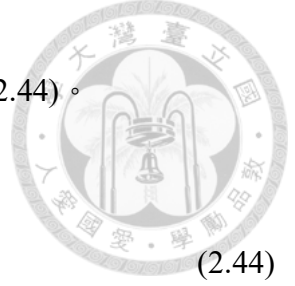
其中 $\delta |\mathbf{V}_p|$ 為浮游生物速度之不確定性， δS_p 為浮游生物位移之不確定性， $\delta \Delta t$ 為拍攝時間間隔之不確定性。

本實驗所使用的高速攝影機，其內部計時器的震盪週期為 9×10^{-8} s，故 $\delta \Delta t$ 為 $\pm 4.5 \times 10^{-8}$ s，而拍攝時間間隔 Δt 為 1/30 s，因此拍攝時間間隔之相對不確定性 $\delta \Delta t / \Delta t$ 為 $\pm 1.4 \times 10^{-4}\%$ 。藉由 2.5.7 節的運算結果，可得知浮游生物位移之相對不確定性 $\delta S_p / S_p$ 為 $\pm 0.12\%$ 。最後將以上數值代入式 (2.42)，可求得浮游生物速度之相對不確定性 $\delta |\mathbf{V}_p| / |\mathbf{V}_p|$ 為 $\pm 0.12\%$ 。

2.5.10 浮游生物運動方向之不確定性

浮游生物的運動方向定義如式 (2.17) 所示，透過適當的化簡可表示如式 (2.43) 所示。

$$\theta_h = \cos^{-1} \left(\frac{u_p}{|\mathbf{V}_p|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{\Delta x_p}{S_p} \right) \quad (2.43)$$



由於 $\theta_h = f(\Delta x_p, S_p)$ ，故運動方向之不確定性可表示為式 (2.44)。

$$\begin{aligned}\delta\theta_h &= \left[\left(\frac{\partial\theta_h}{\partial\Delta x_p} \cdot \delta\Delta x_p \right)^2 + \left(\frac{\partial\theta_h}{\partial S_p} \cdot \delta S_p \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left\{ \left[1 - \left(\frac{\Delta x_p}{S_p} \right)^2 \right]^{-1} \left[\left(\frac{\delta\Delta x_p}{S_p} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x_p}{S_p^2} \delta S_p \right)^2 \right] \right\}^{1/2}\end{aligned}\quad (2.44)$$

其中 $\delta\theta_h$ 為浮游生物運動方向之不確定性， $\delta\Delta x_p$ 為浮游生物 x 方向位移之不確定性， δS_p 為浮游生物位移之不確定性。

延續 2.5.7 節之分析，探討一隻具有 748 筆資料且停止游動的浮游生物，可得到 $\Delta x_p = 0.049$ pixel、 $\delta\Delta x_p = \pm 0.0034$ pixel，再藉由浮游生物之篩選條件，單位時間內之最大位移 $S_p = 5$ pixel，即可計算出浮游生物運動方向之不確定性 $\delta\theta_h$ 為 $\pm 6.8 \times 10^{-4}^\circ$ 。

2.5.11 浮游生物轉彎角度之不確定性

浮游生物的轉彎角度定義如式 (2.18) 所示，故轉彎角度之不確定性 $\delta\theta_t = \sqrt{2}\delta\theta_h$ 。採用 2.5.9 節的分析結果，可得知運動方向之不確定性 $\delta\theta_h$ 為 $\pm 6.8 \times 10^{-4}^\circ$ ，故浮游生物轉彎角度之不確定性 $\delta\theta_t$ 為 $\pm 9.6 \times 10^{-4}^\circ$ 。若以浮游生物轉彎之判定標準 $\theta_t = 30^\circ$ ，則可進一步計算出轉彎角度之相對不確定性 $\delta\theta_t/\theta_t$ 為 $\pm 0.0032\%$ 。

第三章 實驗結果



本章將探討浮游生物 *Tetraselmis* sp. 於不同溫度梯度與環境溫度下的趨溫性行為。本研究利用溫控平台系統在微流道內產生溫度梯度，將可觀察範圍的流道區域均分成五個分析區間，並針對浮游生物的運動行為進行分析，獲得浮游生物的族群密度、游動速度、轉彎機率以及游泳角度隨時間之變化，以探討浮游生物於各溫度區間的聚集程度與運動情形。本章節共分成四個部分，第一部分為 *Tetraselmis* sp. 於大溫差環境之運動分析，而第二至第三部分為 *Tetraselmis* sp. 於中溫差環境之運動分析，第四部分則為 *Tetraselmis* sp. 於小溫差環境之運動分析。

3.1 浮游生物於冷熱端溫差 25°C 之運動行為分析

本節將探討在熱端 35°C、冷端 10°C，即溫度梯度為 $1.28\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 的條件下，不同溫度區間的浮游生物運動行為隨時間之變化與比較。其中，熱端位於微流元件的左側，而冷端則位於微流元件的右側，因此在長條狀的微流道內會形成水平方向的溫度梯度。

3.1.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度

本研究的流道觀測區域一共包含左右兩個邊界，左側邊界連通至流道入口且靠近熱端，而右側邊界則連接至流道出口並鄰近冷端，故浮游生物會經由兩邊界游進或游出觀測區域。圖 3.1 為不同溫度區間在熱端 35°C、冷端 10°C 條件下之浮游生物族群密度隨時間之變化，從圖 3.1 中可發現在觀測時間為 0 分鐘時，浮游生物的分布集中於 23.6°C 和 25°C 兩區間，而隨著時間增加，五個溫度區間的族群密度皆同時上升，當觀測時間為 25 分鐘至 30 分鐘時，23.6°C 和 25°C 區間相對於其餘溫度區間具備較

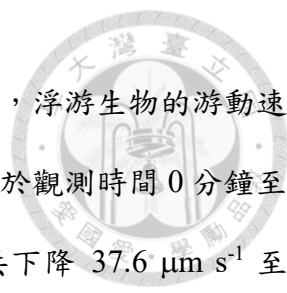


高的族群密度。針對不同溫度區間的浮游生物個數淨變化率來進行比較，可得知由低溫至高溫區間的個數淨變化率分別為 2.3 min^{-1} 、 3 min^{-1} 、 3.3 min^{-1} 、 2.7 min^{-1} 以及 1.9 min^{-1} ，其中以 22.1°C 與 23.6°C 區間的淨增加率最為明顯。此外，若加總整個觀測區域的浮游生物個數，可以發現在觀測時間 5 分鐘之後，每一觀測時間的浮游生物總數會高於初始的浮游生物總數，代表浮游生物會隨時間不斷通過邊界游進觀測區域。

圖 3.2 為不同溫度區間在熱端 35°C 、冷端 10°C 條件下之浮游生物正規化族群密度隨時間之變化，由圖 3.2 中之趨勢可發現，相較於觀測時間為 0 分鐘的族群密度，每個溫度區間在觀測時間為 30 分鐘時的族群密度皆有顯著的上升，且增加幅度均大於 30%，其中浮游生物於 20.7°C 、 22.1°C 及 23.6°C 區間的族群密度分別提高 56.5%、61.5% 以及 57.3%。經由上述之觀察結果，可總結出浮游生物於此冷熱端溫度與溫度梯度下，會聚集至 22.1°C 、 23.6°C 以及 25°C 區間。

3.1.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析

本節所討論之浮游生物游動速率、直行速率以及轉彎速率標準差如表 3.1 所示。圖 3.3 為浮游生物於熱端 35°C 、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間平均游動速率隨時間之變化，經由圖 3.3 可知在不同觀測時間下，浮游生物的平均游動速率大致會隨溫度增加而上升，於觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘時，隨著環境溫度上升，平均游動速率的增加趨勢較為明顯，而在觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘時，平均游動速率隨溫度之分布則漸趨平緩，受環境溫度之影響變小。除此之外，在同一溫度區間下，可發現浮游生物的平均游動速率會隨時間下降，代表浮游生物的活動力會隨時間逐漸降低。當觀測時間為 0 分鐘、5 分鐘時，浮游生物在 20.7°C 區間的平均游動速率為 $183.5 \pm 48.7 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $174.2 \pm 53.1 \mu\text{m s}^{-1}$ ，而在 26.4°C 區間其平均游動速率則提升至 $211.7 \pm 78.1 \mu\text{m s}^{-1}$ 、



193.3±80.8 $\mu\text{m s}^{-1}$ ，於區間溫度由 20.7°C 增加至 26.4°C 的情況下，浮游生物的游動速率在 0 分鐘與 5 分鐘分別增加 15.4% 與 11%。觀察五個溫度區間於觀測時間 0 分鐘至 30 分鐘的平均游動速率變化，可得到游動速率在 30 分鐘內共下降 37.6 $\mu\text{m s}^{-1}$ 至 61.9 $\mu\text{m s}^{-1}$ ，其中浮游生物在最高溫的 26.4°C 區間，游動速率之減少幅度最大，其速率降幅為 29.2%，而在最低溫的 20.7°C 區間，游動速率之減少幅度最小，其速率降幅為 20.5%。

根據 2.4.5 節所述的浮游生物轉彎判斷標準，可以轉彎角度 30° 為界將游動速率細分為直行速率與轉彎速率，轉彎角度大於 30° 視作轉彎，而轉彎角度小於 30° 則視作直行。圖 3.4 和圖 3.5 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間平均直行速率、平均轉彎速率隨時間之變化，從圖 3.4 可發現浮游生物的平均直行速率變化趨勢與其平均游動速率相似，於不同觀測時間下，直行速率大致會隨著溫度上升而增加，而在同一溫度區間下，同樣可觀察到直行速率會隨時間增加而下降。由圖 3.5 可得知，浮游生物的平均轉彎速率分布與其平均直行速率最明顯的差異在於觀測時間為 0 分鐘至 5 分鐘時，轉彎速率隨溫度之分布即趨向平緩，而直行速率則隨溫度上升而增加。相較於直行速率的整體範圍 145.8±49.8 $\mu\text{m s}^{-1}$ 至 219.8±69.5 $\mu\text{m s}^{-1}$ ，轉彎速率的整體範圍落在 108.3±61.6 $\mu\text{m s}^{-1}$ 至 155.7±92.6 $\mu\text{m s}^{-1}$ ，由此可知轉彎速率較直行速率下降 27.3 $\mu\text{m s}^{-1}$ 至 64.1 $\mu\text{m s}^{-1}$ ，代表浮游生物在進行轉彎時之速率會小於直線前行之速率。圖 3.6 為熱端 35°C、冷端 10°C 之浮游生物直行速率、轉彎速率以及平均游動速率隨時間之變化，透過圖 3.6 可明確觀察到在不同觀測時間下，每個溫度區間的直行速率皆大於轉彎速率，且直行速率與轉彎速率皆會隨時間逐漸下降。

圖 3.7 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間轉彎機率隨時間之變化，從圖 3.7 可發現在任一觀測時間下，位於 23.6°C 至 26.4°C 區間的浮游生物



具較高的轉彎機率，而參照 3.1.1 節的族群密度分布，浮游生物會在 30 分鐘內集中於 22.1°C 至 25°C 區間，由此可推論當浮游生物處於偏好的溫度區間時，會提高自身的轉彎比例，使其長時間駐留在該溫度區間。另外，不同溫度區間的浮游生物轉彎機率皆會伴隨時間增長而上升，此趨勢可對應至不同溫度區間的平均游動速率變化，其游動速率隨時間增加而降低，故我們可推論浮游生物的平均游動速率會受其轉彎機率影響，當浮游生物較常轉彎時，因其轉彎速率小於直行速率，故會導致其游動速率下降。

圖 3.8 為浮游生物在熱端 35°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間游動軌跡，此處使用不同的顏色標示浮游生物的瞬時游動速率，即單一浮游生物在單位時間 $\Delta t = 1/30$ s 內之位移，當瞬時游動速率大於 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 時，以紅色來標示浮游生物的游動軌跡，而當瞬時游動速率小於 $60 \mu\text{m s}^{-1}$ 時，則以藍色來標示其游動軌跡。此外，圖 3.8 中所標註之虛線為各溫度區間的分隔線，由左至右依序為 26.4°C、25°C、23.6°C、22.1°C 以及 20.7°C 區間。從圖 3.8 可觀察到在不同的觀測時間下，高溫區間的浮游生物瞬時游動速率大於 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 之比例較低溫區間為高，而隨著時間增加，可發現浮游生物於各溫度區間的瞬時游動速率逐漸從 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上降低至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下，上述趨勢和浮游生物平均游動速率隨溫度與時間之變化一致，當環境溫度升高，其游動速率會隨之增加，而當觀測時間增長，其游動速率則會降低。

3.1.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布

浮游生物於熱端 35°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間游動速率之機率質量函數如圖 3.9 所示。在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，25°C 與 26.4°C 區間的游動速率峰值位於 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $280 \mu\text{m s}^{-1}$ 之速率區間內，而 20.7°C、22.1°C 及 23.6°C 區間的游動速率峰值則落在 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 之速率區間；在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，



五個溫度區間之游動速率 PMF 峰值皆會下降至 $120\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處，且和高溫區間相比，低溫區間之游動速率 PMF 分布往低速率區間的偏移幅度較小。經由以上之結果可得知，在任一觀測時間下，浮游生物於高溫區間的游動速率大於低溫區間的游動速率，而所有溫度區間的游動速率皆隨時間增加而下降。

圖 3.10 為浮游生物於熱端 35°C 、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間游泳角度之機率質量函數，此處取出所有浮游生物每間隔 $0.1\ \text{s}$ 之游泳角度來進行運算，而游泳角度區間則以 5° 為間隔來均分方位角 0° 至 360° ，其中方位角 0° 朝向低溫端，方位角 180° 則面向高溫端。觀察圖 3.10 可發現在觀測時間為 0 分鐘至 10 分鐘時，浮游生物於不同溫度區間之游泳角度有較明顯的方向性；當觀測時間為 15 分鐘至 20 分鐘時，各溫度區間之游泳角度分布則漸趨均勻；在觀測時間為 25 分鐘至 30 分鐘時，所有溫度區間的游泳角度呈現較均勻的圓形分布。針對 20.7°C 至 23.6°C 區間的浮游生物游泳角度分布，可得知於觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘時浮游生物有明顯往左側移動之現象，其中左半部方位角 90° 至 270° 之 PMF 多數大於或趨近 0.025；而觀察浮游生物於 25°C 與 26.4°C 區間的游泳角度分布，可在觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘時發現游泳角度之峰值大約位於 0° 至 30° 和 330° 至 360° 處，整體呈現向右移動之趨勢，將以上的游泳角度 PMF 分布對照到 3.1.1 節所討論的族群密度分布結果可知，浮游生物在 0 分鐘至 10 分鐘時，會主動往偏好的溫度區間游動而聚集於 22.1°C 至 25°C 區間。

3.2 浮游生物於冷熱端溫差 20°C 之運動行為分析

本節將探討冷熱端溫差同為 20°C ，而冷熱端溫度不同的兩組實驗，以下將詳述在熱端 35°C 、冷端 15°C ，即溫度梯度 $1.06^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 與熱端 30°C 、冷端 10°C ，即溫度梯度 $1.21^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件下，不同溫度區間的浮游生物運動行為比較與其隨時間之變

化。

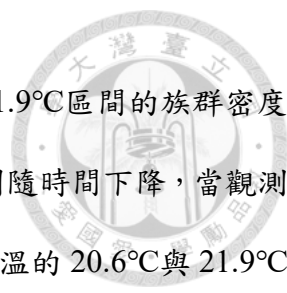


3.2.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度

圖 3.11 為不同溫度區間在熱端 35°C、冷端 15°C 條件下之浮游生物族群密度隨時間之變化，從圖 3.11 中可得知在觀測時間為 0 分鐘時，浮游生物主要聚集於 25.4°C 與 27.8°C 區間，隨著時間增加，23°C 至 26.6°C 區間的族群密度均呈現上升之趨勢，唯獨 27.8°C 區間的族群密度隨時間逐步下降，當觀測時間為 25 分鐘至 30 分鐘時，可發現 24.2°C 與 25.4°C 區間的族群密度較其他三個溫度區間高，其中 25.4°C 區間之族群密度高達約 $8.6 \times 10^5 \text{ ml}^{-1}$ ，為所有溫度區間最高。分析不同溫度區間的浮游生物個數淨變化率，可得到低溫至高溫區間的個數淨變化率依序為 0.3 min^{-1} 、 0.8 min^{-1} 、 0.9 min^{-1} 、 0.5 min^{-1} 與 -0.2 min^{-1} ，由此可知浮游生物於 24.2°C 與 25.4°C 區間的淨增加率最為顯著。

圖 3.12 為不同溫度區間在熱端 35°C、冷端 15°C 條件下之浮游生物正規化族群密度隨時間之變化，經由圖 3.12 同樣可看出 23°C 至 26.6°C 區間的族群密度有隨時間上升之趨勢，而最高溫的 27.8°C 區間其族群密度則會隨時間逐漸下降。與觀測時間為 0 分鐘的族群密度相比，24.2°C 和 25.4°C 區間的族群密度於 30 分鐘內分別增加 22.7%、23.3%，為上升幅度最明顯的兩個溫度區間，而 27.8°C 區間的族群密度則下降 5.2%，為所有溫度區間之中唯一減少的區間。不論是透過族群密度、正規化族群密度抑或個數淨變化率之比較，均可推論在熱端 35°C、冷端 15°C，即溫度梯度為 $1.06 \text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件下，浮游生物會聚集至 24.2°C 與 25.4°C 區間。

圖 3.13 為不同溫度區間在熱端 30°C、冷端 10°C 條件下之浮游生物族群密度隨時間之變化，由圖 3.13 中的族群密度分布可以發現在觀測時間為 0 分鐘時，浮游生物

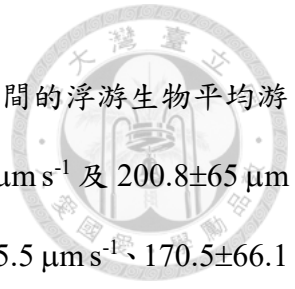


於 17.9°C 與 19.3°C 區間的數量較多，隨著時間上升，19.3°C 至 21.9°C 區間的族群密度皆顯現增加之趨勢，偏低溫的 16.6°C 與 17.9°C 區間其族群密度則隨時間下降，當觀測時間增長至 25 分鐘和 30 分鐘時，可清楚觀察到浮游生物會往高溫的 20.6°C 與 21.9°C 區間聚集，而遠離低溫的 16.6°C 與 17.9°C 區間，其中 21.9°C 區間的族群密度分別為 16.6°C 區間的 1.88 倍與 17.9°C 區間的 1.64 倍。從浮游生物個數淨變化率之定義來進行分析，可得知 20.6°C 與 21.9°C 區間的個數淨變化率分別為 1.8 min^{-1} 和 1.9 min^{-1} ，而 16.6°C 與 17.9°C 區間的個數淨變化率則各別為 -1.4 min^{-1} 和 -0.9 min^{-1} 。

圖 3.14 為不同溫度區間在熱端 30°C、冷端 10°C 條件下之浮游生物正規化族群密度隨時間之變化，透過圖 3.14 可觀察到 20.6°C 和 21.9°C 區間的族群密度隨時間增加之趨勢較為顯著，其族群密度在 30 分鐘後各自增加 36.7% 和 36.5%，而 16.6°C 和 17.9°C 區間的族群密度則伴隨時間逐漸降低，其族群密度分別下降 26.6% 和 17.2%。經由以上的實驗結果，可推論在熱端 30°C、冷端 10°C，即溫度梯度為 $1.21 \text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件下，浮游生物會往 20.6°C 與 21.9°C 區間聚集，並且遠離 16.6°C 和 17.9°C 區間。

3.2.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析

本節所討論之浮游生物游動速率、直行速率以及轉彎速率標準差如表 3.2 和表 3.3 所示。圖 3.15 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間平均游動速率隨時間之變化，觀察圖 3.15 可發現於觀測時間 0 分鐘至 15 分鐘時，浮游生物的平均游動速率大致會隨溫度增加而上升，於觀測時間 20 分鐘至 25 分鐘時，其平均游動速率隨溫度之變化較無明顯的趨勢，最後在觀測時間為 30 分鐘時，隨著溫度上升，其平均游動速率則會隨之下降。此外，聚焦於同一溫度區間的平均游動速率變化，可得知平均游動速率會隨時間降低，表示浮游生物在長時間觀測下會逐漸失去活動力。



在觀測時間為 0 分鐘、5 分鐘、10 分鐘與 15 分鐘時，27.8°C區間的浮游生物平均游動速率依序為 $216.1 \pm 71.4 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $207.4 \pm 72.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $180.7 \pm 74.8 \mu\text{m s}^{-1}$ 及 $200.8 \pm 65 \mu\text{m s}^{-1}$ ，而 23°C區間的平均游動速率則為 $185.8 \pm 54.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $183.2 \pm 55.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $170.5 \pm 66.1 \mu\text{m s}^{-1}$ 以及 $160.2 \pm 46.5 \mu\text{m s}^{-1}$ ，游動速率於區間溫度從 23°C上升至 27.8°C下，在 0 分鐘至 15 分鐘分別提高 16.3%、13.2%、6%與 25.3%，其中以觀測時間 15 分鐘的游動速率增加幅度最為明顯。各溫度區間的最低平均游動速率發生在觀測時間 25 分鐘處，此時比較觀測時間 0 分鐘至 25 分鐘的游動速率變化，可得知游動速率在 25 分鐘內的下降幅度介於 $32.4 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $70.8 \mu\text{m s}^{-1}$ ，其中浮游生物之游動速率於 26.6°C區間的降低幅度最大，其速率降幅為 35.8%，而在 23°C區間的降低幅度最小，其速率降幅為 17.4%。

圖 3.16 與圖 3.17 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 15°C條件下之不同溫度區間平均直行速率與平均轉彎速率隨時間之變化，觀察圖 3.16 可發現浮游生物的平均直行速率分布與其平均游動速率相似，於觀測時間 0 分鐘至 15 分鐘下，直行速率大致隨溫度上升而增加，而在任一溫度區間內，同樣可發現直行速率會隨時間增加而下降，此外直行速率的整體範圍落在 $134.3 \pm 96.3 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $222.4 \pm 67.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 。由圖 3.17 之變化趨勢可知，轉彎速率於觀測時間 0 分鐘至 15 分鐘並無明顯隨溫度上升之現象，而在觀測時間 20 分鐘至 30 分鐘時，轉彎速率隨溫度之變化則和直行速率的分布相近。與直行速率之大小相比，轉彎速率的範圍介於 $93.7 \pm 79 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $167.4 \pm 97.2 \mu\text{m s}^{-1}$ 之間，由此可知轉彎速率比直行速率減少 $32.9 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $73.3 \mu\text{m s}^{-1}$ ，表示浮游生物進行轉彎時會放慢其游動速率，而進行直線運動時則會加快其游動速率。圖 3.18 為熱端 35°C、冷端 15°C之浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化，由圖 3.18 可清楚觀察到所有溫度區間於任何觀測時間下，直行速率均高於轉彎速率，



且直行速率與轉彎速率皆會隨時間降低。

圖 3.19 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間轉彎機率隨時間之變化，透過圖 3.19 可發現在大部分觀測時間下，分布於 24.2°C 至 26.6°C 區間的浮游生物轉彎機率較其餘溫度區間高，在觀測時間為 25 分鐘時，25.4°C 與 26.6°C 區間的轉彎機率分別高達 0.51 和 0.48，此結果可能為浮游生物的資料點不足所導致，兩溫度區間的資料點數目皆少於 100 筆。根據 3.2.1 節所探討的族群密度分布，可得知浮游生物在此溫度條件下會聚集至 24.2°C 與 25.4°C 區間，而位於兩溫度區間的浮游生物亦具有較高之轉彎機率，由此可推論浮游生物會藉由提高自身之轉彎比例，以停留於偏好的溫度區間。此外，不同溫度區間的浮游生物轉彎機率大致伴隨時間增長而逐漸上升，對應至平均游動速率於不同溫度區間之變化，游動速率會隨時間增加而降低，因此我們可推論浮游生物之平均游動速率會受轉彎機率所影響，當浮游生物提高轉彎比例時，其游動速率便會隨之降低。

圖 3.20 為浮游生物在熱端 35°C、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間游動軌跡，區間溫度由左至右依序為 27.8°C、26.6°C、25.4°C、24.2°C 以及 23°C。於觀測時間 0 分鐘至 15 分鐘，可得知高溫區間的浮游生物瞬時游動速率大於 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 之比例較低溫區間高，浮游生物於低溫區間的瞬時游動速率主要介於 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ ，但在觀測時間為 30 分鐘時，浮游生物之瞬時游動速率分布便完全相反，此時瞬時游動速率高於 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 之浮游生物反而集中於低溫區間。隨著時間上升，可發現浮游生物於各溫度區間的瞬時游動速率會逐漸從 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上降低至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下，圖 3.20 所呈現之趨勢也和平均游動速率隨溫度與時間之變化互相吻合。

圖 3.21 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間平均游動速率隨時間之變化，觀察圖 3.21 可以發現除了觀測時間為 30 分鐘之游動速率分布較為平



緩以外，其餘觀測時間之游動速率均隨溫度上升而增加。觀察相同溫度區間內的平均游動速率變化，可得知游動速率會隨時間增長而降低，表示浮游生物之活動力會受到觀測時間影響，並且隨之逐漸流失。比較此溫度條件下最高溫的 21.9°C 區間與最低溫的 16.6°C 區間之平均游動速率，21.9°C 區間於觀測時間 0 分鐘至 25 分鐘的游動速率分別為 $160.4 \pm 58.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $162.6 \pm 64.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $155.1 \pm 61.1 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $161.2 \pm 58.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $153.3 \pm 61.4 \mu\text{m s}^{-1}$ 及 $140.6 \pm 53.5 \mu\text{m s}^{-1}$ ，而 16.6°C 區間的游動速率為 $134.9 \pm 46.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $127.6 \pm 47.7 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $119.1 \pm 51.1 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $129 \pm 45.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $125.7 \pm 44.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 及 $122.1 \pm 43.3 \mu\text{m s}^{-1}$ ，在區間溫度由 16.6°C 增加至 21.9°C 下，游動速率在 0 分鐘至 25 分鐘各別提高 18.9%、27.4%、30.2%、25%、22% 與 15.2%，其中游動速率於觀測時間 10 分鐘的增加幅度最為顯著。由各溫度區間於觀測時間 0 分鐘至 30 分鐘之游動速率變化，可知整體游動速率在 30 分鐘內降低 $8.9 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $30.7 \mu\text{m s}^{-1}$ ，速率降幅最大處發生於 21.9°C 區間，其下降幅度為 19.1%，而速率降幅最小處則位於 16.6°C 區間，其下降幅度為 6.6%。

圖 3.22 與圖 3.23 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間平均直行速率與平均轉彎速率隨時間之變化，觀察圖 3.22 和圖 3.23 可發現平均直行速率與平均轉彎速率之趨勢皆和平均游動速率之分布極為相近，除觀測時間為 30 分鐘外，直行速率與轉彎速率大致會隨溫度上升而增加，而在同一溫度區間中，則同樣可觀察到直行速率和轉彎速率會隨時間增加而下降。直行速率與轉彎速率於此溫度條件下，最大的差別在於速率之大小，直行速率的整體範圍落在 $125.5 \pm 51.4 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $169 \pm 60.5 \mu\text{m s}^{-1}$ ，而轉彎速率的範圍則介於 $99.1 \pm 55 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $137.3 \pm 65 \mu\text{m s}^{-1}$ ，其中直行速率比轉彎速率增加 $23.4 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $38.1 \mu\text{m s}^{-1}$ ，代表浮游生物行直線運動之游動速率較進行轉彎時快。圖 3.24 為熱端 30°C、冷端 10°C 之浮游生物直行速率、轉彎速率



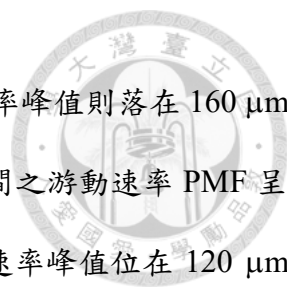
與平均游動速率隨時間之變化，透過圖 3.24 可觀察到在任一觀測時間下，浮游生物於不同溫度區間之直行速率均大於轉彎速率，並且在時間增加時，直行速率與轉彎速率皆同時下降。

圖 3.25 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間轉彎機率隨時間之變化，由圖 3.25 可發現在不同觀測時間下，轉彎機率之分布均趨於平緩，無明顯隨溫度變化的趨勢。依照 3.2.1 節總結的族群密度結果，浮游生物會集中於 20.6°C 和 21.9°C 區間，而兩溫度區間之浮游生物轉彎機率與其他區間差異不大，故可推論在此溫度條件下，浮游生物之轉彎行為與其往溫度區間聚集之現象並沒有顯著的關聯。另外，聚焦不同溫度區間的轉彎機率變化，可發現轉彎機率會隨時間增加而些微上升，此部分可對應至平均游動速率隨時間之改變，游動速率會隨時間增長而減少，由此可推論浮游生物之轉彎機率會對自身的游動速率造成影響，浮游生物在提升轉彎機率的當下，便會調降其游動速率。

圖 3.26 為浮游生物在熱端 30°C、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間游動軌跡，區間溫度由左至右依序為 21.9°C、20.6°C、19.3°C、17.9°C 以及 16.6°C，根據圖 3.26 之分布可觀察到於不同觀測時間下，高溫區間的浮游生物瞬時游動速率多數介於 240 $\mu\text{m s}^{-1}$ 以上，而低溫區間的瞬時游動速率則以 120 $\mu\text{m s}^{-1}$ 至 180 $\mu\text{m s}^{-1}$ 為主，隨著時間增加，各溫度區間的瞬時游動速率將逐漸從 240 $\mu\text{m s}^{-1}$ 以上偏移至 180 $\mu\text{m s}^{-1}$ 以下，上述隨溫度與時間之變化趨勢亦和平均游動速率之分布一致。

3.2.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布

浮游生物於熱端 35°C、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間游動速率之機率質量函數如圖 3.27 所示。在觀測時間 0 分鐘至 15 分鐘，26.6°C 與 27.8°C 區間之游動速率峰



值位於 $200\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $280\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處， 23°C 至 25.4°C 區間之游動速率峰值則落在 $160\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處；在觀測時間 20 分鐘至 30 分鐘，各溫度區間之游動速率 PMF 呈現近似雙峰的分布，其中 23°C 區間於觀測時間 20 分鐘之游動速率峰值位在 $120\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $160\ \mu\text{m s}^{-1}$ 和 $200\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處， 25.4°C 區間於觀測時間 25 分鐘之游動速率峰值則落在 $0\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $40\ \mu\text{m s}^{-1}$ 和 $160\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處。此外，觀察不同溫度區間的游動速率 PMF 變化，可發現其 PMF 峰值會隨時間逐漸從高速率區間偏移至低速率區間。藉由以上所歸納之結果，便可得知在觀測時間 20 分鐘至 30 分鐘時，浮游生物的游動速率並無明顯隨溫度改變之趨勢，以及每個溫度區間之游動速率皆會隨時間而下降。

圖 3.28 為浮游生物於熱端 35°C 、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間游泳角度之機率質量函數，經由圖 3.28 可發現在觀測時間為 0 分鐘至 15 分鐘時，除 26.6°C 區間外其餘溫度區間之游泳角度分布皆較為均勻；在觀測時間為 20 分鐘至 30 分鐘時，不同溫度區間陸續出現較不均勻之游泳角度分布，其中以 25.4°C 區間於觀測時間 25 分鐘之游泳角度分布最為雜亂。觀察 23°C 區間之游泳角度 PMF 分布，可得知於大部分觀測時間下浮游生物有往左側游動之現象；根據 26.6°C 區間的游泳角度 PMF 分布，可發現浮游生物有明顯往左右兩側移動之趨勢，其游泳角度峰值在多數觀測時間下位於 150° 至 180° 以及 330° 至 360° 處；比對 24.2°C 、 25.4°C 和 27.8°C 區間的游泳角度 PMF 隨時間之變化，可知浮游生物在這三個溫度區間內並沒有顯現特定之方向。從 3.2.1 節的族群密度分布，可得知浮游生物偏好的溫度區間為 24.2°C 和 25.4°C 區間，而兩溫度區間所呈現之游泳角度不具備明顯的方向性，因此可推論在此溫度條件下，浮游生物的游泳角度無法反映出往偏好溫度區間聚集之行為。

浮游生物於熱端 30°C 、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間游動速率之機率質量函



數如圖 3.29 所示。在觀測時間為 0 分鐘至 25 分鐘時， 19.3°C 至 21.9°C 區間之游動速率峰值位於 $160\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處， 16.6°C 與 17.9°C 區間之游動速率峰值則位於 $120\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處；當觀測時間為 30 分鐘時，五個溫度區間之游動速率峰值皆偏移至 $120\ \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $160\ \mu\text{m s}^{-1}$ 處。觀察圖 3.29 中的游動速率 PMF 分布隨時間之變化，可發現每個溫度區間之 PMF 分布均向左偏移至低速率區間，且高溫區間的橫移幅度較低溫區間為大。透過以上之觀察結果可得知，在大部分觀測時間下，浮游生物於高溫區間的游動速率較低溫區間高，但在觀測時間為 30 分鐘時，各溫度區間之游動速率則沒有明顯的差異，而隨著時間增加，所有溫度區間的游動速率皆會逐漸下降。

圖 3.30 為浮游生物於熱端 30°C 、冷端 10°C 條件下之不同溫度區間游泳角度之機率質量函數，透過圖 3.30 可發現在觀測時間為 0 分鐘至 5 分鐘時，各溫度區間之游泳角度分布較為均勻；當觀測時間上升到 20 分鐘至 30 分鐘時，各溫度區間之游泳角度呈現近似十字狀分布，其 PMF 極值會出現於 0° 、 90° 、 180° 及 270° 。透過 3.2.1 節之族群密度分布，可知浮游生物會遠離低溫的 16.6°C 與 17.9°C 區間，並且聚集至高溫的 20.6°C 與 21.9°C 區間，由於分布在 16.6°C 與 17.9°C 區間之浮游生物並無明顯往左側移動之趨勢，故可推論浮游生物於此溫度條件下，其游泳角度和溫度區間之聚集行為沒有顯著的關聯性。

3.3 浮游生物於冷熱端溫差 15°C 之運動行為分析

本節將探討冷熱端溫差同為 15°C ，而冷熱端溫度不同的兩組實驗，以下將詳述在熱端 35°C 、冷端 20°C ，即溫度梯度 $0.83^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 與熱端 30°C 、冷端 15°C ，即溫度梯度 $0.83^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件下，不同溫度區間的浮游生物運動行為比較與其隨時間之變

化。



3.3.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度

圖 3.31 為不同溫度區間在熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之浮游生物族群密度隨時間之變化，從圖 3.31 中可得知在觀測時間為 0 分鐘時，浮游生物的數量分布偏向 25.2°C 與 29°C 區間，隨著時間增加，26.2°C、28°C 及 29°C 區間之族群密度皆呈現上升之趨勢，而 25.2°C 和 27.1°C 區間之族群密度則隨時間逐漸降低，當觀測時間為 25 分鐘至 30 分鐘時，可發現 26.2°C、28°C 及 29°C 區間的族群密度高於其餘溫度區間，其中 26.2°C 區間具有最高的族群密度。計算浮游生物個數之淨變化率，可得知 26.2°C、28°C 與 29°C 區間的個數淨變化率分別為 0.4 min^{-1} 、 0.2 min^{-1} 以及 0.1 min^{-1} ，而 25.2°C 與 27.1°C 區間的個數淨變化率則各別為 -0.3 min^{-1} 與 -0.3 min^{-1} ，其中便以 26.2°C 與 28°C 區間的淨增加率最為明顯。

圖 3.32 為不同溫度區間在熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之浮游生物正規化族群密度隨時間之變化，經由圖 3.32 同樣可觀察到 26.2°C、28°C 與 29°C 區間之族群密度均有隨時間增加的現象，其族群密度在 30 分鐘內各別提升 10.6%、6.7% 和 2.7%，而 25.2°C 與 27.1°C 區間之族群密度則顯現隨時間降低之趨勢，其族群密度一共下降 7.6% 和 9%。綜合族群密度、正規化族群密度以及個數淨變化量之分布，可推論浮游生物在熱端 35°C、冷端 20°C，即溫度梯度 $0.83 \text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件下，會往 26.2°C、28°C 以及 29°C 區間聚集。

圖 3.33 為不同溫度區間在熱端 30°C、冷端 15°C 條件下之浮游生物族群密度隨時間之變化，於觀測時間 0 分鐘時，浮游生物的數量分布即偏向 22.4°C 與 24.3°C 區間，隨著時間推移，五個溫度區間之族群密度皆同時上升，當觀測時間為 30 分鐘時，可



發現 23.3°C 與 24.3°C 區間之族群密度較其餘三個溫度區間高，其中兩溫度區間之族群密度分別高達 $1.16 \times 10^6 \text{ ml}^{-1}$ 和 $1.19 \times 10^6 \text{ ml}^{-1}$ 。根據浮游生物個數之淨變化率，可發現 20.5°C 至 24.3°C 區間的浮游生物個數淨變化率依序為 1.5 min^{-1} 、 1.4 min^{-1} 、 1.2 min^{-1} 、 1.9 min^{-1} 以及 2 min^{-1} ，淨增加率最明顯的溫度區間發生於 23.3°C 與 24.3°C 區間。

圖 3.34 為不同溫度區間在熱端 30°C、冷端 15°C 條件下之浮游生物正規化族群密度隨時間之變化，經由圖 3.34 一樣能觀察到五個溫度區間之族群密度皆呈現隨時間上升之趨勢，於 30 分鐘內 20.5°C 至 24.3°C 區間之族群密度依序增加 36.9%、30.2%、23.8%、43% 及 42.1%。統整以上之觀察結果，可推論浮游生物在熱端 30°C、冷端 15°C，即溫度梯度 $0.83 \text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件下，會傾向往高溫的 23.3°C 與 24.3°C 區間集中。

3.3.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析

本節所討論之浮游生物游動速率、直行速率以及轉彎速率標準差如表 3.4 和表 3.5 所示。圖 3.35 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間平均游動速率隨時間之變化，於觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘，浮游生物之平均游動速率會隨溫度增加而略微上升，於觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘，隨著環境溫度上升，其平均游動速率則些微降低。比較浮游生物在任一溫度區間內的平均游動速率變化，可得知游動速率會伴隨時間明顯降低，代表在時間推移的過程中浮游生物將逐漸流失活動力。在觀測時間為 0 分鐘與 5 分鐘時，浮游生物於 25.2°C 區間之平均游動速率為 $158.5 \pm 57.9 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $160 \pm 60.3 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ ，而在 29°C 區間之游動速率則上升至 $177 \pm 60.8 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $172 \pm 69 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ ，游動速率於區間溫度從 25.2°C 提升至 29°C 的情況下，在 0 分鐘和 5 分鐘各別增加 11.7% 與 7.5%。比較五個溫度區間於觀測時間 0 分鐘至 30 分鐘的游動速率變化，可得知游動速率在 30 分鐘內整體下降 $33.7 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $60.3 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ ，其中最高溫之 29°C



區間的游動速率降低幅度最大，其速率降幅為 34.1%，而最低溫之 25.2°C 區間的游動速率降低幅度最小，其速率降幅為 21.3%。

圖 3.36 與圖 3.37 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間平均直行速率與平均轉彎速率隨時間之變化，比對浮游生物之平均直行速率和平均轉彎速率分布，可發現兩者隨溫度與時間之變化皆十分相近，於觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘，直行速率與轉彎速率均會隨溫度增加而略微上升，於觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘，直行速率與轉彎速率則會伴隨溫度上升而些微降低，此外在同一溫度區間下，也能發現兩者會隨時間增加而明顯下降。將直行速率和轉彎速率之大小進行比較，可得知直行速率的整體範圍介於 $121.6 \pm 48.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $195.9 \pm 65.8 \mu\text{m s}^{-1}$ ，轉彎速率的整體範圍則落在 $100.8 \pm 54 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $154 \pm 83.5 \mu\text{m s}^{-1}$ ，其中直行速率較轉彎速率增加 $19 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $41.9 \mu\text{m s}^{-1}$ ，代表浮游生物於直線前進時之游動速率會比進行轉彎時快。圖 3.38 為熱端 35°C、冷端 20°C 之浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化，觀察圖 3.38 可發現各溫度區間之直行速率於任一觀測時間下均大於轉彎速率，且隨著時間上升，直行速率與轉彎速率皆同步降低。

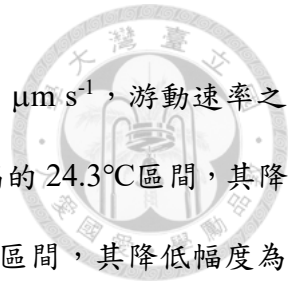
圖 3.39 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間轉彎機率隨時間之變化，經由圖 3.39 可觀察到在大部分觀測時間下，浮游生物之轉彎機率大致會隨溫度升高而逐漸增加，其中分布於 27.1°C 至 29°C 區間之浮游生物具有較高的轉彎機率。依照 3.3.1 節所呈現的族群密度分布，可得知於此溫度條件下浮游生物會集中至 26.2°C、28°C 與 29°C 區間，其中較為高溫的 28°C 與 29°C 區間之轉彎機率大於其餘溫度區間，因此可推論提高游動時的轉彎比例將有助於浮游生物徘徊於偏好的溫度區間。根據不同溫度區間的轉彎機率變化，可發現浮游生物之轉彎機率會隨時間推移而上升，對照到平均游動速率隨時間之分布，可得知游動速率會伴隨時間增長而降低，



由此可推論游動速率會受轉彎機率影響，當浮游生物提高轉彎機率時，便會適時調降游動速率。

圖 3.40 為浮游生物在熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間游動軌跡，區間溫度從左到右依序為 29°C、28°C、27.1°C、26.2°C 以及 25.2°C。在觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘，浮游生物於高溫區間之瞬時游動速率大部分落在 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 與 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上，而低溫區間之瞬時游動速率主要介於 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 和 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下，在觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘，高溫區間與低溫區間之瞬時游動速率分布便和觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘相反，此時瞬時游動速率低於 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 之浮游生物會遍佈在高溫區間，而瞬時游動速率高於 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 之浮游生物則會聚集至低溫區間。比較不同溫度區間之瞬時游動速率隨時間之變化，可發現隨著時間增加，浮游生物之瞬時游動速率會從 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上逐步下降到 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下。以上所描述之觀察結果也契合於平均游動速率隨溫度和時間之變化。

圖 3.41 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間平均游動速率隨時間之變化，在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，可發現浮游生物之平均游動速率會隨溫度上升而逐漸增加，在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，其平均游動速率分布則趨於平緩，並無明顯隨溫度改變之趨勢。此外，觀察同一溫度區間內的平均游動速率變化，便能得知當時間上升時，浮游生物之游動速率會明顯隨之降低，代表浮游生物會在時間增加的過程中漸漸失去活動力。在觀測時間為 0 分鐘、5 分鐘以及 10 分鐘時，分佈於 20.5°C 區間之浮游生物平均游動速率為 $158.6 \pm 47.7 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $156.5 \pm 51.6 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $149.8 \pm 53.1 \mu\text{m s}^{-1}$ ，而 24.3°C 區間之游動速率則提升至 $168.6 \pm 56 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $169 \pm 57.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $168 \pm 55.2 \mu\text{m s}^{-1}$ ，在區間溫度由 20.5°C 增加至 24.3°C 之情況下，游動速率於 0 分鐘至 10 分鐘分別上升 6.3%、8% 和 12.1%。由不同溫度區間於總觀測時間之游動速率



變化，可得知整體游動速率在 30 分鐘內降低 $25.9 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $41.5 \mu\text{m s}^{-1}$ ，游動速率之下降幅度會伴隨溫度上升，其中速率降幅最大處發生於溫度最高的 24.3°C 區間，其降低幅度為 24.6%，而速率降幅最小處則位於溫度最低的 20.5°C 區間，其降低幅度為 16.3%。

圖 3.42 與圖 3.43 為浮游生物於熱端 30°C 、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間平均直行速率與平均轉彎速率隨時間之變化，將圖 3.41 和圖 3.42 進行比對可發現，浮游生物之直行速率與其游動速率分布極為相似，於觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，直行速率隨溫度上升之趨勢明顯，於觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，直行速率隨溫度之分布則趨於平緩，另外在任一溫度區間中，同樣能觀察到直行速率會隨時間增加而下降。從圖 3.43 之變化趨勢，可得知轉彎速率於觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘並沒有明顯隨溫度增加之趨勢，但在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，轉彎速率則和直行速率與游動速率之分布相差不大。比較直行速率與轉彎速率之大小，可發現直行速率的整體範圍處於 $133.4 \pm 44 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $175.6 \pm 54.4 \mu\text{m s}^{-1}$ ，而轉彎速率的整體範圍則介於 $109.8 \pm 53.8 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $144.5 \pm 71.6 \mu\text{m s}^{-1}$ ，由此可知轉彎速率較直行速率降低 $17.8 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $36.4 \mu\text{m s}^{-1}$ ，表示浮游生物進行轉彎時之游動速率比行直線運動時低。圖 3.44 為熱端 30°C 、冷端 15°C 之浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化，經由圖 3.44 除了可觀察到在任一觀測時間下不同溫度區間之直行速率較轉彎速率快以外，還能發現直行速率和轉彎速率皆會隨著時間增長而下降。

圖 3.45 為浮游生物於熱端 30°C 、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間轉彎機率隨時間之變化，在整段觀測時間內，浮游生物之轉彎機率大致會隨溫度增加而上升，其中 22.4°C 至 24.3°C 區間之浮游生物於大部分觀測時間下皆具備較高的轉彎機率，將此現象對應至 3.3.1 節的族群密度分布，可得知浮游生物聚集最為明顯的溫度區間為

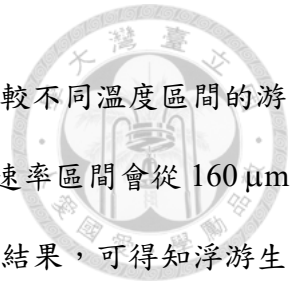


23.3°C與 24.3°C區間，故我們可推論浮游生物會藉由提高轉彎比例以停留於其偏好的溫度區間。觀察不同溫度區間的浮游生物轉彎機率變化，可發現轉彎機率會伴隨時間增長而一同上升，參照平均游動速率之變化趨勢，可得知游動速率會隨時間推移而下降，因此可推論轉彎機率會對浮游生物的游動速率產生影響，當浮游生物的轉彎機率提高時，其游動速率便會隨之降低。

圖 3.46 為浮游生物在熱端 30°C、冷端 15°C條件下之不同溫度區間游動軌跡，區間溫度從左到右依序為 24.3°C、23.3°C、22.4°C、21.5°C以及 20.5°C。在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，浮游生物於高溫區間之瞬時游動速率多數介於 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 和 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上，而低溫區間之瞬時游動速率主要落在 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 與 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下，在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，不同溫度區間之瞬時游動速率分布沒有顯著的差異。此外，比較瞬時游動速率隨時間之變化趨勢，可發現浮游生物於不同溫度區間之瞬時游動速率逐漸從 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上偏移至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下。以上所統整之結果能確切反映於平均游動速率隨溫度與時間之變化。

3.3.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布

浮游生物於熱端 35°C、冷端 20°C條件下之不同溫度區間游動速率之機率質量函數如圖 3.47 所示。在觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘，27.1°C與 28°C區間之游動速率峰值位於 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 處，25.2°C、26.2°C以及 29°C區間之游動速率峰值則落在 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 處；在觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘，低溫區間之游動速率 PMF 會向右偏移至較高的速率區間，而高溫區間之游動速率 PMF 則會往左移動到較低的速率區間，其中最低溫的 25.2°C區間於觀測時間 10 分鐘與 15 分鐘之游動速率峰值分別位於 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 處和 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 處，而最高溫的



29°C區間其游動速率峰值均落在 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 處。比較不同溫度區間的游動速率 PMF 於 30 分鐘內之變化，可得知其 PMF 峰值所對應的速率區間會從 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 下降到 $80 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 。根據上述之討論結果，可得知浮游生物於觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘之游動速率會隨溫度增加而些微上升，於觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘之游動速率則伴隨溫度上升而略微降低，此外不同溫度區間之游動速率皆在時間增加的過程中逐漸下降。

圖 3.48 為浮游生物於熱端 35°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間游泳角度之機率質量函數，在觀測時間為 0 分鐘和 20 分鐘至 30 分鐘時，可發現所有溫度區間之游泳角度呈現較均勻之分布；在觀測時間為 5 分鐘至 15 分鐘時，各溫度區間則出現非均勻之游泳角度分布。觀察 25.2°C 區間之游泳角度變化，可發現其 PMF 分布於不同觀測時間下較為隨機，且沒有明顯往左側游動之趨勢；針對 27.1°C 區間之游泳角度分布，可得知在觀測時間為 5 分鐘、25 分鐘及 30 分鐘時，游泳角度之 PMF 極值會發生於 90°和 270°附近，浮游生物於大部分觀測時間下並無表現出往左右兩側移動之現象。將上述觀察結果與 3.3.1 節的族群密度分布進行比對，可得知浮游生物會傾向往 26.2°C、28°C 及 29°C 區間集中，而 25.2°C 和 27.1°C 區間之浮游生物游泳角度則沒有顯現朝偏好溫度區間移動之方向性，由此可推論在此溫度條件下，浮游生物的游泳角度無法確切反映出其聚集趨勢。

浮游生物於熱端 30°C、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間游動速率之機率質量函數如圖 3.49 所示。在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，20.5°C 至 24.3°C 區間之游動速率峰值皆位於 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 處，其中較高溫的 22.4°C 至 24.3°C 區間在速率區間 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 之 PMF 高於較低溫的 20.5°C 與 21.5°C 區間；在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，不同溫度區間之游動速率 PMF 分布漸趨一致，其中五個溫度區間之



PMF 分布於觀測時間 25 分鐘的重合程度最為明顯。在 30 分鐘內，可發現各溫度區間之游動速率 PMF 分布會稍微向左偏移，當中 PMF 峰值對應之速率區間會由 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 降低到 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 。透過以上歸納結果，即可得知浮游生物於觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘之游動速率沒有明顯隨溫度變化之趨勢，而不同溫度區間之游動速率則會隨時間增長而降低。

圖 3.50 為浮游生物於熱端 30°C 、冷端 15°C 條件下之不同溫度區間游泳角度之機率質量函數，在觀測時間為 0 分鐘至 20 分鐘時，浮游生物於不同溫度區間之游泳角度呈現均勻分布；在觀測時間為 25 分鐘至 30 分鐘時，各溫度區間會出現類似十字狀的游泳角度分布，其中 PMF 極值會發生在 0° 、 90° 、 180° 與 270° 附近。針對 20.5°C 至 22.4°C 區間之游泳角度分布，可發現於觀測時間 10 分鐘至 20 分鐘，三個溫度區間的浮游生物皆表現出往左側遷移之趨勢。根據 3.3.1 節的族群密度分布，可得知浮游生物的偏好溫度區間為 23.3°C 與 24.3°C 區間，其中在觀測時間為 10 分鐘至 20 分鐘下， 20.5°C 至 22.4°C 區間之浮游生物有主動往高溫區間游動之現象。

3.4 浮游生物於冷熱端溫差 10°C 之運動行為分析

本節將探討冷熱端溫差降低至 10°C ，在熱端 30°C 、冷端 20°C ，即溫度梯度為 $0.6^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 的條件下，不同溫度區間的浮游生物運動行為隨時間之變化與比較。

3.4.1 浮游生物族群密度與正規化族群密度

圖 3.51 為不同溫度區間在熱端 30°C 、冷端 20°C 條件下之浮游生物族群密度隨時間之變化，當觀測時間為 0 分鐘時，可發現浮游生物之數量分布偏向 23.9°C 與 24.6°C 區間，而隨著時間增加，五個溫度區間之族群密度均明顯上升，當觀測時間為 25 分



鐘至 30 分鐘時，可發現 24.6°C 至 25.9°C 區間之族群密度大於其餘溫度區間，其中以 25.3°C 區間的族群密度為最高。比較不同溫度區間的浮游生物個數淨變化率，可得知 23.3°C 至 25.9°C 區間之個數淨變化率分別為 2.8 min^{-1} 、 2 min^{-1} 、 2.1 min^{-1} 、 3 min^{-1} 及 3 min^{-1} ，淨增加率最為顯著的溫度區間位於 25.3°C 和 25.9°C 區間。

圖 3.52 為不同溫度區間在熱端 30°C、冷端 20°C 條件下之浮游生物正規化族群密度隨時間之變化，透過圖 3.52 可清楚觀察到五個溫度區間的族群密度均表現出隨時間增加之趨勢，且相比於各自的初始族群密度，每個溫度區間的族群密度於 30 分鐘後之增加幅度皆超過 55%，其中 23.3°C、25.3°C 與 25.9°C 區間之浮游生物族群密度提高將近一倍，其上升幅度各別為 94.3%、93.8% 和 111%。整合族群密度、正規化族群密度與個數淨變化量之分布，可推論在此冷熱端溫度與溫度梯度之條件下，浮游生物偏好的溫度區間為較高溫的 25.3°C 與 25.9°C 區間。

3.4.2 浮游生物游動速度與轉彎機率分析

本節所討論之浮游生物游動速率、直行速率以及轉彎速率標準差如表 3.6 所示。圖 3.53 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間平均游動速率隨時間之變化，透過圖 3.53 可發現在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，平均游動速率隨溫度上升之趨勢較為明顯，而在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，各溫度區間之平均游動速率分布便趨向平緩。觀察浮游生物於任一溫度區間的游動速率變化，可清楚得知游動速率會隨時間增加而逐漸下降，代表在時間推移的過程中，浮游生物將無法維持足夠的活動力。當觀測時間為 0 分鐘、5 分鐘與 10 分鐘時，23.3°C 區間之浮游生物平均游動速率分別為 $157.6 \pm 56.5 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $158.6 \pm 51.1 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $147.7 \pm 52 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ ，而 25.9°C 區間之游動速率則依序為 $172.4 \pm 60.2 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $167.6 \pm 57.1 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ 、 $160.5 \pm 48.3 \text{ } \mu\text{m s}^{-1}$ ，由此可知



在區間溫度由 23.3°C 上升至 25.9°C 下，游動速率於 0 分鐘至 10 分鐘會各別提高 9.4%、5.7% 和 8.7%。根據各溫度區間於 30 分鐘內的游動速率變化，可發現整體游動速率降低 $42.1 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $68.7 \mu\text{m s}^{-1}$ ，其中速率之下降幅度大致隨溫度增加而變大，降幅最大處位在較高溫的 25.3°C 區間，其速率降幅為 37.8%，而降幅最小處則落在最低溫的 23.3°C 區間，其速率降幅為 26.7%。

圖 3.54 與圖 3.55 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間平均直行速率與平均轉彎速率隨時間之變化，由圖 3.54 可得知直行速率整體的變化趨勢和平均游動速率分布相當接近，直行速率隨溫度增加之現象將隨時間上升而變得不明顯，且在任一溫度區間內同樣能發現直行速率會隨著時間推移而顯著下降。從圖 3.55 可發現轉彎速率之分布於觀測時間 0 分鐘時即趨於平緩，而後續於觀測時間 5 分鐘至 30 分鐘之分布趨勢則和直行速率隨溫度之變化一致。直行速率與轉彎速率分布最大的差別在於其速率大小，其中直行速率的整體範圍為 $115.9 \pm 39.5 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $191.2 \pm 54.2 \mu\text{m s}^{-1}$ ，轉彎速率的整體範圍為 $94.3 \pm 44.9 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $139.2 \pm 73.1 \mu\text{m s}^{-1}$ ，比較後可得知直行速率較轉彎速率增快 $20.4 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $52 \mu\text{m s}^{-1}$ ，代表浮游生物於直線前行之游動速率較進行轉彎時快。圖 3.56 為熱端 30°C、冷端 20°C 之浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化，透過圖 3.56 可觀察到在不同觀測時間下，各溫度區間之直行速率均大於轉彎速率，且直行速率和轉彎速率皆隨時間上升而逐漸降低。

圖 3.57 為浮游生物於熱端 30°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間轉彎機率隨時間之變化，浮游生物之轉彎機率於大部分觀測時間下會隨溫度增加而上升，其中 24.6°C 至 25.9°C 區間的轉彎機率會大於其餘兩個溫度區間。根據浮游生物於此溫度條件下所顯現之族群密度分布，可得知浮游生物傾向往較為高溫的 25.3°C 與 25.9°C 區間



聚集，而兩溫度區間亦具備較高之轉彎機率，由此可推論浮游生物會為了停留在偏好的溫度區間而提高自身的轉彎比例。比較不同溫度區間的轉彎機率變化，可發現浮游生物之轉彎機率會隨時間上升而增加，而對照平均游動速率隨時間之變化，可得知浮游生物之游動速率會隨時間拉長而降低，因此可推論浮游生物的轉彎機率會對其平均游動速率有所影響，轉彎機率之提升將導致游動速率之下降。

圖 3.58 為浮游生物在熱端 30°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間游動軌跡，區間溫度由左至右依序為 25.9°C、25.3°C、24.6°C、23.9°C 與 23.3°C。在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘，可觀察到分布於高溫區間之浮游生物其瞬時游動速率主要介在 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 與 $300 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上，而低溫區間之瞬時游動速率分布則以 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 和 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下為主，在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘，五個溫度區間之瞬時游動速率分布便趨於相同，彼此之間無明顯的差異。觀察同一溫度區間內的瞬時游動速率變化，可發現多數浮游生物之瞬時游動速率會隨觀測時間從 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 以上逐漸降低至 $180 \mu\text{m s}^{-1}$ 以下。經由以上觀察結果，可得知瞬時游動速率隨溫度與時間之變化吻合平均游動速率之分布趨勢。

3.4.3 浮游生物游動速度與游泳角度之機率質量分布

浮游生物於熱端 30°C、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間游動速率之機率質量函數如圖 3.59 所示。在觀測時間 0 分鐘至 5 分鐘，23.3°C 至 25.9°C 區間之游動速率峰值均落在 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 處，其中 24.6°C 至 25.9°C 區間於速率區間 $200 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $280 \mu\text{m s}^{-1}$ 之 PMF 大於 23.3°C 與 23.9°C 區間，相較於低溫區間的游動速率 PMF 分布，高溫區間之 PMF 則明顯偏向高速率區間；在觀測時間 10 分鐘至 30 分鐘，五個溫度區間之游動速率 PMF 分布會趨於一致。從圖 3.59 可發現隨著時間增加，各溫度



區間之 PMF 分布會逐漸往低速率區間偏移，當觀測時間為 0 分鐘時，五個溫度區間之 PMF 峰值位於 $160 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $240 \mu\text{m s}^{-1}$ 處，而當觀測時間上升至 30 分鐘時，各溫度區間之 PMF 峰值所對應的速率區間則下降到 $80 \mu\text{m s}^{-1}$ 至 $120 \mu\text{m s}^{-1}$ 。由不同溫度區間之速率 PMF 分布與其隨時間之變化，可得知浮游生物之游動速率在觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘會伴隨溫度一同上升，而在觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘則無明顯隨溫度改變之趨勢，且不同溫度區間之游動速率均會隨時間推移而下降。

圖 3.60 為浮游生物於熱端 30°C 、冷端 20°C 條件下之不同溫度區間游泳角度之機率質量函數，當觀測時間為 0 分鐘至 10 分鐘時，浮游生物於各溫度區間之游泳角度具備明顯的方向性；當觀測時間上升至 15 分鐘以後，各溫度區間之游泳角度分布便漸趨均勻，最終呈一圓形狀分布。觀察 23.3°C 至 24.6°C 區間之游泳角度分布，可發現在觀測時間為 0 分鐘時浮游生物即明顯表現出往左側游動之趨勢，其中左半部方位角 90° 至 270° 之 PMF 趨近於 0.025，而右半側方位角 270° 至 360° 與 0° 至 90° 之 PMF 則貼近 0.01；在觀測時間增加為 5 分鐘至 10 分鐘時，三個溫度區間之游泳角度分布變得較為隨機，且沒有一致的方向性。對照 3.4.1 節的族群密度分布，可知浮游生物會集中於 25.3°C 與 25.9°C 區間，而位於 23.3°C 至 24.6°C 區間之浮游生物在觀測時間為 0 分鐘時表現出主動往高溫區間移動之行為。

第四章 結論與建議



本研究利用溫控平台在微流元件內創造一維溫度梯度場，藉由觀察不同溫度區間的浮游生物族群密度、游動速率、轉彎機率以及游泳角度隨時間之變化，探討不同溫度梯度和環境溫度對 *Tetraselmis* sp. 的聚集情形與運動行為之影響。茲將實驗結果與後續建議分述如下。

4.1 結論

1. 當冷熱端溫差為 25°C 時，在熱端 35°C、冷端 10°C，即溫度梯度 1.28 °C mm⁻¹ 之條件下，浮游生物會聚集至 22.1°C、23.6°C 及 25°C 區間，於總觀測時間 30 分鐘內其族群密度分別提高 61.5%、57.3% 和 41%。
2. 當冷熱端溫差同為 20°C 時，在熱端 35°C、冷端 15°C，即溫度梯度 1.06 °C mm⁻¹ 之條件下，浮游生物會集中至 24.2°C 和 25.4°C 區間，其族群密度於總觀測時間 30 分鐘內各別提升 22.7% 與 23.3%；而在熱端 30°C、冷端 10°C，即溫度梯度 1.21 °C mm⁻¹ 之條件下，浮游生物則明顯往 20.6°C 與 21.9°C 區間聚集，其族群密度一共增加 36.7% 和 36.5%，並且遠離 16.6°C 和 17.9°C 區間，其族群密度分別下降 26.6% 和 17.2%。
3. 當冷熱端溫差為同為 15°C 時，在熱端 35°C、冷端 20°C，即溫度梯度 0.83 °C mm⁻¹ 之條件下，浮游生物會聚集至 26.2°C、28°C 及 29°C 區間，於總觀測時間 30 分鐘後其族群密度各自上升 10.6%、6.7% 及 2.7%；而在熱端 30°C、冷端 15°C，即溫度梯度 0.83 °C mm⁻¹ 之條件下，浮游生物則會往 23.3°C 與 24.3°C 區間集中，其族群密度總共增加 43% 和 42.1%。
4. 當冷熱端溫差為 10°C 時，在熱端 30°C、冷端 20°C，即溫度梯度 0.6 °C mm⁻¹ 之條



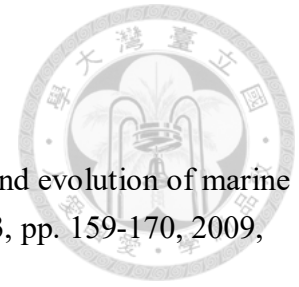
- 件下，浮游生物會傾向聚集至 25.3°C 和 25.9°C 區間，其族群密度於總觀測時間 30 分鐘內分別上升 93.8% 與 111%。
5. 在不同冷熱端溫差之下，於觀測時間 0 分鐘至 10 分鐘時，浮游生物之平均游動速率隨溫度增加的趨勢較為明顯，其中最高溫區間之平均游動速率較最低溫區間增加 5.7% 到 30.2% 不等；於觀測時間 15 分鐘至 30 分鐘時，其平均游動速率隨溫度之分布則漸趨平緩，代表游動速率受溫度的影響將隨時間增加而逐漸減緩。此外，不同溫度區間之浮游生物平均游動速率皆隨時間上升而逐步降低，代表浮游生物在長時間的觀測過程中會漸漸降低活動力。
 6. 在不同冷熱端溫差之下，浮游生物於不同溫度區間之直行速率均大於轉彎速率，其中直行速率相較於轉彎速率增快 14.1% 至 51.3%，代表浮游生物行直線運動之游動速率較進行轉彎時快。另外，浮游生物的直行速率與轉彎速率均會隨時間增加而下降。
 7. 除了熱端 30°C、冷端 10°C，即溫度梯度 $1.21\text{ }^{\circ}\text{C mm}^{-1}$ 之條件以外，在其餘五個溫度條件下，轉彎機率較大的溫度區間會和族群密度增加最為顯著的溫度區間重合，代表當浮游生物處於偏好的溫度區間時，便會提高自身的轉彎機率以延長停留於該溫度區間的時間。此外，在不同冷熱端溫差之下，浮游生物於不同溫度區間之轉彎機率均會隨時間增加而逐漸上升。
 8. 在熱端 35°C、冷端 10°C，熱端 30°C、冷端 15°C 以及熱端 30°C、冷端 20°C 之條件下，浮游生物於特定觀測時間的游泳角度有明顯表現出往偏好溫度區間移動之趨勢。



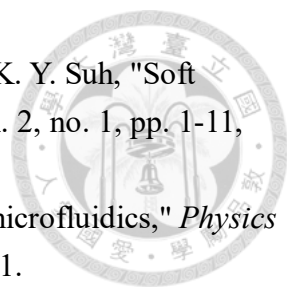
4.2 建議

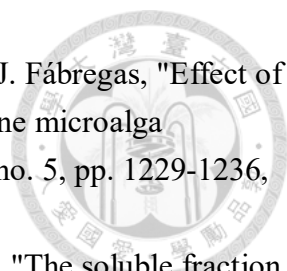
1. 本實驗所選用之浮游生物 *Tetraselmis* sp. 容易附著於微流道壁面而停止移動，導致無法長時間觀察其游動行為，建議後續可更換不同種類的浮游生物來進行研究。
2. 微流元件中的通道和微流道距離相近，在擺放熱電偶時須緩慢將其放入通道內，以避免損壞微流道結構，而造成空氣流入至微流道內。
3. 浮游生物的成長階段與活動力會隨培養時間而改變，進行實驗時應盡量挑選培養天數固定的浮游生物與維持同樣的操作時間，以降低實驗變因。
4. 實驗操作結束後，須使用酒精清洗流道，以防止浮游生物殘留於流道內而影響下次實驗的觀測。
5. 本實驗目前使用熱電偶來量測流道內的流體溫度，建議後續可添加溫度感測的螢光染劑至流道中，並藉由螢光強度之變化來推測流體的溫度分布。
6. 影像的拍攝品質與分析軟體的參數設定皆會影響實驗的數據分析，建議往後可持續優化影像品質和調整相關參數，以提高數據的精確性。

參考文獻



- [1] N. Simon, A. L. Cras, E. Foulon, and R. Lemee, "Diversity and evolution of marine phytoplankton," *Comptes Rendus Biologies*, vol. 332, no. 2-3, pp. 159-170, 2009, doi: 10.1016/j.crv.2008.09.009.
- [2] F. Not, R. Siano, W. H. C. F. Kooistra, N. Simon, D. Vaultot, and I. Probert, "Diversity and ecology of eukaryotic marine phytoplankton," in *Advances in Botanical Research*, vol. 64, G. Piganeau, Ed. Cambridge: Academic Press, 2012, pp. 1-53.
- [3] P. G. Falkowski, "The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles," *Photosynthesis Research*, vol. 39, no. 3, pp. 235-258, 1994, doi: 10.1007/BF00014586.
- [4] P. Falkowski, "Ocean science: the power of plankton," *Nature*, vol. 483, no. 7387, pp. S17-S20, 2012, doi: 10.1038/483S17a.
- [5] R. C. Dewar, B. E. Medlyn, and R. E. Mcmurtrie, "Acclimation of the respiration/photosynthesis ratio to temperature: insights from a model," *Global Change Biology*, vol. 5, no. 5, pp. 615-622, 1999, doi: 10.1046/j.1365-2486.1999.00253.x.
- [6] M. M. Tilzer, m. Elbrächter, W. W. Gieskes, and B. Beese, "Light-temperature interactions in the control of photosynthesis in Antarctic phytoplankton," *Polar Biology*, vol. 5, no. 2, pp. 105-111, 1986, doi: 10.1007/BF00443382.
- [7] M. Winder and U. Sommer, "Phytoplankton response to a changing climate," *Hydrobiologia*, vol. 698, no. 1, pp. 5-16, 2012, doi: 10.1007/s10750-012-1149-2.
- [8] P. A. Garrity, M. B. Goodman, A. D. Samuel, and P. Sengupta, "Running hot and cold: behavioral strategies, neural circuits, and the molecular machinery for thermotaxis in *C. elegans* and *Drosophila*," *Genes & development*, vol. 24, no. 21, pp. 2365-2382, 2010, doi: 10.1101/gad.1953710.
- [9] A. Bahat, I. Tur-Kaspa, A. Gakamsky, L. C. Giojalas, H. Breitbart, and M. Eisenbach, "Thermotaxis of mammalian sperm cells: a potential navigation mechanism in the female genital tract," *Nature Medicine*, vol. 9, no. 2, pp. 149-150, 2003, doi: 10.1038/nm0203-149.
- [10] M. Sekiguchi, S. Kameda, S. Kurosawa, M. Yoshida, and K. Yoshimura, "Thermotaxis in *Chlamydomonas* is brought about by membrane excitation and controlled by redox conditions," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 2018, Art. no. 16114, doi: 10.1038/s41598-018-34487-4.
- [11] G. M. Whitesides, "The origins and the future of microfluidics," *Nature*, vol. 442, no. 7101, pp. 368-373, 2006, doi: 10.1038/nature05058.

- 
- [12] P. Kim, K. W. Kwon, M. C. Park, S. H. Lee, S. M. Kim, and K. Y. Suh, "Soft lithography for microfluidics: a review," *Biochip Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 1-11, 2008.
 - [13] G. M. Whitesides and A. D. Stroock, "Flexible methods for microfluidics," *Physics Today*, vol. 54, no. 6, pp. 42-48, 2001, doi: 10.1063/1.1387591.
 - [14] A. K. Wessel, L. Hmelo, M. R. Parsek, and M. Whiteley, "Going local: technologies for exploring bacterial microenvironments," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 11, no. 5, pp. 337-348, 2013, doi: 10.1038/nrmicro3010.
 - [15] D. B. Weibel, W. R. DiLuzio, and G. M. Whitesides, "Microfabrication meets microbiology," *Nature Reviews Microbiology*, vol. 5, no. 3, pp. 209-218, 2007, doi: 10.1038/nrmicro1616.
 - [16] R. K. Goswami, K. Agrawal, S. Mehariya, and P. Verma, "Current perspective on wastewater treatment using photobioreactor for *Tetraselmis* sp.: an emerging and foreseeable sustainable approach," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 41, pp. 61905-61937, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-16860-5.
 - [17] M. Arora, "Tetraselmis: an introduction," *The Botanica*, vol. 66, pp. 155-175, 2016.
 - [18] R. E. Norris, T. Hori, and M. Chihara, "Revision of the genus *Tetraselmis* (Class Prasinophyceae)," *The botanical magazine*, vol. 93, no. 4, pp. 317-339, 1980, doi: 10.1007/BF02488737.
 - [19] J. L. Salisbury and G. L. Floyd, "Calcium-induced contraction of the rhizoplast of a quadriflagellate green alga," *Science*, vol. 202, no. 4371, pp. 975-977, 1978, doi: 10.1126/science.202.4371.975.
 - [20] D. G. Sirico, E. Cavalletti, L. Miccio, V. Bianco, P. Memmolo, A. Sardo, and P. Ferraro, "Kinematic analysis and visualization of *Tetraselmis* microalgae 3D motility by digital holography," *Applied Optics*, vol. 61, no. 5, pp. B331-B338, 2022, doi: 10.1364/ao.444976.
 - [21] R. W. Butcher, "Introduction and Chlorophyceae," in *An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters*. London: Her Majesty's Stationery Office, 1959, pp. 1-74.
 - [22] J. Fabregas, J. Abalde, C. Herrero, B. Cabezas, and M. Veiga, "Growth of the marine microalga *Tetraselmis suecica* in batch cultures with different salinities and nutrient concentrations," *Aquaculture*, vol. 42, no. 3, pp. 207-215, 1984, doi: 10.1016/0044-8486(84)90101-7.
 - [23] M. Arora, A. C. Anil, F. Leliaert, J. Delany, and E. Mesbahi, "*Tetraselmis indica* (Chlorodendrophyceae, Chlorophyta), a new species isolated from salt pans in Goa, India," *European Journal of Phycology*, vol. 48, no. 1, pp. 61-78, 2013, doi: 10.1080/09670262.2013.768357.

- 
- [24] G. Ulloa, A. Otero, M. Sánchez, J. Sineiro, M. J. Núñez, and J. Fábregas, "Effect of Mg, Si, and Sr on growth and antioxidant activity of the marine microalga *Tetraselmis suecica*," *Journal of Applied Phycology*, vol. 24, no. 5, pp. 1229-1236, 2012, doi: 10.1007/s10811-011-9764-2.
- [25] J. Fábregas, E. Morales, D. García, B. Cabezas, and A. Otero, "The soluble fraction of *Solanum tuberosum* enhances growth and pigmentation of the microalga *Tetraselmis suecica* under photoheterotrophic conditions," *Bioresource Technology*, vol. 59, no. 2, pp. 263-266, 1997, doi: 10.1016/S0960-8524(96)00141-1.
- [26] M. A. González, P. A. Aguayo, I. D. L. Inostroza, P. A. Castro, G. A. Fuentes, and P. I. Gómez, "Ultrastructural and molecular characterization of *Tetraselmis* strains (Chlorodendrophyceae, Chlorophyta) isolated from Chile," *Gayana. Botánica*, vol. 72, no. 1, pp. 47-57, 2015, doi: 10.4067/S0717-66432015000100007.
- [27] P. Coutteau, "Micro-algae," in *Manual on the production and use of live food for aquaculture*, P. Lavens and P. Sorgeloos, Eds. Rome: FAO, 1996, pp. 7-48.
- [28] H. Pereira, J. Silva, T. Santos, K. N. Gangadhar, A. Raposo, C. Nunes, M. A. Coimbra, L. Gouveia, L. Barreira, and J. Varela, "Nutritional potential and toxicological evaluation of *Tetraselmis* sp. CTP4 microalgal biomass produced in industrial photobioreactors," *Molecules*, vol. 24, no. 17, 2019, doi: 10.3390/molecules24173192.
- [29] R. Fu, B. Xu, and D. Li, "Study of the temperature field in microchannels of a PDMS chip with embedded local heater using temperature-dependent fluorescent dye," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, no. 9, pp. 841-847, 2006, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.11.009.
- [30] H. Salman, A. Zilman, C. Loverdo, M. Jeffroy, and A. Libchaber, "Solitary modes of bacterial culture in a temperature gradient," *Physical Review Letters*, vol. 97, no. 11, 2006, Art. no. 118101, doi: 10.1103/PhysRevLett.97.118101.
- [31] M. Demir, C. Douarche, A. Yoney, A. Libchaber, and H. Salman, "Effects of population density and chemical environment on the behavior of *Escherichia coli* in shallow temperature gradients," *Physical biology*, vol. 8, no. 6, 2011, Art. no. 063001, doi: 10.1088/1478-3975/8/6/063001.
- [32] M. Demir and H. Salman, "Bacterial thermotaxis by speed modulation," *Biophysical Journal*, vol. 103, no. 8, pp. 1683-1690, 2012, doi: 10.1016/j.bpj.2012.09.005.
- [33] M. R. Clegg, S. C. Maberly, and R. I. Jones, "Behavioural responses of freshwater phytoplanktonic flagellates to a temperature gradient," *European Journal of Phycology*, vol. 38, no. 3, pp. 195-203, 2003, doi: 10.1080/0967026031000121697.
- [34] S. G. Menon and P. C. Goswami, "A redox cycle within the cell cycle: ring in the

- old with the new," *Oncogene*, vol. 26, no. 8, pp. 1101-1109, 2007, doi: 10.1038/sj.onc.1209895.
- [35] S. Saito, G. Hamanaka, N. Kawai, R. Furukawa, J. Gojobori, M. Tominaga, H. Kaneko, and Y. Satta, "Characterization of TRPA channels in the starfish *Patiria pectinifera*: involvement of thermally activated TRPA1 in thermotaxis in marine planktonic larvae," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, 2017, Art. no. 2173, doi: 10.1038/s41598-017-02171-8.
- [36] "f/2 Medium." ncma.bigelow.org.
https://ncma.bigelow.org/PDF%20Files/NCMA%20algal%20medium%20f_2.pdf
 (accessed May. 20, 2023).
- [37] *MATLAB*. (9.10.0 R2021a). The MathWorks Inc. Accessed: May. 29, 2023.
 [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>
- [38] J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise, V. Kaynig, M. Longair, T. Pietzsch, S. Preibisch, C. Rueden, S. Saalfeld, B. Schmid, J.-Y. Tinevez, D. J. White, V. Hartenstein, K. Eliceiri, P. Tomancak, and A. Cardona, "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis," *Nature Methods*, vol. 9, no. 7, pp. 676-682, 2012, doi: 10.1038/nmeth.2019.
- [39] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, 1979, doi: 10.1109/tsmc.1979.4310076.
- [40] D. Ershov, M.-S. Phan, J. W. Pylvänäinen, S. U. Rigaud, L. Le Blanc, A. Charles-Orszag, J. R. W. Conway, R. F. Laine, N. H. Roy, D. Bonazzi, G. Duménil, G. Jacquemet, and J.-Y. Tinevez, "TrackMate 7: integrating state-of-the-art segmentation algorithms into tracking pipelines," *Nature Methods*, vol. 19, no. 7, pp. 829-832, 2022, doi: 10.1038/s41592-022-01507-1.
- [41] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004, doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- [42] "Particle analysis." imagej.net. <https://imagej.net/imaging/particle-analysis>
 (accessed Mar.13, 2023).
- [43] "Thermocouple types." omega.com. <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-types> (accessed Mar. 18, 2023).

附表

表 2.1 PDMS 製程參數

step	setup	value
mixing	silicone resin, PDMS-A (g)	88
	curing agent, PDMS-B (g)	11
vacuum	operating pressure (mm Hg)	630
	operating time (min)	30
curing	heating temperature (°C)	85
	heating time (hr)	2
ultrasonic cleaning	cleaning power (W)	110
	degassing time (min)	5
	cleaning time (min)	15
plasma cleaning	cleaning power (W)	45
	cleaning time (min)	3
bonding	bonding temperature (°C)	85
	bonding time (hr)	2

表 2.2 加熱塊與冷卻塊設定溫度

temperature difference, ΔT_{hc} (°C)	temperature of hot block, T_h (°C)	temperature of cold block, T_c (°C)	temperature gradient, ∇T (°C mm ⁻¹)
25	35	10	1.28
20	35	15	1.06
	30	10	1.21
15	35	20	0.83
	30	15	0.83
10	30	20	0.6

表 3.1 熱端 35°C、冷端 10°C 之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差

(a) mean planktonic speed, $|V_p|_{avg}$ ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
26.4°C	78.1	80.8	68.3	63.8	59.1	59.2	54.8
25°C	83.8	76	84.9	73.9	69.1	68	61.5
23.6°C	71.8	70	66.5	67.4	61.2	64.5	58.9
22.1°C	59.9	53.4	64.1	64.2	63.3	59.3	54.9
20.7°C	48.7	53.1	52.2	53.9	54.5	49.7	50.4

(b) mean planktonic speed along straight trajectories, u_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
26.4°C	69.5	78.1	60.9	59.9	54.5	54.2	50.5
25°C	76.9	68.8	81.5	67.7	61.7	59.8	54.7
23.6°C	66.8	65	62.8	60	53.9	55.7	52.5
22.1°C	55.7	54.2	59.7	56.4	56.9	54	49.8
20.7°C	46.5	47.8	50.1	50.9	50	47	45.2

(c) mean planktonic speed at turns, u_t ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
26.4°C	92.6	93.2	80.5	71.3	64	67.6	63.3
25°C	95.6	84.9	97.1	76.1	76.6	73.2	70
23.6°C	84.9	86.5	79.2	77	67.9	73.3	68.5
22.1°C	75.9	68.3	77.9	75.7	68.5	69.7	61.1
20.7°C	64.6	68.6	69.1	63.4	69.3	62.1	62

表 3.2 熱端 35°C、冷端 15°C 之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差

(a) mean planktonic speed, $|V_p|_{\text{avg}}$ ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
27.8°C	71.4	72.5	74.8	65	73.1	81.4	83.7
26.6°C	74.2	85.5	78.1	79	70.1	85.3	89.1
25.4°C	68.7	73.3	72.8	84.4	74.4	93.2	67.1
24.2°C	56.3	62.9	71.2	72.1	67	61.2	82.4
23°C	54.6	55.5	66.1	46.5	65.9	62.3	63.3

(b) mean planktonic speed along straight trajectories, u_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
27.8°C	67.5	64.9	69	57.9	67.6	78.4	81.1
26.6°C	68.1	83.2	76.4	76.6	71.9	91	88.4
25.4°C	61.7	68.6	68.3	79	67.4	96.3	65
24.2°C	50.3	57.1	64.4	64	61.5	60.5	76.2
23°C	51.5	50.1	58.8	42.9	63.9	58	57.7

(c) mean planktonic speed at turns, u_t ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
27.8°C	81.3	82.4	87.2	82.1	97.2	79.2	81.2
26.6°C	85.5	89.5	85.8	84.7	65.4	81.9	91.9
25.4°C	79.7	85.6	78.8	88.6	77.4	79	70.9
24.2°C	72.7	79.3	76.6	81.5	75.8	69	88.8
23°C	66.8	72.6	77.6	59.5	71.5	70.3	81.2

表 3.3 熱端 30°C、冷端 10°C 之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差

(a) mean planktonic speed, $|V_p|_{avg}$ ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
21.9°C	58.5	64.6	61.1	58.6	61.4	53.5	52
20.6°C	56.1	58.8	57.9	55.7	57.3	51.4	48.8
19.3°C	51.4	55.2	53.9	57.1	51.4	50.4	46.9
17.9°C	48.8	49.3	51.7	50.1	51.6	49.1	48.8
16.6°C	46.6	47.7	51.1	45.6	44.5	43.3	46

(b) mean planktonic speed along straight trajectories, u_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
21.9°C	56.8	60.5	59.4	55.1	57.9	51.9	51.5
20.6°C	54.7	56	56	52.4	56.2	49.1	48.3
19.3°C	50.6	53.3	52.5	55.9	49	48.6	45.2
17.9°C	48.2	48.6	51.3	48.7	51	49.3	48.9
16.6°C	45.8	46.4	51.4	44.6	45.2	44.2	44.8

(c) mean planktonic speed at turns, u_t ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
21.9°C	69.5	77.6	74.4	74.6	72.7	61.5	58.2
20.6°C	68.2	66.2	70.1	68.3	71.1	61.6	57.3
19.3°C	62.4	66.3	67.3	68.1	65	63.7	56.7
17.9°C	59.5	59.4	61.5	65.7	61.9	59.1	55.8
16.6°C	57.2	57.5	55	55.5	54	49.3	53.7

表 3.4 熱端 35°C、冷端 20°C 之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差

(a) mean planktonic speed, $|V_p|_{avg}$ ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
29°C	60.8	69	61.1	51.3	49.6	51.6	48.9
28°C	65.4	71.2	64.9	60.8	53.7	45.7	46.8
27.1°C	61.5	62	60.4	48	48.3	43.8	43.6
26.2°C	56.8	59.2	60.4	49.4	48.3	47.2	44.6
25.2°C	57.9	60.3	57.8	49.8	47.1	45.1	44.7

(b) mean planktonic speed along straight trajectories, u_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
29°C	57	66	57.5	49.6	48.7	51.2	48.6
28°C	61.2	65.8	62.4	59.7	52	46.2	47.2
27.1°C	59.1	58.2	57.7	45.9	47.6	43.6	43.7
26.2°C	53.8	56.1	58.1	46.8	46.3	46.6	44.5
25.2°C	54.9	59.1	55.3	47	46.4	44.6	45.6

(c) mean planktonic speed at turns, u_t ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
29°C	70.4	78.3	64.1	58.2	57.1	56.3	54
28°C	75.9	83.5	71	65.9	67.5	54.6	54.4
27.1°C	73.2	72.9	71.9	57.7	55.9	53.7	55.3
26.2°C	68.8	72.8	67.3	63.1	61.2	56.9	51.3
25.2°C	65.1	71	80.1	66.5	59.9	55.4	53.6

表 3.5 熱端 30°C、冷端 15°C 之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差

(a) mean planktonic speed, $|\mathbf{V}_p|_{\text{avg}}$ ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
24.3°C	56	57.5	55.2	55.1	51.4	48.1	45.2
23.3°C	54.5	53.1	57	53.8	50.4	48.2	44.3
22.4°C	54.8	53.1	55.3	53.2	54.2	47.2	44.2
21.5°C	49.5	51.9	51	47	47.6	43.9	43.9
20.5°C	47.7	51.6	53.1	48	46.4	45.8	42.6

(b) mean planktonic speed along straight trajectories, u_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
24.3°C	54.4	54.2	52.2	51.7	50.5	47.6	44
23.3°C	52.8	50.7	53.3	51.9	48.1	47.4	43.7
22.4°C	53.1	50.8	51.4	50	52	46.5	43.8
21.5°C	48.4	50.4	47.6	44.8	46.5	43.8	43.7
20.5°C	47	50.6	53	45.7	43.5	45.1	42.3

(c) mean planktonic speed at turns, u_t ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
24.3°C	66.2	71.6	70.7	68.9	62.5	57.9	53.8
23.3°C	67.4	66.4	67.8	66	66.3	57	54.7
22.4°C	65.9	66	69.4	65.6	63.2	57	55.2
21.5°C	64.6	62.4	71	60.7	58.5	57.3	54.4
20.5°C	62.2	63.1	60.6	61.4	59.5	55.3	54.2

表 3.6 熱端 30°C、冷端 20°C 之浮游生物游動速率、直行速率及轉彎速率標準差

(a) mean planktonic speed, $|V_p|_{avg}$ ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
25.9°C	60.2	57.1	48.3	49.3	43.9	41.9	39.4
25.3°C	59	54.8	50	47.8	46.9	41.2	38.7
24.6°C	63.1	51.5	50.7	49	43.5	40.8	39.9
23.9°C	53.1	52.7	48.1	48.5	44.7	41.3	40.5
23.3°C	56.5	51.1	52	45	45	40.5	39.2

(b) mean planktonic speed along straight trajectories, u_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
25.9°C	56.7	55.9	46.1	46.8	43.2	41.3	39.5
25.3°C	54.2	52.3	45.2	45.6	45.4	40.8	38.2
24.6°C	58.9	48.5	48.5	46.2	41.9	39.7	39.2
23.9°C	50.7	49.8	43.7	46.8	43.3	40.4	40
23.3°C	53.8	49.5	48	42.5	43.4	39.1	38.9

(c) mean planktonic speed at turns, u_t ($\mu\text{m s}^{-1}$)

	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
25.9°C	67.7	63.3	59.4	56.3	50.9	47.5	44.9
25.3°C	73.1	63.4	57.2	54.4	52.8	47.5	45.1
24.6°C	73.8	66.9	59.2	58.5	51.5	47.5	46.7
23.9°C	65.1	64.1	61.4	58.2	52.4	50.9	45.3
23.3°C	64.2	60.4	65.2	53.5	52.8	49	44.9

附圖

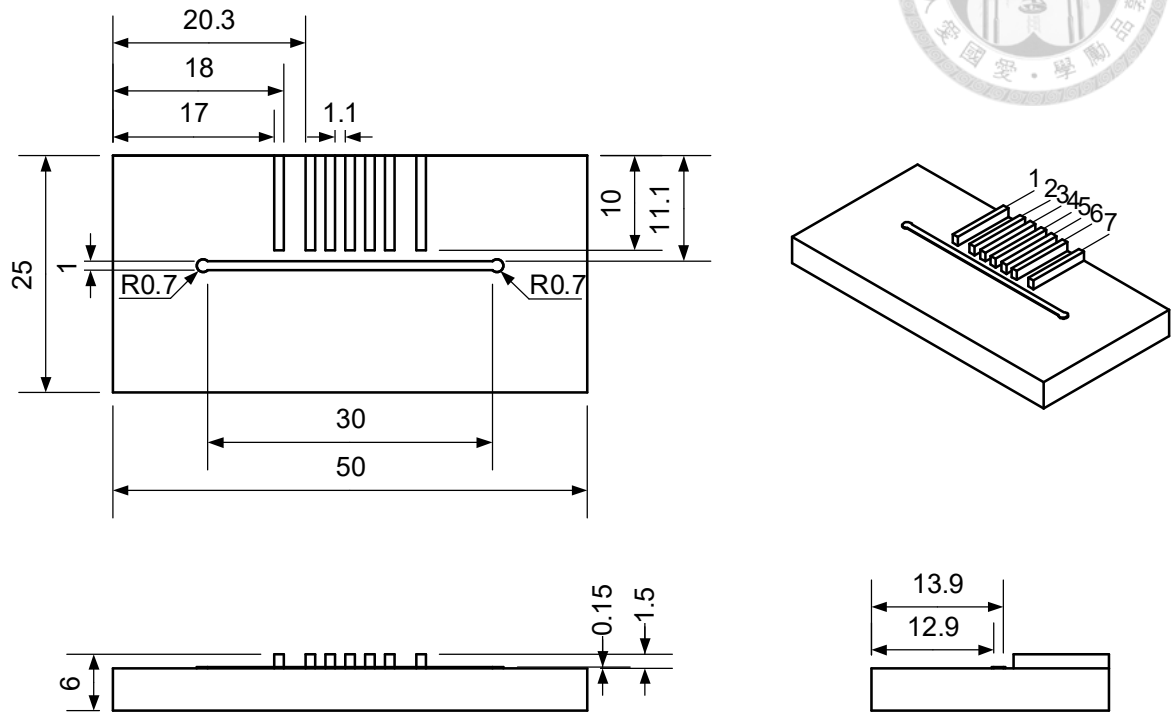


圖 2.1 母模尺寸 (unit: mm)

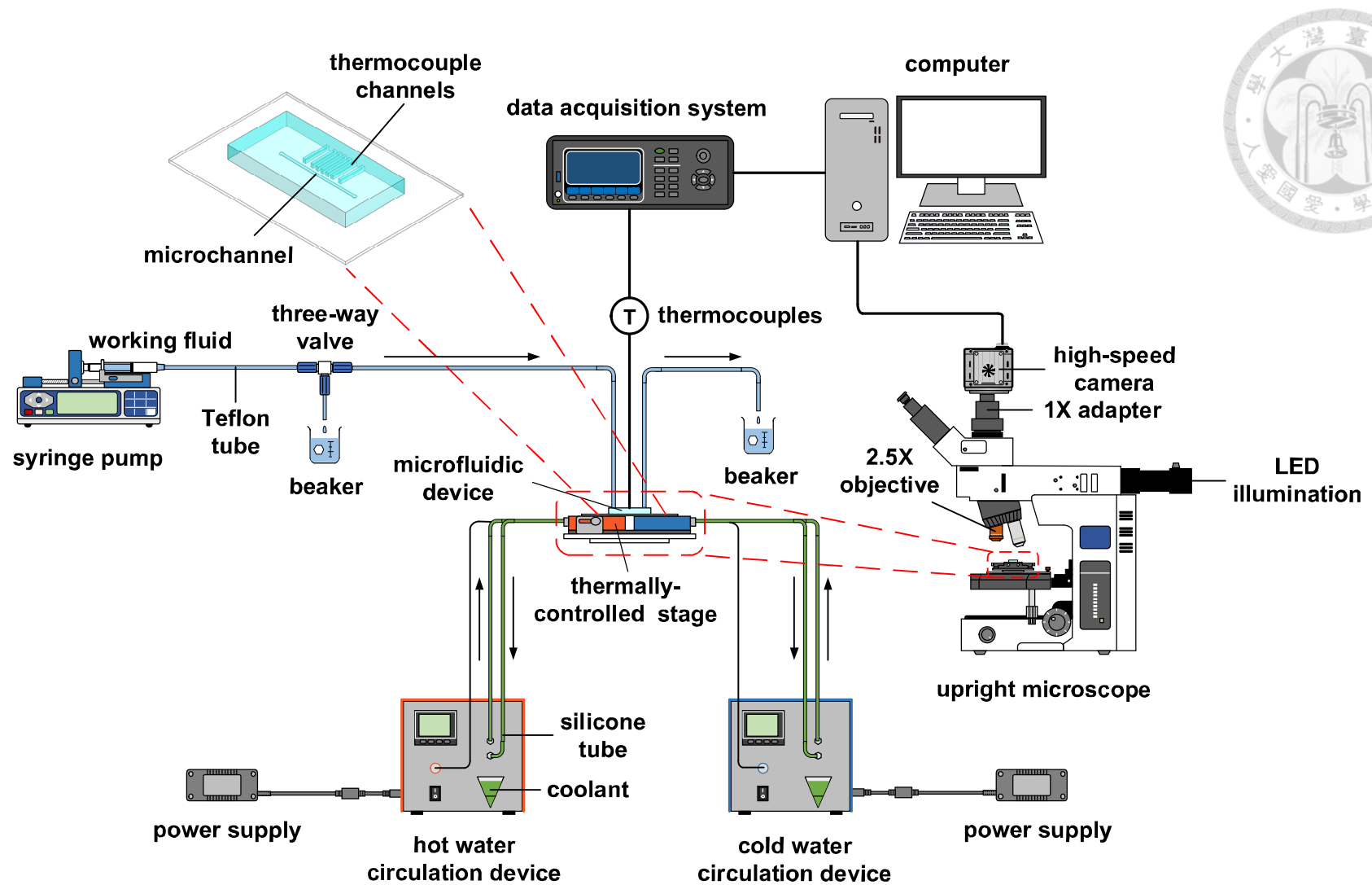
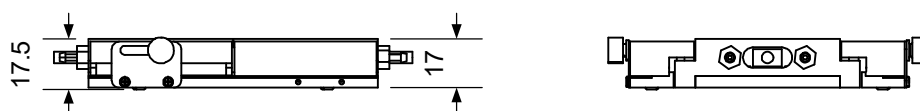
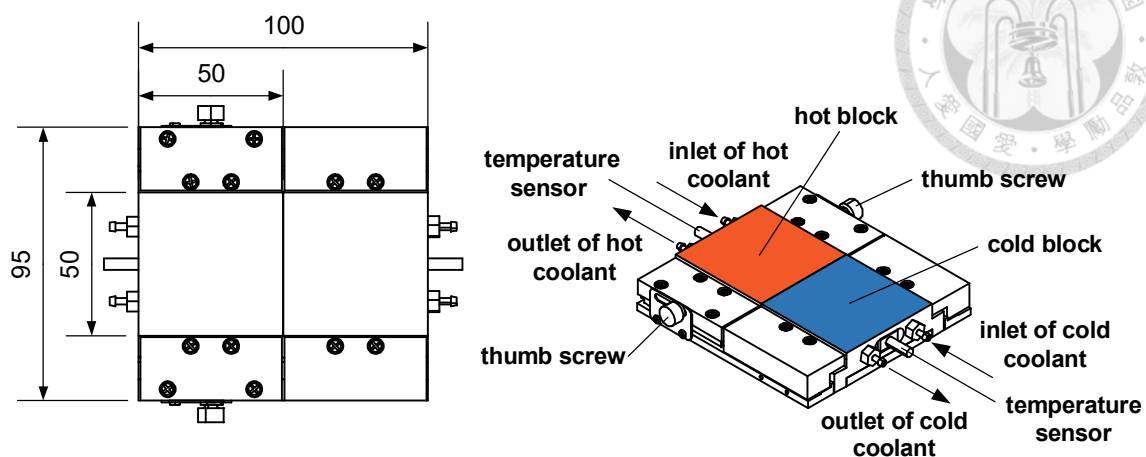
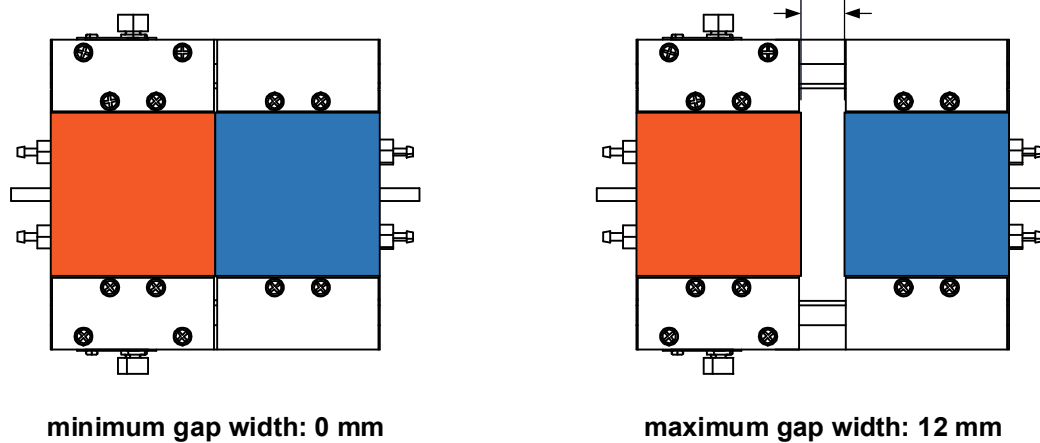


圖 2.2 實驗架構



(a)



(b)

圖 2.3 (a)溫控盤尺寸 (b)溫控盤間隙寬度示意圖 (unit: mm)

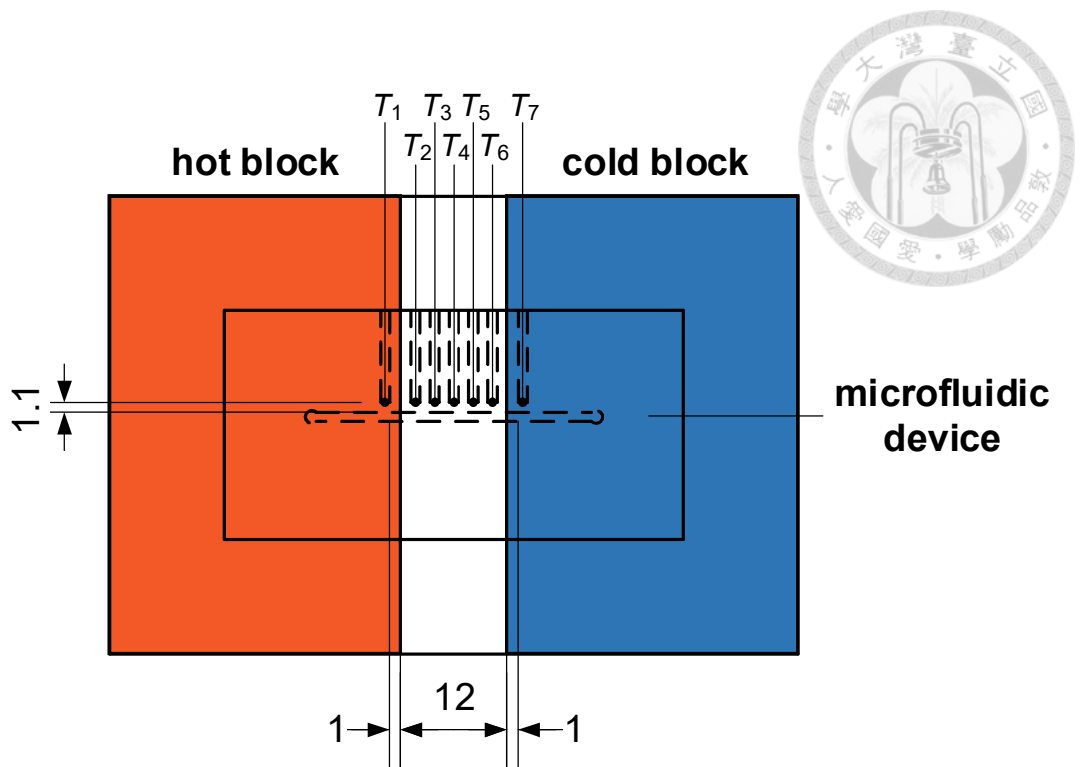


圖 2.4 熱電偶與微流元件擺放位置示意圖 (unit: mm)

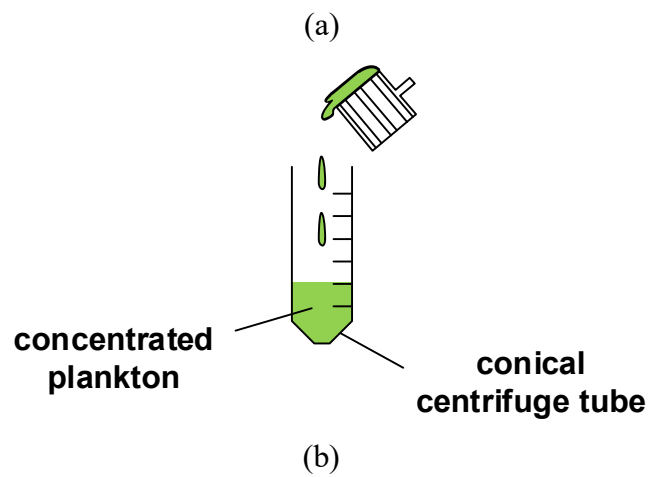
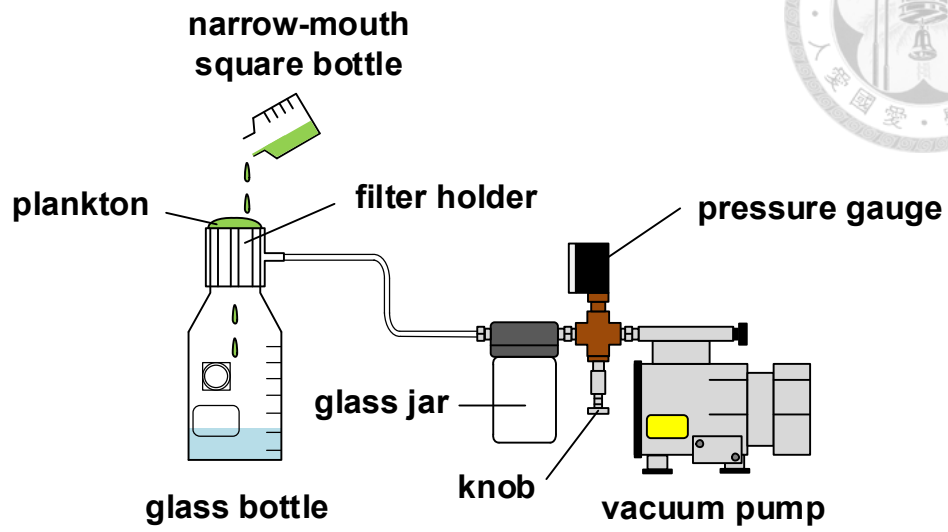


圖 2.5 浮游生物濃縮流程 (a)過濾浮游生物培養液 (b)收集已濃縮之浮游生物培養液

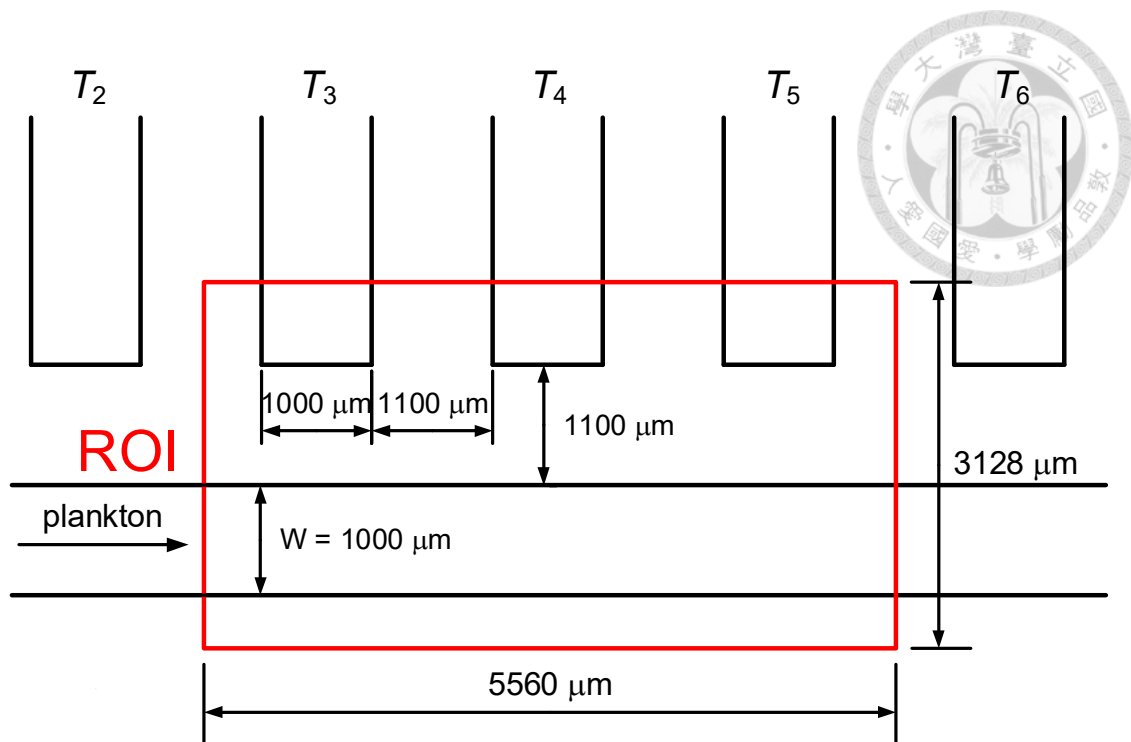


圖 2.6 影像拍攝範圍

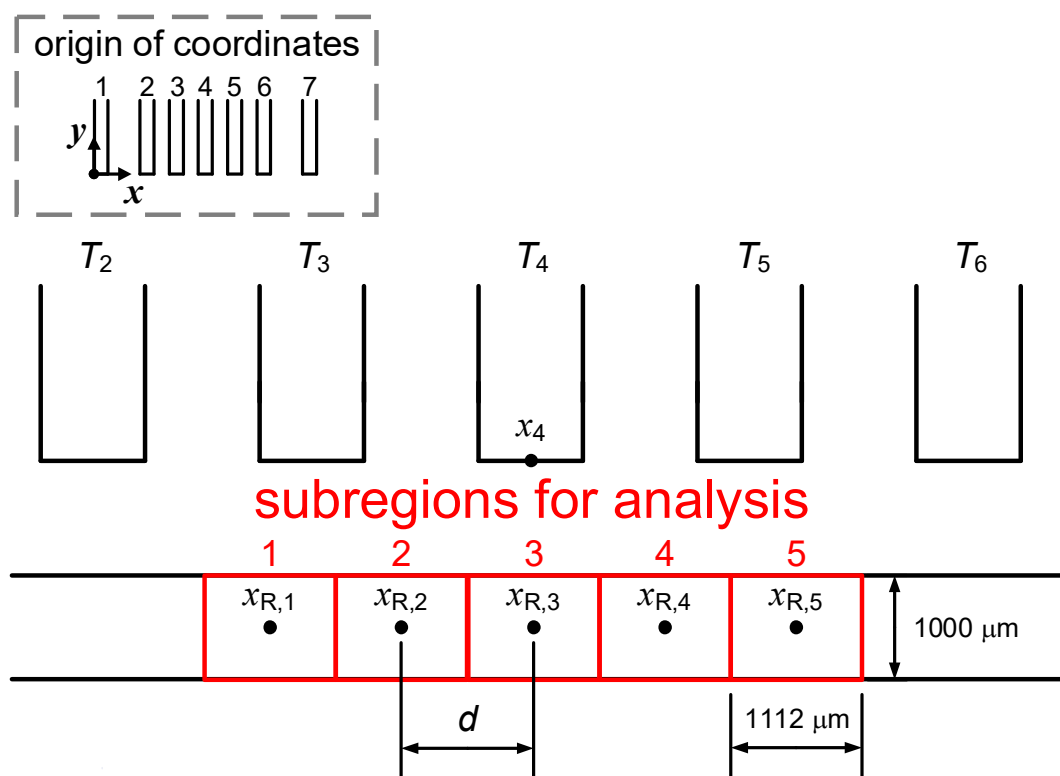


圖 2.7 浮游生物分析區域

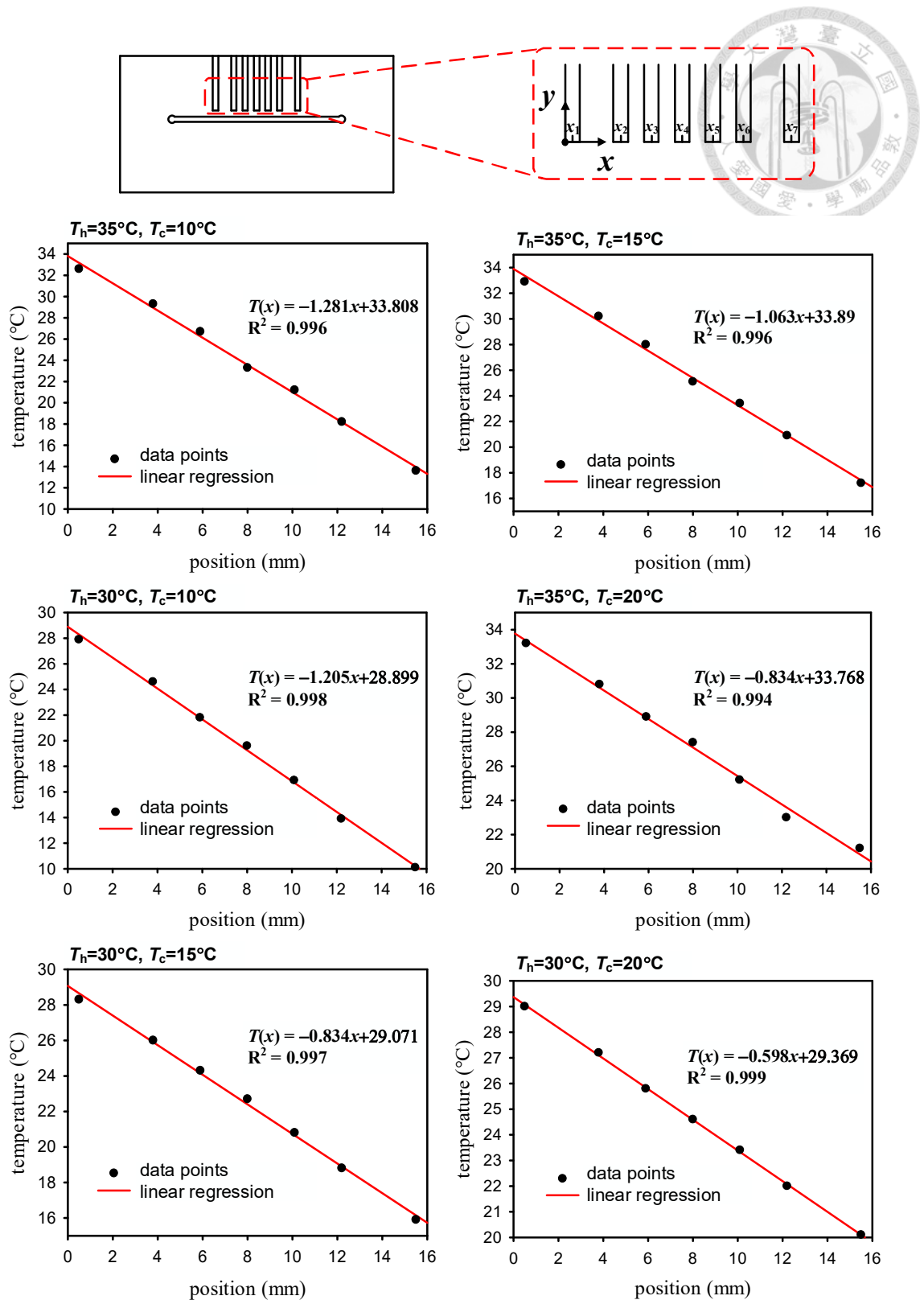


圖 2.8 流體溫度與熱電偶擺放位置之線性擬合圖

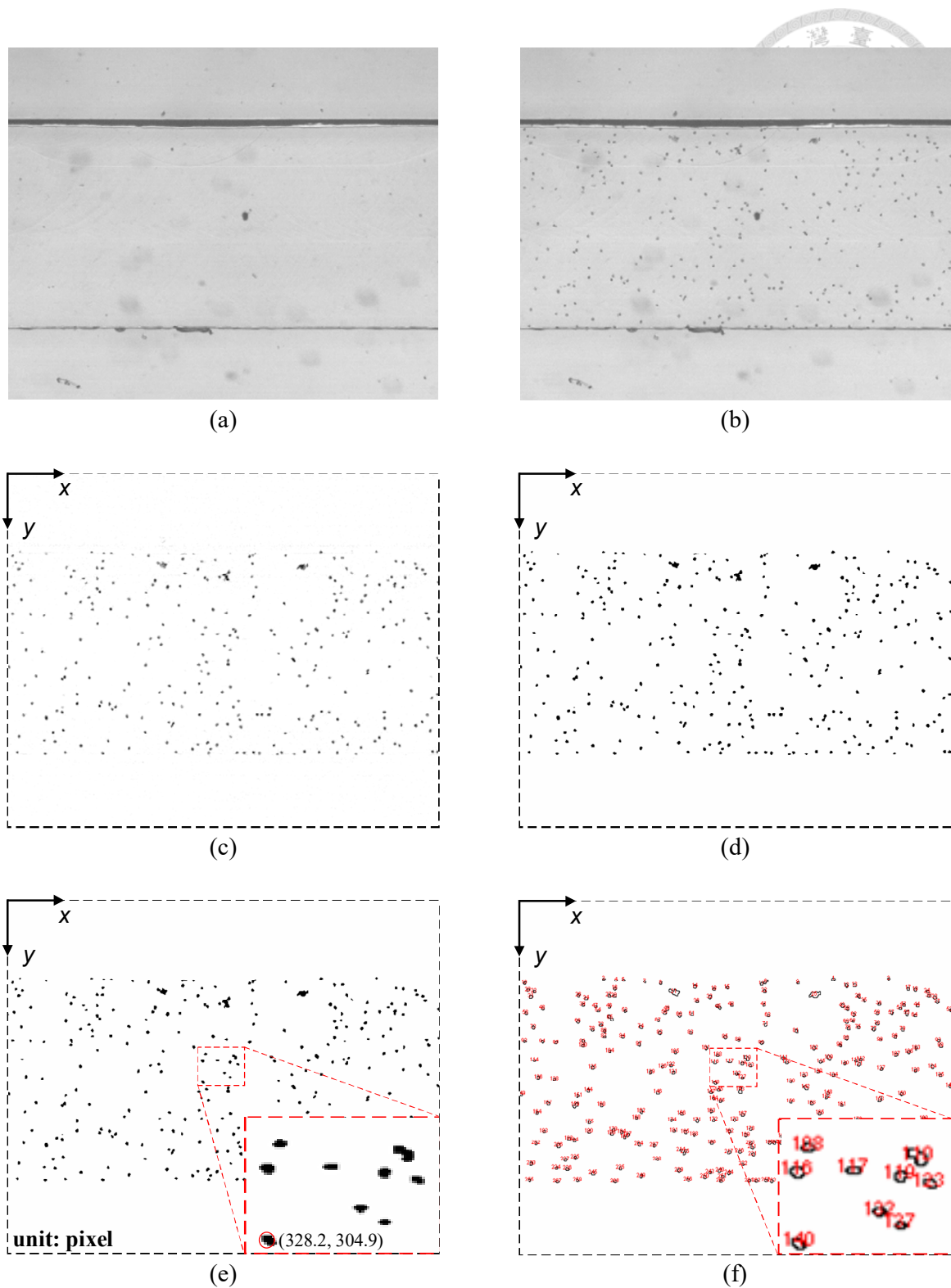


圖 2.9 浮游生物運動軌跡追蹤與計數示意圖 (a)背景影像 (b)含浮游生物之影像 (c)去除背景與正規化之影像 (d)二值化影像 (e)浮游生物軌跡位置 (f)生物個數統計結果

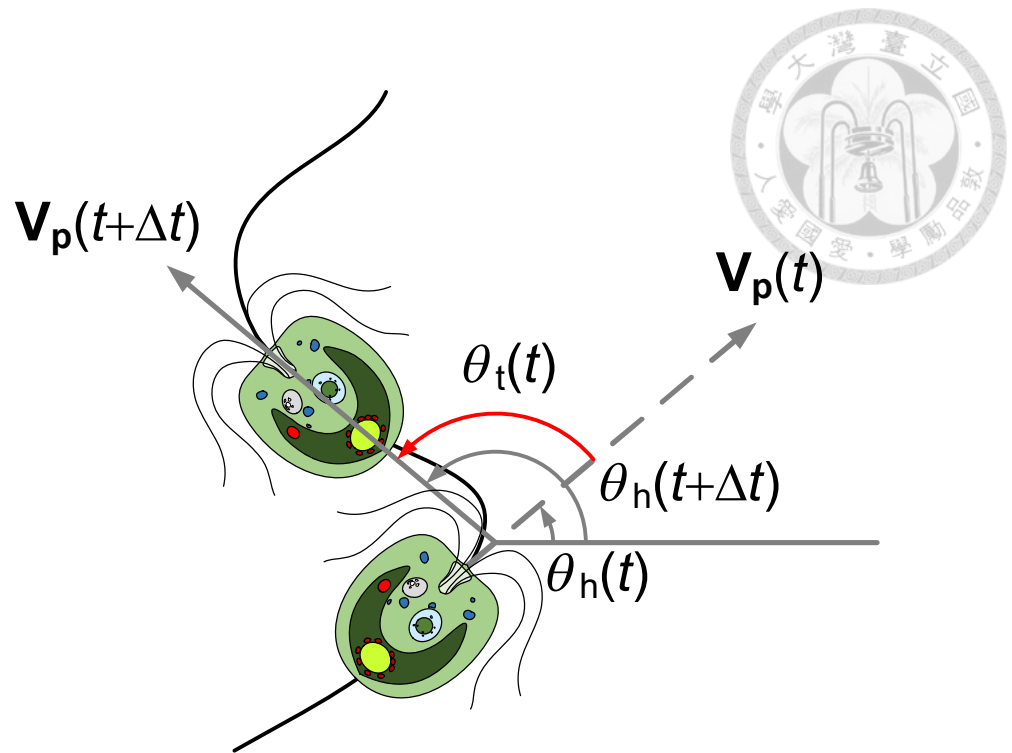


圖 2.10 浮游生物轉彎角度示意圖

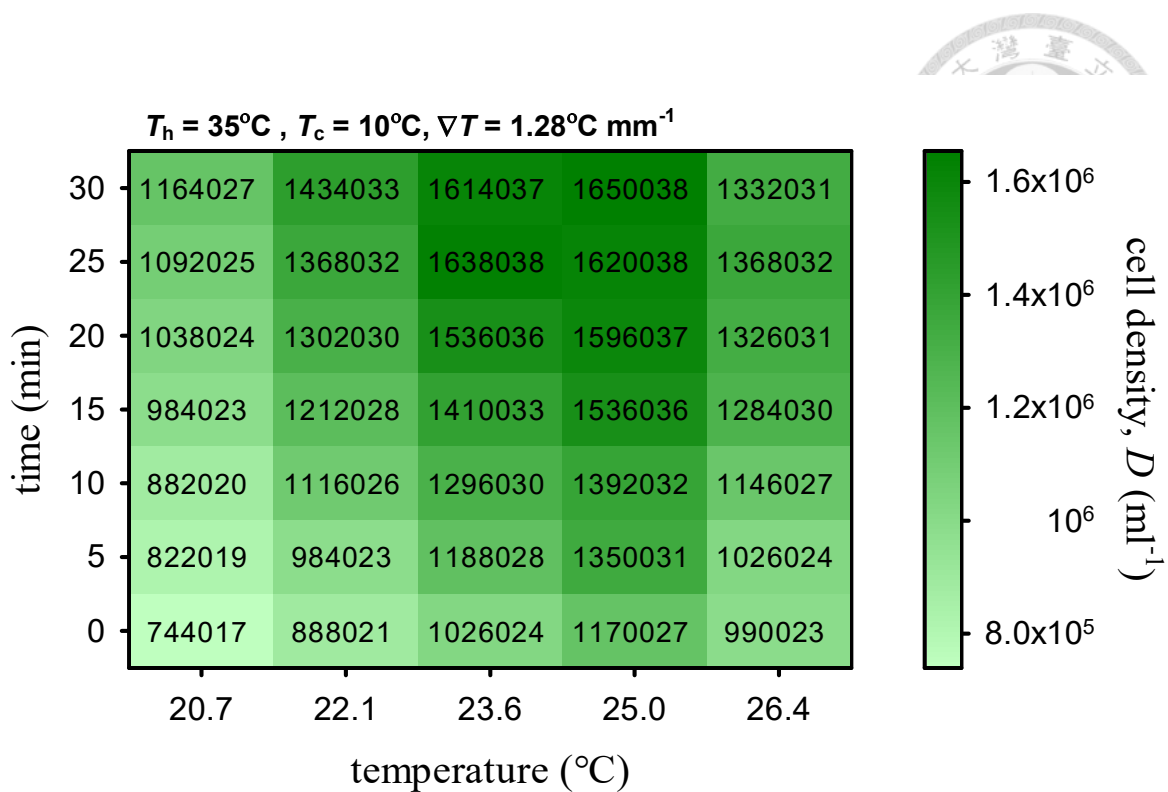


圖 3.1 熱端 35°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化

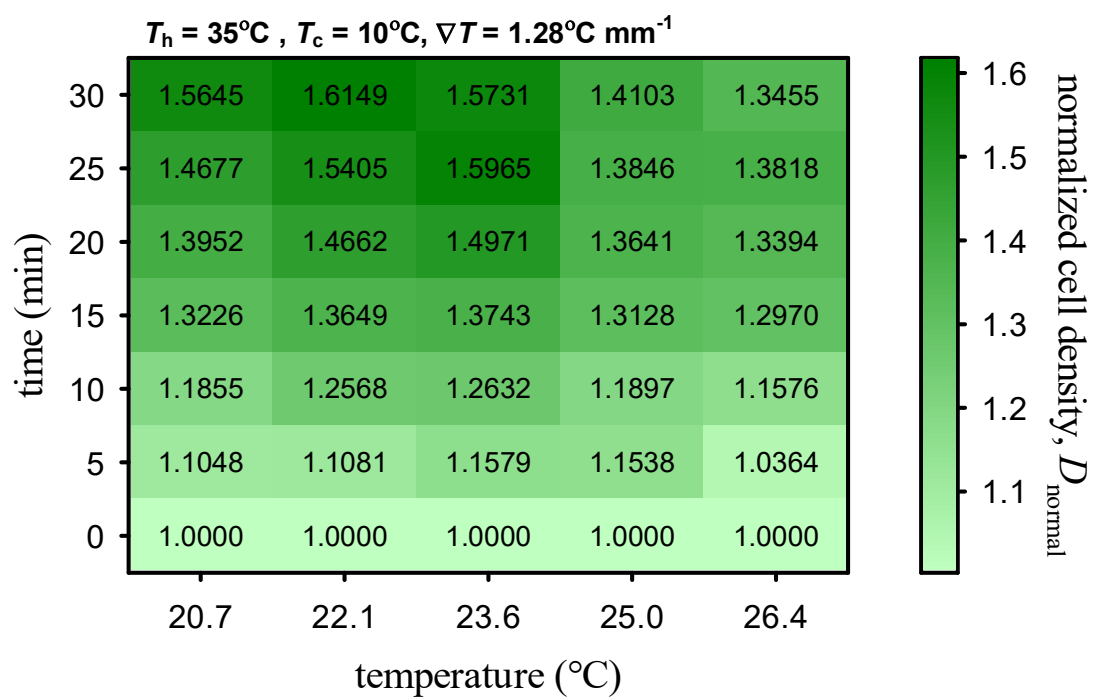


圖 3.2 熱端 35°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化

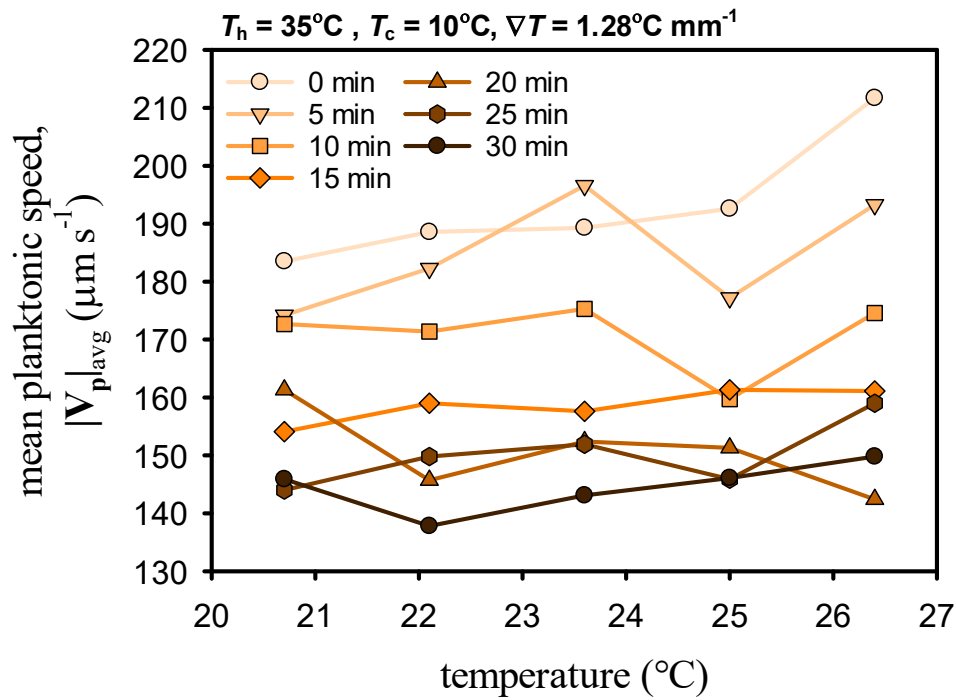


圖 3.3 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較

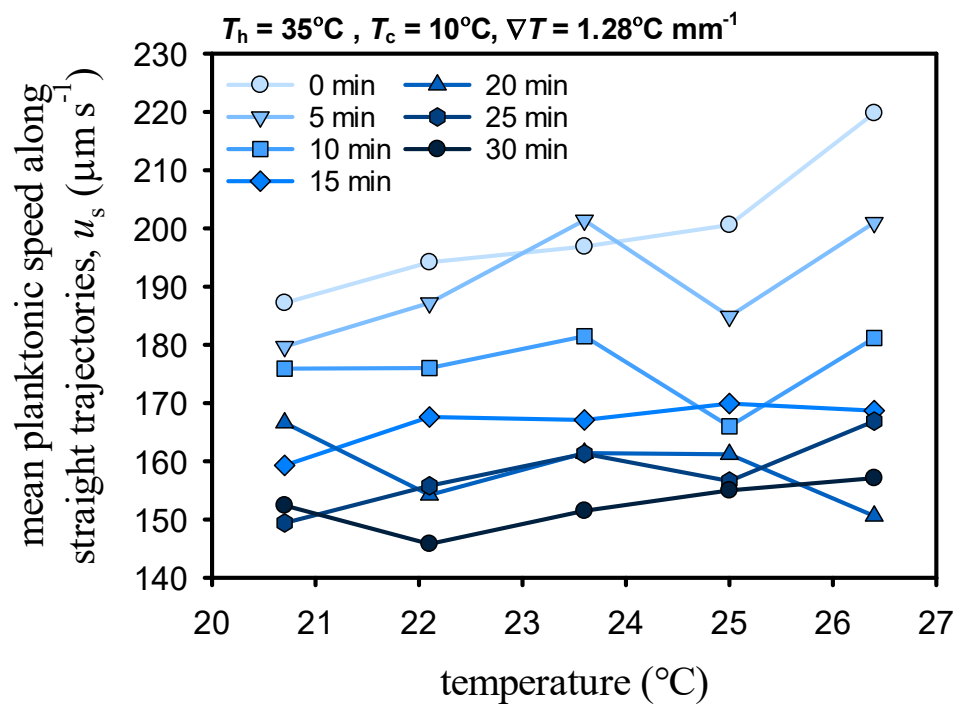


圖 3.4 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較

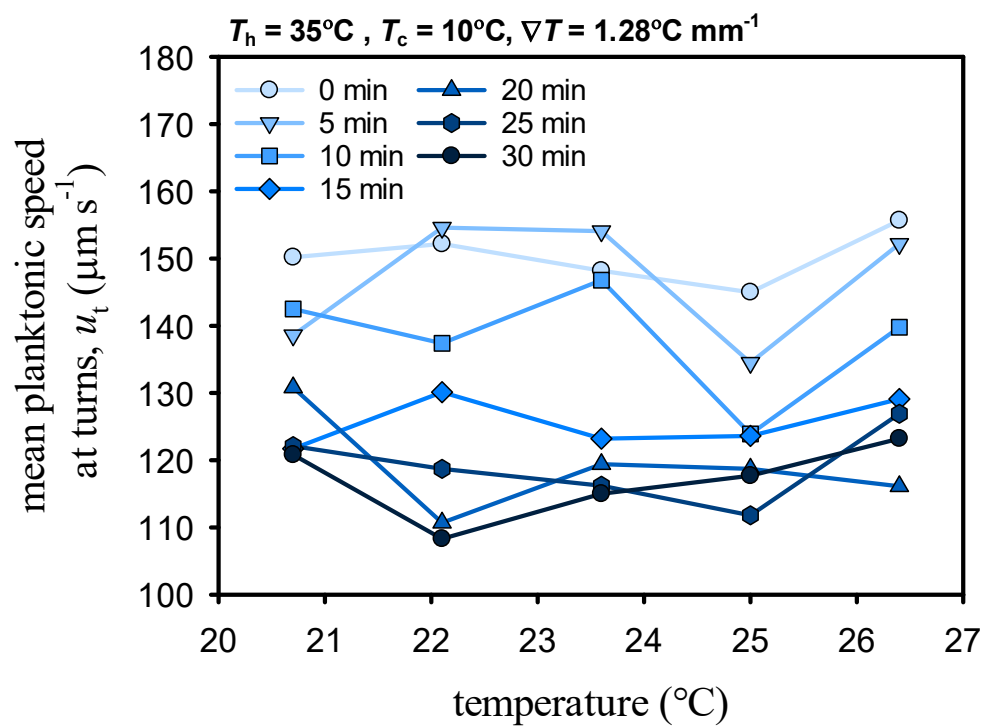


圖 3.5 熱端 35°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 10^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.28^\circ\text{C mm}^{-1}$

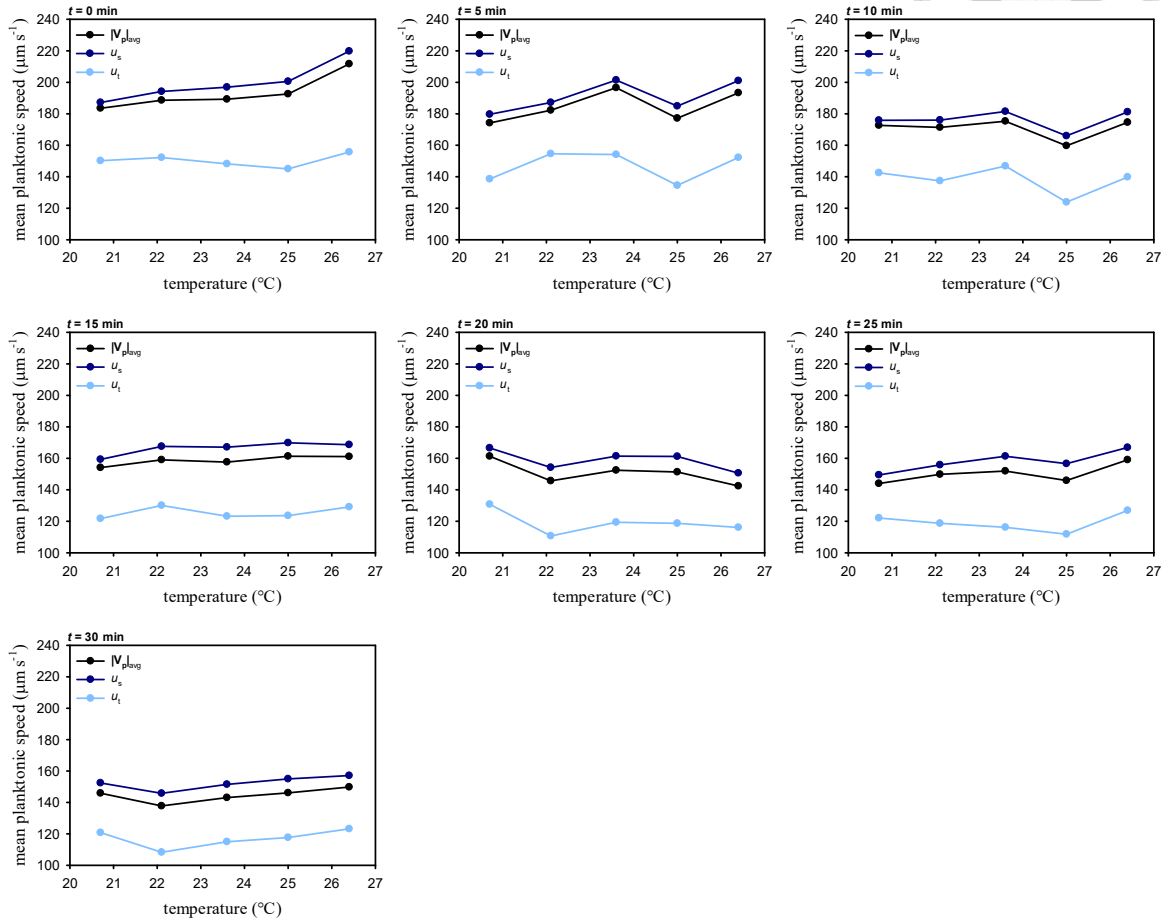


圖 3.6 熱端 35°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化

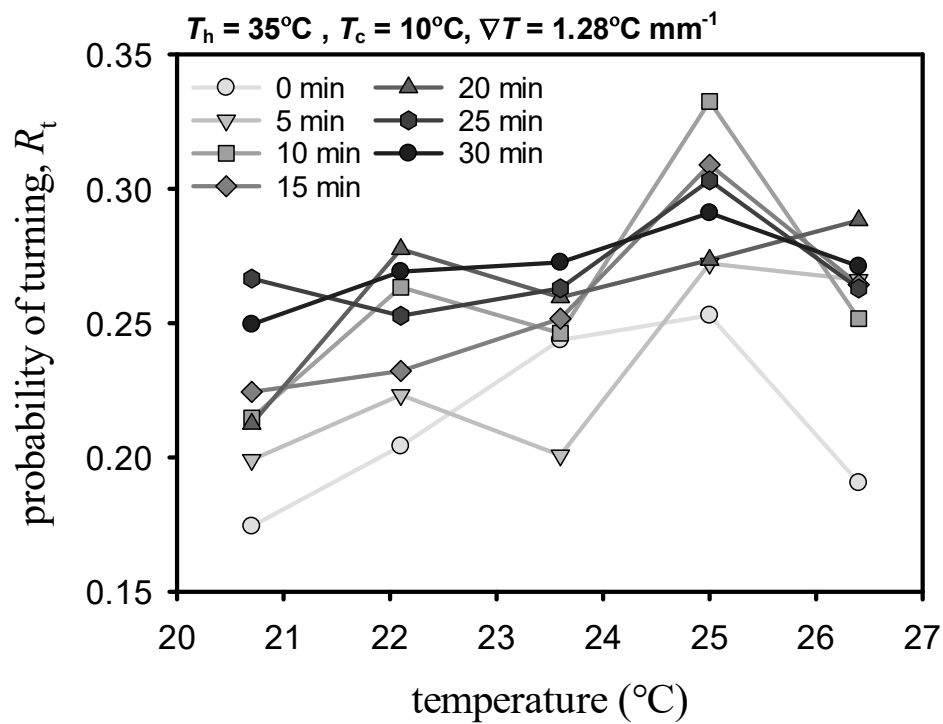


圖 3.7 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較

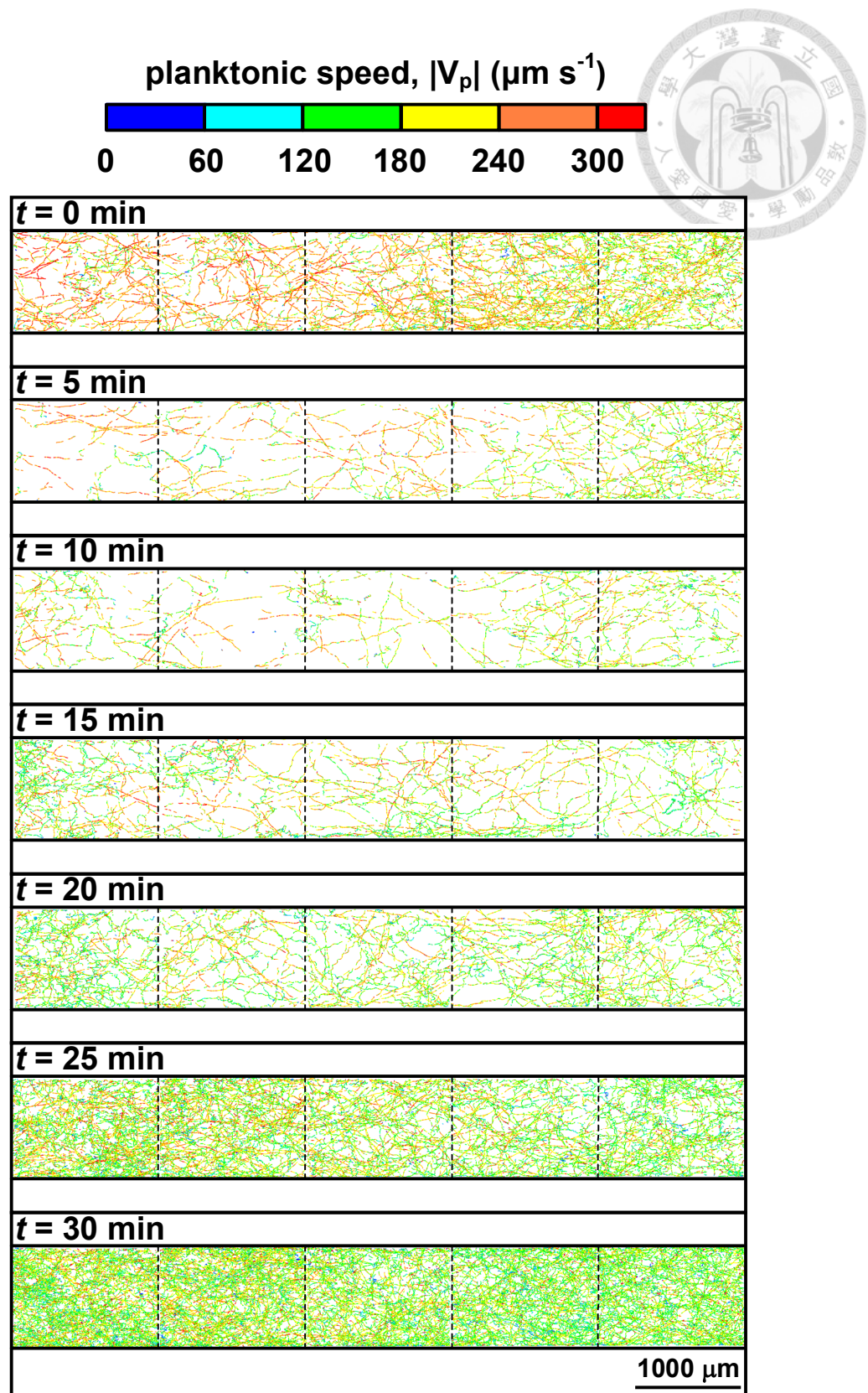


圖 3.8 熱端 35°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡
(虛線為溫度區間分隔線)

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 10^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.28^\circ\text{C mm}^{-1}$

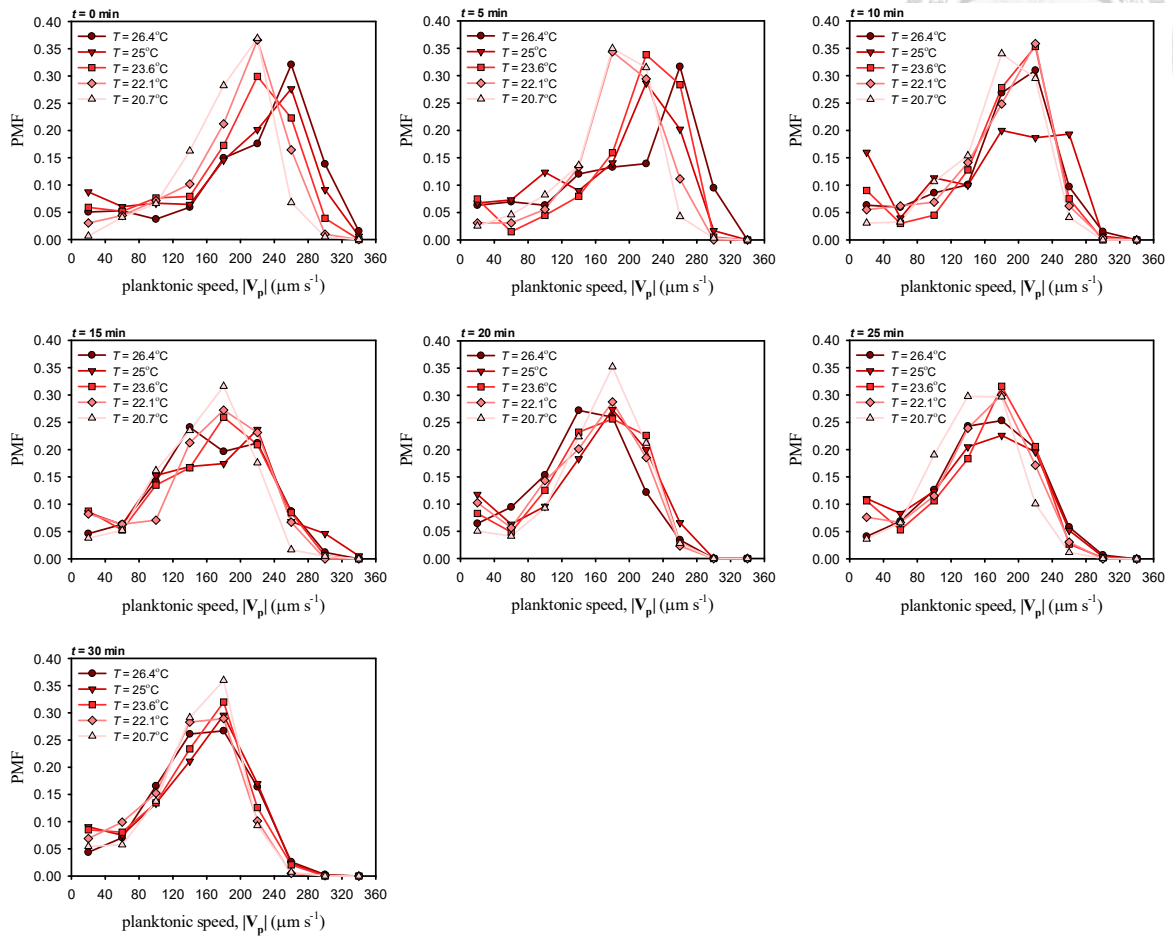


圖 3.9 熱端 35°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 10^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.28^\circ\text{C mm}^{-1}$

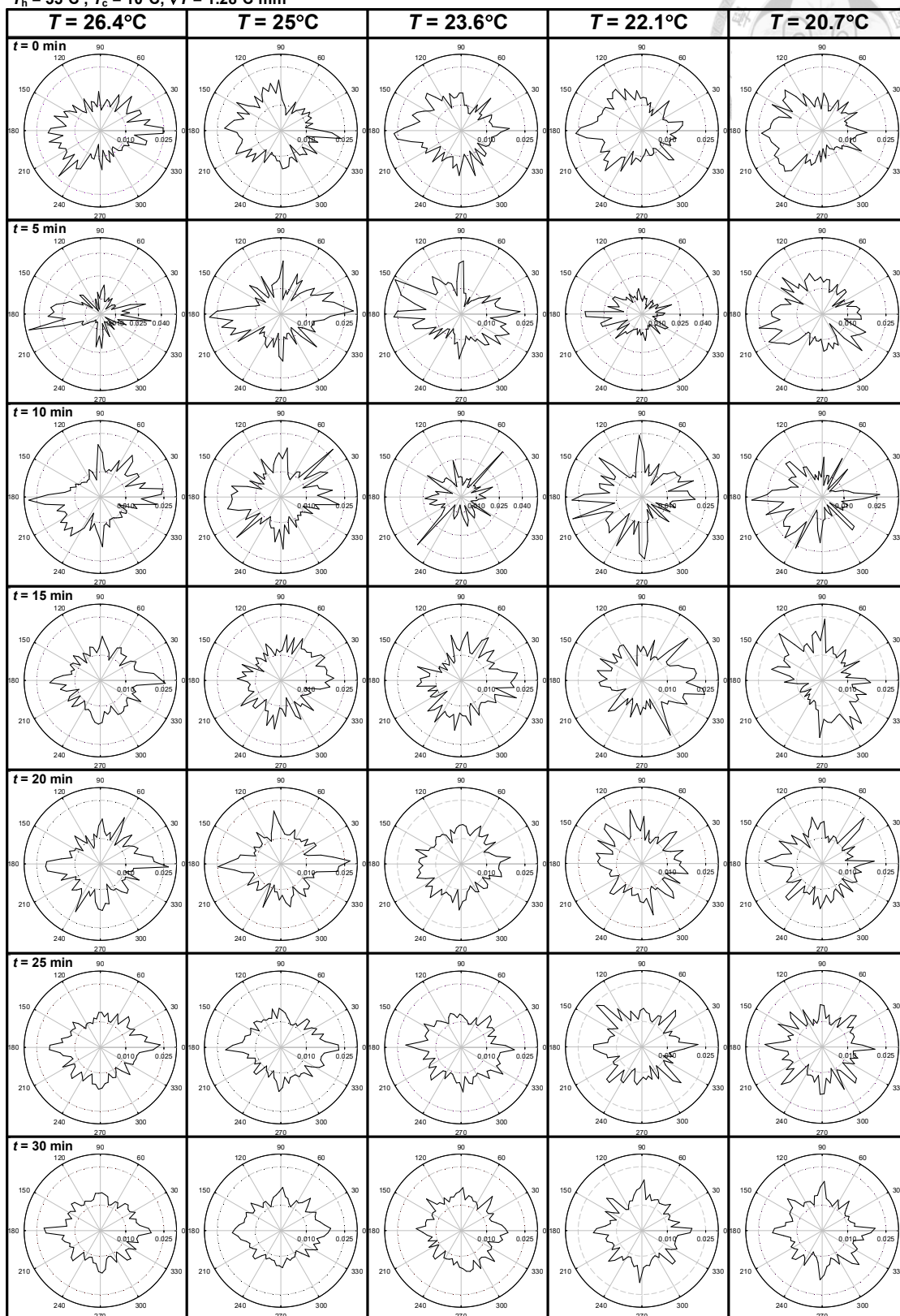


圖 3.10 熱端 35°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化

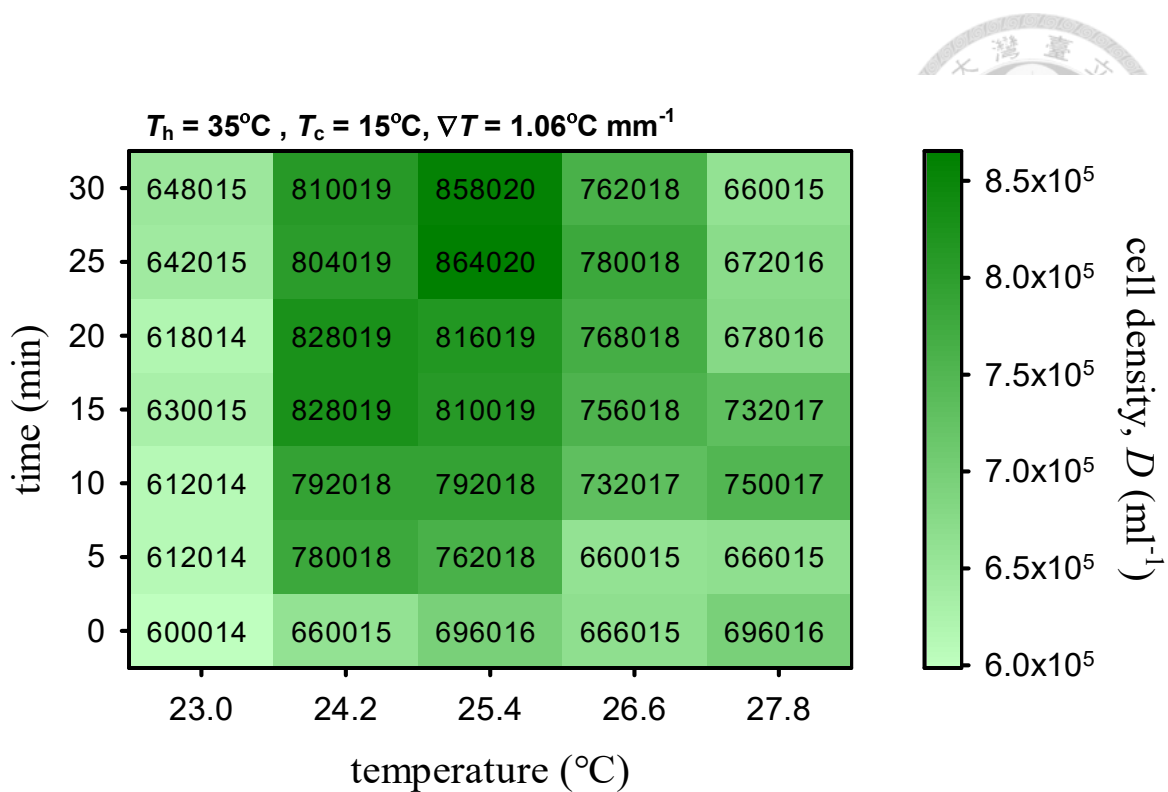


圖 3.11 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化

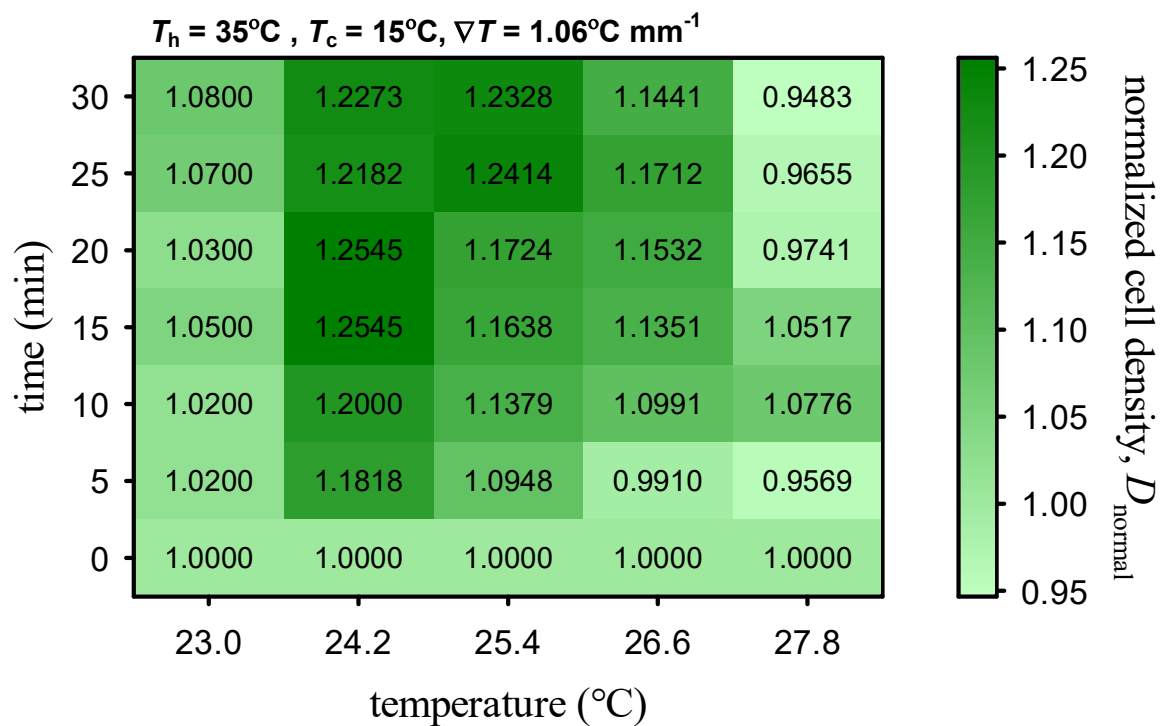


圖 3.12 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化

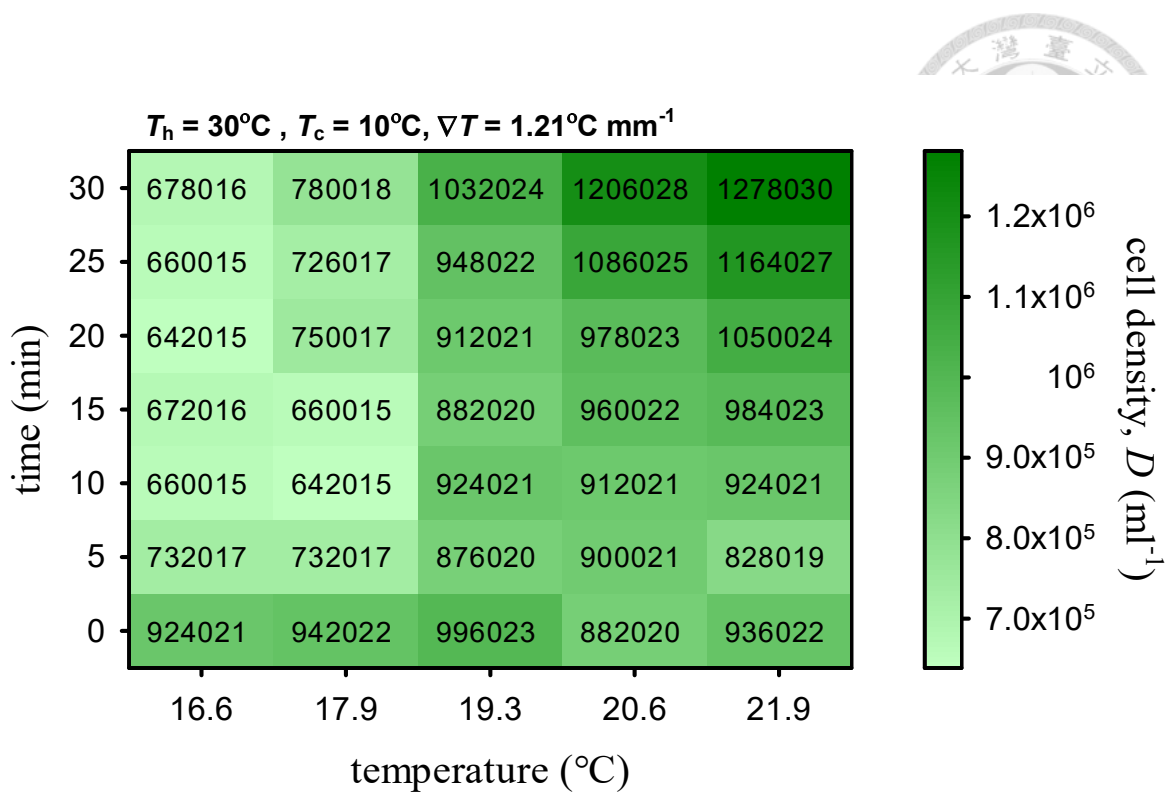


圖 3.13 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化

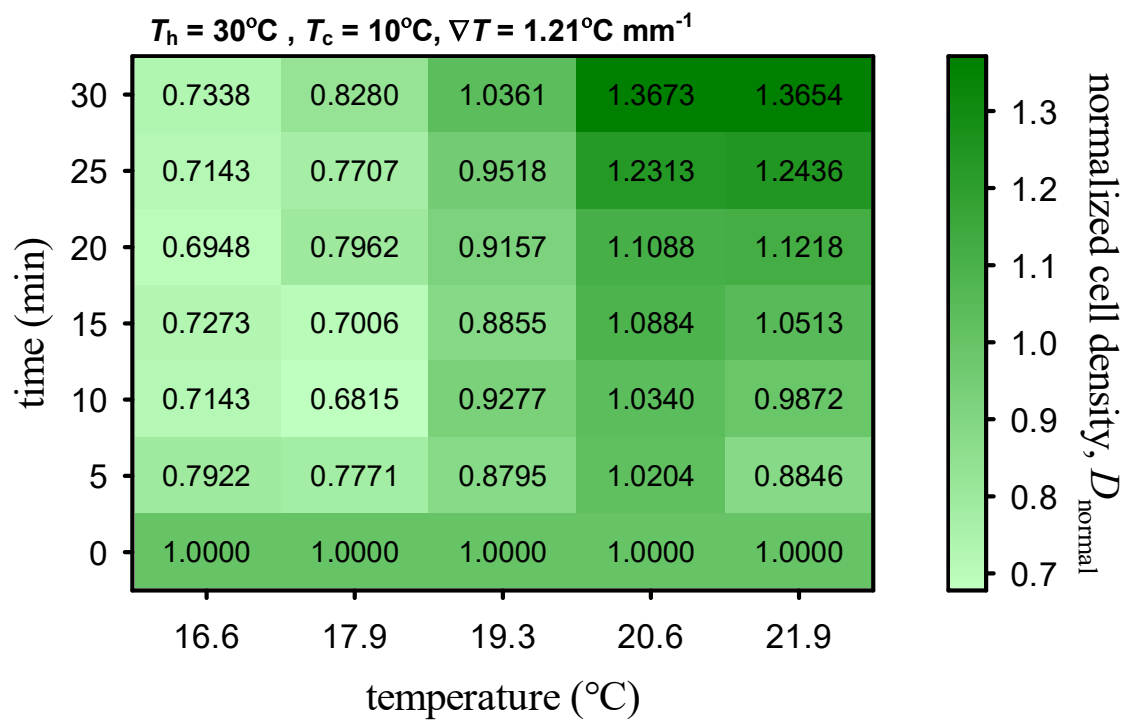


圖 3.14 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化

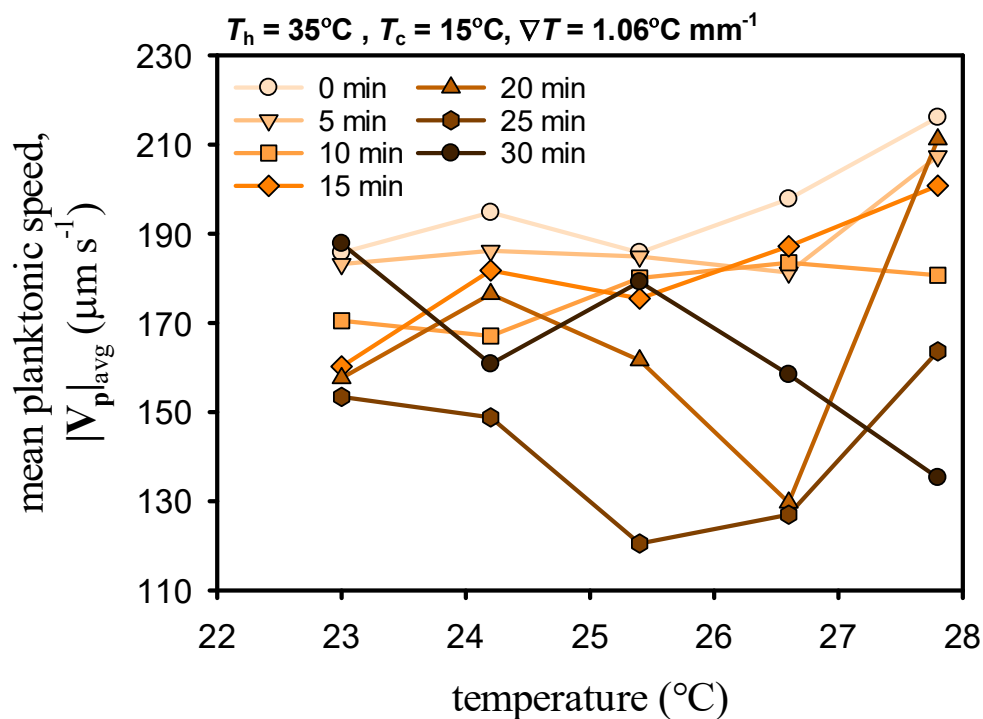


圖 3.15 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較

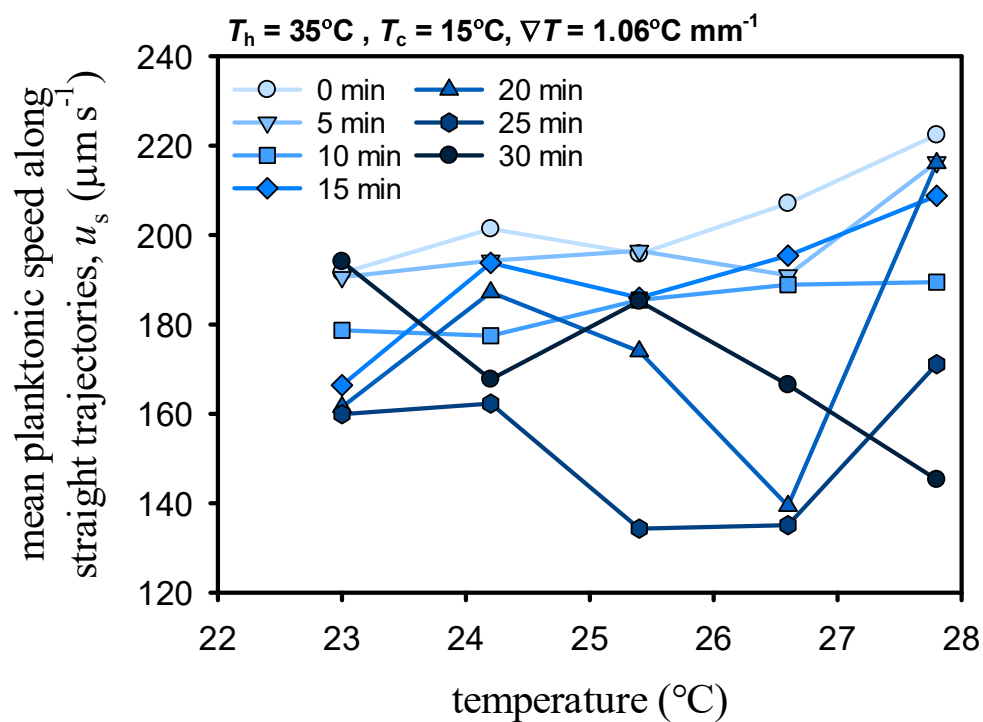


圖 3.16 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較

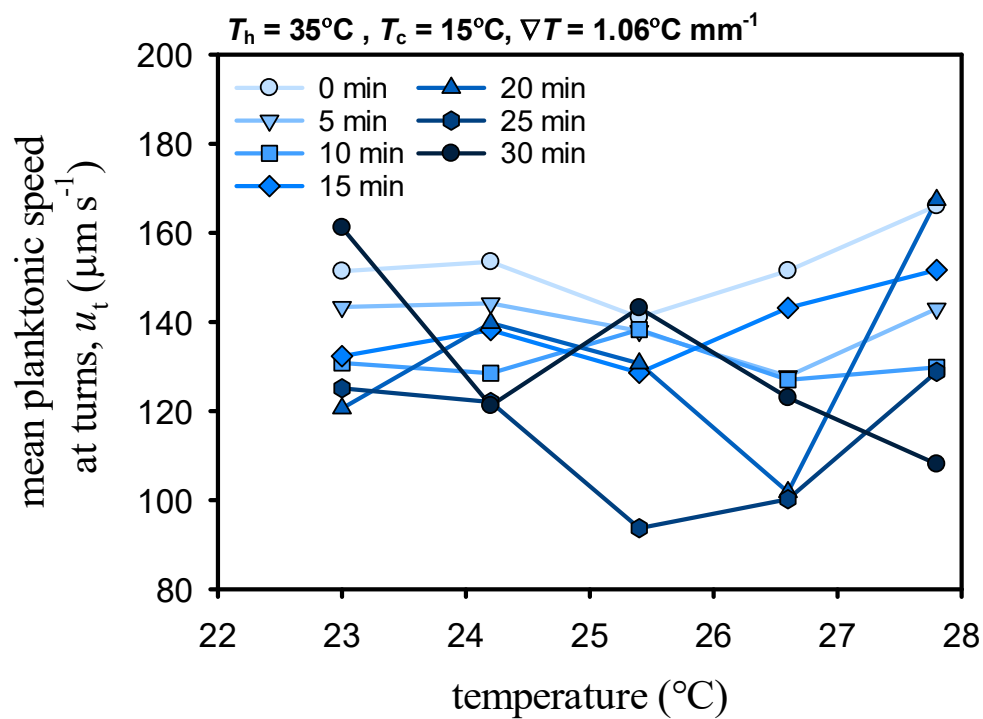


圖 3.17 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 15^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.06^\circ\text{C mm}^{-1}$

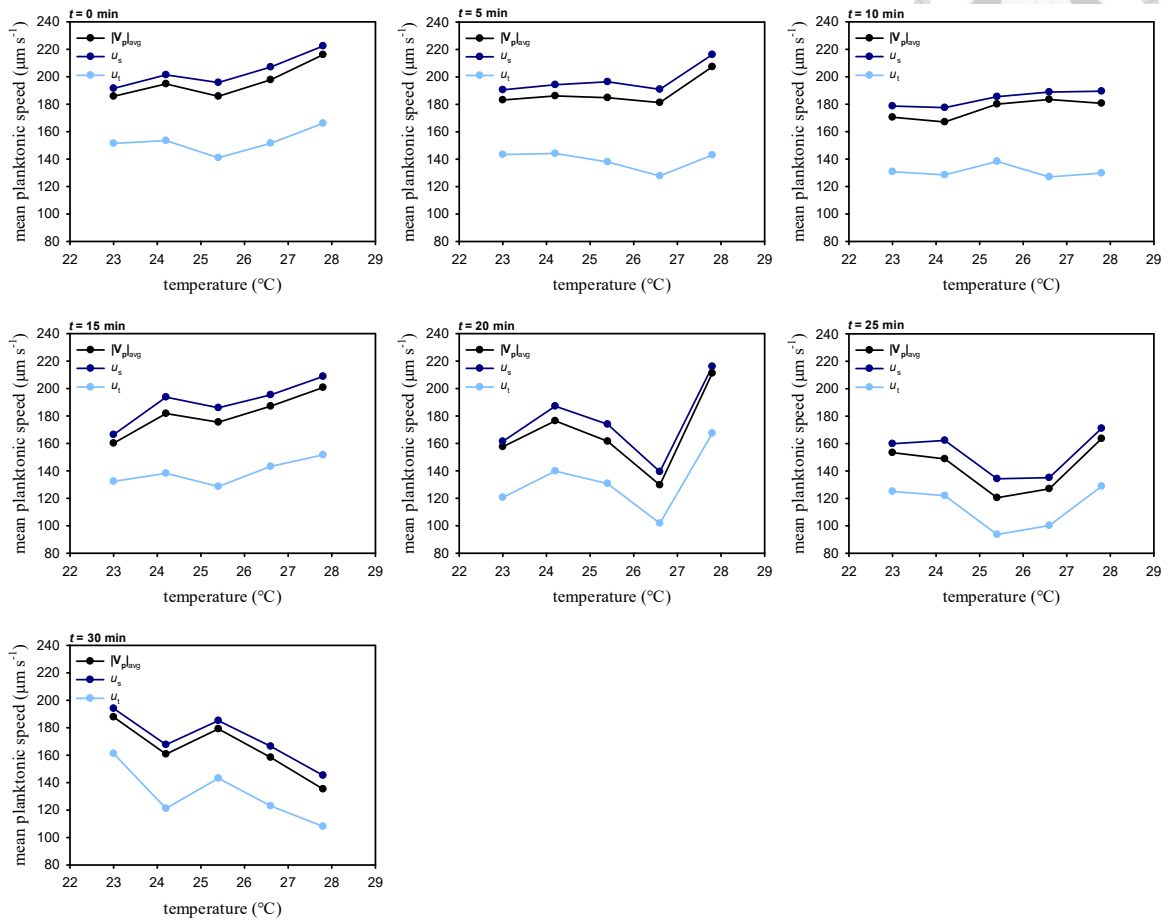


圖 3.18 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化

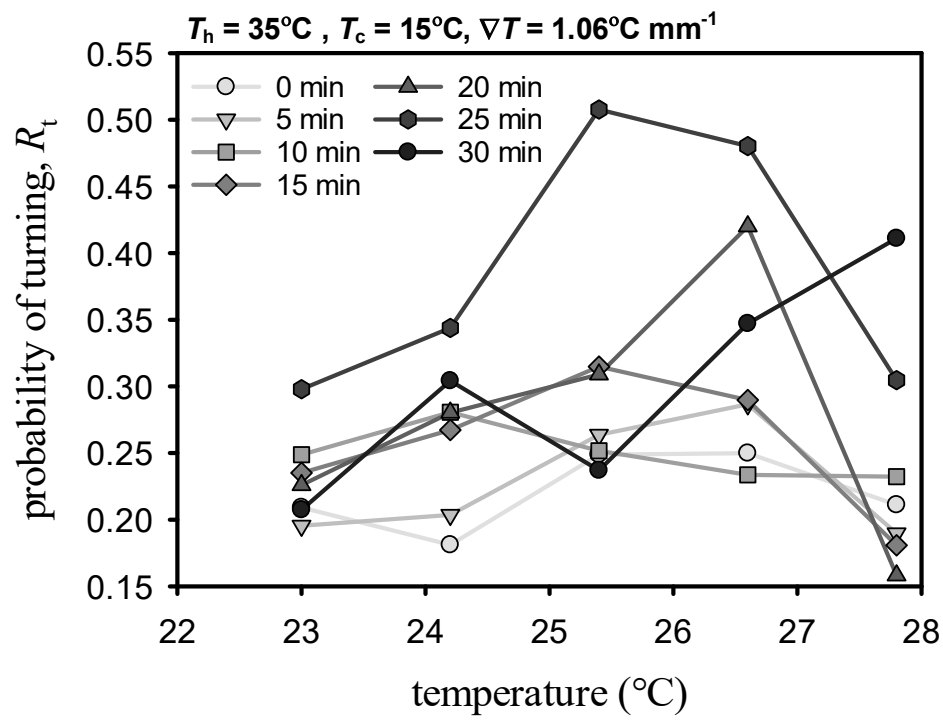


圖 3.19 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較

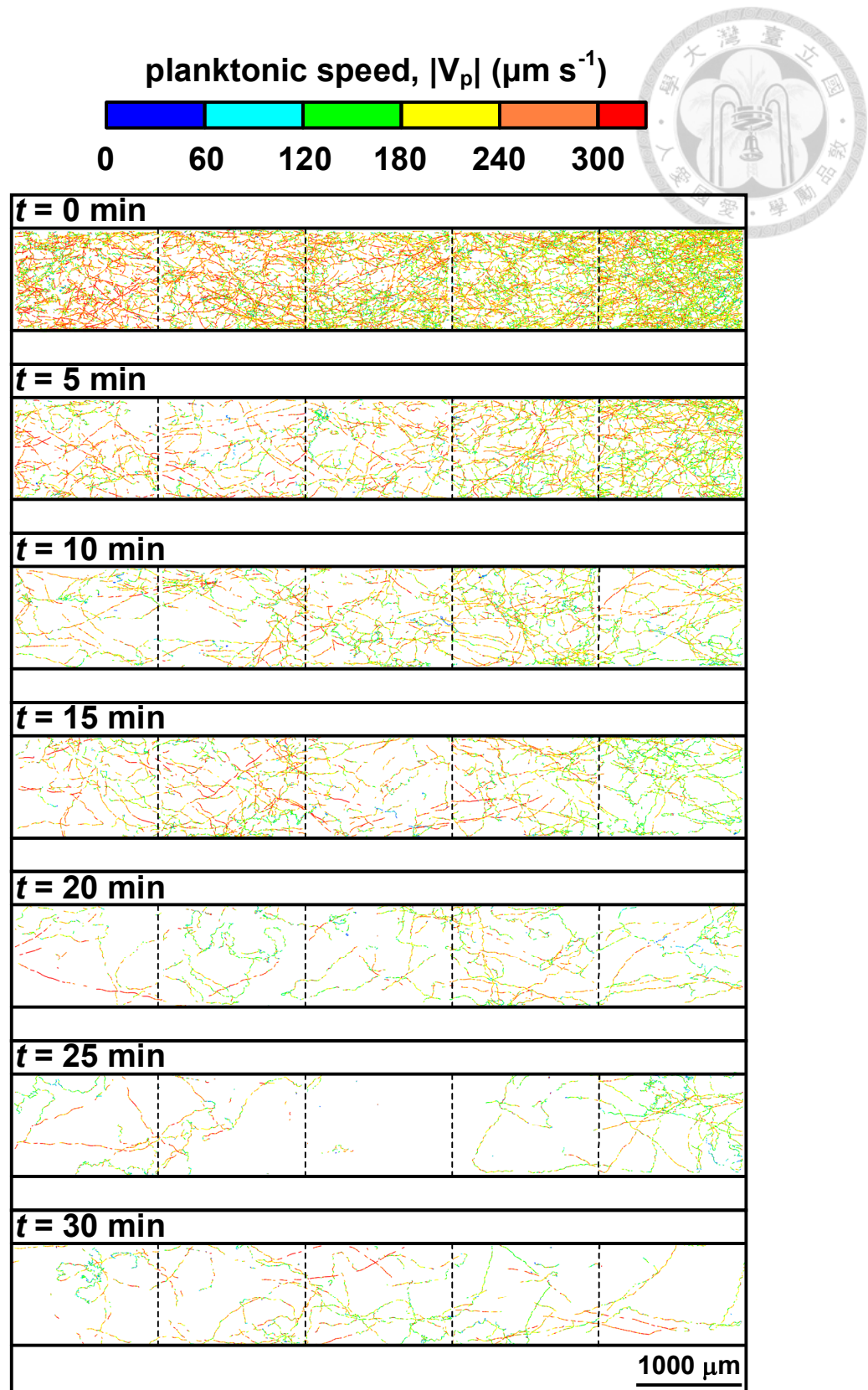


圖 3.20 熱端 35°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡
(虛線為溫度區間分隔線)

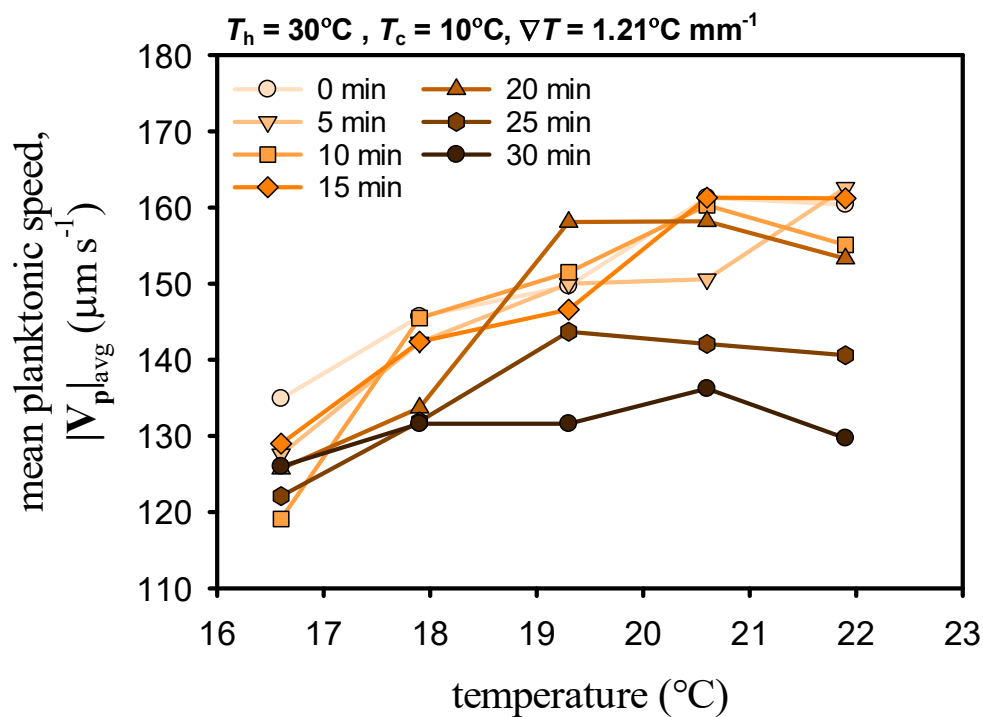


圖 3.21 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較

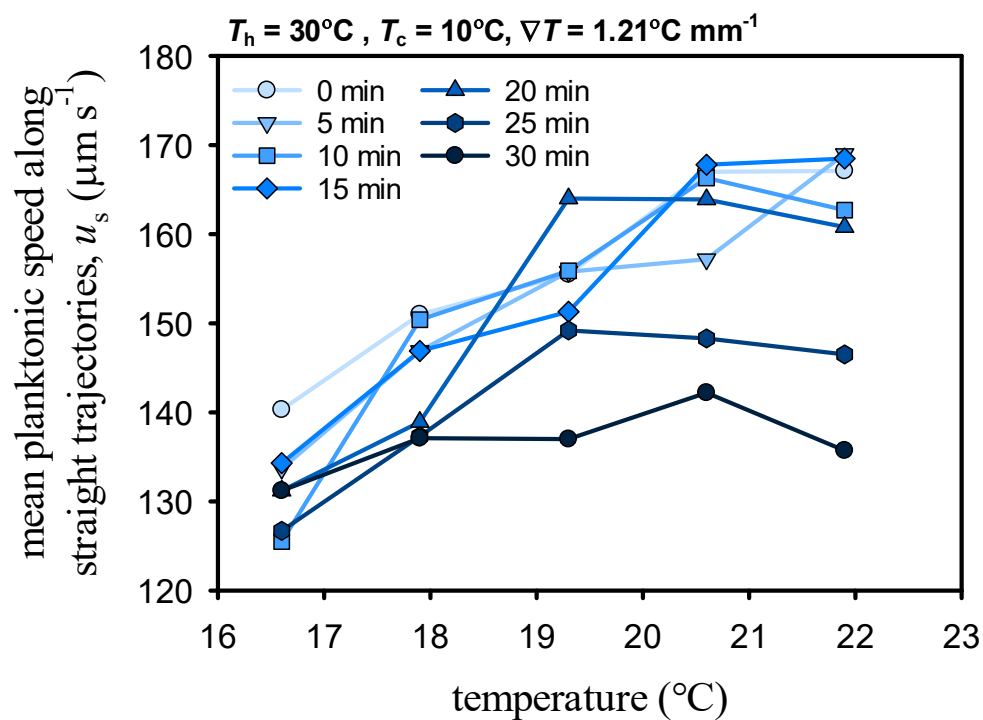


圖 3.22 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較

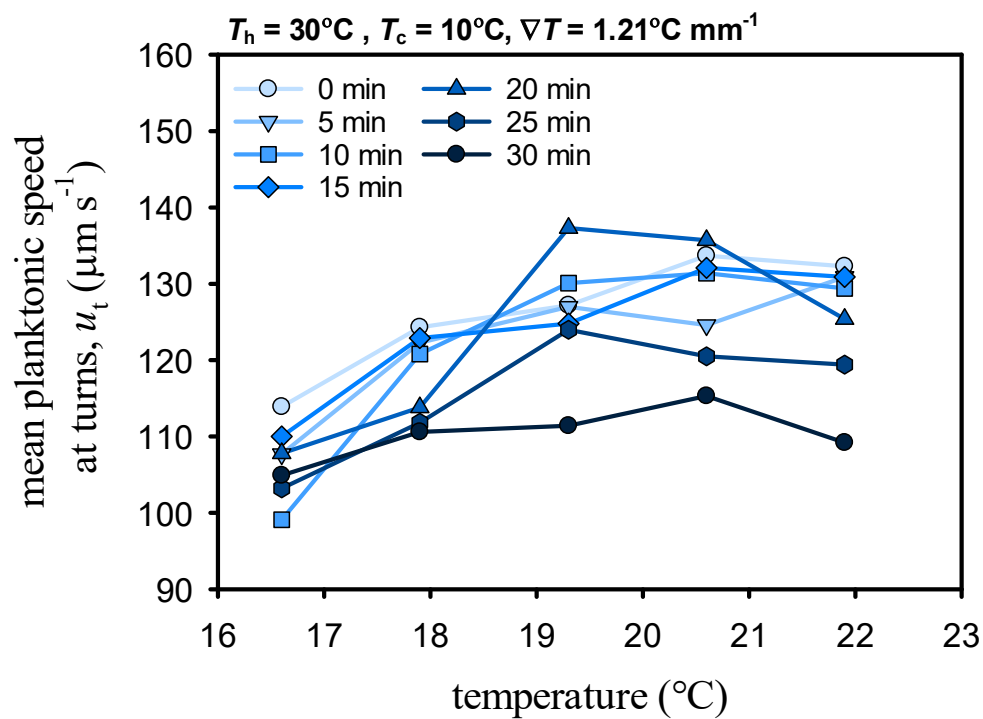


圖 3.23 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 10^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.21^\circ\text{C mm}^{-1}$

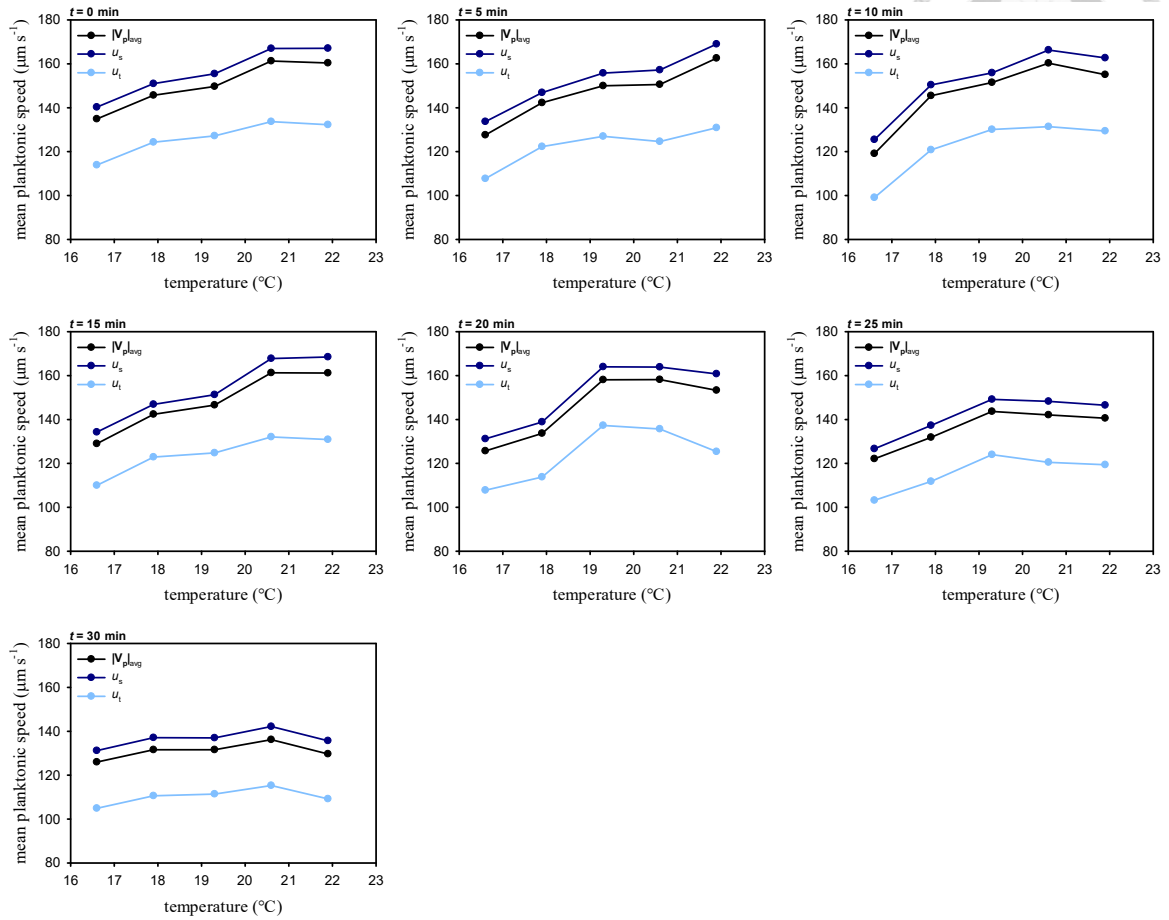


圖 3.24 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化

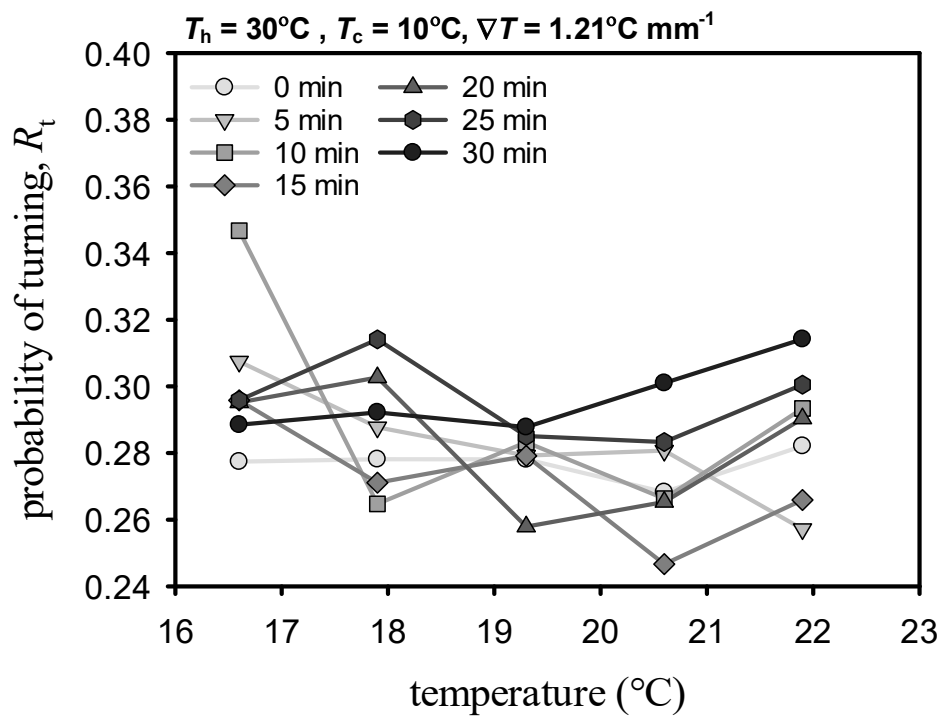


圖 3.25 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較

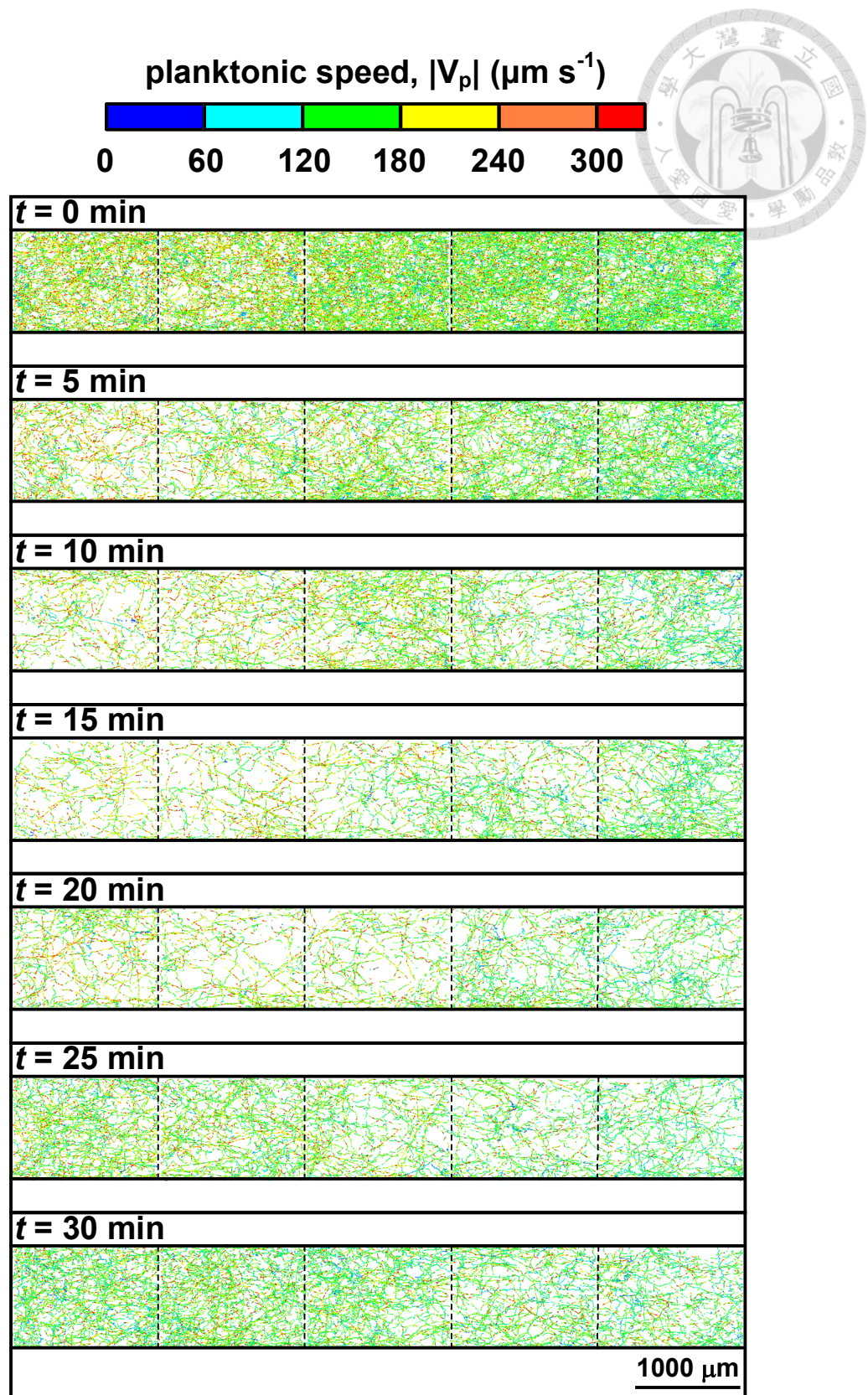


圖 3.26 熱端 30°C、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡
(虛線為溫度區間分隔線)

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 15^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.06^\circ\text{C mm}^{-1}$

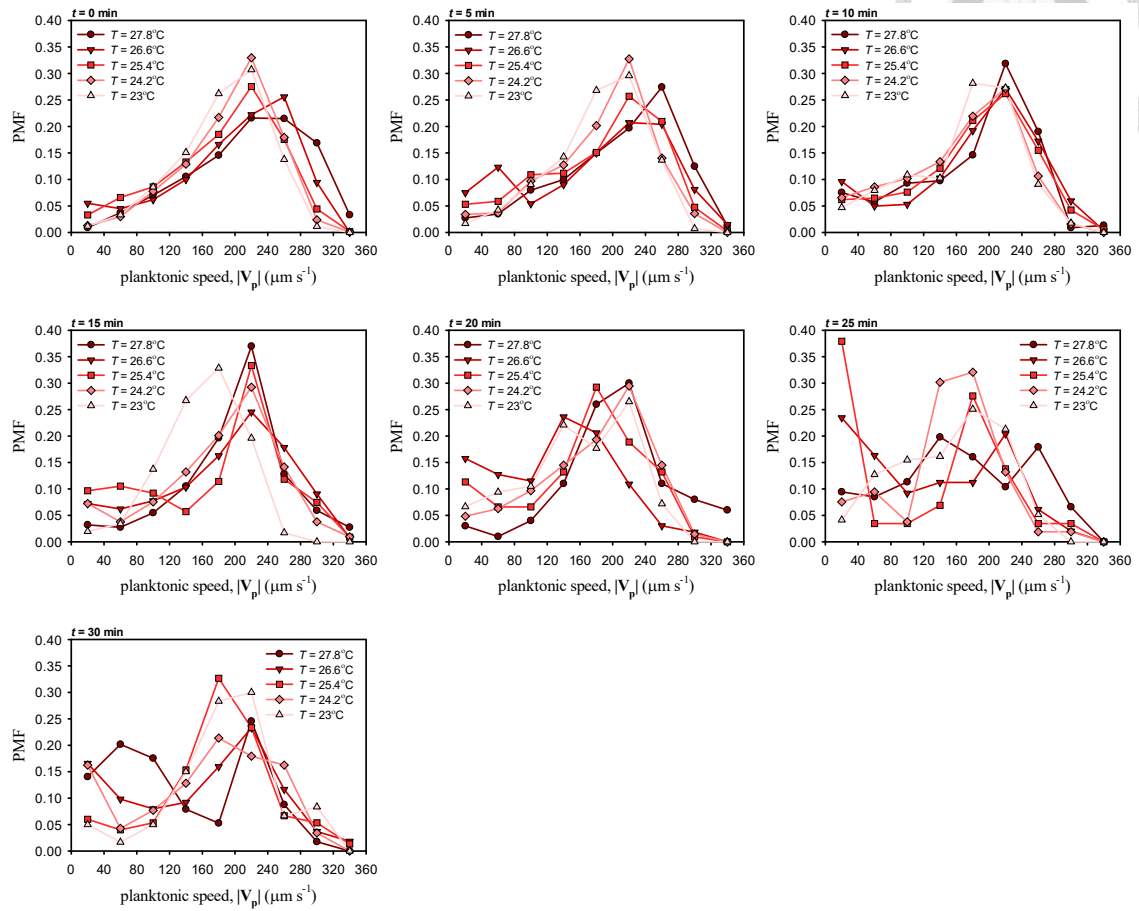


圖 3.27 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 15^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.06^\circ\text{C mm}^{-1}$

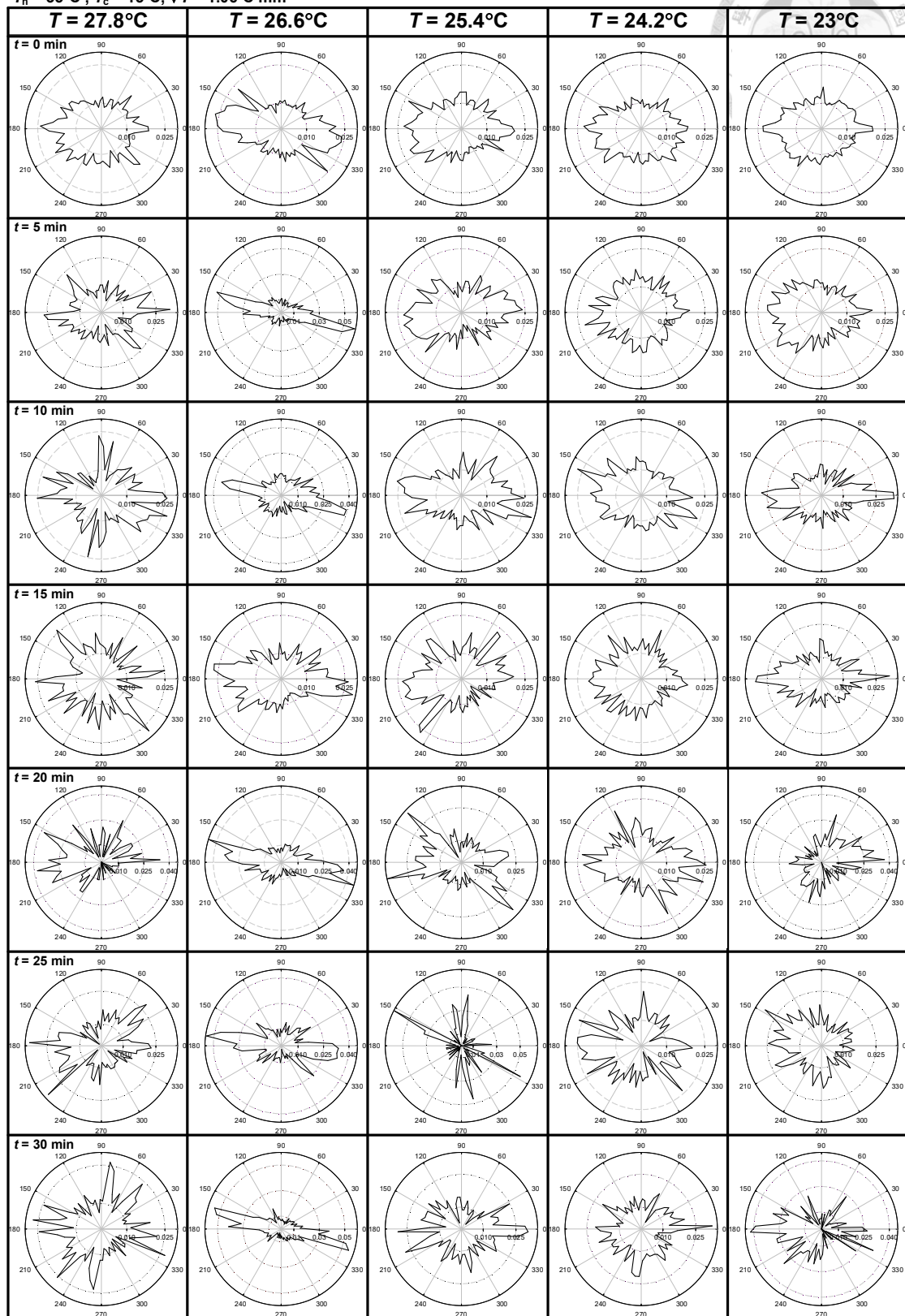


圖 3.28 熱端 35°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 10^\circ\text{C}$, $\nabla T = 1.21^\circ\text{C mm}^{-1}$

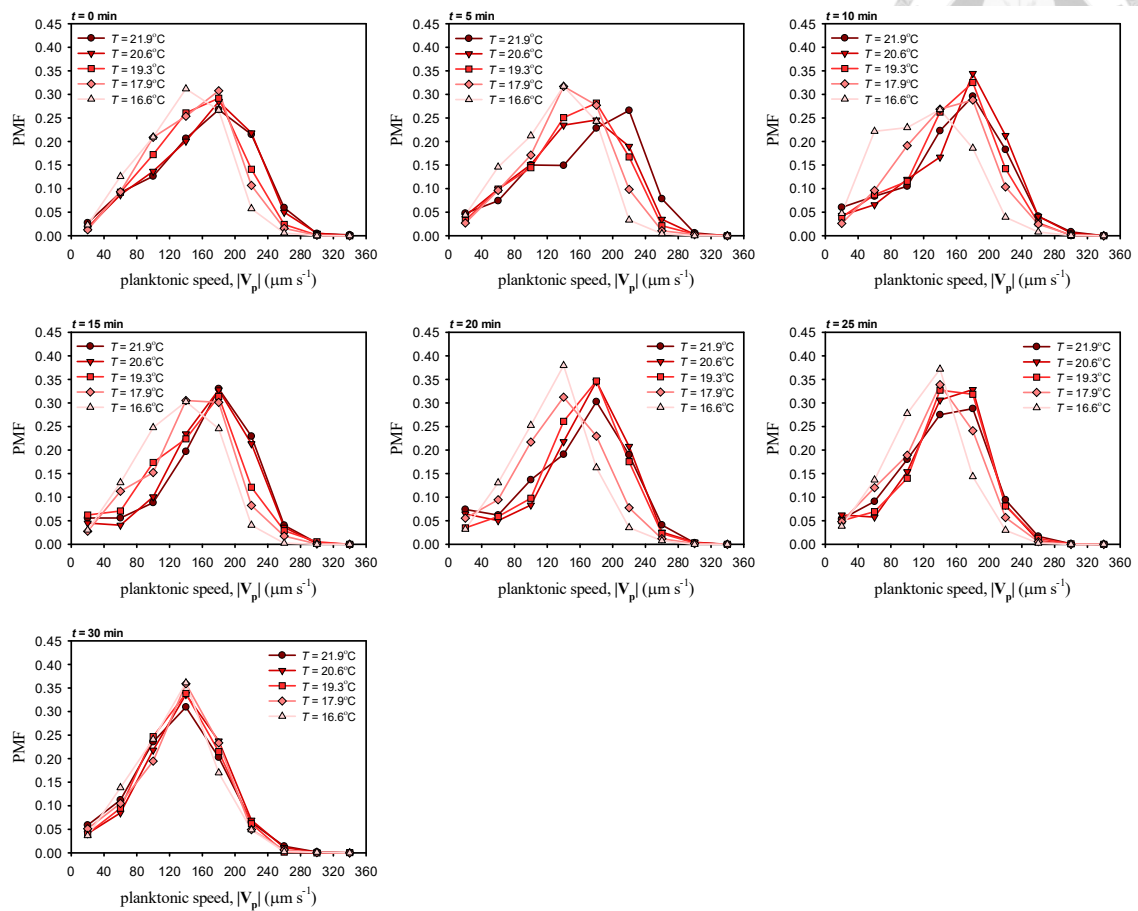


圖 3.29 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較

$T_h = 30^{\circ}\text{C}$, $T_c = 10^{\circ}\text{C}$, $\nabla T = 1.21^{\circ}\text{C mm}^{-1}$

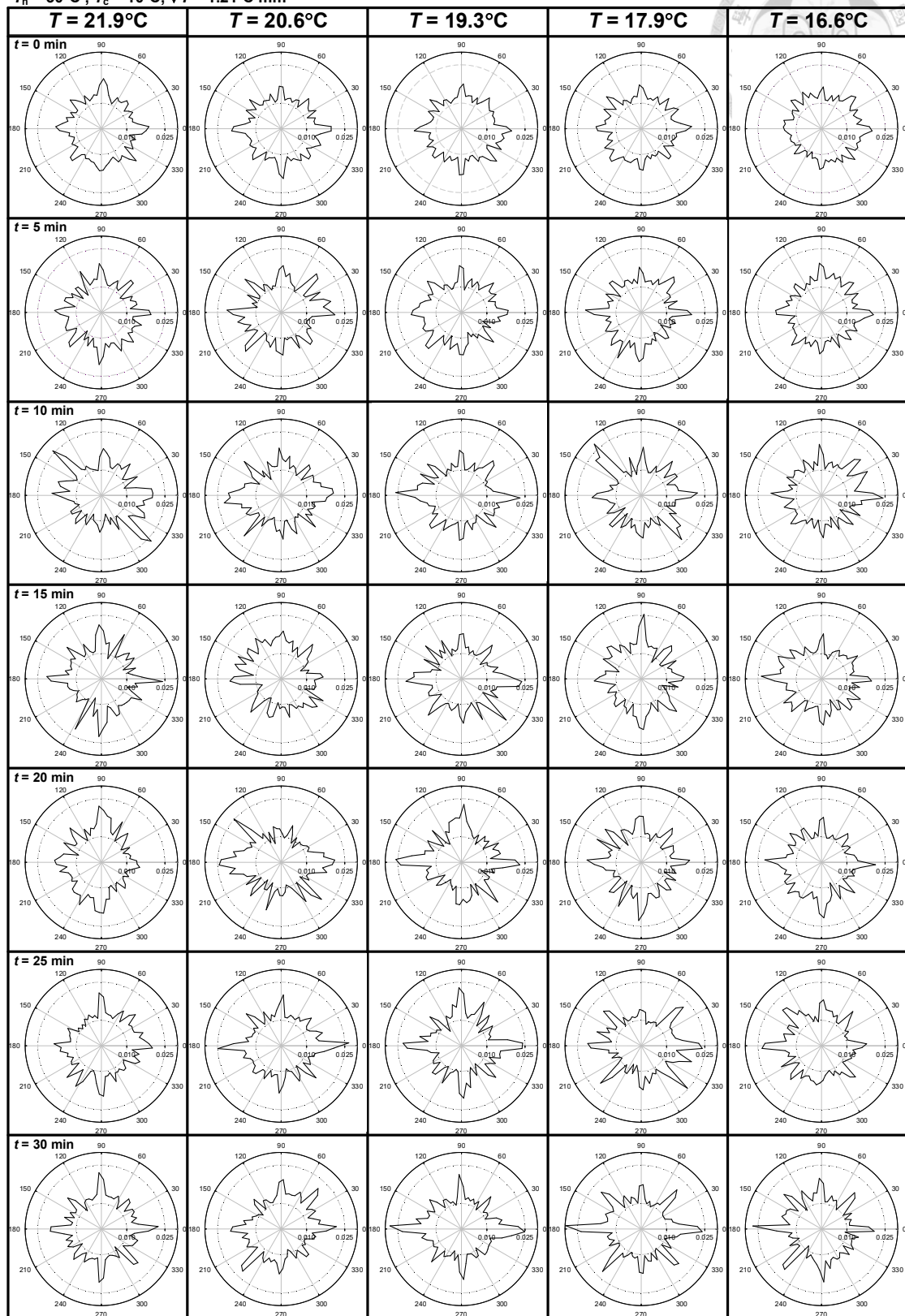


圖 3.30 熱端 30°C 、冷端 10°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化

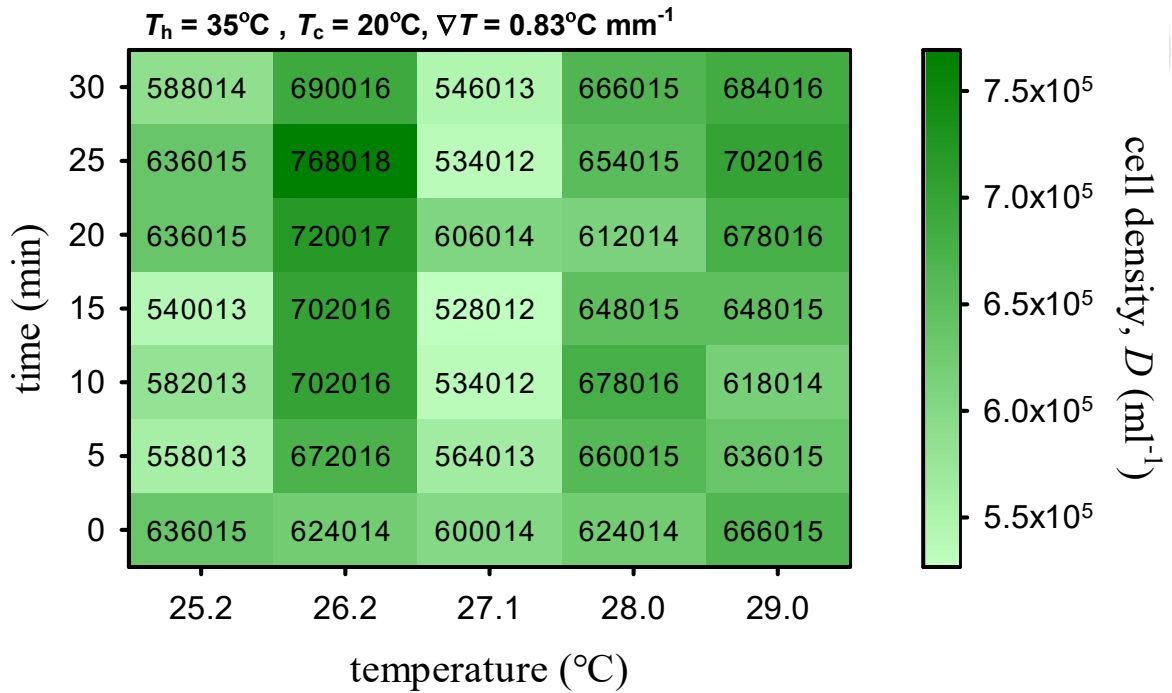


圖 3.31 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化

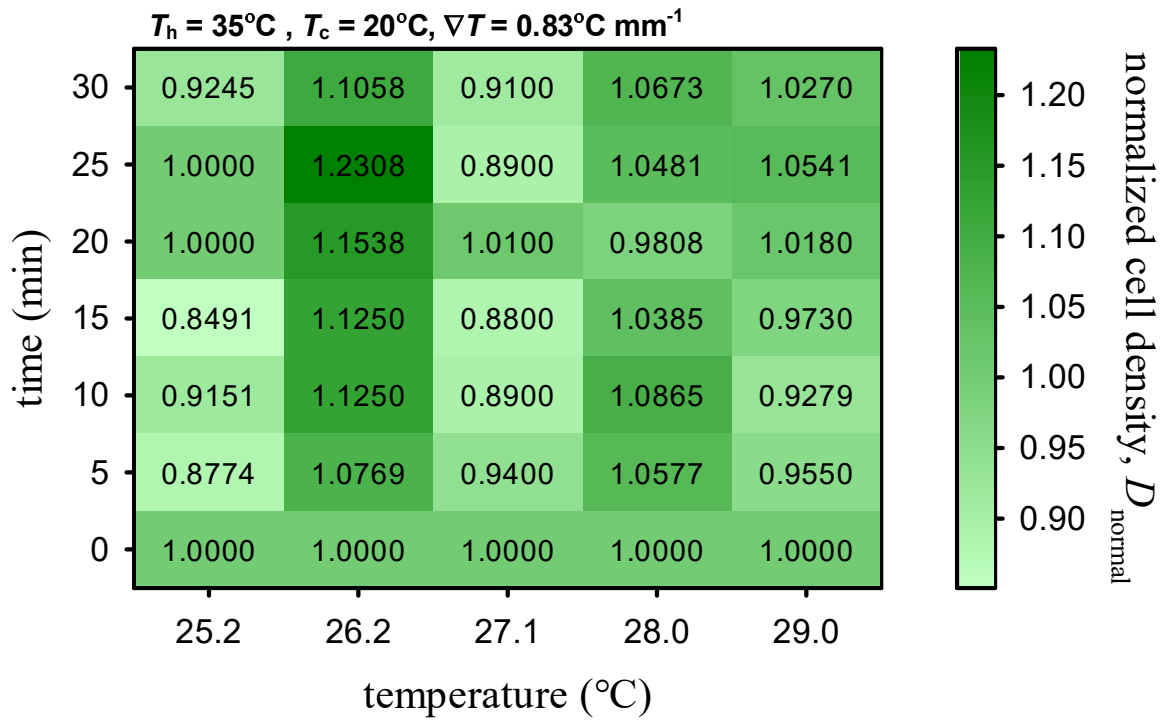


圖 3.32 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化

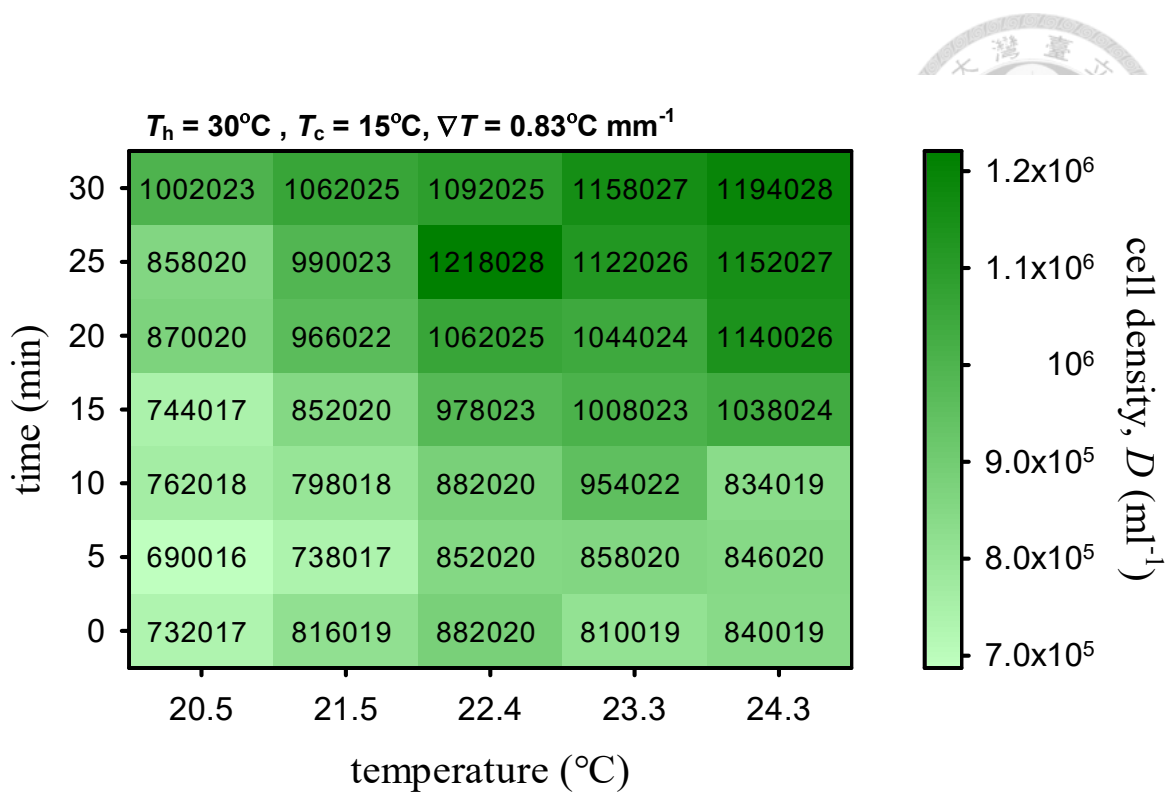


圖 3.33 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化

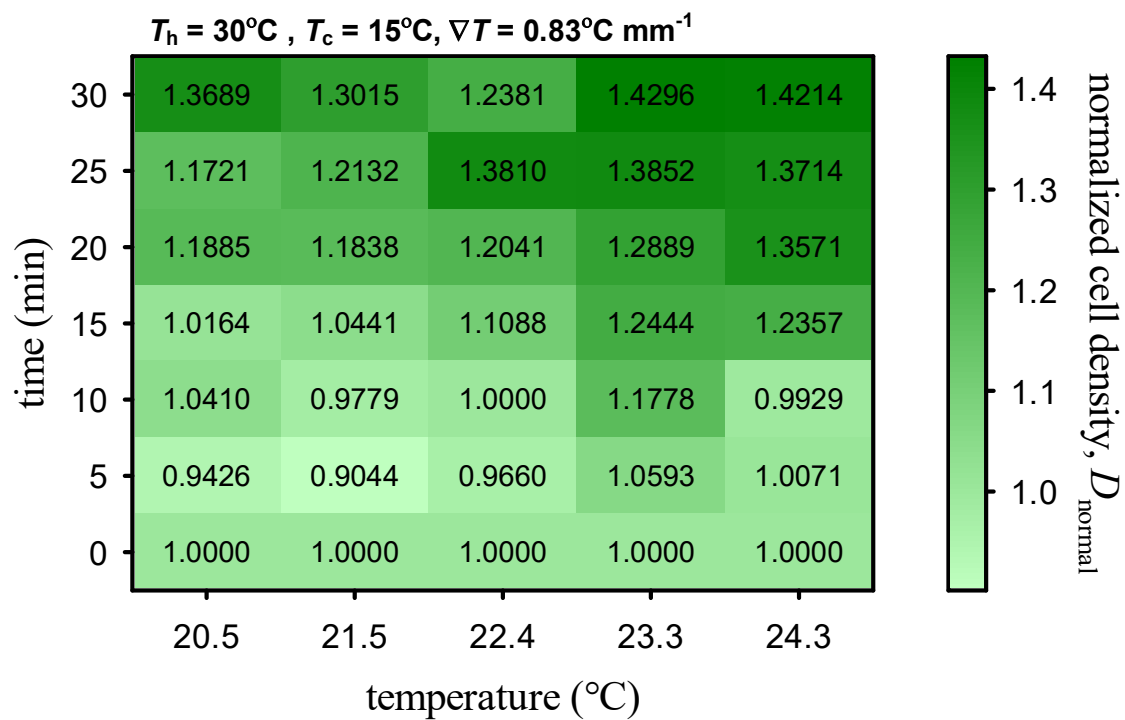


圖 3.34 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化

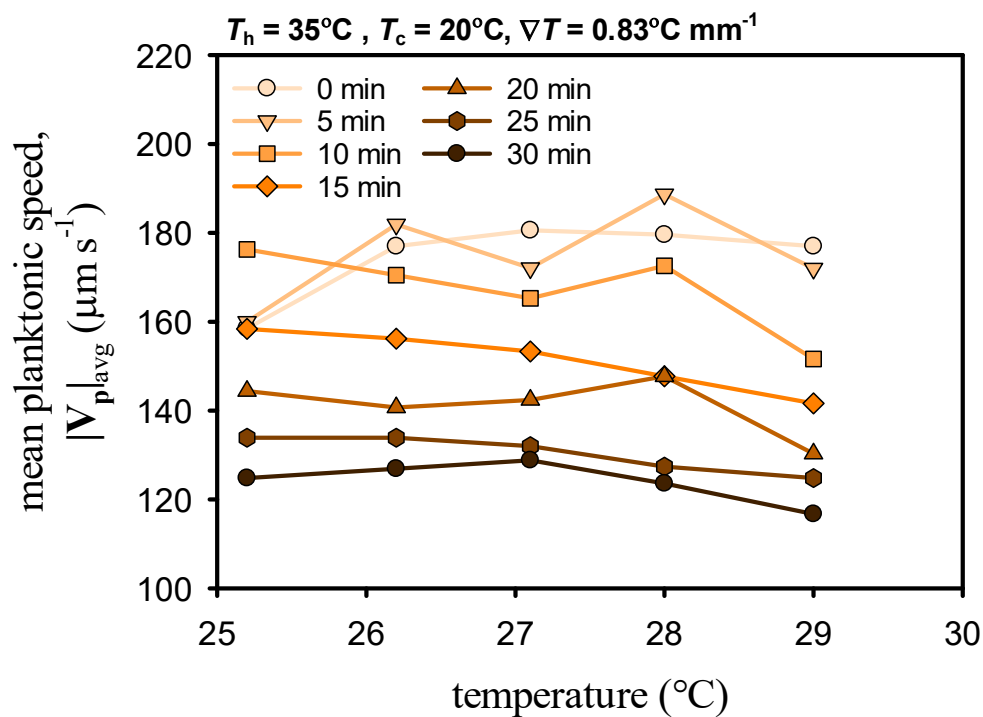


圖 3.35 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較

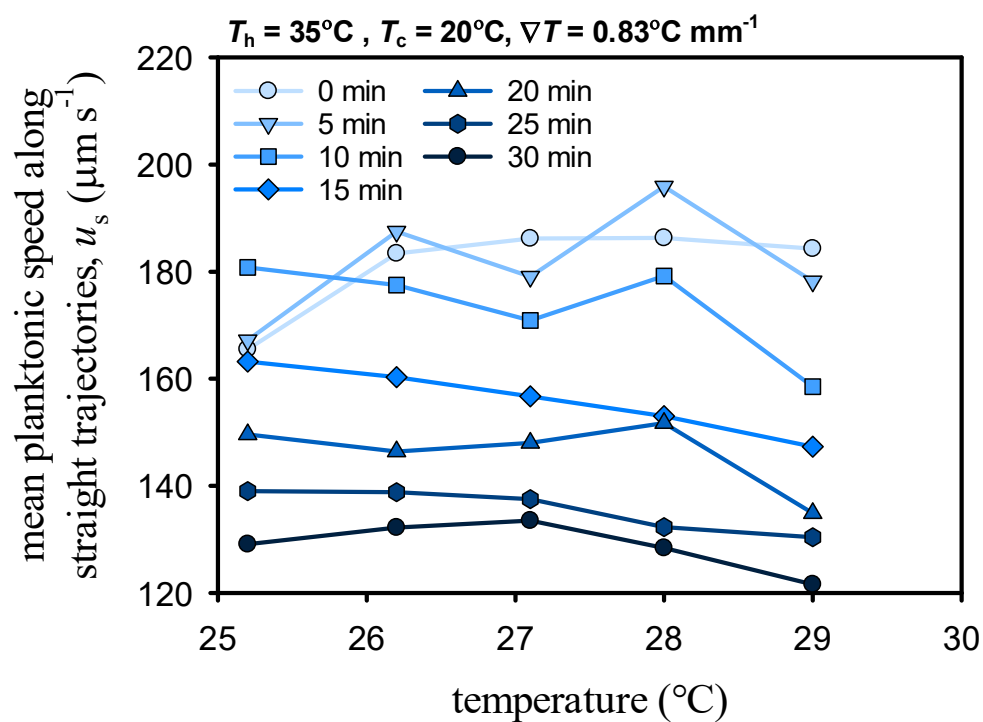


圖 3.36 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較

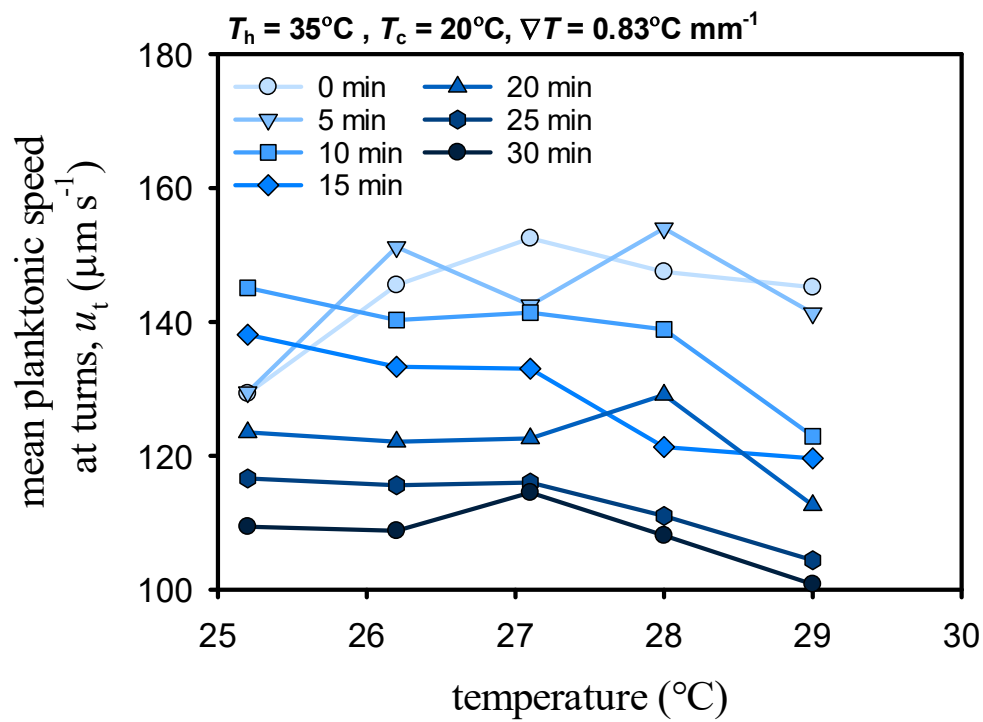


圖 3.37 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.83^\circ\text{C mm}^{-1}$

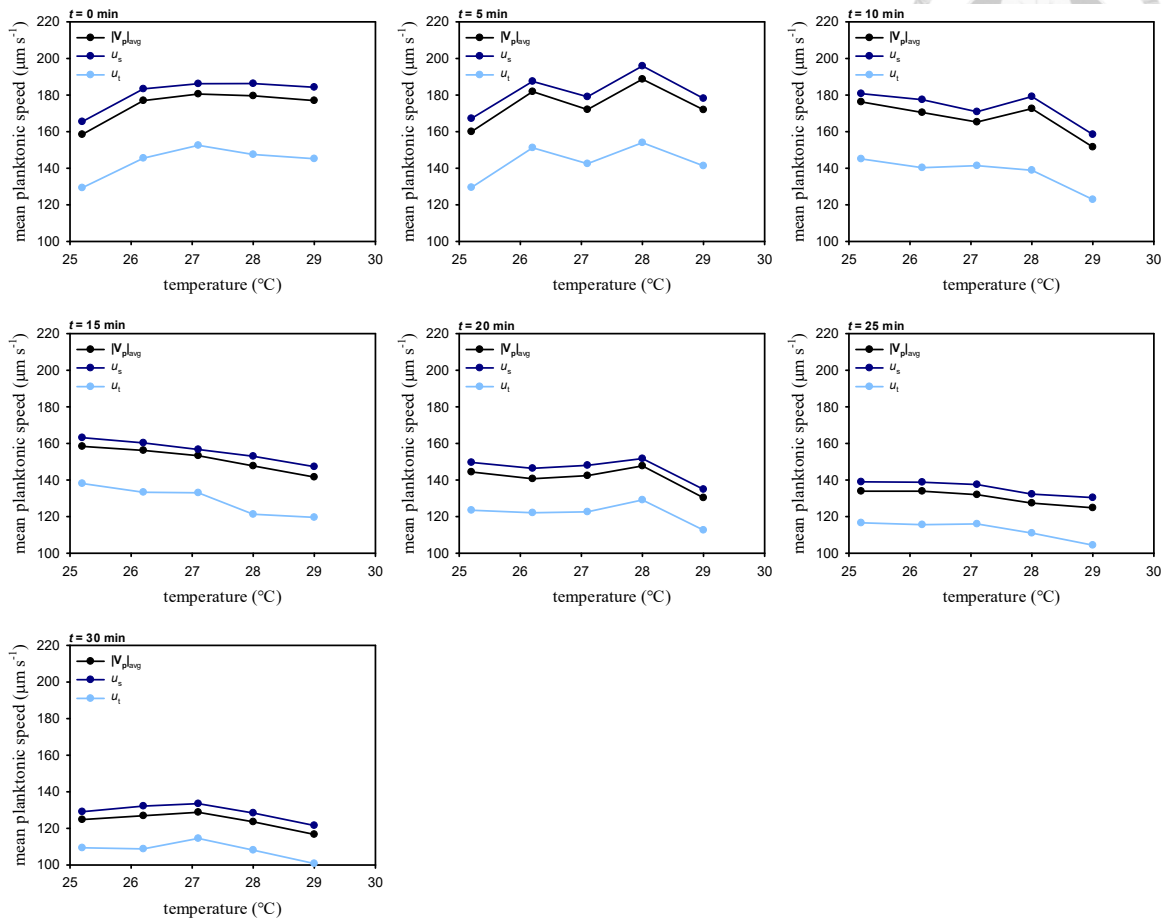


圖 3.38 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化

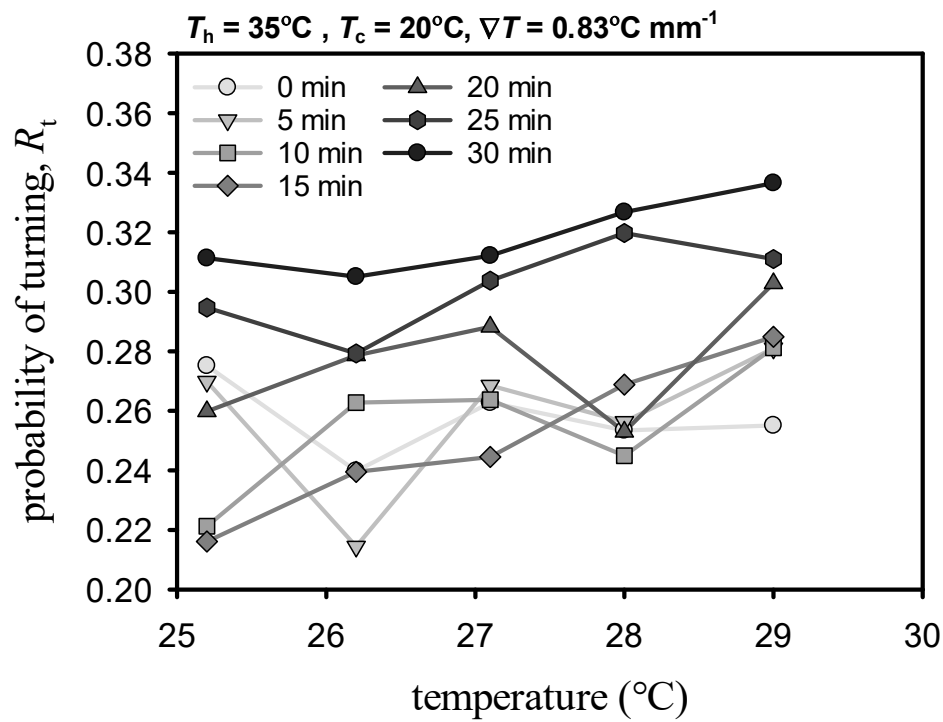


圖 3.39 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較

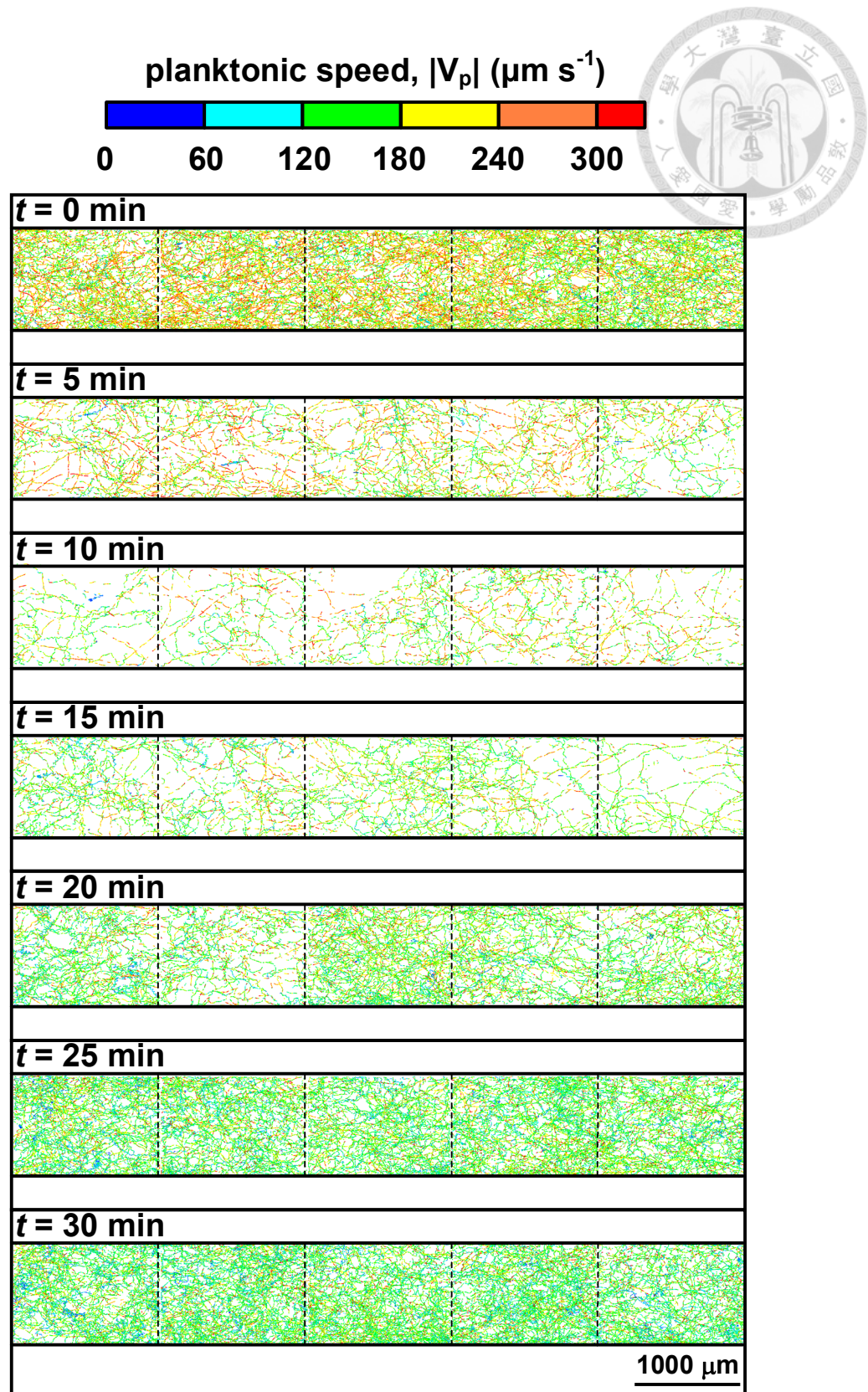


圖 3.40 熱端 35°C、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡
(虛線為溫度區間分隔線)

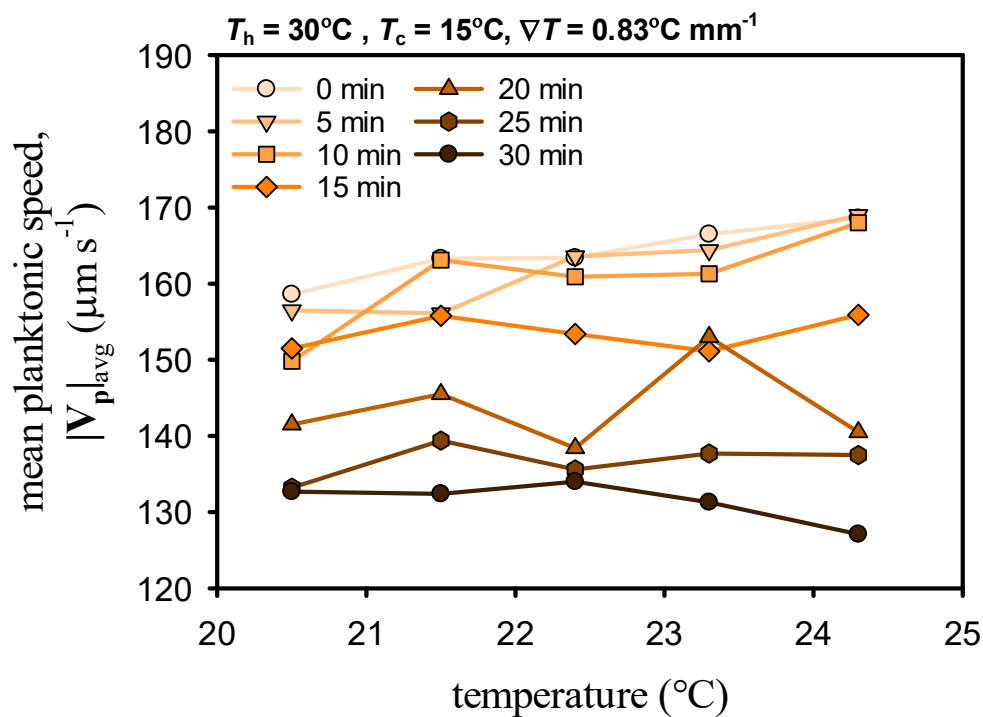


圖 3.41 熱端 30°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較

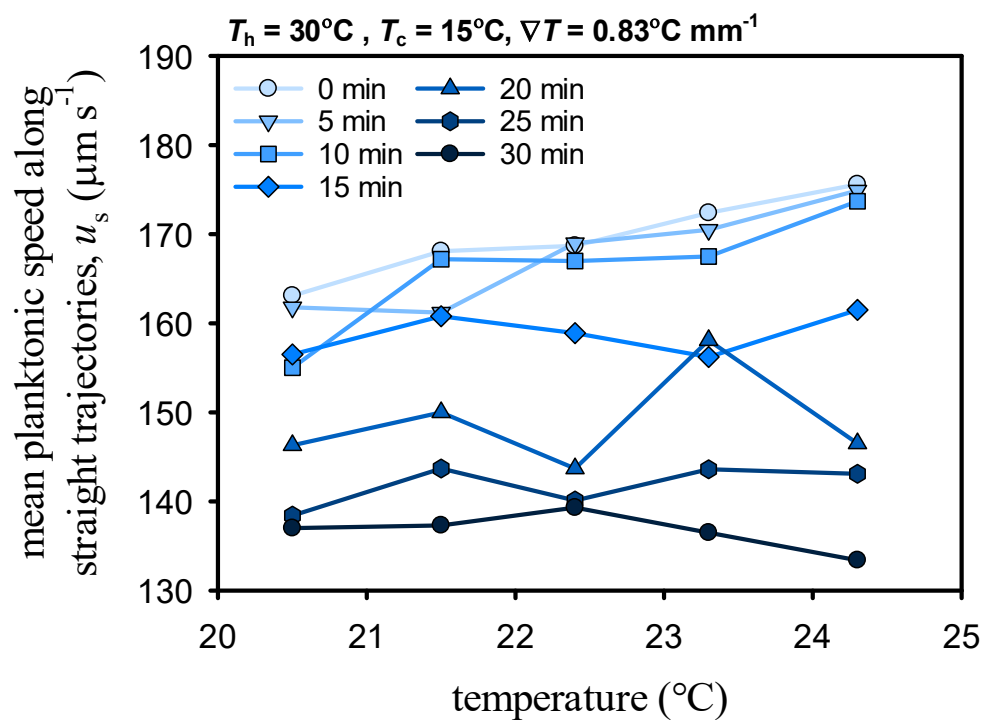


圖 3.42 熱端 30°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較

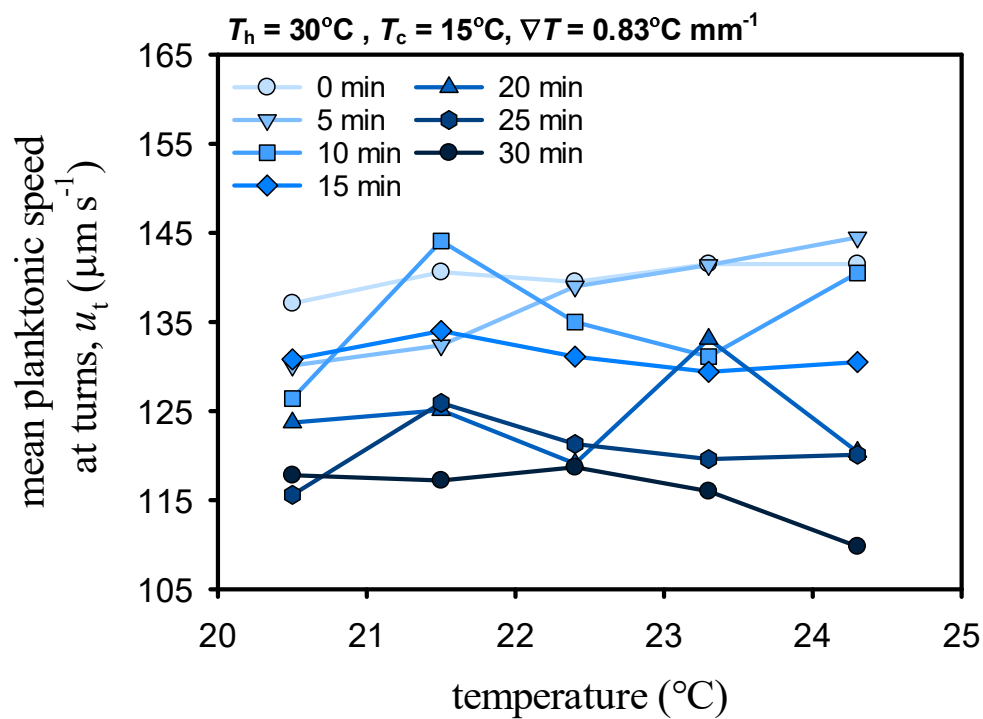


圖 3.43 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 15^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.83^\circ\text{C mm}^{-1}$

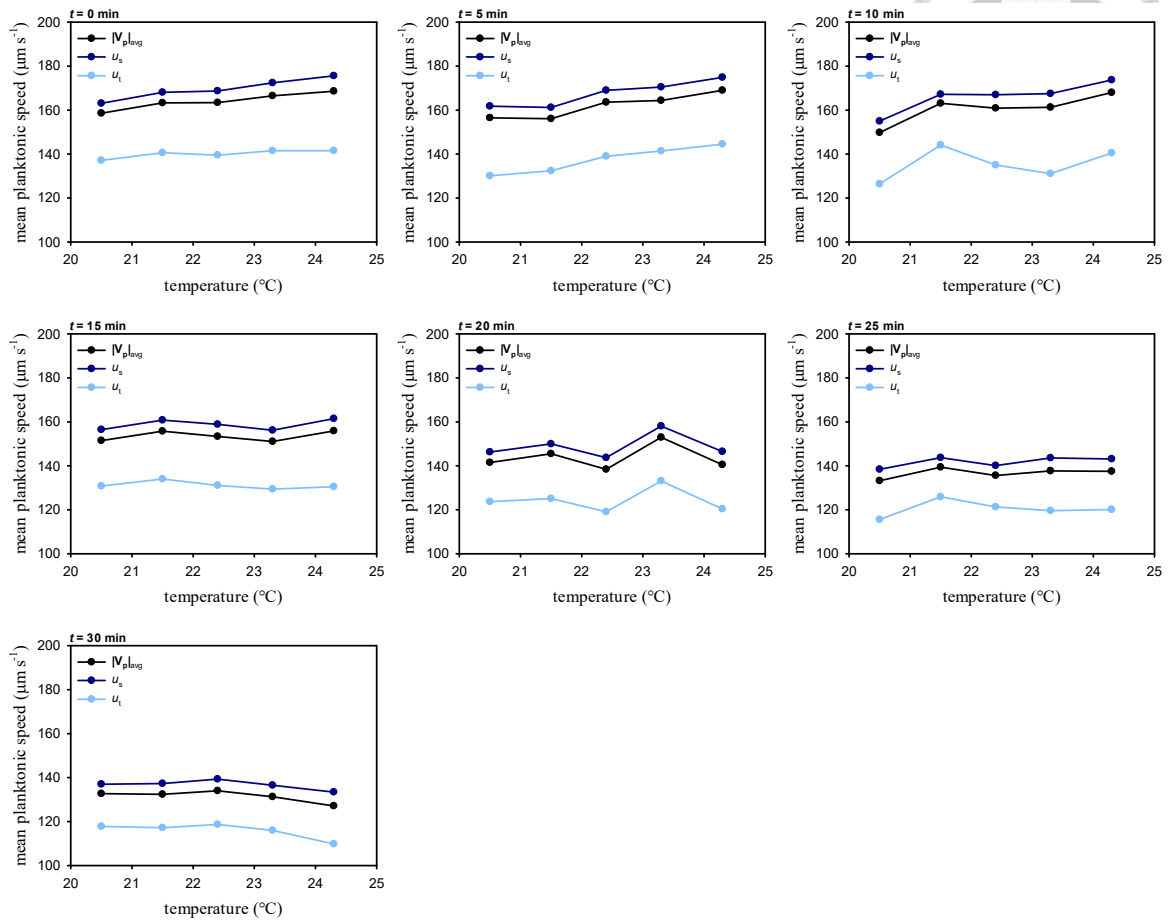


圖 3.44 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化

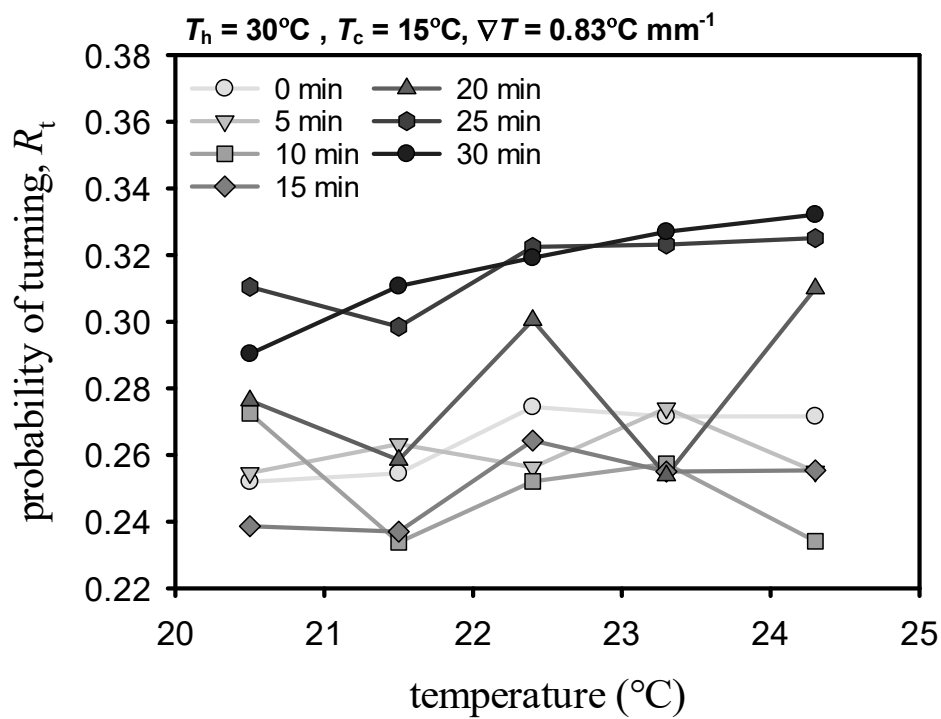


圖 3.45 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較

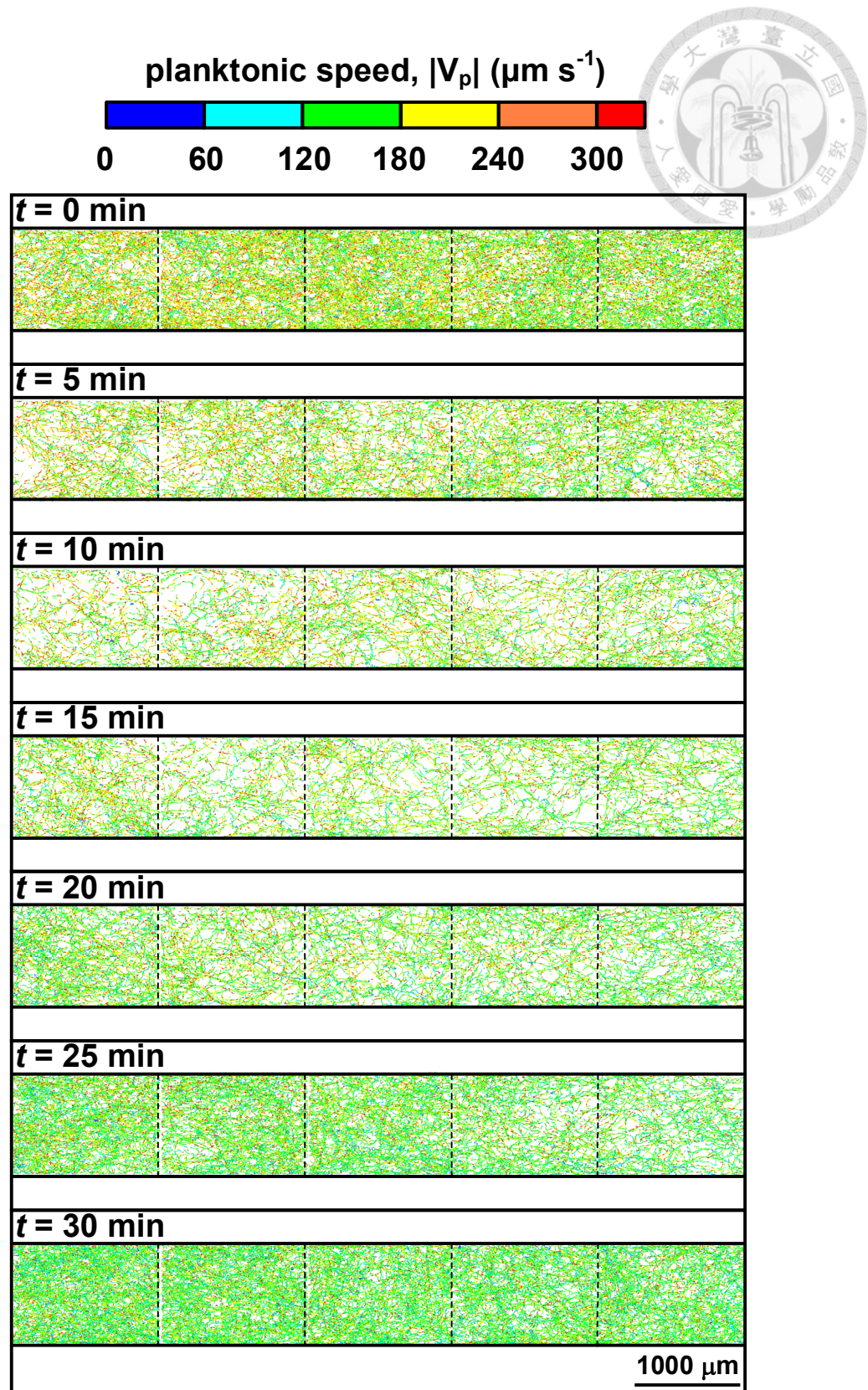


圖 3.46 熱端 30°C、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡
(虛線為溫度區間分隔線)

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.83^\circ\text{C mm}^{-1}$

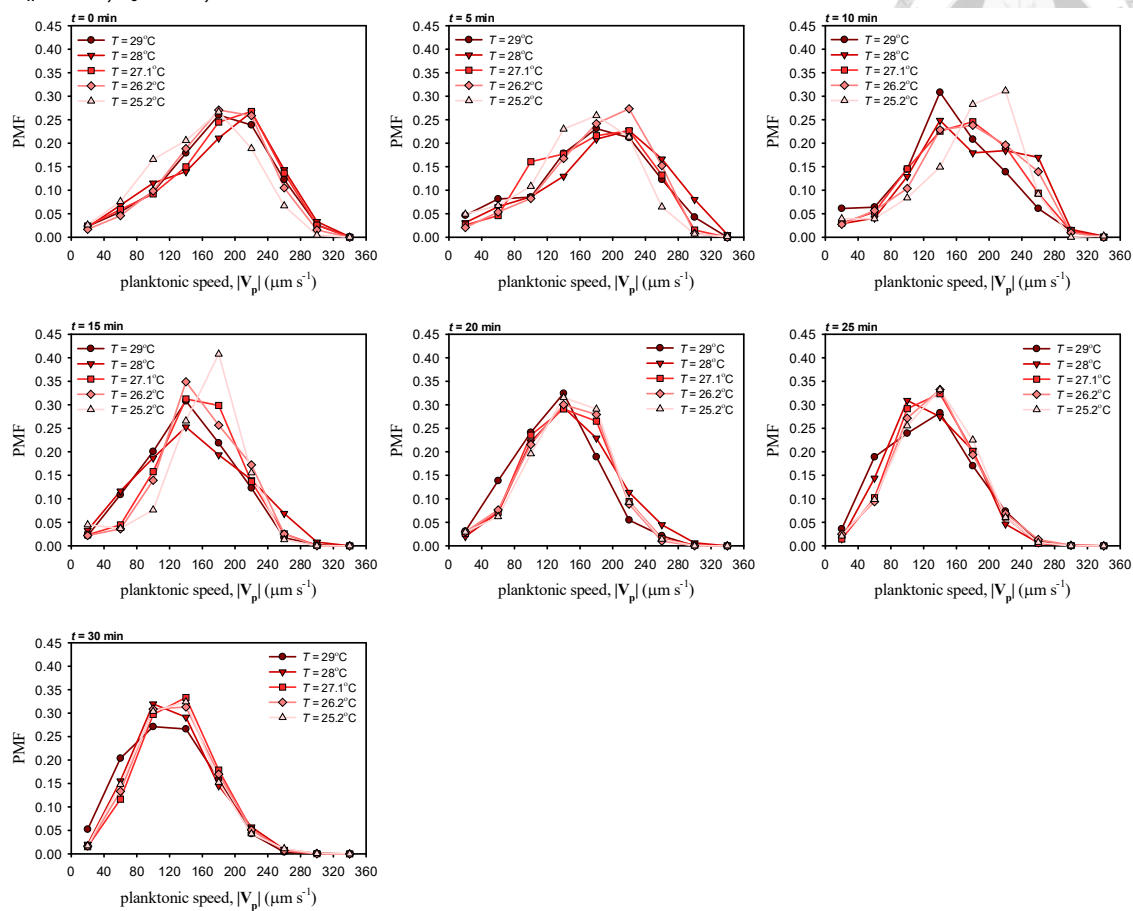


圖 3.47 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較

$T_h = 35^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.83^\circ\text{C mm}^{-1}$

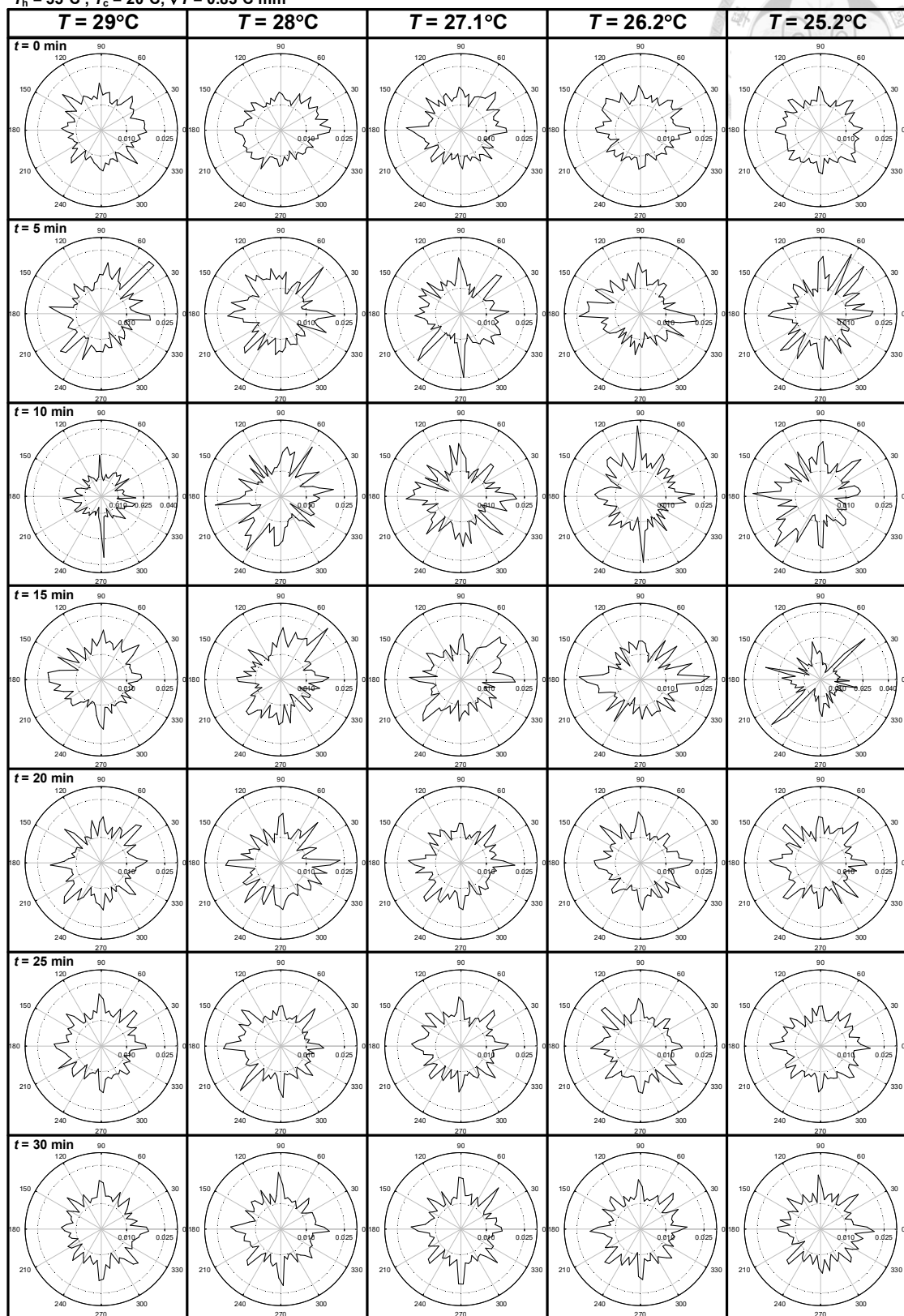


圖 3.48 熱端 35°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 15^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.83^\circ\text{C mm}^{-1}$

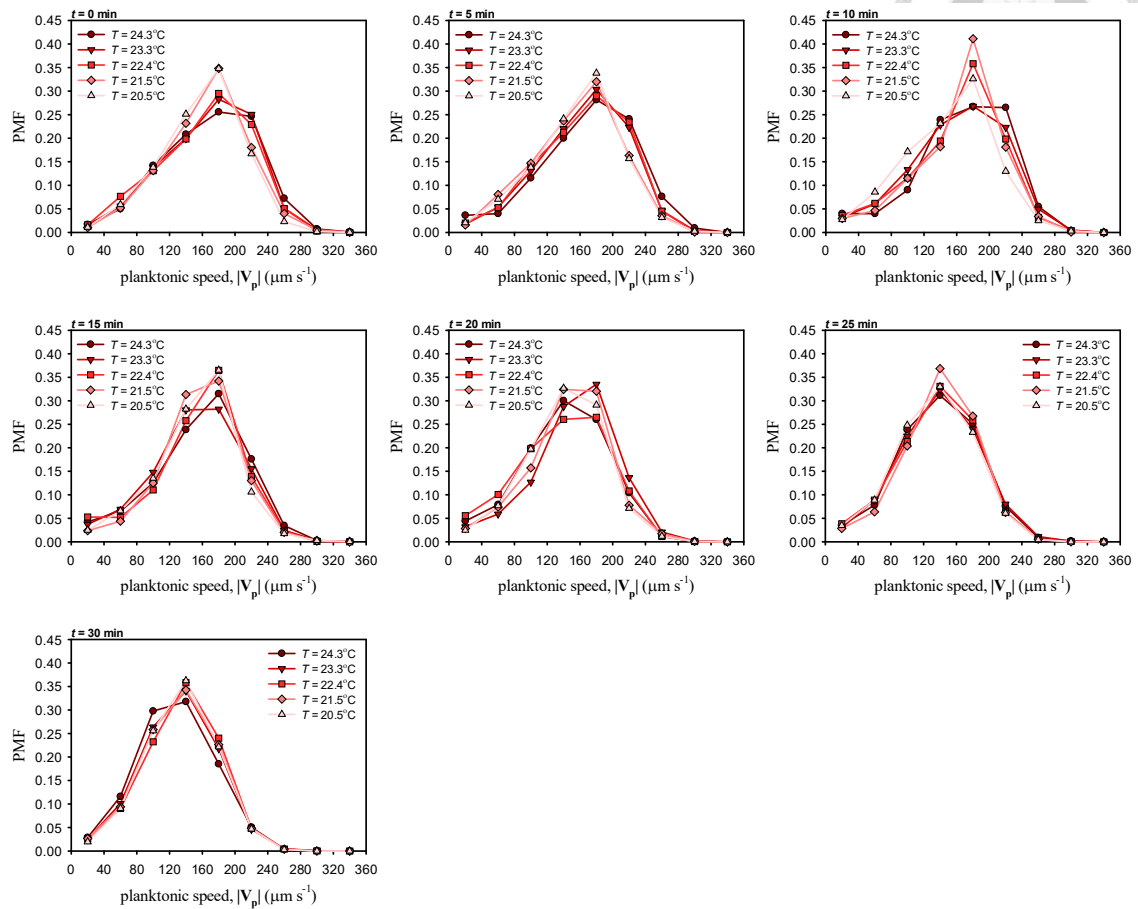


圖 3.49 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 15^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.83^\circ\text{C mm}^{-1}$

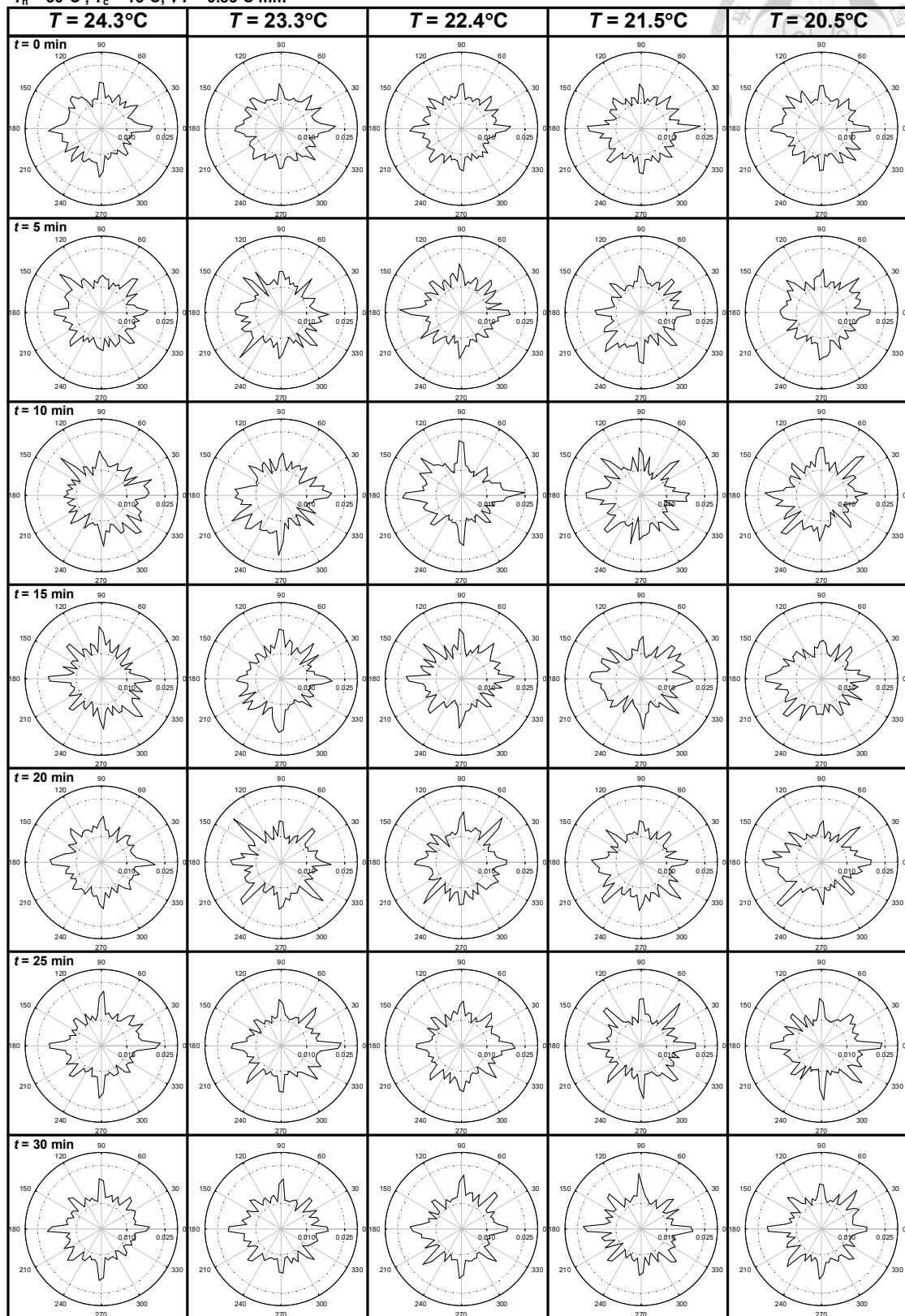


圖 3.50 熱端 30°C 、冷端 15°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化

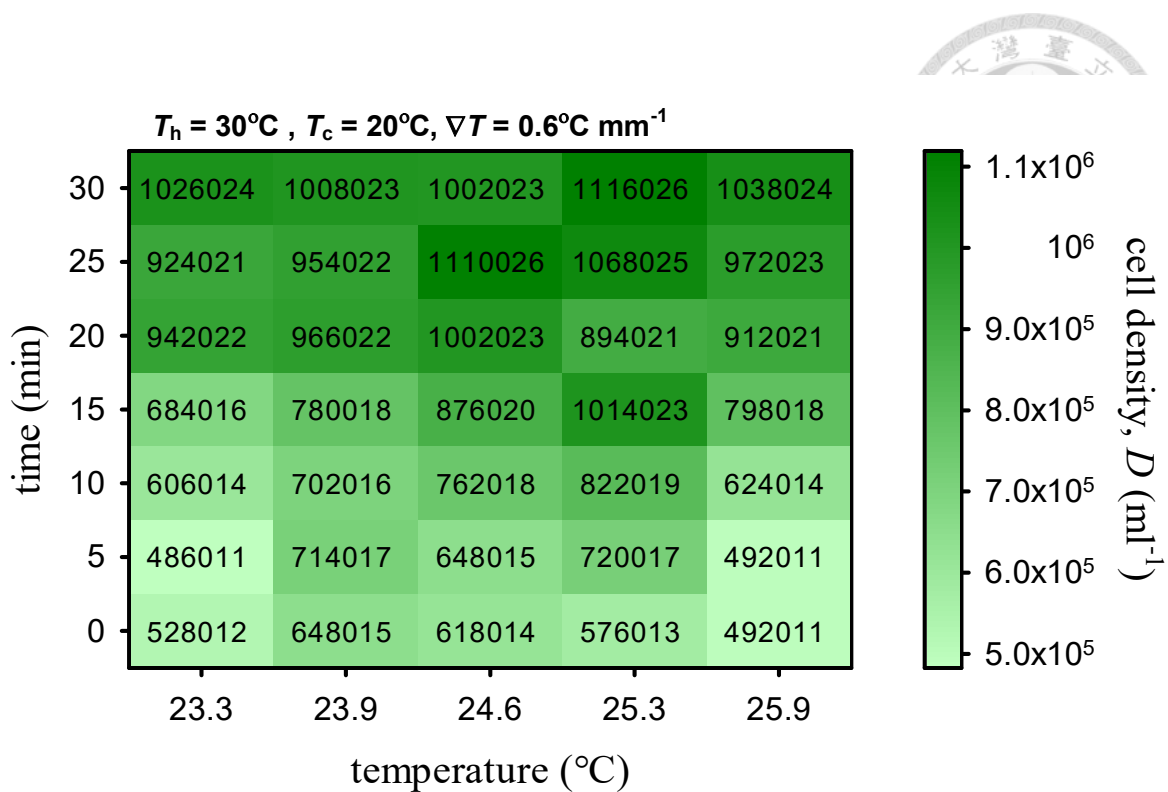


圖 3.51 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物族群密度隨時間之變化

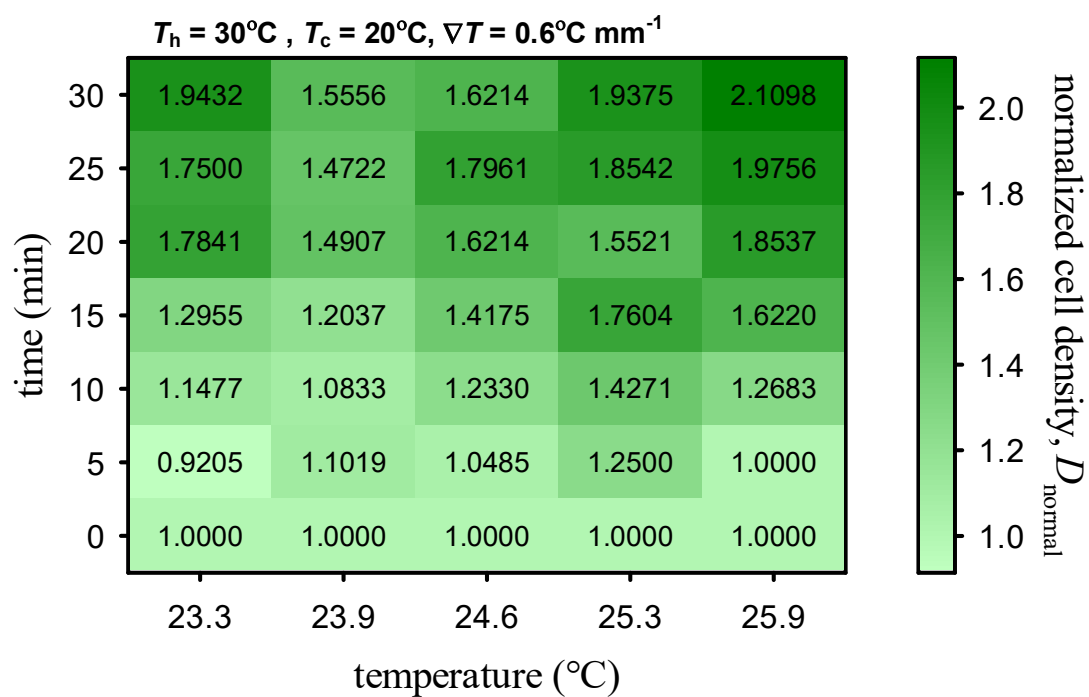


圖 3.52 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物正規化族群密度隨時間之變化

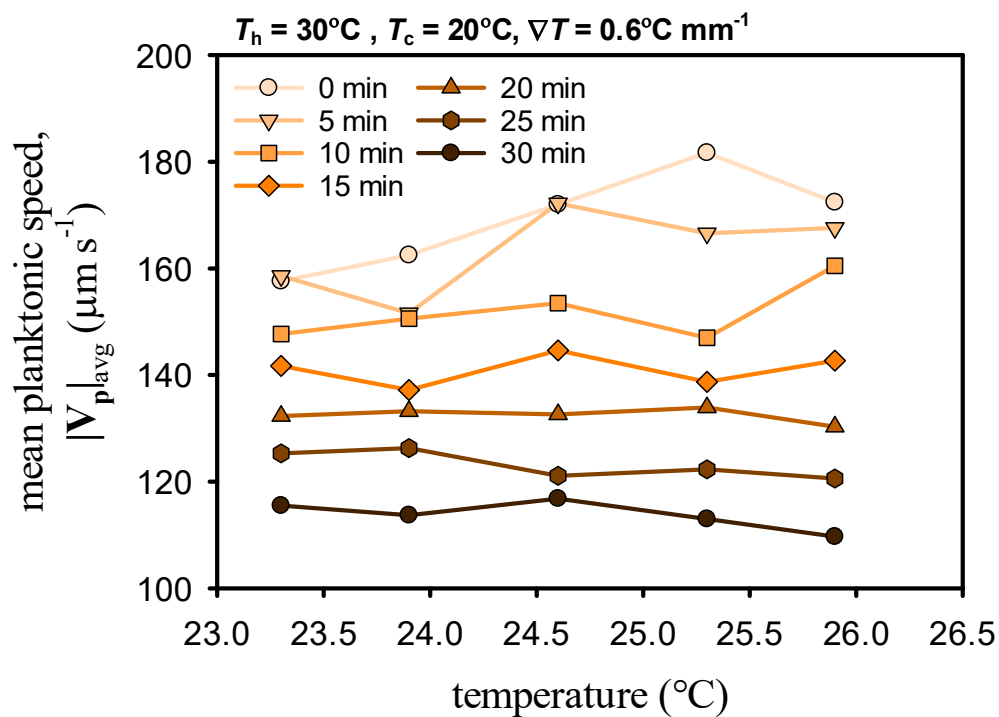


圖 3.53 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物平均游動速率在不同時間下之比較

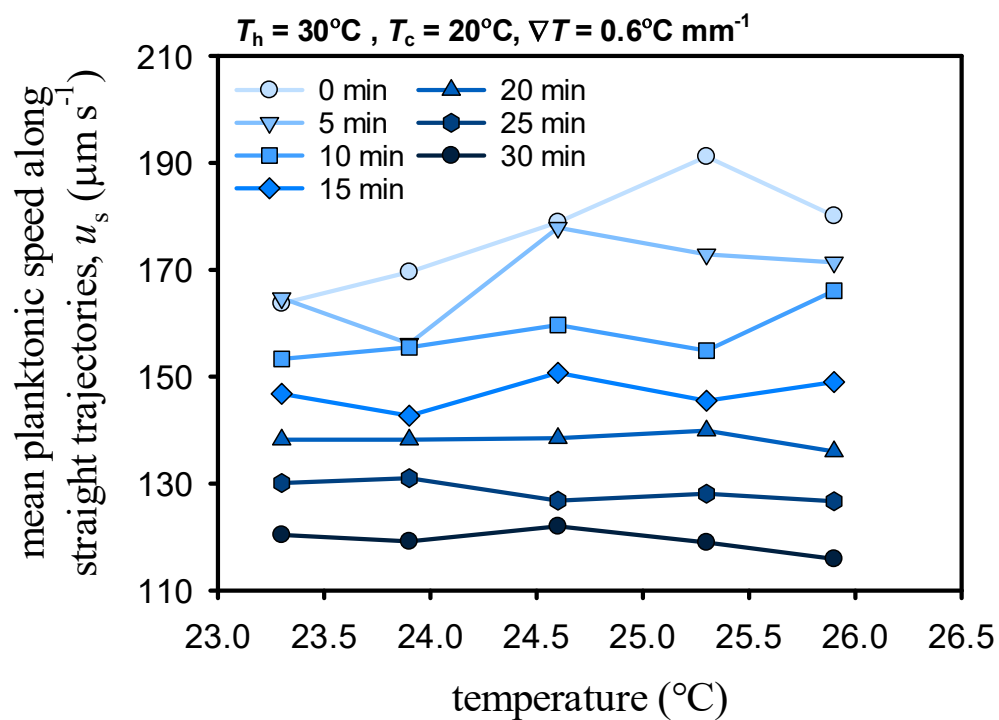


圖 3.54 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物平均直行速率在不同時間下之比較

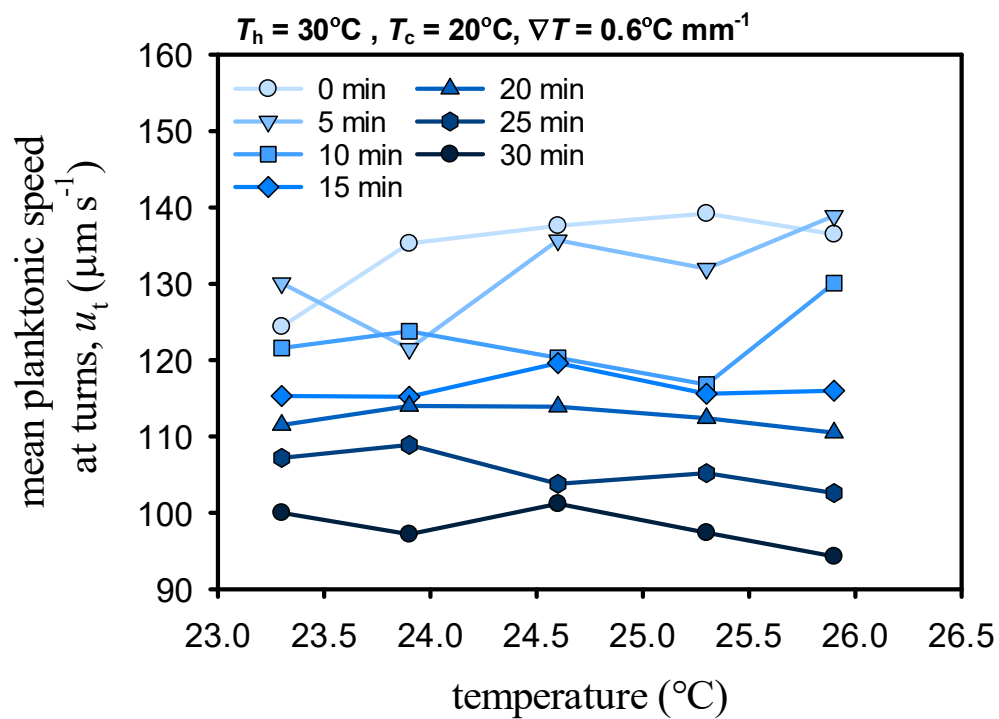


圖 3.55 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物平均轉彎速率在不同時間下之比較

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.6^\circ\text{C mm}^{-1}$

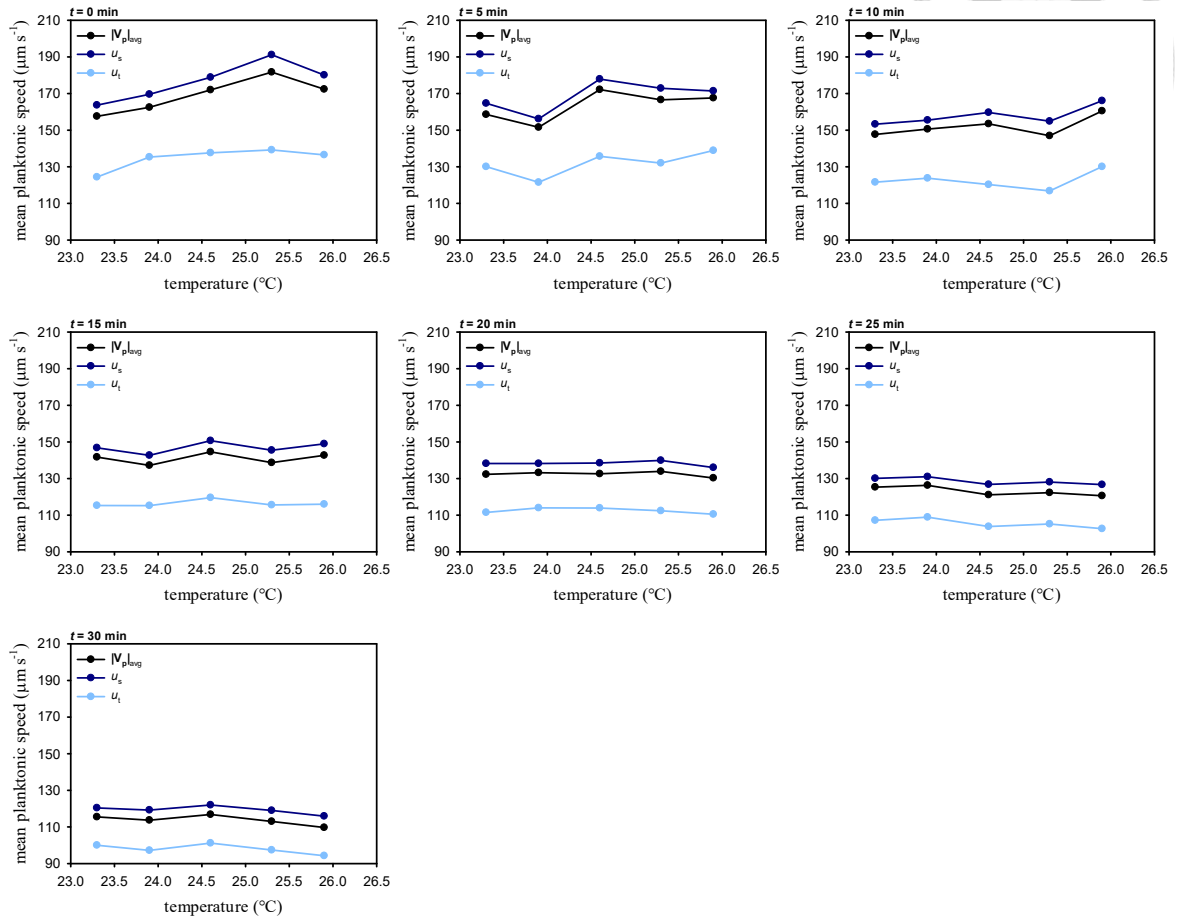


圖 3.56 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物直行速率、轉彎速率與平均游動速率隨時間之變化

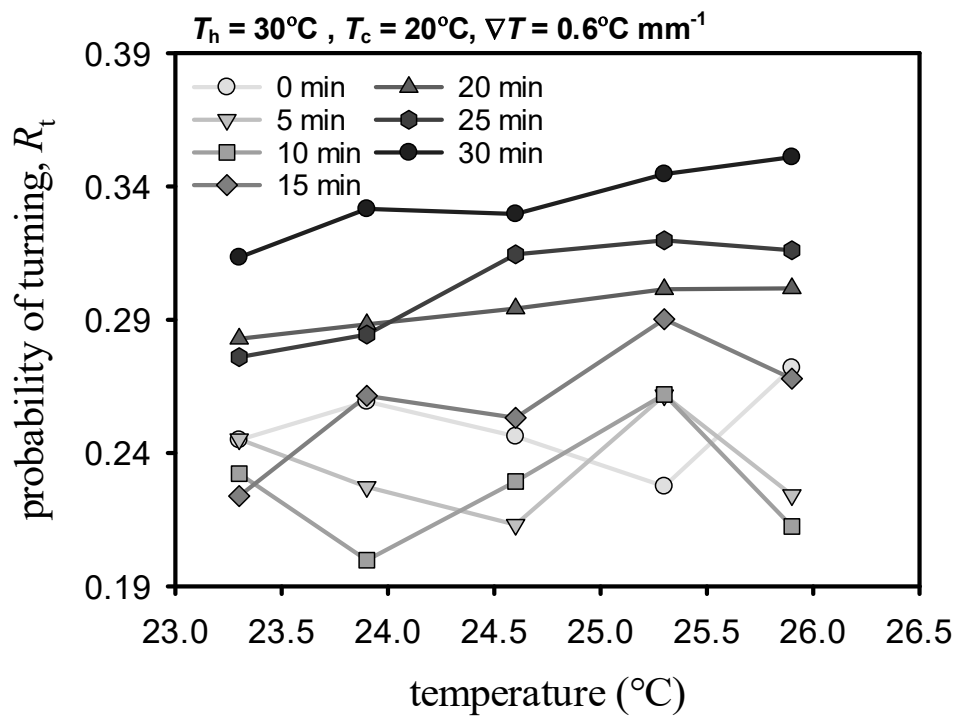


圖 3.57 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物轉彎機率在不同時間下之比較

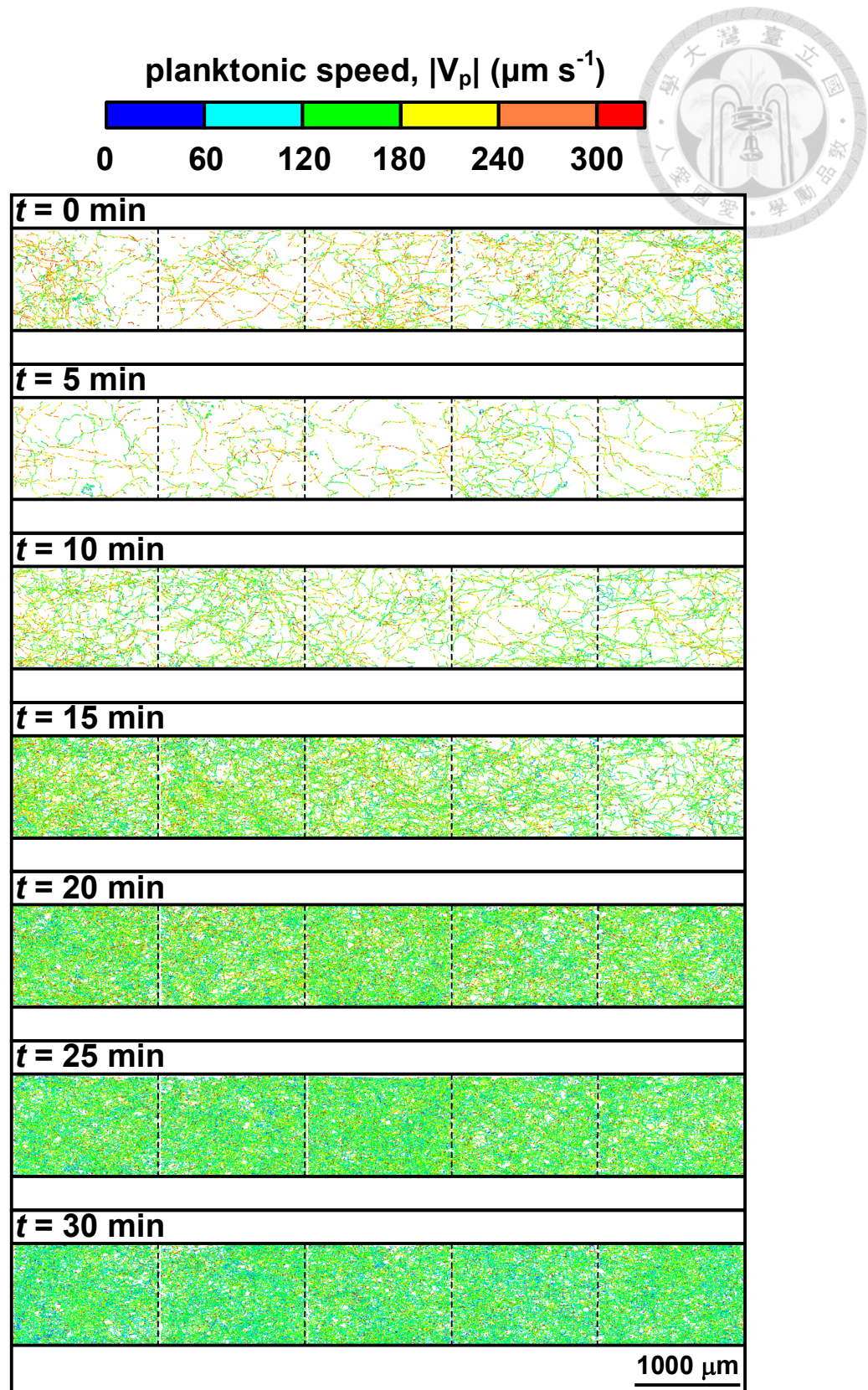


圖 3.58 熱端 30°C、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物游動軌跡
(虛線為溫度區間分隔線)

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.6^\circ\text{C mm}^{-1}$

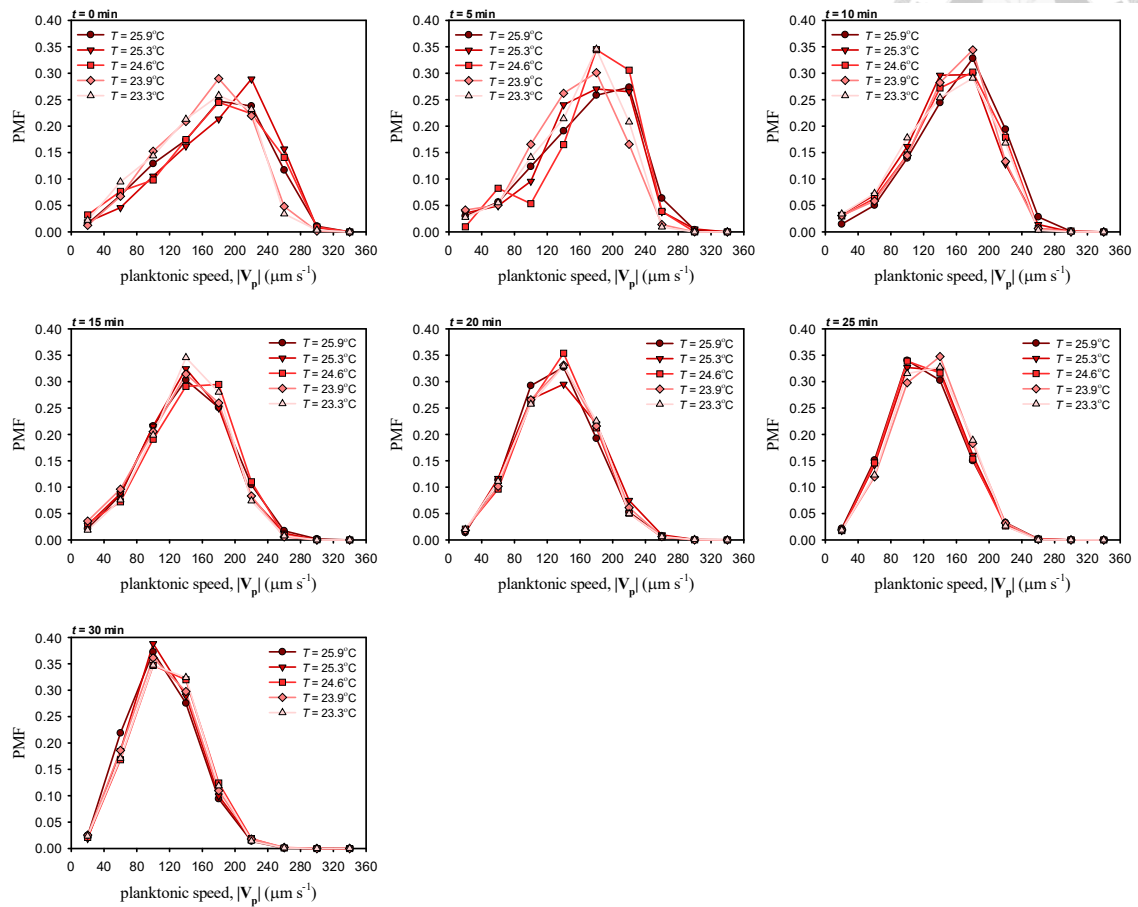


圖 3.59 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物游動速率之機率質量函數在不同時間下之比較

$T_h = 30^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, $\nabla T = 0.6^\circ\text{C mm}^{-1}$

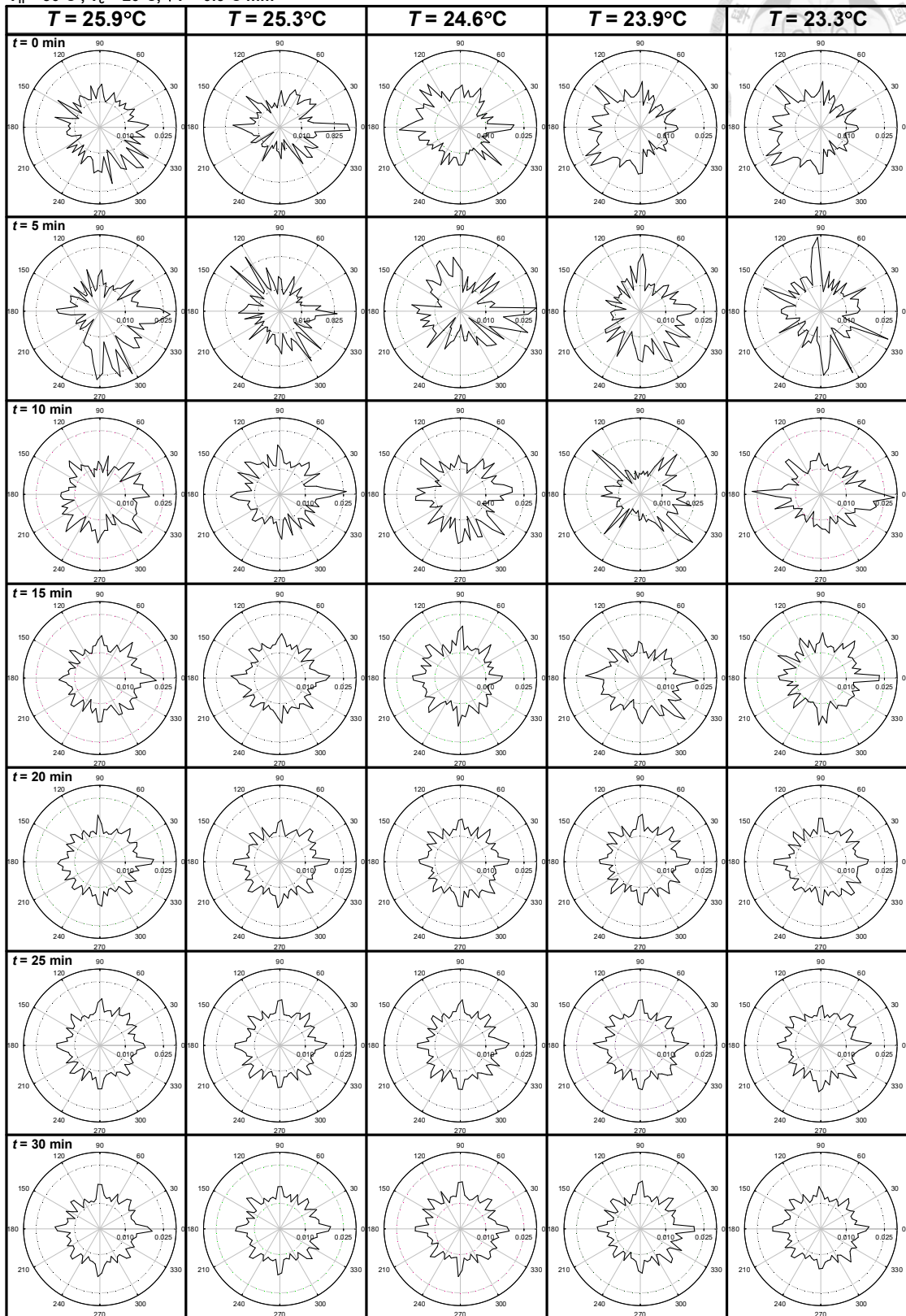


圖 3.60 熱端 30°C 、冷端 20°C 之各溫度區間浮游生物游泳角度之機率質量函數隨時間的變化