

國立臺灣大學理學院地理環境資源學系



碩士論文

Department of Geography

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

運用相對輻射校正增強小衛星 Planet NICFI 偵測熱帶

乾燥林植被季節性能力

Relative radiometric calibration of SmallSat Planet

NICFI imagery improves detection of seasonality in

tropical dry forest

王茵然

Yin-Ran Wang

指導教授：黃倬英 博士

Advisor: Cho-ying Huang, Ph.D.

中華民國 112 年 2 月

February, 2023



國立臺灣大學碩（博）士學位論文
口試委員會審定書

運用相對輻射校正增強小衛星 Planet NICFI 偵測熱帶乾
燥林植被季節性能力
Relative radiometric calibration of SmallSat Planet NICFI
imagery improves detection of seasonality in tropical dry
forest

本論文係王茵然君（學號 R08228021）在國立臺灣大學地理環境
資源學系、所完成之碩（博）士學位論文，於民國 112 年 1 月 17 日承
下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

黃倬英

（簽名）

（指導教授）

溫在弘

莊昀敬

鍾智昕



誌謝

回想起加入黃倬英老師研究室的那天，大約是一個和煦的午後，我推開 608 的門（那時候還沒有搬到 605），而老師在操作著一些儀器。我問老師能不能加入您的研究室，老師很爽快地答應了，一切夢就是這樣開始，如今竟已經過去四年。這四年間，世界的變化很大（疫情的突如其來），我個人也遭遇一些問題，不得已中間休學一段時間，這些對我而言都是不小的阻礙。但好在我擁有最好的老師，黃老師對我說加入過 605 就是永遠的大家庭，605 的大門永遠向我敞開。而我確實再次回來了，這是我目前並不長的人生中所做的最正確的決定。在指導我論文的過程及日常相處中，黃老師總是對情況並不好的我充滿耐心與信心，他的熱情態度一直在激勵著我繼續向前。我真的很喜歡聽老師講的很多笑話，和老師在一起的時間永遠那麼開心。

感謝口委溫在弘老師，在預口試階段就對我論文給予了關鍵的指導，對研究方向提出了新的見解。感謝另外兩位口委老師莊昀叡老師和鍾智昕老師，在論文完成階段給予了最後的一些修改意見。感謝中井太郎老師，我的森林生態學知識基本全部來自於中井老師的教授。感謝黃誌川老師，在專題討論的階段對我論文架構及寫作給予了許多建議。感謝中央大學的劉說安老師，在研討會交流時也給予了我寶貴的見解。感謝所有在台大教過我的老師，每個老師各有不同的風格，讓我增長學術知識同時也增長了不少人生閱歷。

605 研究室也充滿了老師本人的氣質，既有很強學術能力，又充滿歡聲笑語。這裡碰上的每一個人都非常特別。管理各項事務的婉瑜學姐對我而言是 605 的象徵，總是非常可靠地幫我解決問題。我們一起去花蓮的那幾天是我難忘的回憶。還有和我同屆的桔云，在你來了之後我才有了真正的朋友，我與研究室有關的記憶都有你的參與。還有 Lino，對我的論文進行了最為關鍵的技術指導，相信未來他一定可以實現自己的願望，當上一名出色的老師。已經畢業的欣儒學姐，是研究室的技術擔當，我遇到什麼問題都會放心去問欣儒學姐，因為她什麼都會。還有偶爾會出現的孝隆學長，會為大家提供研究上的建議，同時經常會冒出一些頗有哲理的人生意見。出野外也算是 605 最具特色的事情。感謝所有同行的研究室朋友的幫助，讓我經歷了從未體驗過的野外之行。

感謝我的夥伴們。好友郭晴茜，從我入學那天就一直陪伴我，是我在台灣的依靠。感謝男朋友沈君輝，推薦我來台灣，在台大見識到了廣闊的世界，在生活上也給予了我陪伴，一起遊歷了台北的許多地方。最後，感謝總是在幕後的父母，總是無條件地關心我、支持我。

雖然寫作論文的過程很辛苦，但有這麼多老師、朋友陪著我，讓我覺得每

一天都值得。此時此刻，交卷鈴聲響起，我的學生時代結束了。悲歡聚散一杯酒，南北東西萬里程。願所有人的未來人生一切順利。

王茵然謹誌

二零二三年二月十五日



摘要



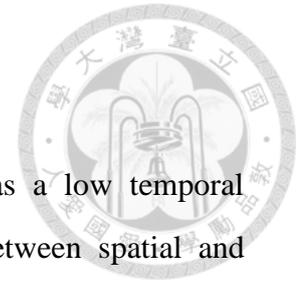
受限於技術和成本，具有良好空間解析度的陸地觀測衛星傳感器往往具有較低的時間解析度，因此在實際應用中需要不斷在空間和時間解析度間權衡，這種權衡在熱帶地區的研究中尤其具有挑戰性。濕潤季節頻繁的雲層增加了清晰影像的獲取難度。商業衛星儘管具有高性能，但其成本過高難以進行實際應用。如今以小衛星為代表的廉價商業衛星得到了發展，其中以 Planet 公司的產品作為代表。小衛星通過削減單個衛星的成本實現更密集的發射，並以星座組網的方式改善觀測模式，在空間解析度及獲取清晰影像能力上存在優勢。但小衛星資料質量尚未得到有效檢驗。現在來自挪威的環保組織 NICFI 與 Planet 開展了合作項目，提供了免費的熱帶地區 Planet 影像（Planet NICFI），藉此機會我們檢視了 Planet NICFI 的資料質量，以經過嚴格輻射校正的傳統衛星 Landsat 8/9 OLI 作為參照，發現 Planet NICFI 反映光譜變化能力有限，不能有效檢測乾燥季節植被生長差異。我們通過相對輻射校正（relative radiometric calibration, RRC）的方法嘗試改善 Planet NICFI 資料的輻射質量，以 Landsat 8/9 OLI 作為參考，增強不同波段間兩源影像的反射率一致性。本研究選取三種 RRC 方法進行對比，分別為基於非線性原理的直方圖匹配法（histogram matching, HM）、基於線性原理的 MAD 法（multivariate alternation detection）與 IR-MAD 法（iteration re-weighted MAD）。處理結果顯示，三種方法在操作穩定性上存在差異：HM 法受限於參考影像質量，在濕潤季節效果不好。MAD 法在濕潤季節檢測噪聲能力不足，而 IR-MAD 法在濕潤季節也可正常開展，取得了較好效果。經過 RRC 校正後 Planet NICFI 在保持高空間解析度與無雲的優勢的同時提高了光譜季節性差異。該結果為在熱帶乾燥林進行低成本與高空間解析度的大範圍植被生長監測提供了參考。

關鍵字：熱帶乾燥林，植被季節性，相對輻射校正，Planet NICFI，Landsat 8/9

OLI，直方圖匹配，MAD, IR-MAD



Abstract



Earth observation satellite with fine spatial resolution often has a low temporal resolution mainly due to technical limitations. The trade-off between spatial and temporal resolutions is particularly crucial in the tropics, for the more frequently cloud cover impedes optical satellite remote sensing instruments from obtaining cloud-free imagery. Commercial satellites may overcome the above issue, but the data may be costly. An alternative and cost-effective observation strategy based upon SmallSat has recently become an operational reality. SmallSats, represented by Planet's products, achieve more intensive launches by reducing the cost of a single satellite, and improve the revisiting time through satellites constellations, which lead to its advantages in high spatial resolution and stronger ability to obtain clear images. Planet, through Norway's International Climate and Forest Initiative (NICFI), now open free access to analysis-ready basemaps over the tropics, which shows a high potential in the field of vegetation metabolism monitoring. However, the radiometric data quality of SmallSat is not equivalent to a rigorously calibrated satellite such as Landsat 8. We tested the data quality of Planet NICFI by using Landsat 8/9 OLI as the reference images, and found that Planet NICFI has limited ability to reflect vegetation spectral changes in tropical dry forests (TDF), especially during the dry seasons. Therefore, we attempted to improve the radiometric quality of Planet NICFI by using relative radiometric calibration (RRC). We using Landsat 8/9 OLI as a reference data to enhance the consistency in surface reflectance of the two images. Three RRC methods were selected for comparison, namely histogram matching (HM) based on the nonlinear assumption, multivariate alternation detection (MAD) and iteration re-weighted MAD (IR-MAD) based on the linear assumption. The result showed that HM cannot be implemented when the images are contaminated by clouds, while MAD and IR-MAD are more generally available, for they can detect cloud-free pixels automatically and enhance the background no-change area. IR-MAD is more effective in removing noise and therefore

can also operate normally in wet season. The calibrated data showed improvement in seasonal variation of spectral and has higher spatial details with clear boundary information compared to the reference Landsat 8/9 OLI imagery. Our findings provide a foundation for cost-effective and accurate high spatial resolution vegetation phenology monitoring in TDF.

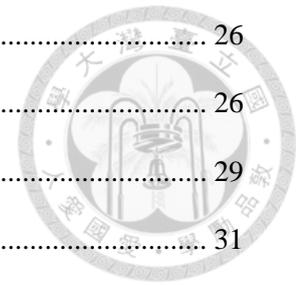
Keywords: tropical dry forest, vegetation seasonality, relative radiometric calibration, Planet NICFI, Landsat 8/9 OLI, histogram matching, MAD, IR-MAD

目錄



誌謝.....	i
摘要.....	iii
Abstract.....	v
目錄.....	vii
圖目錄.....	ix
表目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	3
1.3 研究目的和技術路線.....	6
第二章 文獻回顧.....	8
2.1 陸地植物生長的季節性特徵及其觀測方法.....	8
2.2 衛星技術研究發展.....	9
2.2.1 傳統衛星技術進展與局限.....	9
2.2.2 小衛星技術進展與局限.....	10
2.2.3 立方衛星與 Planet 公司.....	13
2.2.4 Planet NICFI 項目.....	14
2.3 影像相對輻射校正技術研究進展.....	15
第三章 資料來源及研究方法.....	21
3.1 研究對象介紹.....	21
3.1.1 熱帶地區植被組成及熱帶乾燥林的概念.....	21
3.1.2 研究區選取原則.....	23

3.2 資料收集及處理	26
3.2.1 Planet NICFI 衛星影像	26
3.2.2 Landsat 衛星影像	29
3.2.3 WorldView-2 衛星影像	31
3.3 方法原理	32
3.3.1 直方圖匹配法	32
3.3.2 MAD 法	33
3.3.3 IR-MAD 法	36
3.3.4 歸一化植被指數 NDVI	37
3.3.5 均方根誤差 <i>RMSE</i>	38
第四章 實驗與分析	39
4.1 三種方法實驗與結果	39
4.1.1 基於分佈：直方圖匹配法	39
4.1.2 基於像元：MAD 法與 IR-MAD 法	41
4.1.3 三種相對輻射校正效果對比與評價	50
4.2 相對輻射校正後 Planet NICFI 反映的季節變化	55
4.2.1 整體區域光譜季節變化趨勢	55
4.2.2 特定像元光譜曲線變化趨勢	59
第五章 結論與討論	61
參考文獻	64





圖目錄

圖 1 本文分析流程圖	7
圖 2 現有輻射校正方法說明	17
圖 3 540 個熱帶乾燥林及 WWF 規定的亞熱帶乾燥闊葉林生態區的分佈..	24
圖 4 研究區說明	25
圖 5 Planetscope 光譜響應曲線	27
圖 6 Landsat 1-9 帶通波長對比	30
圖 7 區域劃分過程與結果	32
圖 8 直方圖匹配示意圖	33
圖 9 MAD 的算法流程	35
圖 10 自由度為 4 的卡方分佈	36
圖 11 IR-MAD 法的算法流程	37
圖 12 直方圖匹配過程	40
圖 13 2021 年 9 月直方圖匹配的異常狀況	41
圖 14 IR-MAD 法迭代坐標圖	42
圖 15 濕潤季節與乾燥季節實際 NMAD 分佈	43
圖 16 濕潤季節與乾燥季節 NMAD 灰度圖像	44
圖 17 PIFs 點位提取示意圖	45
圖 18 濕潤季節不同 PIFs 提取方法散點圖	46
圖 19 乾燥季節不同 PIFs 提取方法散點圖	47
圖 20 不同時期四波段的擬合直線圖	49
圖 21 三種方法相對輻射校正結果對比	51
圖 22 Planet NICFI 校正前後反射率季節性對比	57
圖 23 校正後 Planet NICFI 精細尺度季節差異	58
圖 24 特定像元點校正前後的光譜變化	60



表目錄

表 1 小衛星分類	11
表 2 Planetscope 三種傳感器類型	28
表 3 待歸一影像 Planet NICFI 的技術參數表	28
表 4 參考影像 Landsat 技術參數表	30
表 5 每月影像對應傳感器類別及拍攝日期	31
表 6 各波段不同閾值 t 的 R^2 和 $RMSE$	45
表 7 基於 IR-MAD 5%提取的線性擬合係數表	48
表 8 原始影像對與經過三種相對輻射歸一化後影像對的均方根誤差	54



第一章 緒論

1.1 研究背景

傳統衛星影像在大規模、長時間序列的監測中有著難以替代的優勢，在植動態監測等生態領域有著廣泛應用。然而對熱帶地區濕潤季節的監測一直存在難點，具體在於熱帶地區的可用影像獲取難度很高，主要有兩點原因：第一，極地軌道衛星在高緯度地區會有軌道重疊現象，而處於低緯度的熱帶地區不存在這種情況，因此熱帶地區的平均重訪時間會低於高緯度地區(Li & Roy, 2017)。第二，熱帶地區的氣候的代表有熱帶雨林氣候、熱帶季風氣候，這些氣候類型在濕潤季節尤其會潮濕多雨，導致雲層頻繁出現，光學遙測影像的質量會受到很大干擾。以 WorldView 為代表的高性能商業衛星理論上可能解決以上問題，但因研發和資料採集成本很高，因而影像難以投入廣泛應用。

鑒於以上傳統商業衛星存在的成本過高的問題，一種新的技術思路是將傳感器逐漸小型化以使其更具經濟性，此策略代表性的產品就是小衛星 (small satellite)。小衛星也被稱為 SmallSat, 指重量小於 500kg 的衛星。小衛星也是一種商業衛星，但相比普通商業衛星，小衛星的設計成本低很多，因此可以視為廉價版的商業衛星。它們的生產和發射速度比傳統衛星快得多，因為尺寸很小使得它們能夠快速建造，並且不需要專用的運載火箭，而是可以作為次要載荷搭載在其他衛星的火箭上進行發射，這種靈活性使得小衛星星座可以在發生故障時通過其他平台快速更新。軌道設計上，小衛星軌道高度更低，這樣一方面減少了能量的消耗，一方面減少了到達地表前的能量衰減，從而會有效降低資

料的傳輸成本。目前小衛星的商業公司中成立較早並且規模最大的是 Planet (Planet Labs, Inc., San Francisco, CA, USA)，已經擁有兩座小衛星的星座群，分別為 Planetscope 與 SkySat，其中 DOVE 衛星組成的 Planetscope 星座 (Planetscope constellation，下文統稱為 Planetscope 資料) 衛星數量超過 200 顆。DOVE 衛星十分小巧，由多個 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 的單位立方體構成，重量在 10kg 以下，因此也被稱為立方衛星 (CubeSat)。總體來說，小衛星可以依靠低成本的優勢發射大量的數量，由此實現更廣的覆蓋範圍和更密集的重訪時間，從而大大提高獲取熱帶濕潤季節影像的概率。

然而 SmallSat 還處於發展初期，目前具有多方面的限制。首先，因為整體體量的減小，它的輻射資料質量跟經過嚴格輻射校正的傳統衛星存在差距。其次，目前小衛星支持的光譜範圍有限，對於以高空間解析度為招牌的 SkySat 星座來說僅支持五個波段的偵測 (RGB[紅綠藍]，PAN[全色態]及 NIR[近紅外光])，而 Planetscope 星座雖然即將全部迭代為八波段傳感器，但現階段提供的資料僅局限在 RGB 及 NIR，導致能夠應用的研究類型有限。另外，小衛星的影像幅寬較小，組合成一張完整影像需要進行多次的拼接，並且因其傳感器數量眾多，每日都能拍攝大量影像，因此單日影像是由當日拍攝多張影像鑲嵌 (mosaic) 而成，這其中就涉及到不同鑲嵌算法精度的問題，及多代傳感器之間資料整合的問題，此環節可能會造成一定資料精度的損失。特別是幾何精度及輻射精度：多個場景組合時容易出現配准上的差距，對於需要精確地理定位的研究來說可能需要進行額外幾何校準的操作；即使是同日拍攝的影像，不同時段也會有不同大氣條件的差異，因此造成在大氣校正時產生的誤差。由於星座同時可能由多代傳感器組成，不同傳感器都有獨特的光譜響應能力，因此即使經過良好校準的傳感器也會產生不同的輻射值(Frazier & Hemingway, 2021)。另外，Planet 在輻射校正時假定地表均為朗伯面 (Lambertian surface)，沒有考

慮 BRDF 效應。以上種種原因都可能造成 Planet 資料精度上的問題。因此，在現階段使用 Planet 資料可能需要根據研究需求進行額外的幾何校準或者輻射校正的操作。

另外資料使用成本也是需要考量的問題。儘管成本已經大大縮減，但 Planet 的衛星資料仍需要透過私人訂購的方法進行購買。然而來自挪威的環保組織 NICFI (Norway's International Climate and Forest Initiative) 於 2020 年和 Planet 簽署了合作計劃 (預計持續到 2023 年之後)。在項目持續期間，用戶可免費獲取 2015 年以來 Planet 熱帶地區的影像 (以下將該部分資料簡稱為 Planet NICFI 資料)。這給我們研究 Planet 的影像質量提供了一個很好的機會，我們可藉此評估目前小衛星資料的真實狀況，從而客觀認識到小衛星影像的潛力和局限。進一步，我們可以探索改善 Planet NICFI 影像質量的方法，如果能夠使免費的 Planet NICFI 資料的質量達到應用標準，會為熱帶地區的遙測研究提供高性價比的資料補充。

1.2 研究動機

目前已有學者將 Planet NICFI 資料應用在植被分類(Vizzari, 2022)、農業監測(Thwal, 2022)、樹木死亡監測(Pascual, 2022)等領域，但目前對於應用 Planet NICFI 進行植被生長監測的研究較少，特別是長時間、大面積的植被生長監測，其中尚未有研究顯示 Planet NICFI 在監測植被生長季節差異上的能力，本研究希望可以對此進行補充。為此，本研究在選取研究區時，希望研究區的植被季節性變化更明顯，如此可以在遙測影像上顯出更明顯的季節光譜反射率差異。考慮到熱帶雨林儘管是最具代表性的熱帶植被類型，但其全年植被生長均



很茂盛，在遙測影像上較難反映出植被指數差異，而熱帶還有一種植被類型為熱帶乾燥林（tropical dry forest），和雨林的不同在於其生長在具有降水季節性差異的稀樹草原氣候中，植被除常綠林以外有大面積的落葉林，乾燥季節落葉林的生長在影像上可以和常綠林顯示出較大差異，如此我們將研究區設在季節性變化更強的熱帶乾燥林。在過去的研究中，對於熱帶乾燥林的植被監測較難推進，除熱帶遙測共通的濕潤季節雲層覆蓋問題的障礙以外，還有一個障礙在於熱帶乾燥林因降水差異導致植被異質性更強，因此對影像的空間解析度要求高，而傳統衛星難以捕捉到景觀的多樣性，高空間解析度的商業衛星（VHR）則應用成本過高（Awuah, 2022）。因此小衛星 Planet NICFI 資料為應用高空間解析度影像進行快速且低成本的植被監測提供了新的機會。

由此我們收集了研究區從 2021 年 5 月至 2022 年 5 月間 13 個月的 Planet NICFI 資料，發現這部分資料的優勢在於空間解析度高，而輻射能力存在問題。其光譜特徵的解釋力有限，不能檢測出乾燥季節落葉林與常綠林間的光譜差異，導致全年研究區的植被季節性變動在影像上不明顯。我們同時收集了對應時期的 Landsat 8/9 OLI 的資料作為參照，因 Landsat OLI 傳感器是目前應用廣泛、得到了研究普遍輻射精度認可的經過嚴格輻射校正的傳統衛星資料。在對比後發現 Landsat 能更好展現出研究區全年的光譜反射率差異，並且常綠區域（evergreen forest）與落葉區域（deciduous forest）在乾燥季節差別明顯，然而其重訪時間較高，在濕潤季節的影像受到雲層干擾明顯，並且空間解析度較低。由此本文想到採用輻射校正的方法，以 Landsat 做為參照，通過提高 Planet NICFI 與 Landsat 之間的輻射一致性來改善其輻射質量，實現對兩個傳感器的優勢進行結合。若校正之後的資料既能保留高空間細節，也可以保持更好的光譜完整性，則可為熱帶乾燥林植被研究提供高性價比的資料補充。

輻射校正方法包括絕對輻射校正（absolute radiometric calibration, ARC）和

相對輻射校正(relative radiometric calibration, RRC)兩種(Hong & Zhang, 2008)。

鑒於我們無法獲取地面資料以及影像拍攝時的大氣條件，本研究採用相對輻射校正進行操作。

現有的相對輻射校正方法很多，依據其原理，可以分為線性和非線性兩類。其中非線性方法的研究較少，只有直方圖匹配法及機器學習法（以神經網絡方法為主）。大量研究集中線性回歸的方法，其技術關鍵是選取偽不變特徵點（Pseudo-Invariant Features, PIFs）(Denaro & Lin, 2020)。目前學者們已經提出了很多半自動、自動的選取 PIFs 的方法，需要根據不同影像的特點選取適合的方法。其中 Nilson 提出的基於典型相關分析（Canonical Correlation Analysis, CCA）的多元變化檢測法（Multivariate Alternation Detection, MAD）可以同時對多個波段進行 PIFs 提取，十分適用於處理來自不同傳感器的多時相遙測影像，對原始數據的質量和輻射校正的要求相對較低。之後 Canty 針對 MAD 法在處理噪聲上的不足進行了改進，提出了升級版的迭代加權法（Iteratively reweighted multivariate alternation detection, IR-MAD），通過多次迭代重新計算權重的方法提高了精度與強健性。

目前對於 Planet 影像的相對輻射校正研究文獻較少，尚不確定 Planet 資料最適合的相對輻射校正方法，因此本研究嘗試選取多種方法進行對比，以探索可以達到的更好的校正效果。但因本文重點不在於改進現有算法或者提出新的算法，因此本文在選取方法時還考慮到方法的簡便性以及目前應用的廣泛性。最終本文在基於非線性原理中選用直方圖匹配法，在線性原理中選用 MAD 法及 IRMAD 法。



1.3 研究目的和技術路線

我們以 Landsat 8/9 OLI 為參考影像，採用直方圖匹配法（HM）、MAD 法與 IR-MAD 法對 Planet NICFI 影像進行相對輻射校正，以期望提高 Planet NICFI 反映熱帶植被季節性變化的能力，並對三種方法的效果進行評估。

將主要針對以下內容開展研究：

- 1) 總結三種方法處理結果的差異與各自的特點。
- 2) 檢視校正後結果是否可以讓 Planet 對植被變化的偵測能力提高。具體在於精細尺度上的地物光譜、生態尺度上的植被指數（以歸一化植被指數 NDVI[normalized difference vegetation index]及增強型植被指數 EVI[enhanced vegetation index]為指標）是否存在差異。並且將研究區分為常綠林（evergreen forest）及落葉林（deciduous forest）兩種區域進行對比，以說明對不同植被類型的效果差異。

對於上述第一點，本文將從以下兩個角度評價 RRC 方法的差異：

- 1) 對比三種方法操作過程的穩定性。
- 2) 評價歸一前後目標影像與參考影像目視效果差異，並計算三種方法的目標影像與參考影像之間均方根偏差 RMSE（root mean square error）。

詳細分析流程圖如圖 1。

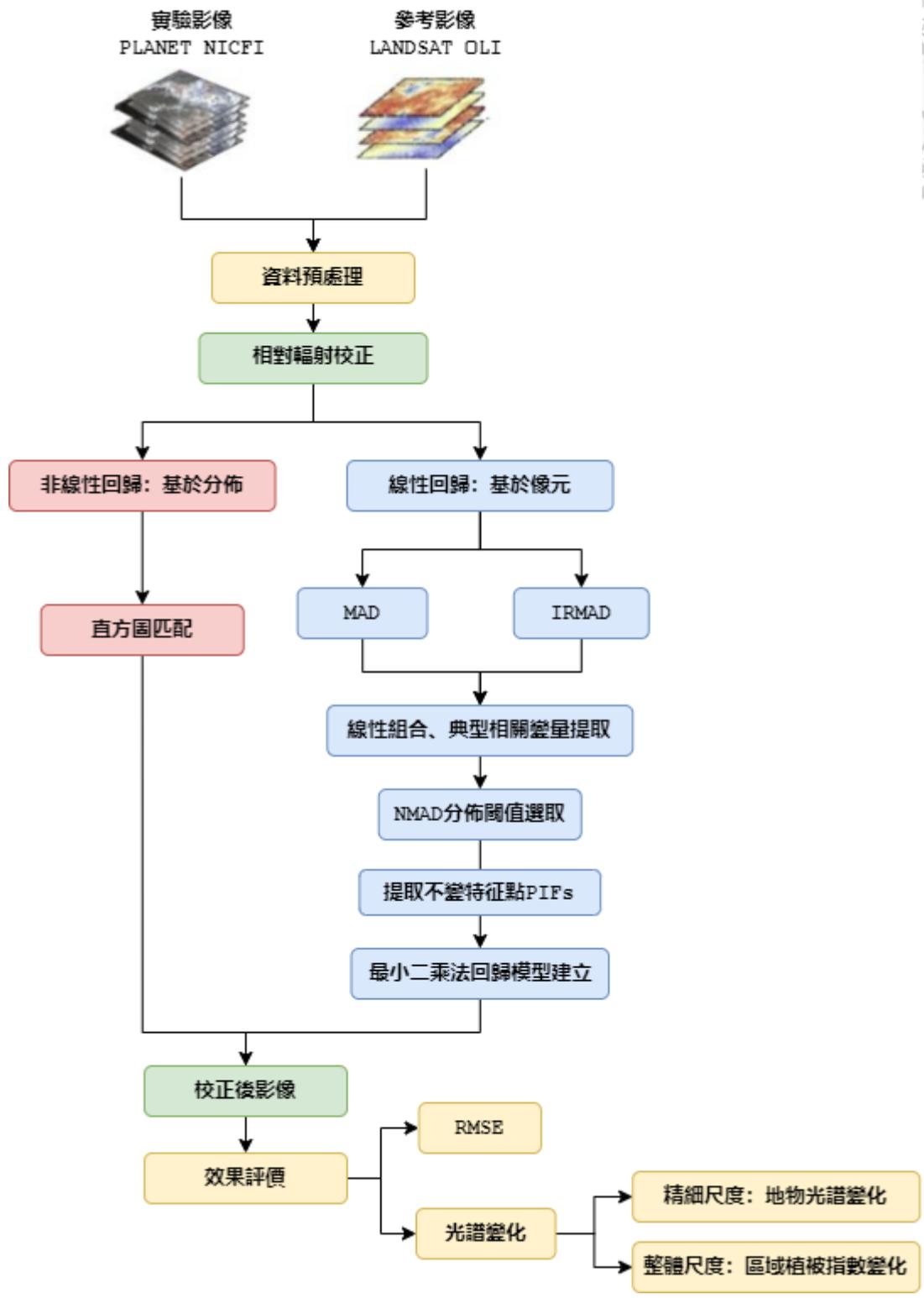


圖 1 本文分析流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 陸地植物生長的季節性特徵及其觀測方法

植被季節性可以定義為植被結構或功能（如葉面積、光合作用）在一個天文年間發生的週期性變化模式，與植物物候密切相關(Eastman et al., 2013; Ye et al., 2021)。季節性強弱與所處緯度密切相關。低緯度地區因不存在降水或者氣溫等非生物因素的明顯波動,多個短雨季密集出現，使得降水較為均勻地分佈在全年，因此植物全年保持生長狀態，而沒有明顯的植物非生長季(Addo-Bediako et al., 2000; Mandl et al., 2018; Stevens, 1989)；隨著緯度升高，短雨季逐漸合併為一個較長雨季(van Schaik & Pfannes, 2005)，使植物存在明顯的生長季節。同樣，光週期（Photoperiod）的全年波動也會隨著緯度增加而變強

(Hill,2005)。植被季節性強調連續的植物生長過程，屬於連續型時間時間，較不易表達和記錄。在人類發展早期，對特定物候事件（如植物開花、結果）的觀測與記錄更為普遍。

傳統的觀測方法為人工觀測。上世紀 70 年代之後，因遙測技術的發展，使用衛星依據植被光譜特性來監測季節性的方法得到了廣泛推廣。人們發明了多種能夠反映植物生長狀況的陸地植被指，應用最廣的是歸一化植被指數 NDVI。NDVI 最初於 1973 年由 Rouse 等人應用在北美大平原（Great Plains）的研究中 (Rouse et al.,1973)，隨後由 Tucker 整理並正式發表(Tucker, 1979)。然而當前從遙測的光譜信號評估植物生長特徵容易受到植物冠層遮蔽和大氣介質的干擾，未來還存在很多技術挑戰(Houborg et al., 2015)。除衛星遙測以外，以無人機和物候相機為代表的近地面遙測工具也得到了發展。相比衛星遙測，後者的自主操作性更強，並能夠滿足更高的空間解析度需求，能夠填補衛星遙測無

法完成的研究缺口，但是實際應用過程會受到功率限制及電池壽命限制，地理可用性較低(Curnick et al., 2022)。

整體來說，光譜、空間、時間、輻射解析度的增強顯著推進了植被特徵的監測，目前正在逐步邁進對植物特徵精準監測的時代。



2.2 衛星技術研究發展

2.2.1 傳統衛星技術進展與局限

傳統單源衛星 (single-source satellite missions) 成本很高，並且在空間解析度和影像獲取頻率方面會受到物理條件限制。例如，Landsat 8 衛星是已經持續了 50 年的 Landsat 系列衛星近十年的觀測主力，其對地表的監測能力已經得到了研究的廣泛印證(Houborg & McCabe, 2016)。這部分成績的取得源於 Landsat 8 傳感器設計先進、能量-雜訊比高 (high signal to noise ratios)、輻射精度高。然而，其 16 天的重訪週期對於需要更密集監測的研究 (例如植被物候觀測) 來說觀測間隔過長。Sentinel -2 衛星在空間解析度及觀測頻率上有進一步改進 (空間解析度為 10-60m，重訪時間為 5 天)。但若是需求更高的時空解析度，一種思路是探求多源衛星資料的融合，即通過算法盡量消除傳感器之間的參數差異，將不同來源資料協同應用。另一種思路是發展更高性能的傳感器，諸如 WorldView 和 RapidEye 等商業傳感器都可以滿足高空間解析度 (小於 10m)、高觀測頻率 (小於 1 天) 的需求。但鑒於目前技術能力，以上商業傳感器一方面開發成本及運營成本都非常高，另一方面商業傳感器的公司有盈利的需求，所以這些影像的單位價格很高。在實際應用中成本是需要考慮的重要問題，高性能商業衛星的影像資料往往只能小範圍進行應用，極大限制了可開展的研究

內容。總結來說，目前傳統單源衛星難以滿足性能高且同時成本可承受的基本要求，對於研究者來說往往需要在兩者間進行權衡。

這種權衡在熱帶地區會更為棘手。因熱帶地區全年輻射強度高，在濕潤季節尤其潮濕多雨，導致雲層覆蓋厚，而光學遙測無法穿透雲層，影像受雲霧污染強烈(Houborg & McCabe, 2018)。傳統衛星如 Landsat，對植物生長監測來說時間解析度並不高，一旦受到雲霧干擾，獲取清晰影像概率則會進一步下降。

2.2.2 小衛星技術進展與局限

70 年代後發射的衛星的質量越來越重，技術越來越複雜，儘管是提升性能的重要需要，但也出現了令人擔憂的問題。例如投資大、風險高、研製週期長、不能及時應用最新技術成就等。現在人們在追求性能不斷完善的同時對於簡化性及經濟性也提出了要求。

過去幾十年裡，更小的微型處理器、更高效的太陽能電池板和發射技術的改進促使了小衛星的誕生。據估計，截至 2021 年底，地球共有 4550 顆在軌衛星，其中約有 70% 為小衛星。小衛星具有質量輕、體積小、成本低、性能高、研製週期短的優勢，人們預測小衛星發展將引起衛星應用和衛星技術方面的一場重大變革。

小衛星目前尚未有明確定義。一種普遍的看法（根據文獻及維基百科所述）是小衛星指質量在 500 kg 以下的衛星。依據質量不同，可進一步劃分為不同類別（表 1）。

表 1 小衛星分類

衛星種類名稱	質量範圍	在軌數量佔比
超小衛星 (minisatellite)	100-500kg	5%
微型衛星 (microsatellite)	10-100kg	26%
納米衛星 (nanosatellite)	1-10kg	64%
皮衛星 (picosatellite)	0.1-1kg	
飛衛星 (femtosatellite)	低於 0.1kg	5%

其中，立方衛星 (CubeSat) 是常見的納米衛星，是唯一具有明確定義的小衛星類別 (由加州理工大學及斯坦福大學的合作團隊於 1999 年提出規範)。立方衛星由多個 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 的單位立方體構成，例如 6U 即為 6 個單位立方體。本文所使用來自 Planet 公司的 Dove 星座產品即隸屬於立方衛星類別。

相比傳統衛星，小衛星的興起可能有以下原因：

1) 質量更輕、體積更小、成本更低。微電子、MEMS、先進合成材料等技術支持了衛星的小型化和輕型化，使小衛星製造效益極大提高，大幅減少衛星上軌成本。發射費用在衛星上軌成本中佔比很高，但小衛星因其體量小而不需要專用的運載火箭 (dedicated launch vehicle)，而是可以作為次要載荷 (secondary payload) 採用搭載 (Rideshare launch) 的方法發射，或者採用“一箭多星”的方法一次發射數十顆，因此大幅削減了發射成本。一顆微型衛星的發射成本可以低至三十萬美元 (7000 美元/公斤)。這也意味著小衛星的發射具有靈活性，隨時可以在衛星星座發生故障或者需要技術更新時快速將新產品送入軌道。小衛星最常見的軌道是低地球軌道 (Low Earth orbit, LEO, 又稱近地軌道)，運行速度大約為 27400km/h，繞地一周需 90 分鐘左右。相比地球同步軌道，將衛星發射到低地球軌道所需能量更少，輸送信號所需能量也更少，這也是一種成本的縮減。一般認為，微型衛星每公斤的成本大約為傳統衛星的 10%-50%。



2) 研製週期更短、技術更新速度快。傳統衛星的技術複雜性在不斷提高，帶來的是研製週期極長，常常需要十年甚至更久(Davis, 2015)。而現代的技術更迭速度在不斷加快，尤其電子元部件，革新速度從以年為單位逐步過渡到以月為單位，但傳統衛星若要進行技術迭代只能等待下一個發射週期。因為投入成本高，帶來的發射風險也很大（例如 Landsat 6 曾經發射失敗）。同時，若是在軌衛星出現運行故障，也很難進行及時糾正（例如 Landsat 7 的掃描糾正器的故障導致的條帶問題），其中的空檔期可能會持續數月或者數年。相比而言，小衛星的研製週期短，目前可以達到 3-18 個月。因其採用廉價運載方式，發射風險低，並且在在軌衛星出現故障也能及時進行更換。

3) 星座組網。星座組網最能體現小衛星的優勢，也是小衛星技術的發展趨勢。若干顆微小衛星按一定要求分佈在單軌道或多軌道平面上組成星座，可以提高衛星對地面的覆蓋範圍，最終達到覆蓋全球的目標。衛星星座可以很大程度上縮短衛星對同一地點的重訪週期。

4) 運營方式有所改變。小衛星面向受眾更廣泛，而非航天企業或者承包商。傳統衛星發展許多為政府的非盈利項目，由相關部門的平台進行支持，主要參與者為少部分大國。而今小衛星的出現讓衛星技術大眾化，太空准入門檻有了降低，衛星擁有者從單一政府部門變為了企業乃至個人，也為許多國家創造了擁有自己衛星的機會。商業公司的小衛星主要通過自主運營和及租用商業運管服務相結合的方式管理小衛星星座。商業化的發展方向意味著遙感衛星越來越看重經濟性。小衛星的低運營成本會減少終端用戶的單位影像花費，從而解決高解析度影像單位花費過高的問題。

儘管具有上述優勢，但其對於成本的縮減會帶來性能上的一些不足。小衛星的光譜性能與傳統衛星還存在差距。市售 SmallSat 影像主要限於可見光，可應用的研究類型十分有限。同時小衛星平均工作週期在 9-24 個月，不同代傳感

器迭代時可能出現資料連貫性的問題。並且受限於私營公司資金支持，小衛星的資料沒有穩定的平台，相比有穩定政府資金支持的傳統衛星更難訪問和獲取。同時目前行業處於新興階段，投資還存在很大風險，不能保證降低的成本會最終傳遞到消費者身上，單位成本的節省可能會被更大的數據量還有投資成本抵消(Curnick et al., 2021)。鑒於此，小衛星的實際應用能力還有待更多研究探索。

2.2.3 立方衛星與 Planet 公司

美國斯坦福大學研製了繞軌皮衛星自動發射器 (OPAL)，並於 2000 年初成功發射兩顆皮衛星。在這個成功實踐的鼓舞下，共同提出“立方衛星”概念的加州理工州立大學 Jordi Puig-Suari 教授和斯坦福大學 Bob Twiggs 教授，開始實際探索比皮衛星大一些、能提供更強實驗能力的立方體構型衛星。自 2003 年第一批立方衛星升空以來，全世界已經發射了超過 1000 顆立方衛星，立方衛星已經成為小衛星發展的主流。

成立較早且規模最大的小衛星商業公司是 Planet (前身為 Planet Labs)，目前 Planet 擁有 SkySat 及 PlanetScope 兩個小衛星星座，在軌衛星超過 200 顆。PlanetScope 星座目前具有三代傳感器 (詳見 3.2.1 節)。根據 Planet 自身的報告，其所有 PlanetScope 產品都經過一定程度的幾何校正，實測顯示水平位置誤差低至 4.8m，高至 19m，在需要精確地理配准的研究中可能需要額外幾何校正。同時，因每個傳感器都有各自的光譜響應差異，即便是經過良好校準，在合成多個傳感器資料時也可能造成輻射不一致性，現階段額外的輻射校準對於許多實際應用至關重要(Frazier,2021)。Houborg 等學者比較了 PlanetScope 和 Landsat 8 在沙特旱地農業區的差異，結論顯示 Planet 的影像受到低輻射精度、



特定光譜響應函數和交叉傳感器不一致的影響，NDVI 數值與 Landsat 8 存在顯著差異，並且差異關聯不穩定(Houborg & McCabe, 2016)。當前為改善 Planetscope 輻射質量，使用多個傳感器集成的校準方法是一種較為便捷的選擇，例如可以使用 MAD 法在相同時序的圖像間建立回歸方程。Wang 等應用直方圖匹配將 Planetscope 與 MODIS 進行交叉校正，改善了 Planetscope 對亞馬遜熱帶常綠林旱季特征監測能力(Wang, 2020)。更先進的方法涉及到多尺度的機器學習，例如 Houborg 和 McCabe 採用 CESTEM (Cubesat Enables Spatio-Temporal Enhancement Method) 的技術利用回歸樹模型來構建 Planetscope 與 Landsat 8 之間的波段特定關係(Houborg&McCabe, 2018)。Latte 和 Lejeune 則使用超解析度殘差卷積神經網絡對 Planetscope 進行輻射校正(Latte&Lejeune,2020)。

2.2.4 Planet NICFI 項目

挪威國際氣候及森林機構 (Norway's International Climate and Forests Initiative, NICFI, <https://www.nicfi.no/>) 是一個國際發展基金會組織，由挪威政府發起，旨在每年通過政府提供的 30 億挪威克朗幫助拯救熱帶森林及改善森林周圍居民的生計，目前由挪威氣候與環境部 (Norwegian Ministry of Climate and the Environment) 和挪威發展合作署 (The Norwegian Agency for Development Cooperation, Norad) 合作管理。

該組織於 2020 年 9 月起和 Planet 簽署了合作計劃，向用戶免費提供熱帶地區高解析度衛星影像，以推動熱帶森林研究進展 (減少熱帶森林損失、應對氣候變化、保護生物多樣性、促進可持續發展)。該計劃預計持續到 2023 年 9 月 (並有可能再延長一年)，在此期間用戶可以通過在網站註冊

(<https://www.planet.com/nicfi/>) 免費獲取 2015-2023 年每月一張的熱帶地區底圖影像資料 (basemap, 也稱為 mosaic, 即本研究所指 Planet NICFI 資料)。該部分資料由立方衛星 DOVE 組成的 Planetscope 星座拍攝, 空間解析度可達 4.77m。

當前研究在應用 Planet NICFI 資料時多需要與其他來源資料進行結合。Awuah 應用 Gram-Schmidt 變換融合 Planet NICFI 與 Sentinel-2A, 融合結果實現了更準確的放牧草坪監測(Awuah, 2021)。Pascual 應用實測資料與 Planet NICFI 資料建構了預測桉樹死亡率的邏輯函數模型, 通過與實測資料進行修正增強 Planet NICFI 的可用性, 顯示了其在大規模監測中的應用潛力(Pascual, 2022)。Masolete 使用 Attention U-Net 深度學習分割方法, 分別對比了 Planet NICFI、Sentinel-2 和 Landsat 8 的土地利用識別結果, 結果顯示 Planet NICFI 與另外兩者具有相似分類精度, 在小規模土地利用檢測中是更高解析度的最佳選擇 (Masolete, 2022)。

2.3 影像相對輻射校正技術研究進展

輻射校正方法分為絕對輻射校正和相對輻射校正。絕對輻射校正使用衛星同步觀測資料, 可藉由衛星上校正及在軌校正達成 (曾聖凱, 2017), 可通過精確的傳感器校準、大氣校正等將影像中像元值轉換為地物的輻射亮度或反射率, 在實際應用中存在較多限制。相對輻射校正可以直接利用圖像本身的像素值, 為多源多時相遙測多光譜資料中對應的波段建立輻射變換方程, 不需要獲取任何其他參數。由此, 此方法非常適用於歷史衛星影像資料的校正。

相對輻射歸一化的方法種類多樣，且發展迭代較快，我們從算法原理、實現方式、模型特性等方面對其進行詳細的總結分類，結果如下所示（圖 2）：



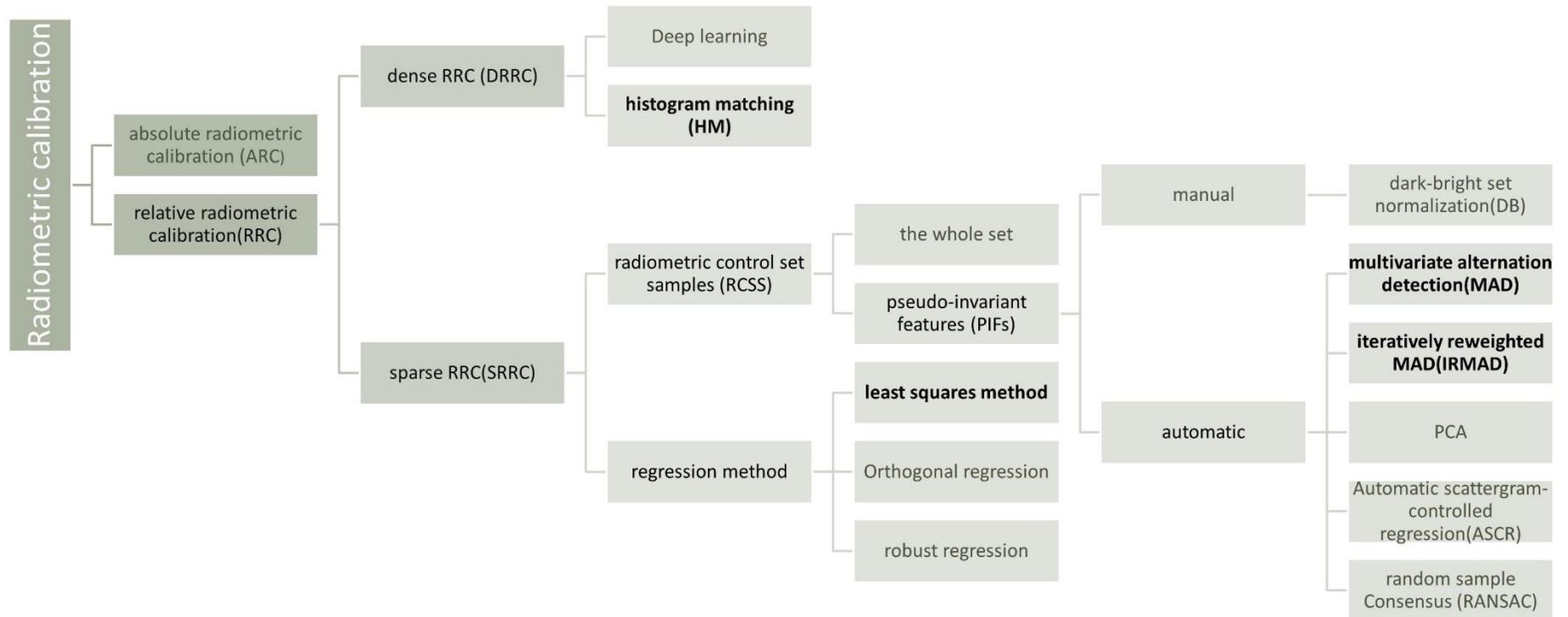


圖 2 現有輻射校正方法說明
(其中加粗部分為本文所採用的方法)



依據校正原理，可將相對輻射校正方法分為線性和非線性方法兩大類（白洋，2018）。非線性原理的方法毋需對變量關係進行先驗假設（Latte，2020），主要包括直方圖匹配法及深度學習中的神經網絡（neural networks，NNs）法。直方圖匹配是更為常見的方法，其在圖像處理中定義為對原始圖像進行變換使其與指定的參考圖像的直方圖相匹配。該方法操作便捷且有效，但因其是完全依據圖像像素數值而建立全幅影像的統計關係，難以根據具體需求轉換，靈活性較差。NNs 最初主要應用於影像分類及目標檢測中，近年來出現許多研究將其應用於圖像融合及影像校正中。NNs 可依照多維度網絡架構模擬複雜的非線性關係，包括模擬圖像內部及圖像之間的光譜、空間和時間變化（Latte，2020）。深度卷積神經網絡（convolutional neural networks，CNN）因其出色的性能及很高的效率而成為影像分析中最為流行的 NNs 方法，但現階段因複雜性而帶來的處理時間過長的問題可能會限制該方法的使用場景。總體而言，目前非線性方法的研究較少，多數研究集中在以線性迴歸為原理的線性方法。

線性原理方法均需基於以下假設：對同一具有恆定反射率的區域在不同時期獲取的傳感器輻射度之間的關係近似為線性(Syariz et al., 2019)。而實際情況中不同時期外部條件可能存在較大差異，例如大氣條件不同及傳感器本身的問題，因此往往需要選取輻射控制點作為基準，選取的輻射控制點也稱為偽不變特徵點（Pseudo-invariant features，PIFs）。長期研究表明，直接使用影像全部像元點作為控制點效果不好（Yuan，1996），因此目前大部分方法的思路是提取影像中的一部分像元點作為 PIFs。PIFs 可以近似認為在兩期影像中是光譜變化恆定的點位，其受到外部條件差異的影響最小，如建築物、道路、水體經常可做為偽不變特徵點。線性原理的方法差異主要在於選取偽不變特徵點的原理不同。大致可以分為人工選取及自動選取兩類。PIFs 的提出者 Schott 建議人工選取 PIFs，人工選取方法以暗-亮像元法（Dark set-Bright set，DB）為主，該方法使用 Kauth-Thomas 變換通過從原始影像和參考影像中提取一組暗像元和亮像元的平均值來推導歸一化係數(Sadeghi et al., 2013)。因人工法具有一定主觀性，而且現今研究多關注使用多源、多時相的影像資料進行資料融合，因此資

料量顯著增加，如今多使用自動的算法來計算 PIFs 以提高處理效率及穩定性 (Henebry & Su, 1993; Yang & Lo, 2000; Yuan & Elvidge, 1996)。

MAD 法 (multivariate alteration detection) 是較為經典的自動選取 PIFs 進行輻射校正的方法。後續許多方法都是在 MAD 法的基礎上提出的升級版本。MAD 法最初由 Nielsen 和 Conradsen 在 1997 年提出，思路在於通過典型相關分析 (canonical correlation analysis, CCA) 提取出兩幅影像的典型相關變量，讓兩者所代表的線性組合的相關性最小，典型相關變量的大小反映像元發生變異的可能性，因此可以依據典型相關變量的分佈提取出 PIFs (Nielsen et al., 1998)。因 MAD 法在處理噪聲上效果不好，Nielsen 和 Canty 與 2008 年提出了 IR-MAD 法 (iteratively re-weighted MAD, IR-MAD) (Canty, 2008)，該方法受到機器學習中的 bootstrapping 思路啟發，引入迭代加權的思想，相比 MAD 法能更好的檢測出噪聲干擾點。同時該方法一個重要優點在於只需要指定一個參數，即卡方百分位數 (the chi-squared percentile)，即可進行自動操作，因此穩定性較強 (Bai et al., 2018)。現今 MAD 原理方法的發展方向為使用核典型相關分析 (kernel canonical correlation analysis, KCCA) 原理進行非線性關係的擬合。例如 Bai 等利用 KCCA 原理對 Gaofen-1 進行輻射校正，有效消除影像間外部條件引起的光譜差異。Denaro 等使用 Landsat-7 ETM+ 及 Landsat-8 OLI 檢測了 KCCA 原理的處理效果及對比了運算時間差異 (Denaro & Lin, 2020)。

除基於 CCA 的 MAD 原理方法以外，還有許多線性原理方法基於其他數學原理。例如 Elvidge 等人提出了自動散點圖控制迴歸法 (automatic scattergram controlled regression, ASCR)，該方法在圖像對之間執行線性迴歸，並根據點與擬合直線之間的正交距離 (orthogonal distances) 計算無變化區域 (Elvidge et al., 1995)。Du 等人使用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 選取 PIFs，由第一主成分描述兩個單獨波段之間的線性關係 (Du et al., 2002)。

除上述選取 PIFs 的方法不同以外，在選取 PIFs 後進行線性迴歸的輻射校正過程中依據擬合方法的不同，也可以大致分為最小二乘迴歸法 (least squares regression)、正交迴歸法 (orthogonal regression) 及強健性迴歸法 (robust-regression)。其中最小二乘迴歸法和正交迴歸法是較為常用的方法，強健性迴歸法是對最小二乘法的改進，能夠更有效地規避異常值 (de Carvalh et al.,

2013)。

總而言之，相對輻射校正算法的研究在長期以來已經取得一些成就，但現有方法仍具有一定局限性。具體體現在：

- 1) 現有方法大多基於線性假設。而線性關係是近似的假設，只有當原始影像和參考影像之間相似度很高時，這種關係才存在。隨著計算能力增強，越來越多研究開始以非線性假設進行輻射校正，但現階段相關算法複雜性依舊較高，處理時間過長的問題使得其無法真正應用在實際工程之中。
- 2) 現有方法選取的 PIFs 多為數學意義上的，在處理過程中常會存在一些“噪聲點”，現有方法對這些噪聲點的討論較少(Bai et al., 2018)。

第三章 資料來源及研究方法



本文嘗試使用小衛星的技術對熱帶乾燥林進行季節性變化的監測。小衛星的資料需要進行輻射校正以提高其資料質量。利用 HM、MAD、IR-MAD 三種相對輻射校正方法，以 Landsat 8/9 OLI 為參考影像，對 Planet NICFI 資料進行影像相對輻射校正。其中 HM 是原理相對簡單、操作最便捷的方法，得到了研究的廣泛應用。但因其原理是基於非線性的影像分佈，受制於參考影像質量，而本研究區域屬於熱帶地區，氣象條件不穩定，部分參考影像受到雲霧干擾，HM 的結果可能並不理想。因此本文還會選用基於像元點原理的 MAD 及 IR-MAD 方法，以作對比。本文假設同區域相近時間段（一個月）之內區域特徵沒有發生顯著變化，理論上相同月份內 Planet NICFI 與 Landsat 資料反映的地表反射率不應存在明顯差異，但實際會因為具體拍攝時間氣象條件的不同導致傳感器受到輻射干擾不同，使得兩者地表反射率差異很大。並且研究區不同位置受到的噪聲干擾不一致（視拍攝時氣象條件，雲霧覆蓋區域干擾更明顯），因此在歸一化時使用全幅影像直接進行線性回歸效果不好。為盡可能排除以上噪聲干擾，本研究會採用提取偽不變特徵點（Pseudo-invariant features, PIFs，即輻射不變的區域）的方法，先提取出數學意義上變動最小的像元點，對這些 PIFs 進行線性迴歸，再將迴歸係數應用到全幅影像。MAD 法及 IR-MAD 法的主要差別在於選取 PIFs 的原理不同。

本章將在 3.1 節介紹本文的研究對象與研究區選取，3.2 節介紹資料的來源及進行的預處理操作，3.3 節介紹本文採用的 RRC 方法原理及評價指標的原理。

3.1 研究對象介紹

3.1.1 熱帶地區植被組成及熱帶乾燥林的概念

熱帶地區的植被種類多樣，分佈廣泛且茂密，是研究植被的理想區域。其中熱帶雨林區域分佈最廣泛，且生物多樣性最豐富。熱帶雨林氣候受到赤道低氣壓帶控制，全年盛行上升氣流，使得全年高溫多雨、土壤水分充足，生長樹

木多為四季均很茂盛的常綠木本植物。隨著地區緯度升高，氣候開始受到低氣壓帶和季風帶的交替影響，因此出現了明顯的濕季和乾季的降水差異：從五月到十一月為濕潤季節，十二月到次年四月為乾旱季節。此時植被類型由熱帶雨林過度到熱帶乾燥林，主要生長植被變為半常綠樹（semievergreen）、半落葉樹（semideciduous）、落葉樹（deciduous）。若全年的降水量進一步減少則氣候變為熱帶稀疏草原氣候（tropical savanna climate）。此時大喬木佔比減少，小喬木、灌木、草本植物的比例增加，形成熱帶稀樹草原的植被類型。

曾經的研究多以濕潤森林（熱帶雨林）和稀樹草原為主要研究對象。但上個世紀 80 年代，一些生態學家提出新的觀點，認為在濕潤森林和稀疏草原之間存在一種過渡類型的植被，這種過渡植被需要被進行新的歸類，即熱帶乾燥林（Janzen, 1988）。目前還尚缺少對熱帶乾燥林嚴格的定義（Miles et al., 2006）。從自然條件上來講，它是指分佈在南北緯 20 度之間，年平均氣溫大於 25°C，年降水量在 700-2000mm 之間，旱季中存在至少三個月降水量小於 100mm，植被高於 50% 區域為落葉樹的地區（Stan & Sanchez-Azofeifa, 2019）。相比稀樹草原，熱帶乾燥林草本植物佔比小，結構層間差異很大，既有高大封閉的樹冠層，也有較矮小的灌木層，對於乾旱的耐受性更強，受到火災的威脅更小。

熱帶乾燥林占有所有熱帶森林的約 42%，是生態系統的重要組成部分，具有許多生態及經濟功能。熱帶乾燥林在很長一段時間之中沒有引起研究重視，一部分原因是因為許多熱帶乾燥林和雨林及稀樹草原混在一起，難以進行明確區分。受限於技術條件，熱帶乾燥林在較粗解析度（>500m）的遙測影像中常常被誤判為稀樹草原或者灌木叢。更準確地定義熱帶乾燥林的概念及範圍有賴於更精確的技術手段發展。近年來高性能衛星和小衛星的出現使得植被監測推進到了冠層尺度，精度的大大提升或許也可能提高對熱帶乾燥林的觀測能力。

除此以外，近年來氣候變化是研究十分關注的議題，氣候變化引起的植被變化及植被對氣候變化的響應也是研究重點關注的內容。由於熱帶地區對於氣候變化響應強烈，相應熱帶地區的研究也得到了更多關注。許多學者表示熱帶乾燥林的生態穩定性遠不如熱帶雨林，是一種非常脆弱的生態群落，氣候變化會極大地影響熱帶乾燥林的生態結構及功能。有一些研究表示熱帶乾燥林可能是所有低地森林類型中受到氣候變化威脅（更極端的乾旱或者更頻繁的降水）

最大的植被種類，在乾旱影響下生產力有了明顯下降(Allen et al., 2017)。

總結而言，目前對於熱帶乾燥林的研究尚不充分，但學界對於熱帶乾燥林的重視在不斷提高，有越來越多的研究反映出熱帶乾燥林在生態系統中的重要位置，更多地關注熱帶乾燥林的生態變化對於理解其碳循環機制具有重要意義。

3.1.2 研究區選取原則

在檢視小衛星資料 (Planet NICFI) 和傳統衛星資料 (Landsat OLI) 的差異時，需要選取一種評價指標。本文重點關注點在於小衛星資料未來在植被及生態監測領域的應用潛力，考慮到在植被監測中植被指數是一種穩定的量化方法，同時因其已得到研究的普遍應用而在不同研究中具有可比性，因此本文會以植被指數變化反映的植被季節性變化為主要評價依據。鑒於以上，本文希望研究區全年的植被變化能盡可能大，這樣反映在影像上就可以更突出不同傳感器對於植被生長變化的敏感性強弱。

如前所述，雖然熱帶雨林是熱帶地區更具有代表性的植被類型（其具有覆蓋範圍廣、生物量最為豐富等特點），但因為全年植被生長都很茂盛，所以季節性變化不大，反映在影像上全年植被指數基本都很穩定，因此不適用於本研究分析影像季節變化。而熱帶乾燥林中落葉樹的比例有大幅提高（佔區域 50% 以上），在乾燥季節落葉樹的可見光反射率更高、近紅外反射率更低，會和常綠樹的反射率產生差異，使得整體影像也會呈現更明顯的變化，因此熱帶乾燥林所在區域是相比熱帶雨林更理想的驗證植被季節性的場所。

不同生物氣候定義 (bioclimate definition) 對熱帶乾燥林的範圍劃分存在差異，現有來自不同組織定義的多種森林群落劃分結果，如 Murphy and Lugo, 世界糧食及農業組織 (Food and Agriculture Organization, FAO), DryFlor, 乾旱指數 (aridity index), 世界自然基金會 (World Wildlife Fund, WWF)。若以 WWF 的陸地生態區劃分為依據，則熱帶乾燥林主要分佈於中美洲、南美洲、非洲及南亞洲

(圖 3)。其中以中美洲分佈最為密集。

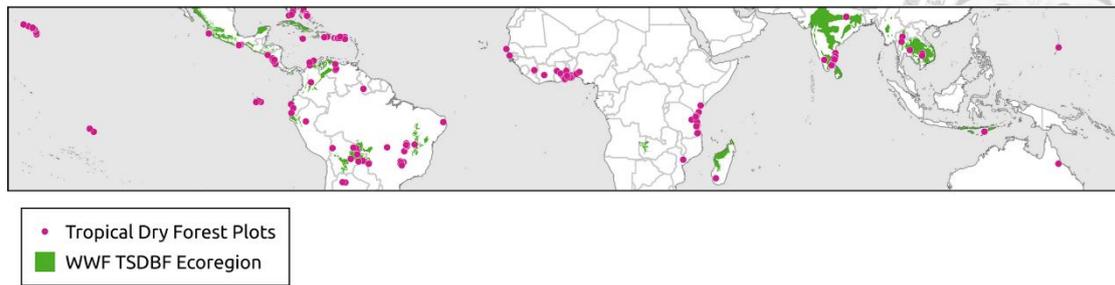


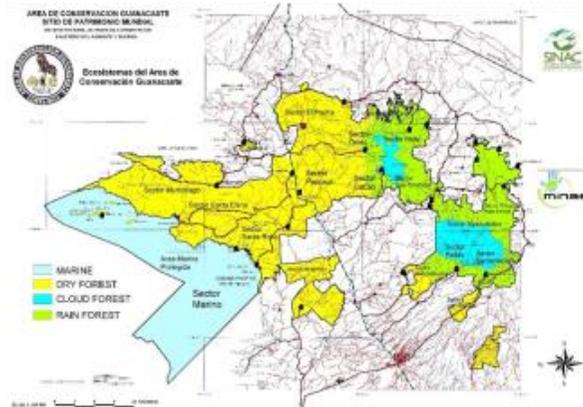
圖 3 540 個熱帶乾燥林及 WWF 規定的亞熱帶乾燥闊葉林生態區的分佈
(圖片引自 Ocon et al., 2021)

本文將位於哥斯達黎加瓜納卡斯特地區 (Provincia de Guanacaste, Costa Rica, 圖 4a) 中部的聖羅莎國家森林公園 (Santa Rosa National Park, 圖 4b) 作為研究區，是因為聖羅莎國家森林公園的植被全部為熱帶乾燥林，是整個新熱帶界 (Neotropics, 包含南美洲、中美洲、加勒比群島和北美洲南部) 中現存最大的熱帶乾燥林保護區，總面積達 38,000 ha。其於 1972 年被正式劃定為保護區，生態保護的開展使得先前退化較嚴重的森林生態系統得以逐漸恢復，目前受到人為干擾的程度較小。該地區的降水分佈符合上文提到的熱帶乾燥林氣候特點，本文根據該降水情況將 12 月至次年 4 月定義為乾燥季節，5 月至 11 月定義為濕潤季節。

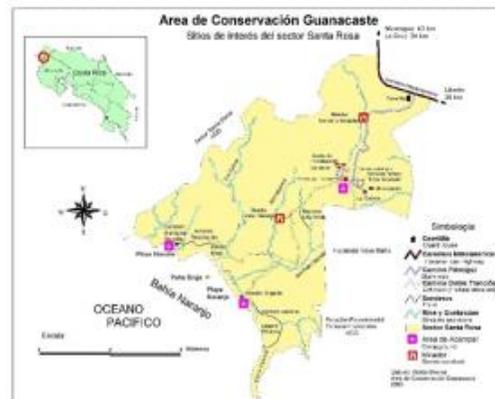
因我們會將現有的一張高解析度的 WorldView 影像資料作為區分乾燥林與落葉林的參照，因此選取該影像資料的範圍作為研究區範圍 (圖 4c)。



(a) Area de Guanacaste



(b) Sector Santa Rosa



(c) Study area

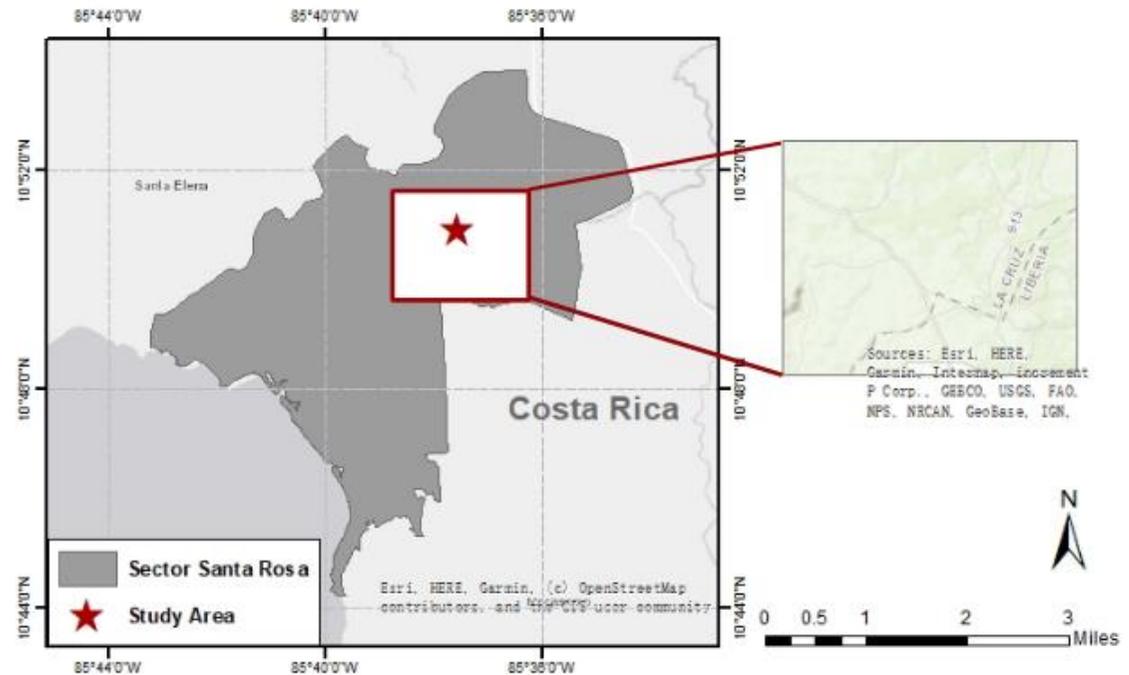


圖 4 研究區說明

其中 (a) 為位於哥斯達黎加西北部的瓜納卡斯特地區範圍。(b) 為位於瓜納卡斯特地區中部聖羅莎國家森林公園範圍。(c) 為研究區域示意，星標所在矩形區域即為研究區域。(a)、(b) 均來自於 <http://www.investigadoresacg.org>



3.2 資料收集及處理

3.2.1 Planet NICFI 衛星影像

本文待校正影像為 Planet NICFI 影像。NICFI Data Program 免費開放 PlanetScope Surface Reflectance Mosaics 熱帶地區影像資料，可在官網 (<https://www.planet.com/nicfi/>) 獲取下載。此產品是由 Dove 衛星數據經過輻射校正、大氣校正、影像鑲嵌後的地表反射率鑲嵌產品。每個像元經由同樣的像元篩選方法，在設定的時間間隔內自動選取質量最高的像元進行鑲嵌，未經過任何顏色均衡化處理，最大程度提升了全幅影像質量同時保有資料的原始面貌。經此處理之後的資料無需進行輻射修正、大氣修正及去雲處理。

該部分資料來源於 Planetscope 衛星群，目前由三代衛星星座構成，每一代都包含多個群組，相同群組衛星大約在同一時間發射並進入相同軌道。所有衛星均位於高度 478km、傾角為 98 度的太陽同步衛星軌道上，約在當地時間上午 9:30 至 11:30 之間穿越赤道。目前在軌 Dove 系列衛星總數超過 200 顆。Planetscope 有三種傳感器類型（表 2），一代傳感器 Dove Classic 在 RGB 波段會存在光譜響應混合的情況（圖 5a），難以進行精確的光譜分析。從 2018 年起，Dove-R 搭載的 PS2.SD 投入使用，其傳感器光譜的分離性及波段間區分度得到了改進（圖 5b）。2019 年，SuperDove 搭載的第三代傳感器 PSB.SD 上市，該傳感器為八光譜段傳感器（圖 5c），光譜響應曲線類似於 Sentinel-2，可與 Sentinel-2 的頻段進行集成(Frazier & Hemingway, 2021)。四光譜段傳感器（即 blue,green II,red,NIR）將於 2023 年 1 月全部迭代為八光譜段傳感器（即 blue,green II,red,NIR,red edge,green I,coastal blue,yellow），但目前為止 NICFI 項目僅提供四個波段的資料。

NICFI 影像具體參數如表 3 所示，其中空間解析度為 4.77m，影像獲取時間間隔為 1 個月。研究區包含像元行列數為 965×776。本研究收集了研究區從 2021 年 5 月至 2022 年 5 月全年間的 13 張影像。

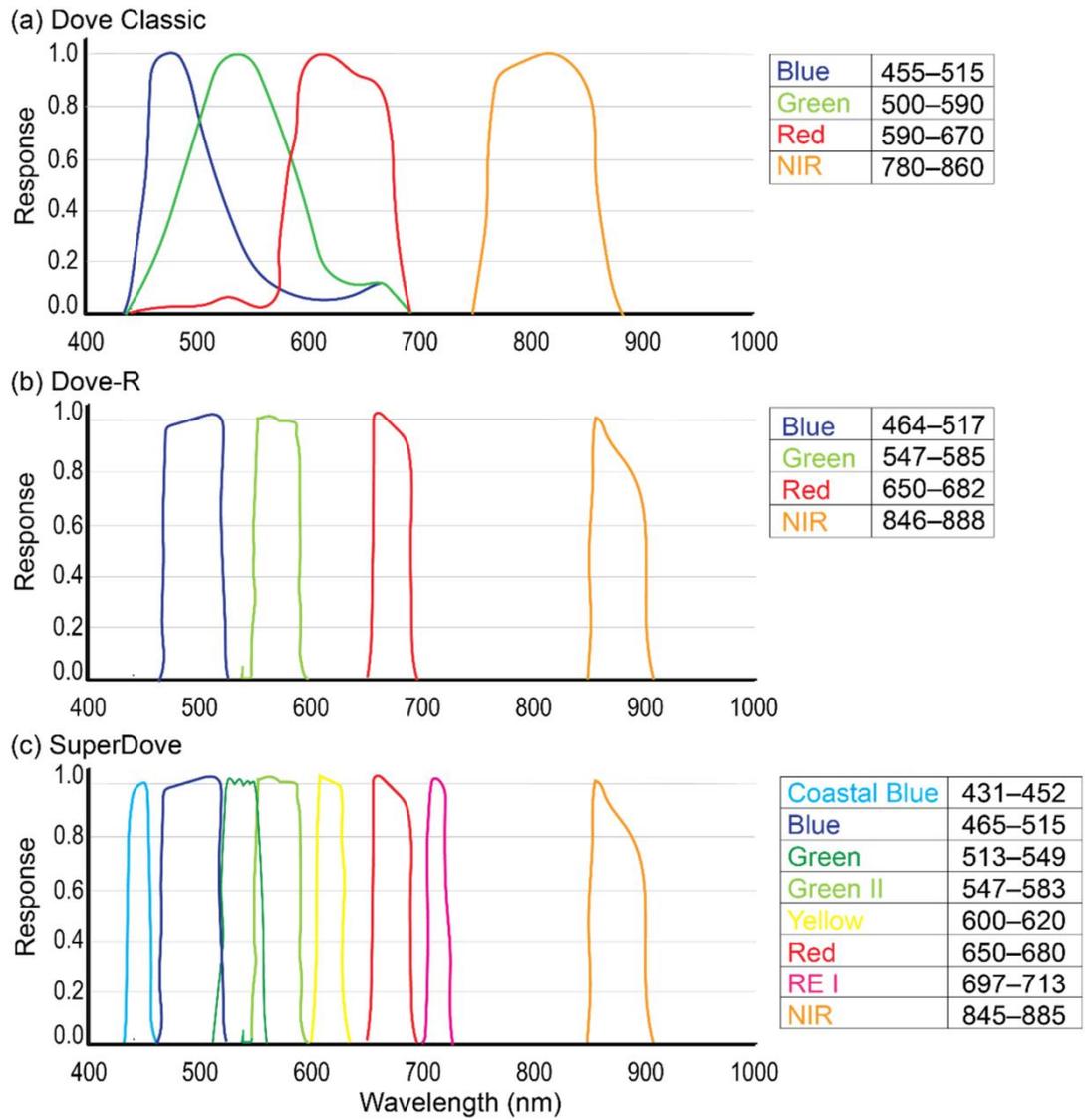


圖 5 Planetscope 光譜響應曲線
(Frazier&Hemingway,2021)

表 2 Planetscope 三種傳感器類型

儀器名稱	Dove Classic	Dove-R	SuperDove
telescope 類型	PS2	PS2.SD	PSB.SD
衛星數量	36	150	44
光譜通道	red、green、 blue、NIR	red、green、blue、 NIR 同 PS2 相比具有更 新的拜耳濾光鏡 (Bayer pattern and pass-band filters)	red、green、 blue、NIR、red edge、green I、 coastal blue、 yellow
幅寬	25km×11.5km	25km×23km	32.5km×19.6km
運營區間	2014.7- 2022.4.29	2019.3- 2022.4.22	2020.3 至今

表 3 待校正影像 Planet NICFI 的技術參數表

項目	指標
衛星星座	Planetscope
傳感器	Dove、Dove-R、SuperDove
軌道類型	太陽同步軌道
軌道傾角	98°
大氣修正模型	6S 模型
天頂角	Nadir pointing(0)
假定地表類型	朗伯面 (未考慮 BRDF 效應)
像元大小 (空間解析度)	4.77m
光譜通道	Red, Green, Blue, Near-Infrared (4 波段)
時間解析度	1 月
投影	WGS84 Web Mercator
單幅大小(像元數)	4096×4096
資料類型	地表反射率資料集 (Planetscope surface reflectance)



3.2.2 Landsat 衛星影像

本文參考影像選用 Landsat 8/9 OLI 地表反射率 (L2SP) 產品。Landsat 8 作為 Landsat 系列的第八顆衛星，于 2013 年 2 月由美國太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 發射升空。搭載傳感器為 OLI (operational land imager, 陸地成像儀) 和 TIRS (Thermal Infrared Sensor, 熱紅外傳感器)。OLI 是 Landsat 系列首次採用 pushbroom 的掃描方法，輻射精度達到 12 位。對於光學遙測來說，OLI 在整個發射和在軌期間，定標精度和資料連續性都得到了詳細的評估 (Markham, Storey, & Morfitt, 2015)。長期的研究顯示出 OLI 的輻射性能很好：能量-雜訊比 (signal-to-noise) 比之前的 Landsat 系列高出一個量級 (Morfitt et al., 2015)；輻射均勻性好，幾乎沒有條帶或條紋 (Morfitt et al., 2015)；輻射穩定，並有專門的星上定標系統來實時監測傳感器性能隨著時間發生的改變 (Roy et al., 2014)。Landsat 9 於 2021 年 9 月發射，搭載的傳感器為 OLI-2 和 TIRS-2。其中 OLI-2 設計類似於 OLI，在光譜、空間、輻射、幾何上都和前作具有一致性 (圖 6)，主要的改進在於輻射解析度位數的提高 (從 12 位增加到 14 位)，提高了在較暗區域對輻射細微差異的檢測能力。

Landsat 8/9 資料來自 USGS 官方網站，為 Collection 2 Level-2 Science Products (L2SP) 的地表反射率 (Surface Reflectance, SR) 產品 (詳見表 4)。此部分資料已經過輻射校正及大氣修正，但因儲存方式的問題，DN 值需要進行轉化。在選取影像時，以影像清晰程度為主要選取原則，以影像之間時間間隔為次要選取原則，在每個月所有影像資料集中選取一張作為當月的參考影像，盡量保證不同月份影像的拍攝時間間隔在 20 天以上 (表 5)。需特別說明的是，本研究資料在 2021 年 11 月之前可選範圍只有 Landsat 8 OLI，每月只有兩張可選，而又恰巧該時間段為研究區濕潤月份，因此 2021 年 5 月至 11 月部分區域難以避免雲霧干擾，並且不能保證上述時間間隔。而 2021 年 11 月後因有 Landsat 9 OLI-2 的資料補充，可選範圍增加，每月獲取影像可多達四張，因此拍攝到無雲影像的概率增加，11 月之後的資料大部分均為清晰影像。

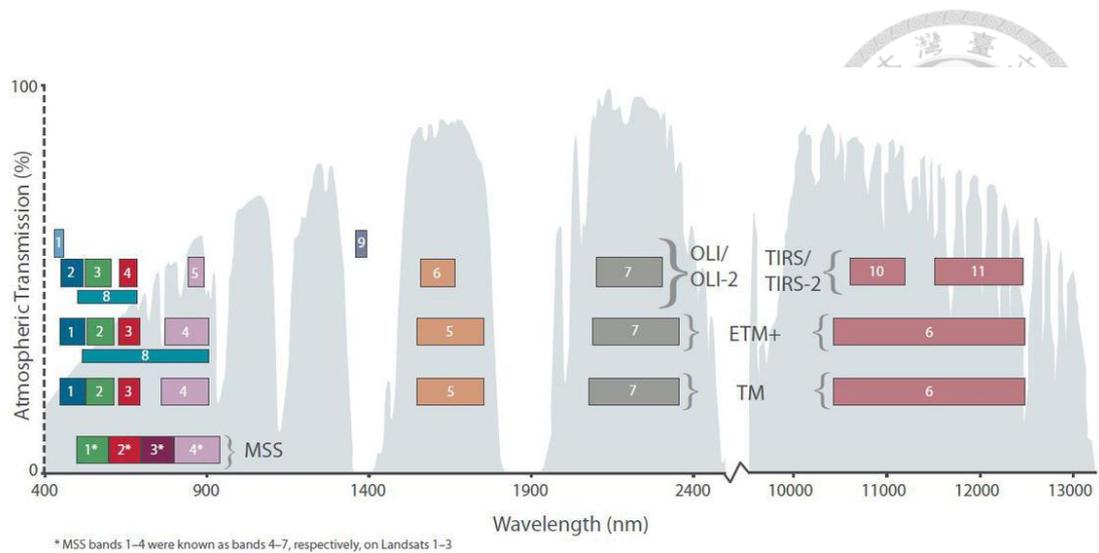


圖 6 Landsat 1-9 帶通波長對比
(資料來自 <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>)

表 4 參考影像 Landsat 技術參數表

項目	指標
傳感器	OLI、OLI-2
軌道類型	太陽同步軌道
軌道傾角	98.2 度
輻射傳輸模型	內置算法
天頂角	Off-nadir
像元大小 (空間解析度)	30m
光譜通道	Ultra blue、Blue、Green、Red、NIR、SWIR I、 SWIR II、Panchromatic、Cirrus (9 波段)
時間解析度	16 天
投影	WGS84 UTM
資料類型	Surface Reflectance (SR) from Landsat 8-9 Collection 2 Level-2 Science Products(L2SP)

表 5 每月影像對應傳感器類別及拍攝日期

影像拍攝日期	傳感器類別	月份歸類
2021 年 5 月 20 日	L8 OLI	2021 年 5 月
2021 年 6 月 5 日	L8 OLI	2021 年 6 月
2021 年 7 月 7 日	L8 OLI	2021 年 7 月
2021 年 8 月 8 日	L8 OLI	2021 年 8 月
2021 年 9 月 25 日	L8 OLI	2021 年 9 月
2021 年 10 月 27 日	L8 OLI	2021 年 10 月
2021 年 11 月 12 日	L8 OLI	2021 年 11 月
2021 年 12 月 30 日	L8 OLI	2021 年 12 月
2022 年 1 月 23 日	L9 OLI-2	2022 年 1 月
2022 年 2 月 24 日	L9 OLI-2	2022 年 2 月
2022 年 3 月 28 日	L9 OLI-2	2022 年 3 月
2022 年 4 月 29 日	L9 OLI-2	2022 年 4 月
2022 年 5 月 31 日	L9 OLI-2	2022 年 5 月

3.2.3 WorldView-2 衛星影像

出於比較 Planet NICFI 影像偵測不同類型植被敏感程度的需要，本研究需將研究區域分為常綠區域與落葉區域。為此需要採用高解析度影像做為分離依據，此處我們選用研究區的一張 WorldView-2 影像。該影像空間解析度為 1.85m，獲取時間為 2017 年 3 月 27 日，此時研究區已經持續一段時間處於乾旱季節，透過 RGB 真彩色合成方法可以以顏色清楚辨別常綠與落葉區域。本文以 NDVI 值為依據將影像進行二值劃分，通過反復試驗選取閾值。為評估精度，在區域內隨機選取 100 個點進行人工目視比對，結果顯示精度在 90% 以上。劃分結果如圖 7 所示。

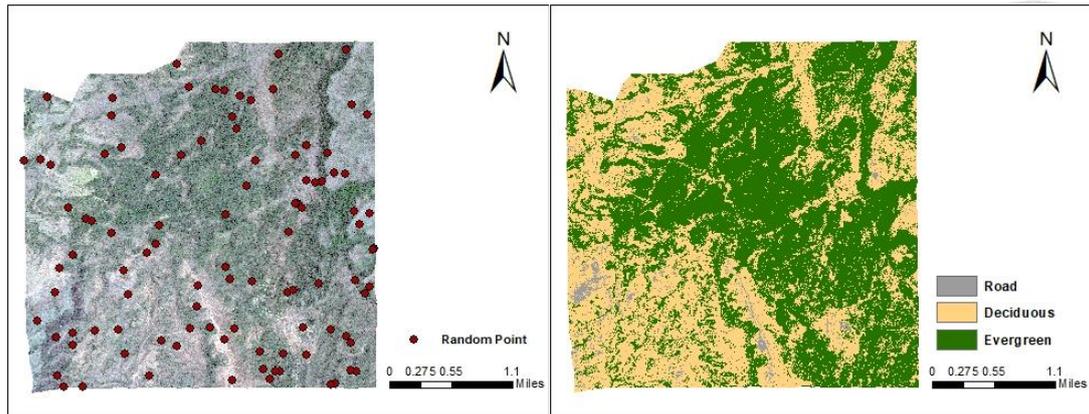


圖 7 區域劃分過程與結果

左為隨機選取 100 個點的示意圖。右為最終區域分類結果。綠色為常綠區域，黃色為落葉區域，灰色為道路區域。

3.3 方法原理

3.3.1 直方圖匹配法

直方圖匹配 (Histogram Matching)，也稱為直方圖規範化，定義為使用空間域的映射函數將來自參考圖像的像素值分佈匹配到目標圖像中。其中參考圖像為 P_R ，原始圖像為 P_A (Kayyali, 2002)。直方圖匹配的原理是計算每幅圖像的累積分佈函數，並將原始圖像在給定閾值點的值映射到具有相同概率的參考圖像值。該過程如圖 8 所示。在匹配過程中， $P_A(x_i)$ 的數值依循如下關係式：

$$P_{A'}(x_i) \approx P_R(x_i) \quad (3-1)$$

據此閾值設定， x_i 被分配到原始直方圖的新位置 x_i' 。匹配過程可以用兩個分佈函數的組合表示：

$$x_{i'} = P_R^{-1}P_A(x_i) \quad (3-2)$$

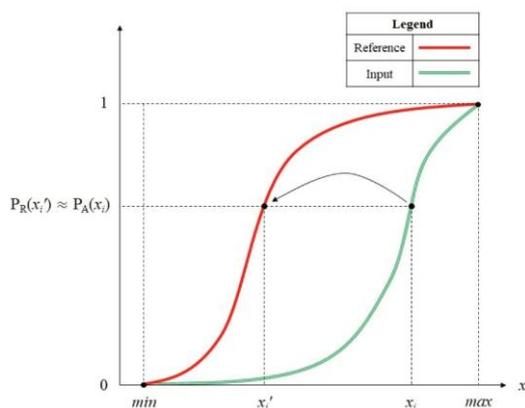


圖 8 直方圖匹配示意圖

3.3.2 MAD 法

當我們檢測單波段影像資料的變化時，最簡單的思路是對兩個影像的 DN 值做差，絕對值越小則代表變化強度越小。假設我們有兩組多波段影像，其中影像 1 表示為 $X = [X_1 \cdots X_k]^T$ ，影像 2 表示為 $Y = [Y_1 \cdots Y_k]^T$ ，其中 k 為波段數。兩者間變化檢測（change detection transformation，也稱為變化向量 change vector）則為

$$X - Y = [X_1 - Y_1 \cdots X_k - Y_k]^T \quad (3-3)$$

此方法適用單波段及波段數少於三的情況。但當影像具有超過三個波段時，我們無法同時視覺化所有的波段變化，因此需要採用線性變換（linear transformation）的方法將所有波段的變化統合起來。所有線性組合方法中能夠最大化兩組影像之間偏差的方法即能最大程度識別變化區域，例如兩組影像方差為

$$V\{v_1(X_1 - Y_1) + \cdots + v_k(X_k - Y_k)\} = V\{v^T(X - Y)\} \quad (3-4)$$

其中 $v^T(X - Y)$ 的絕對值最大的區域即為變化最大的區域。

具體而言，假設兩幅影像 F 和 G 可以各自組成為名為 U 和 V 的線性組合，即：

$$U = a^T F = a_1 F_1 + \cdots + a_N F_N \quad (3-5)$$

$$V = b^T G = b_1 G_1 + \cdots + b_N G_N \quad (3-6)$$

則 $U - V$ 將所有波段的變化綜合在一個波段中，問題進一步轉化為確定 a^T 與 b^T 使各自的特征得以最大保留。即讓兩者的方差最大化：

$$V\{a^T X - b^T Y\} = V\{a^T X\} + V\{b^T Y\} - 2\text{Cov}\{a^T X, b^T Y\}$$

$$= 2(1 - \text{Corr}\{a^T X, b^T Y\}) \quad (3-7)$$

由該式可知，方差與相關係數呈現負相關，方差最大化即為相關係數最小化。此處計算兩者的最小相關係數引入了典型相關分析（canonical correlation analysis, CCA）的思路。該思路最初由 Nielsen 於 1998 年提出 (Nielsen, Conradsen, & Simpson, 1998)。典型相關分析的目的是要找到一組係數組合使得兩個線性組合之間相關性依次遞減，因此將該結果順序對調即可得到從小到大排列的相關係數。我們將兩組變量的方差-協方差矩陣（也稱為一組變量的離散度）分別定義為 Σ_{ff} 和 Σ_{gg} ，兩者間協方差矩陣 (inter-image covariance matrix) 定義為 $\Sigma_{fg} = \Sigma_{gf}^T$ ，相關係數定義為 $\rho = \text{Corr}\{a^T U, b^T V\}$ ，於是廣義特征值 (generalized eigenvalue) 為：

$$\begin{aligned} \Sigma_{fg} \Sigma_{gg}^{-1} \Sigma_{gf} a &= \rho^2 \Sigma_{ff} a \\ \Sigma_{gf} \Sigma_{ff}^{-1} \Sigma_{fg} b &= \rho^2 \Sigma_{gg} b \end{aligned} \quad (3-8)$$

其中

$$\rho^2 = \frac{a^T \Sigma_{fg} \Sigma_{gg}^{-1} \Sigma_{gf} a}{a^T \Sigma_{ff} a} = \frac{b^T \Sigma_{gf} \Sigma_{ff}^{-1} \Sigma_{fg} b}{b^T \Sigma_{gg} b} \quad (3-9)$$

該步驟會得到 N 組典型相關係數從大到小排列的 CCA 結果。將這一系列典型變量按照相關係數從小到大重新排序即可得到如下的變換：

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_N^T F - b_N^T G \\ \vdots \\ a_1^T F - b_1^T G \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

其中 a_i 和 b_i 即為典型變換所得到的各典型變量 U_i 和 V_i 對應的線性組合係數向量，這一變換被稱為 MAD 變換，所得到的差值變量稱為 MAD 變量，其中第 i 個 MAD 變量為第 $n+1-i$ 對典型變量之間的差值，即

$$MAD_i = U_{n+1-i} - V_{n+1-i} = a_{n+1-i}^T F - b_{n+1-i}^T G \quad (3-11)$$

同時則有

$$\sigma_{MAD_i}^2 = 2(1 - \rho_{p-i+1}) \quad (3-12)$$

因為 MAD 是被測量的變量的線性組合，所以它們大致符合正態分佈。如果像元點沒有明顯變化，則 MAD 的值接近於零。為了整合 N 個波段 MAD 的變化，將對其進行標準化：

$$T_j = \sum_{i=1}^p \left(\frac{MAD_{ij}}{\sigma_{MAD_i}} \right)^2 \epsilon \chi^2(p) \quad (3-13)$$

該結果近似符合自由度為 N 的卡方分佈（本文中 N 為 4，即圖 10）。

$$P_r(\text{nochange}) = 1 - P_{\chi^2;N}(T_j) \quad (3-14)$$

通過檢視分佈可以確定閾值，將區域分為變化區域與不變區域兩類。該閾值 t 的選取通常需要根據經驗多次求取。當 $P_r(\text{nochange}) > t$ 時，判斷為偽不變特征點。

MAD 詳細流程操作如圖 9 所示。在根據 MAD 法確定 PIFs 之後，為分析閾值 t 對求解校正方程的影響，本文將分別提取前 5% ($t=0.05$) 和 10% ($t=0.1$) 對應的區域，即圖 10 中白色部分對應的點位，再分別計算各波段的均方根誤差 $RMSE$ （公式 3-18）。

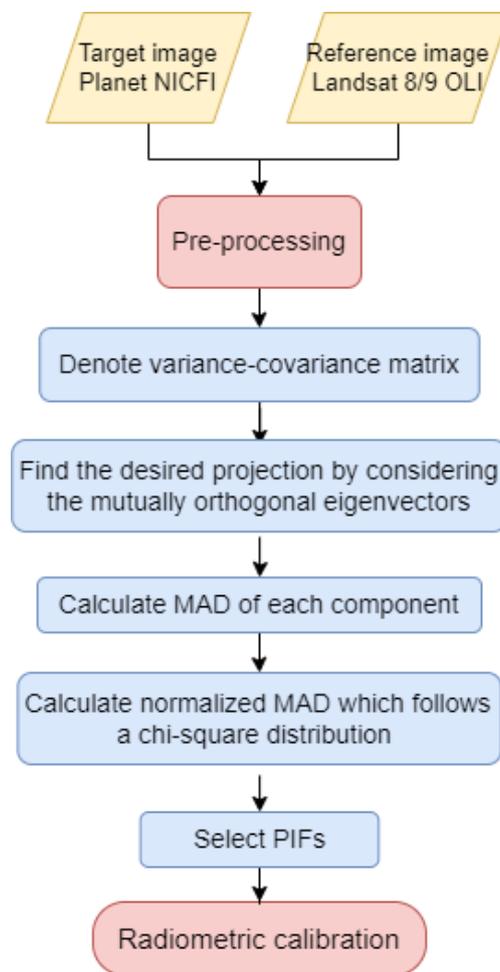


圖 9 MAD 的算法流程

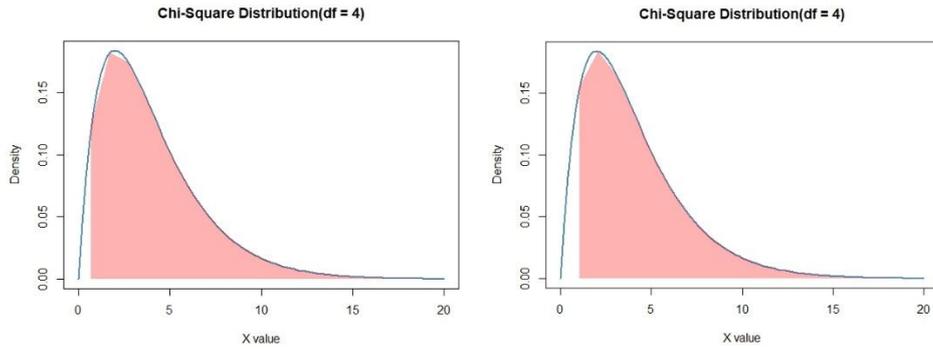


圖 10 自由度為 4 的卡方分佈

3.3.3 IR-MAD 法

鑒於 MAD 法對噪聲干擾不夠敏感，在此基礎上又提出了升級版的 IR-MAD 法。該方法啟發自 data mining 中的 boosting 思路，每一次計算中對變化小的區域賦予更高的權重，在多次迭代之後其權重會越來越大，而變化趨於的權重則會越來越小，從而實現擴大差異的效果，在影像受到噪聲干擾比較多的情況下結果會更好。

前半部分同樣執行 MAD 方法中的操作，此時每個像元的權重為 1。在下次迭代中，根據上一次計算結果為像元分配新的權重，即

$$w_j = P\{T_j > t\} \approx P\{\chi^2(p) > t\} \quad (3-15)$$

該權重進入到下一次的均值、方差、協方差計算中，

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^N w_j X_{ji}}{\sum_{j=1}^N w_j} \quad (3-16)$$

$$S_{kl} = \frac{\sum_{j=1}^N w_j (X_{jk} - \bar{X}_k)(X_{jl} - \bar{X}_l)}{(N-1) \sum_{j=1}^N w_j / N} \quad (3-17)$$

中間如果前後兩次迭代的最大典型相關係數差距小於 10^{-6} ，則迭代停止。迭代完成的結果同樣符合自由度為 4 的卡方分佈。進行相同的閾值提取操作即可得到 IR-MAD 的 PIFs 提取結果。IR-MAD 操作流程如圖 11 所示。

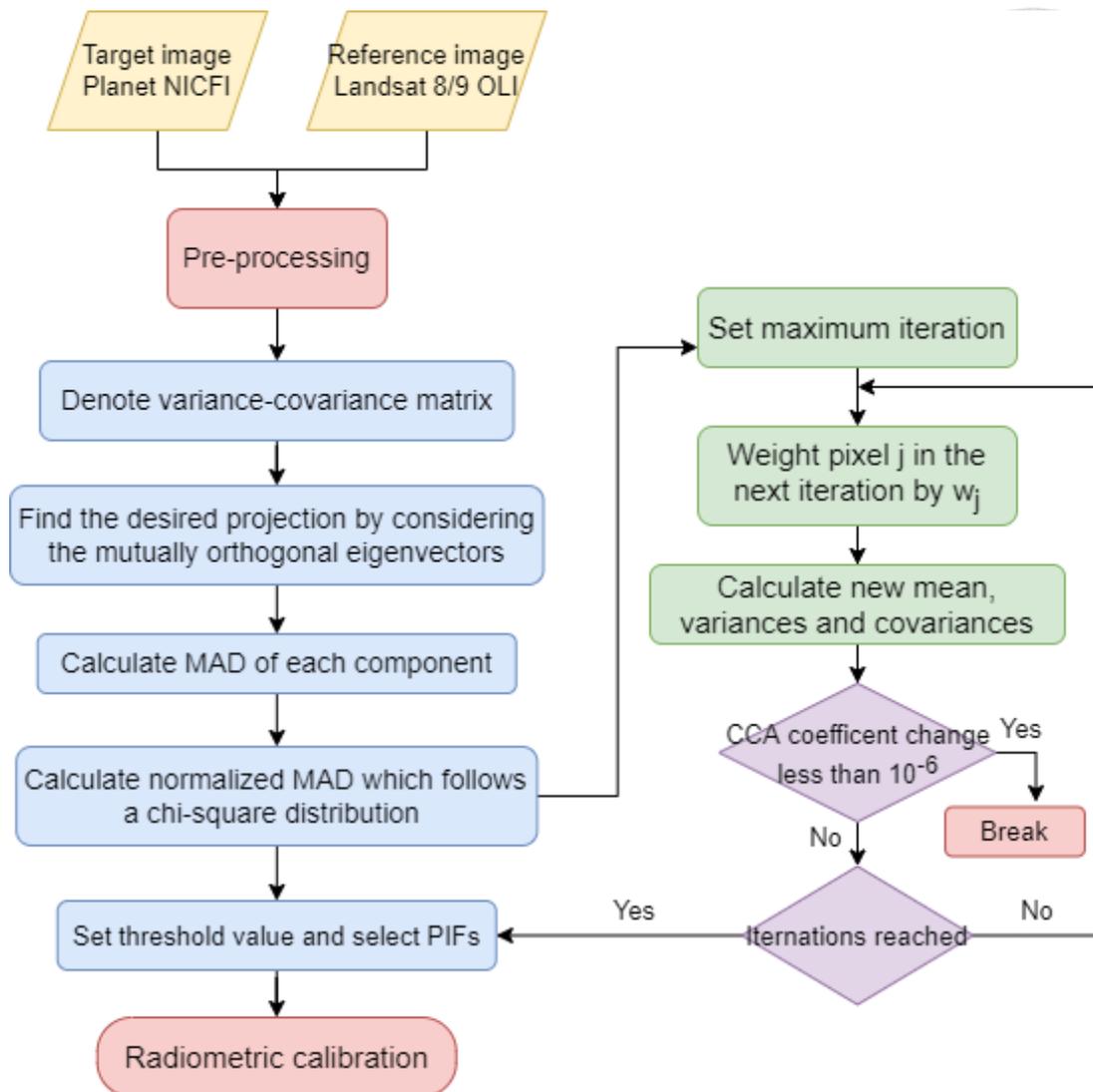


圖 11 IR-MAD 法的算法流程

3.3.4 歸一化植被指數 NDVI

歸一化植被指數 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 是基於綠色植物的葉綠素對可見光譜紅紫光的強吸收和周圍細胞組織對近紅外波段強反射的原理計算得到的一種能表征綠色植物覆蓋度的遙感指數。其計算公式為近紅外和可見光紅色通道反射率波段之差與之和的比值，即：

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (3-18)$$

其中 NIR 和 R 分別為近紅外波段和可見光紅色波段的反射率。NDVI 對植物的物理及生理特征變化十分敏感 (Tucker, 1979)，被廣泛用作植被生長的指標。本研究的 NDVI 數值由波段計算 (band math) 得出。



3.3.5 均方根誤差*RMSE*

*RMSE*的計算公式為：

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y'_i - y_i)^2} \quad (3-19)$$

它的大小可以反映當前資料與參考資料之間的相似程度。結果越小，則越相似。

第四章 實驗與分析



本章第一節將展示三種方法的實驗關鍵環節及結果。第一節分為三部分，前兩小節分別對應基於分佈原理的直方圖匹配法與基於像元原理的 MAD 法及 IR-MAD 法。第三小節將對上述方法進行 RMSE 的評價及各自特點總結。

第二節將展示校正之後 Planet NICFI 反映的季節植被指數變化結果。

4.1 三種方法實驗與結果

4.1.1 基於分佈：直方圖匹配法

在濕潤季節，落葉林和常綠林的反射率差異小，反映在像元直方圖分佈中，則曲線應更密集。濕潤季節以 2021 年 6 月的資料為例（圖 12 左側三列），其中三列分別代表 Landsat、Planet NICFI、匹配後影像的直方圖，四行分別代表藍、綠、紅、近紅外波段情況。此處可以發現在該季節 Planet NICFI 與 Landsat 直方圖分佈差異不大。

在乾燥季節，落葉林和常綠林的反射率差異變大，因此曲線分佈理論上應更稀疏。乾燥季節以 2022 年 4 月為例（圖 12 右側三列），在可見光範圍兩者之間差異較小，但在近紅外波段 Landsat 更符合稀疏分佈的預期，Planet NICFI 像元則過於集中，由此反映出 Planet NICFI 對落葉林和常綠林的區分力不強，可能存在混合像元的情況。此處也可以發現，從濕潤季節到乾燥季節，Planet NICFI 的近紅外數值一直處於較高位置，而 Landsat 則有明顯近紅外反射率的下降，因此推測 Planet NICFI 的輻射問題可能存在於對近紅外波段變化偵測不敏感。

在直方圖匹配之後，Planet NICFI 曲線形狀近似於 Landsat，影像對比度有增強，像元間區分度變大。其中近紅外波段前後分佈差異最大。

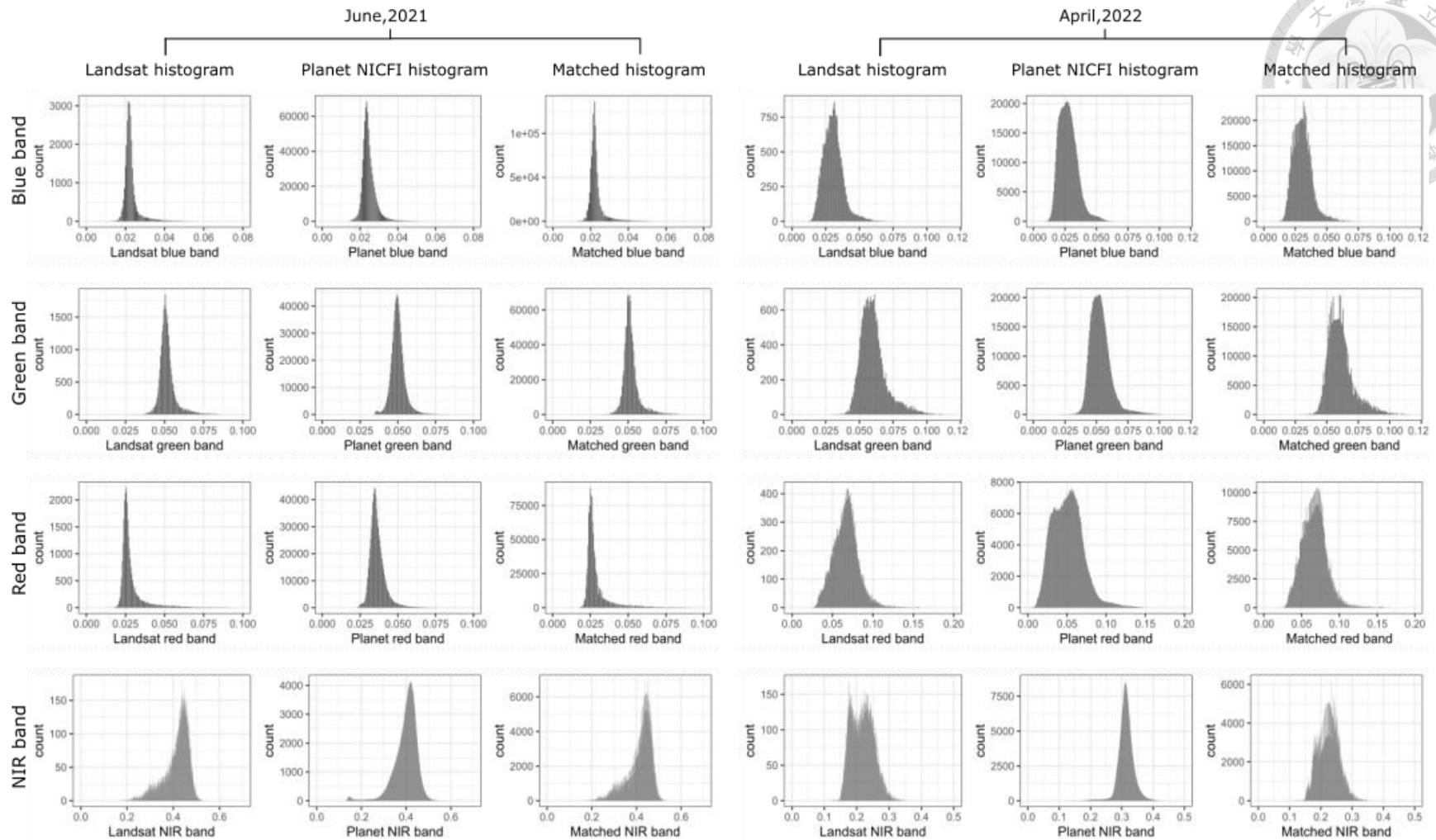


圖 12 直方圖匹配過程

分為兩組，左為 2021 年 6 月，右為 2022 年 4 月，每組三列分別為參考影像 Landsat、原始影像 Planet NICFI、直方圖匹配後

需特別說明的是，在最濕潤季節（8月、9月），參考影像 Landsat 受到雲霧影響嚴重。圖 13 展示了部分 2021 年 9 月影像狀況，Landsat（圖 13（a））有雲層及陰影遮擋，並且全幅影像都受到水汽干擾，色彩區分度不高。本研究在開展直方圖匹配之前先進行了去雲處理，通過設定閾值並人工進行檢視排除了雲層覆蓋及陰影遮擋區域，但無雲區域受到的水汽影響則難以進行修正，這些異常值很大程度影響了整體的分佈，讓整體分佈浮動較大並且兩端極值增加。依據該 Landsat 直方圖分佈對 Planet NICFI（圖 13（b））進行均衡化反而會增加某些異常極端值的影響，均衡化後的 Planet（圖 13（c））色彩也受到了干擾，並沒有有效改善影像質量。

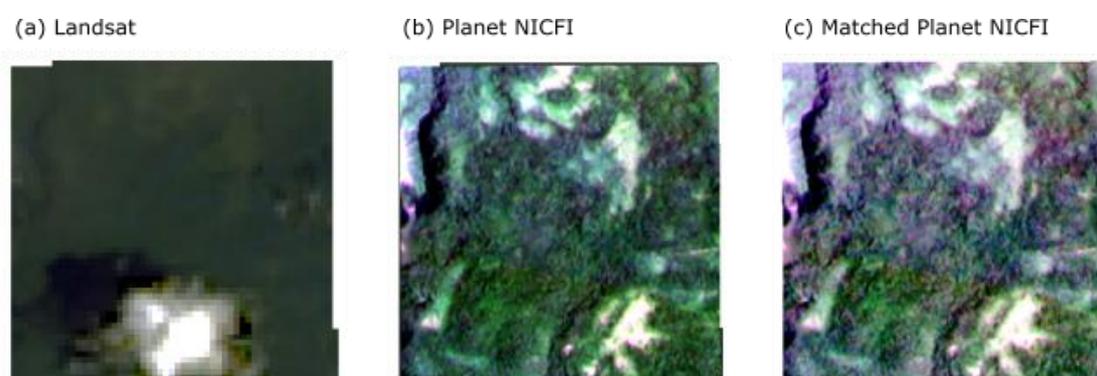


圖 13 2021 年 9 月直方圖匹配的異常狀況

總結來說，目前直方圖匹配的方法已經非常成熟，操作起來簡單易行，無需進行各類參數設定，自動增強整個影像的對比度。但增強效果不受控制，處理結果受到全局影像的影響，因此對參考影像的質量要求較高。本文選用的 Landsat 影像如前文所述，為傳統衛星影像，在濕潤季節容易受到氣候因素干擾，較難獲取高質量參考影像。因此在熱帶濕潤季節較難進行基於直方圖匹配原理的相對輻射校正。

4.1.2 基於像元：MAD 法與 IR-MAD 法

MAD 法與 IR-MAD 法的操作類似，主要由偽不變特徵點提取、最小二乘法求解回歸係數和輻射變換 3 個步驟組成：

- (a) 偽不變特徵點（PIFs）的選取

本文原始 Planet 影像像元數目為 965×776 。根據公式 3-11 計算 MAD，公式 3-13 計算歸一化 MAD（即 NMAD）並統計結果分佈。假定兩幅影像拍攝期間地物沒有發生變化，地物反射率的差異僅由拍攝時的差異(如傳感器的誤差及大氣狀況)引起，NMAD 的大小反映了數學意義上該像元點變化的概率，越接近 0 代表該像元點在兩幅影像中不變的概率越高。

IR-MAD 與 MAD 法的不同在於通過每一次迭代不斷給兩幅影像中的每個像元重新賦予權重，通過計算，沒有發生變化的像元將具有更高權重。經過若干次迭代後，每個像元權重會逐漸趨於穩定。IR-MAD 法的迭代坐標圖如圖 14 所示，橫坐標表示迭代此處，縱坐標表述 4 組變量每次迭代後的典型相關係數變化。前 5 次變換中典型相關係數變化明顯，隨著迭代次數增加，每組變量的相關係數在不斷增大，在 10 次之後變化區域穩定。根據此變化特點，為保證迭代結果穩定，本文將所有時期的迭代次數均設置為 100 次。迭代停止時同樣會輸出每個像元點最終的 NMAD 值。

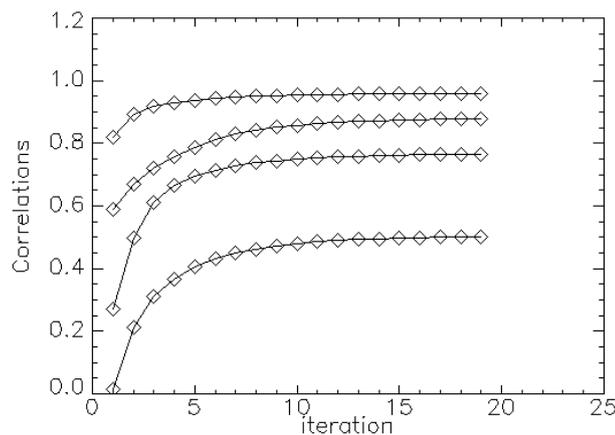


圖 14 IR-MAD 法迭代坐標圖

兩種方法的 NMAD 實際分佈如圖 15 所示，均符合自由度為 N （本例中 N 為 4，即 $df=4$ ）的卡方分佈。此處以 2021 年 7 月作為濕潤季節的示例（圖 15 (a)、(c)），以 2022 年 3 月（圖 15 (b)、(d)）作為乾燥季節的示例。根據 MAD 計算的 NMAD 數值分佈集中，而 IR-MAD 法計算的 NMAD 數值分佈稀疏，反映出數值整體的差異被放大，體現了 IR-MAD 法通過權重的不斷變化實現放大噪聲的效果，進而更容易進行變化與不變區域的劃分。另外，濕潤季節與乾燥季節的分佈存在差異，濕潤季節曲線落差較大，說明濕潤季節整體

像元變動不大，但部分點位會受到雲霧等外部干擾造成較大誤差，因此極值依然存在。而乾燥季節曲線更平緩，說明變動像元可能較濕潤季節更多，但鑒於理論上乾燥季節受到雲霧污染程度小於濕潤季節，因此推測該差異更多源於傳感器在輻射偵測上的誤差。

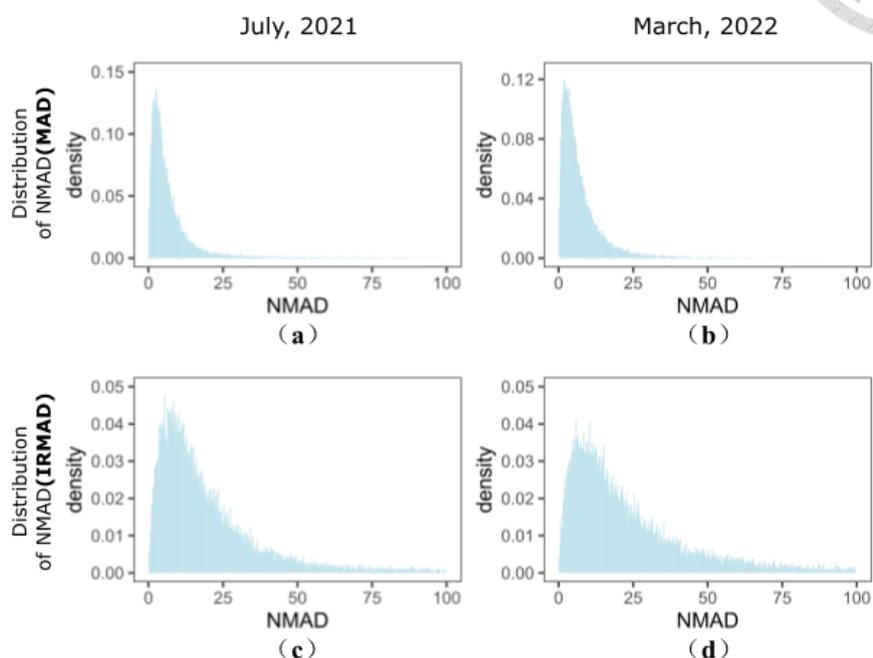


圖 15 濕潤季節與乾燥季節實際 NMAD 分佈

將 NMAD 轉化為灰度圖像，則能更直觀地從空間上反映像元變化強度的差異。顏色越黑的點位表示變化可能性越小，顏色越白的點位表示變化可能性越大。濕潤季節灰度圖像（圖 16 (a)、(c)）相比乾燥季節灰度圖像（圖 16 (b)、(d)）對比度更強，可以更明確區分出變化部分（白色）與不變部分（黑色）。該例中白色部分多為雲層覆蓋區域，說明基於像元點的相對輻射校正方法可以較好排除雲層干擾。從上下兩排的對比也可看出，迭代使圖像對比度增強，灰色部分減少，黑色與白色區域更加明顯。

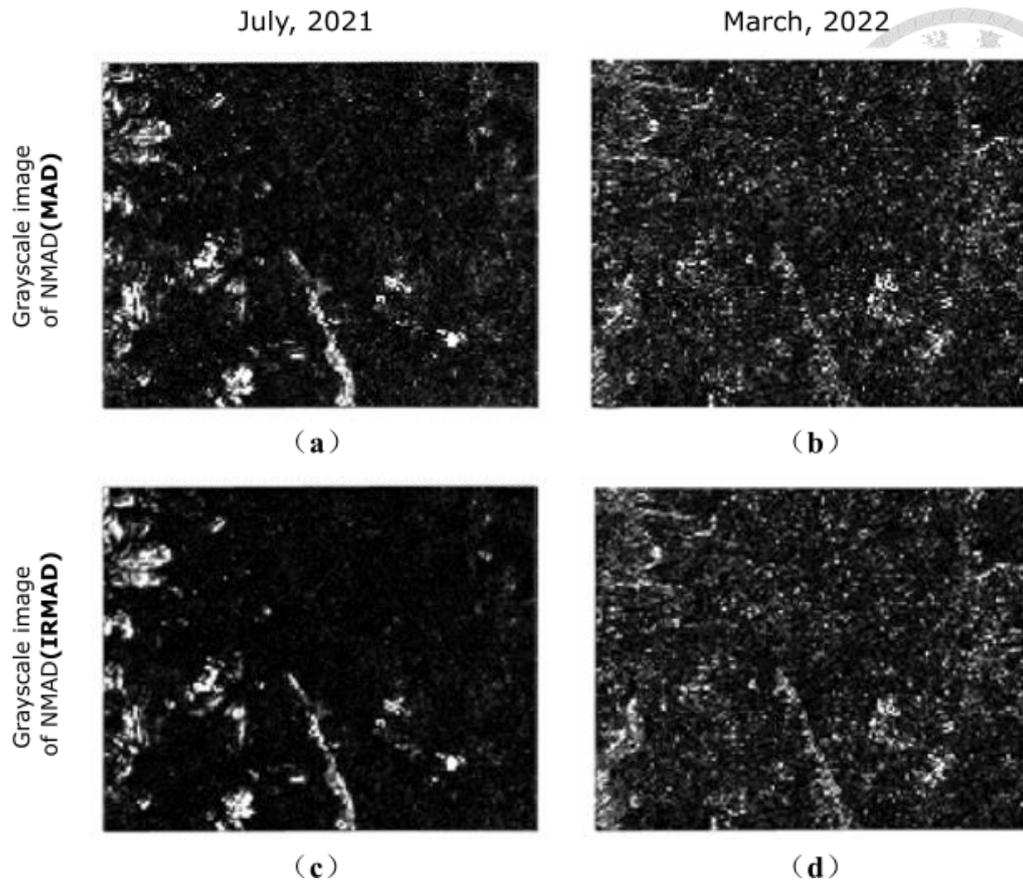


圖 16 濕潤季節與乾燥季節 NMAD 灰度圖像

根據公式 3-13 及第三章所述閾值處理方法，本文分別試驗了閾值 $t=0.05$ （即提取 NMAD 前 5% 對應像元點）及閾值 $t=0.1$ （即提取 NMAD 前 10% 對應像元點）的情況。原始像元數量為 18943，經 5% 提取後數量為 947，10% 提取後數量後為 1894。提取點位結果如圖 17 所示，其中紫色點代表偽不變特徵點，由該分佈圖可直觀看到，基於典型相關分析提取的線性不變點大多分佈於常綠植被覆蓋區。

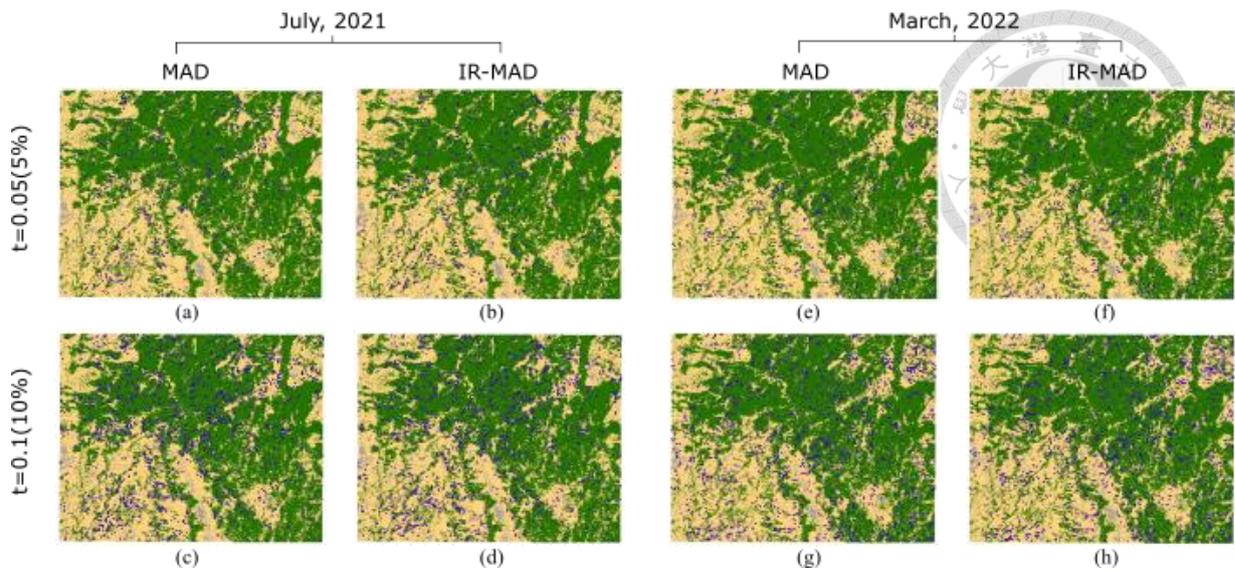


圖 17 PIFs 點位提取示意圖

以 2022 年 3 月為例， R^2 和 $RMSE$ 的計算結果如表 6 所示（此處為方便展示 $RMSE$ 的變化，將 $RMSE$ 數量級擴大了 1000 倍）。分析表 6 可知，各個波段的 R^2 和 $RMSE$ 的差別不大，但 R^2 會隨著樣本數增加而減小， $RMSE$ 會隨著樣本數的增加而增大。該結果表明，兩種閾值選擇都能減小原始影像與參考影像之間的輻射差異，其中 IR-MAD 進行 5% 提取（即閾值 $t = 0.05$ ）的 R^2 和 $RMSE$ 結果稍好於其他方法。

表 6 各波段不同閾值 t 的 R^2 和 $RMSE$

方法	波段	$t = 0.05$		$t = 0.1$	
		R^2	$RMSE$	R^2	$RMSE$
MAD	藍	0.9674	1.6067	0.9549	1.8801
	綠	0.9719	1.6980	0.9590	2.0543
	紅	0.9751	3.6298	0.9646	4.3182
	近紅外	0.9503	5.2770	0.9331	6.3849
IR-MAD	藍	0.9633	1.6825	0.9499	1.9534
	綠	0.9781	1.4683	0.9671	1.7688
	紅	0.9777	3.4113	0.9675	4.0856
	近紅外	0.9601	5.1379	0.9460	6.0956

在濕潤季節 IR-MAD 5% 提取的方法優勢更為明顯。從圖 18、圖 19 可見，

乾燥季節與濕潤季節提取 PIFs 的質量存在差異。乾燥季節兩種方法的兩種閾值設置都可以較好提取集中的點位，這些點位可以很好描述線性關係。而濕潤季節 MAD 法（圖 18 每張小圖的第一排）存在明顯偏離了密集群落的“噪聲點”，這些點位的存在會進一步干擾到回歸曲線的計算。

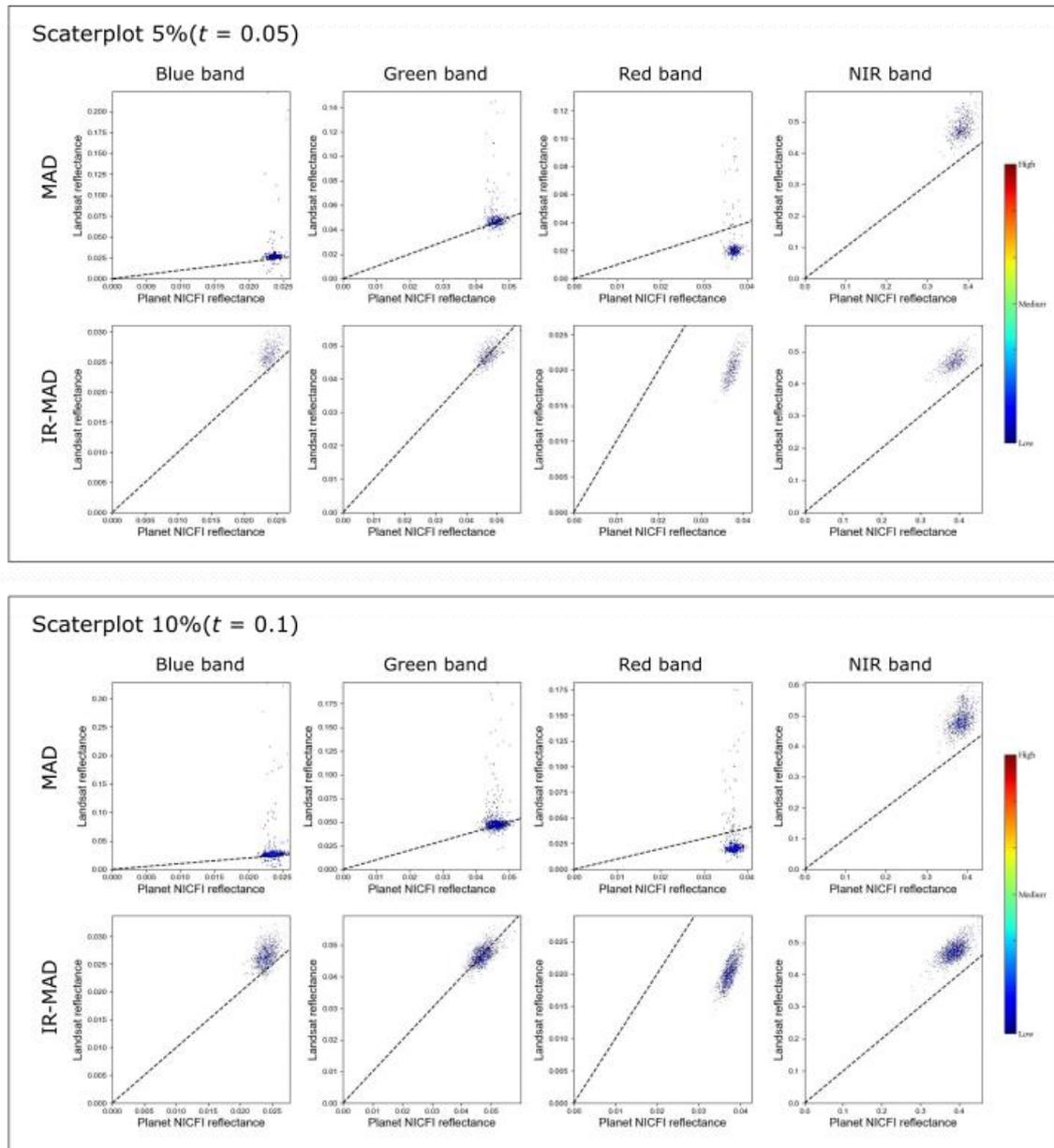


圖 18 濕潤季節不同 PIFs 提取方法散點圖

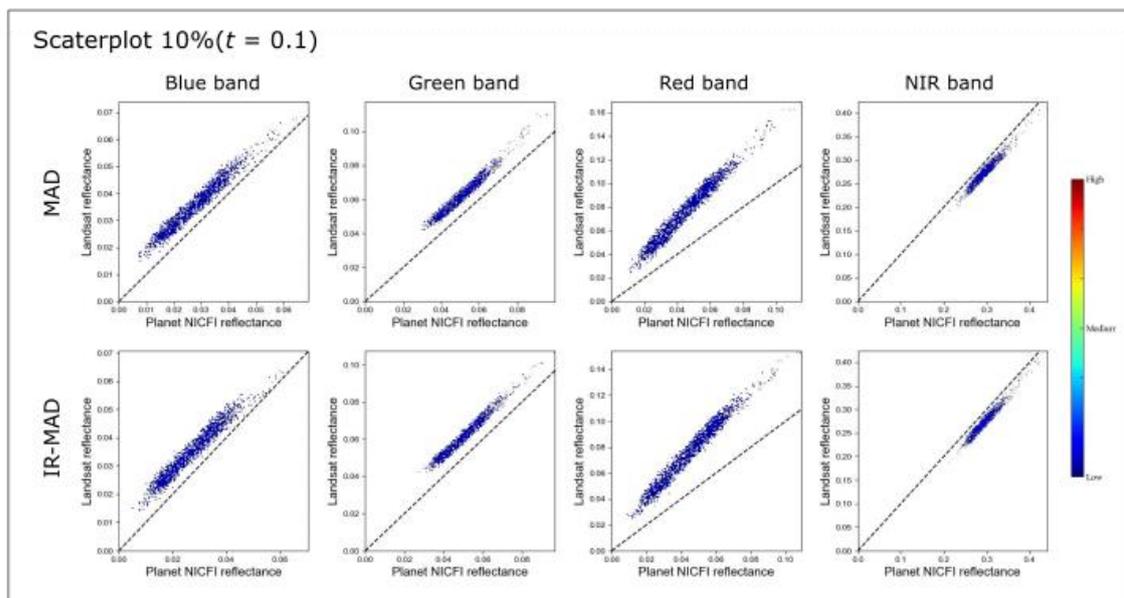
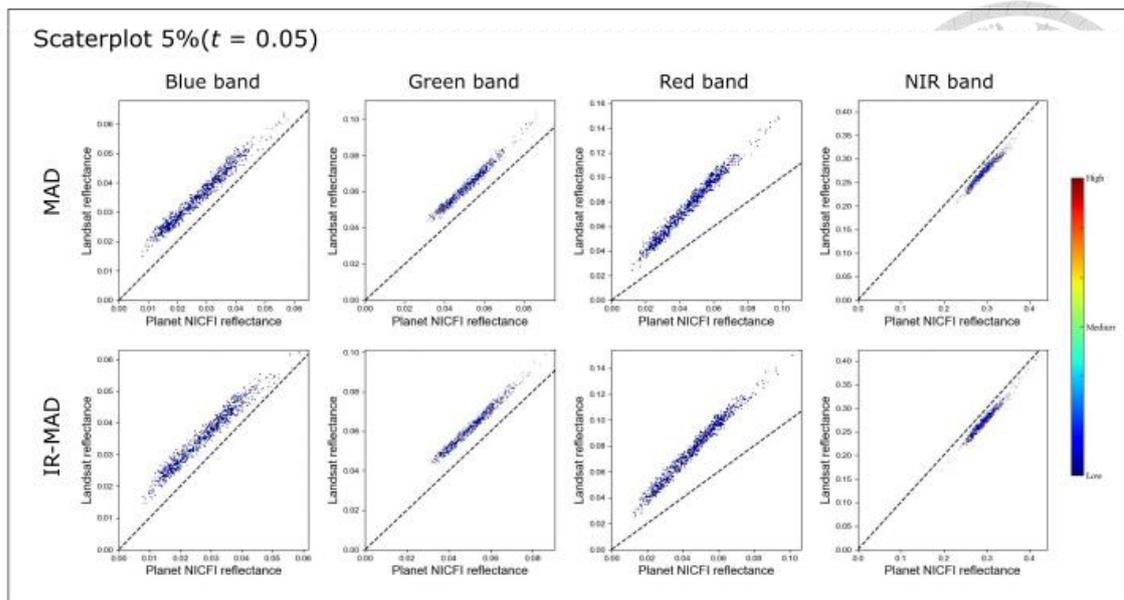


圖 19 乾燥季節不同 PIFs 提取方法散點圖

(b) 基於最小二乘法的線性回歸

基於上述 PIFs 在原始圖像和參考圖像上像元間的對應關係，利用基於最小二乘法的回歸方法擬合回歸方程，求解得到的線性方程用於原始影像的校正。鑒於 IR-MAD 5%提取方法效果較好，此處以該結果為例，得到的回歸係數如表 7 所示。



表 7 基於 IR-MAD 5% 提取的線性擬合係數表

	2021.5			2021.6			2021.7			2021.8		
	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2
B1(blue)	0.5628	0.0091	0.4108	0.8587	0.0014	0.6799	0.7674	0.0049	0.4460	0.5880	0.0122	0.2152
B2(green)	0.7184	0.0221	0.5773	1.0018	0.0010	0.8566	0.7309	0.0136	0.5005	0.6001	0.0186	0.3455
B3(red)	0.9724	-0.0023	0.7113	1.1665	-0.0147	0.6500	1.0059	-0.0097	0.7135	1.1049	-0.0211	0.6115
B4(NIR)	0.9338	0.0649	0.7382	0.9118	0.0587	0.7897	0.7355	0.1377	0.6568	0.7458	0.1823	0.4071
	2021.9			2021.10			2021.11			2021.12		
	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2
B1(blue)	1.1445	-0.0051	0.1729	0.7827	0.0017	0.6571	0.1889	0.0161	0.0446	0.9394	-0.0016	0.8295
B2(green)	0.7658	0.0203	0.1709	0.8275	-0.0003	0.8763	0.6859	0.0079	0.5000	1.0444	-0.0123	0.9100
B3(red)	1.6453	-0.0243	0.1422	0.8895	-0.0109	0.7911	0.5408	0.0028	0.4558	1.1638	-0.0154	0.9847
B4(NIR)	0.6690	0.1960	0.2156	0.7854	0.0625	0.9444	1.3898	-0.0780	0.7578	0.8151	0.0336	0.8805
	2022.1			2022.2			2022.3			2022.4		
	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2	a(斜率)	b(截距)	R^2
B1(blue)	0.9978	-0.0016	0.9673	1.0656	-0.0005	0.9766	0.9181	0.0102	0.9633	0.9124	0.0029	0.9152
B2(green)	1.1709	-0.0127	0.9771	1.1994	-0.0098	0.9797	0.9868	0.0119	0.9781	0.7614	0.0159	0.8088
B3(red)	1.0879	-0.0033	0.9920	1.1436	0.0029	0.9891	1.4191	0.0121	0.9776	0.7324	0.0238	0.9156
B4(NIR)	1.0045	-0.0310	0.9616	0.9355	-0.0213	0.9626	1.0042	-0.0234	0.9600	1.5700	-0.2693	0.8452
	2022.5											
	a(斜率)	b(截距)	R^2									
B1(blue)	0.6527	0.0044	0.7653									
B2(green)	0.7851	0.0143	0.8093									
B3(red)	0.7640	-0.0014	0.7631									
B4(NIR)	0.8767	0.0645	0.8664									

觀察表中擬合係數可發現，原始影像與參考影像的一次項係數（即斜率）變化不穩定，而乾燥季節的一次項係數普遍高於濕潤季節。在季節轉換的時期，如 2021 年 11 月和 12 月（濕季向乾季轉換）、2022 年 4 月（乾季向濕季轉換），一次項係數對比前月會有較大浮動，推測與這兩個時期地物的變動差異較大有關，此時兩影像拍攝時間的不同而導致的時相差異可能更突出。

為了更好分析不同時期原始影像與參考影像的輻射差異，我們比較了不同時期四個波段的線性擬合關係式之間的差異（圖 20）。圖中紫色及藍色系的三種曲線對應 5 月、7 月、8 月三個濕潤季節，綠色及黃色系的三種曲線對應 12 月、1 月、2 月三個乾燥季節。可以發現在所有波段的修正中乾季的一次項係數都要高於濕季（紫色及藍色系與綠色及黃色系有明顯區分）。

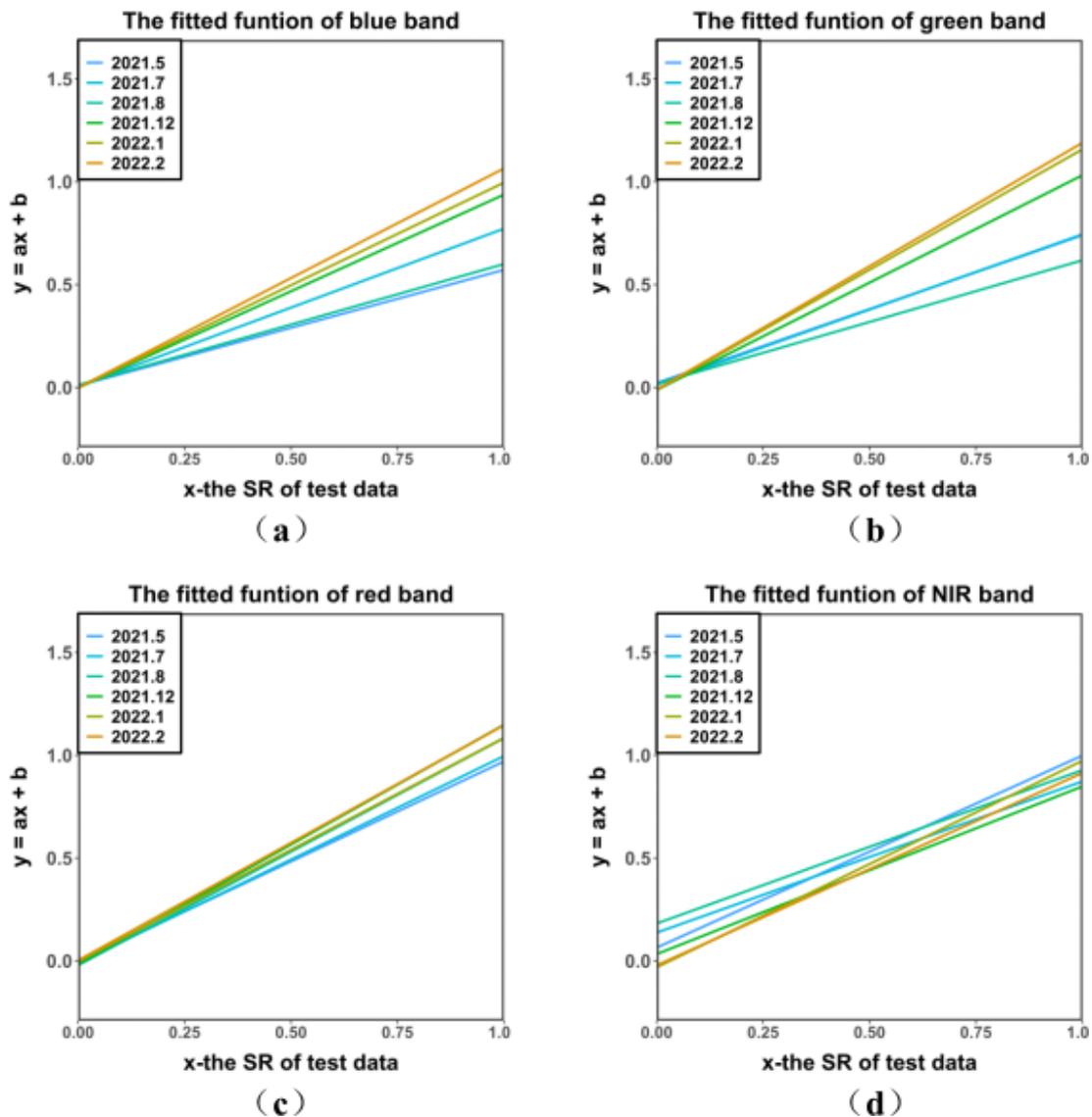


圖 20 不同時期四波段的擬合直線圖



4.1.3 三種相對輻射校正效果對比與評價

依據三種方法對原始影像進行線性和非線性校正處理，結果如圖 21 所示。圖中每張影像都由左右兩部分鑲嵌而成，其中右半部分均為參考影像 Landsat。第一排為原始待校正影像與參考影像的對比，左半部分為原始 Planet NICFI 影像。第二排是非線性原理的直方圖匹配法處理結果對比，左半部分為經過直方圖匹配校正的相對輻射校正 Planet NICFI 影像。第三排是線性原理的 MAD 法處理結果對比，左半部分為經過 MAD 法進行相對輻射校正的 Planet NICFI 影像。第四排是線性原理的 IR-MAD 法處理結果對比，左半部分為經過 IR-MAD 法進行相對輻射校正的 Planet NICFI 影像。從目視來看，輻射變化較為明顯的是基於非線性原理的直方圖匹配法的結果，其色彩和參考影像更為貼近。但基於線性原理的 MAD 與 IR-MAD 法目視效果差異不明顯。

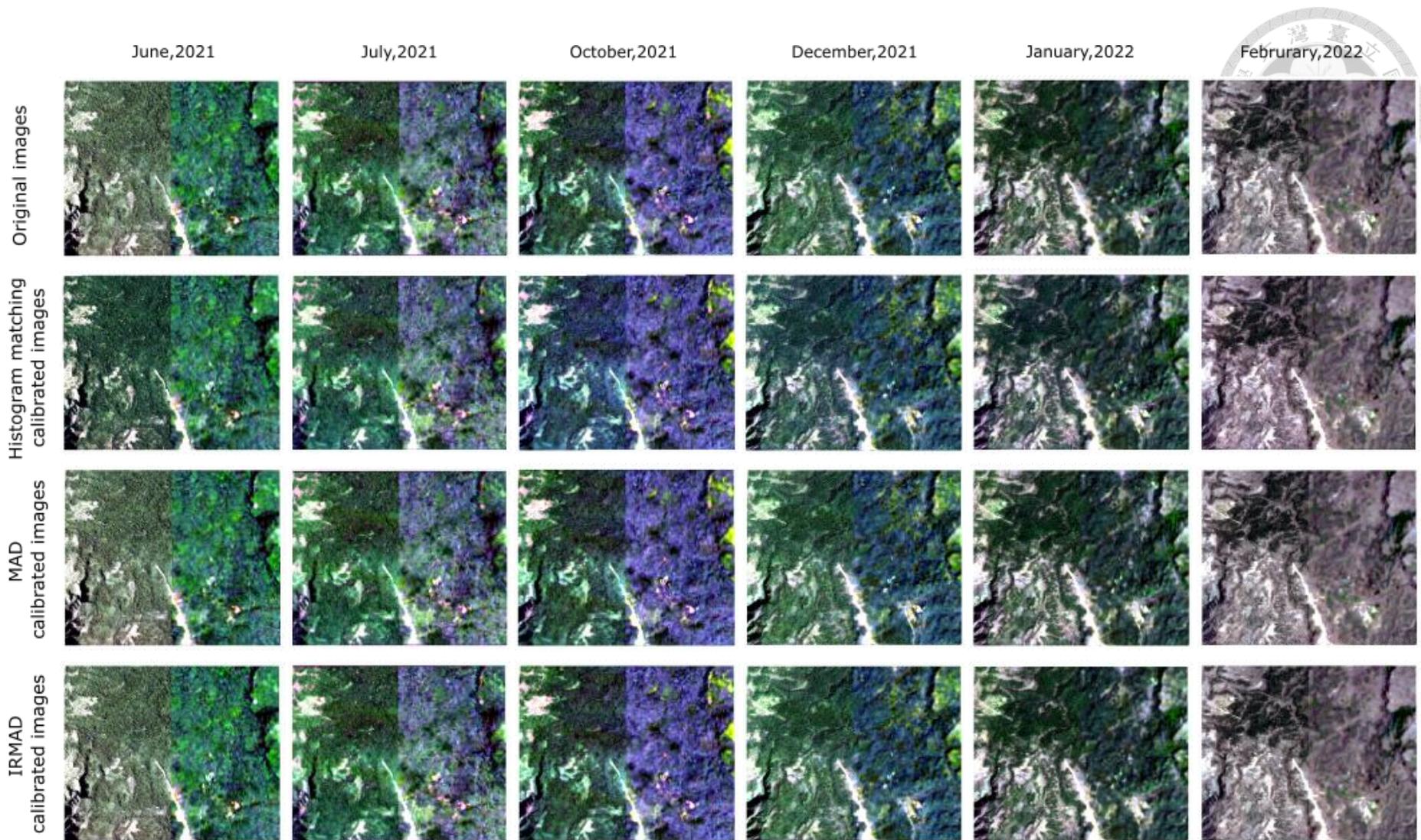


圖 21 三種方法相對輻射校正結果對比



本研究選擇均方根誤差做為精度評價指數。表 8 為各個波段 RMSE 的結果（放大 1000 倍，保留四位有效數字），其中 $RMSE^{ori}$ 表示原始影像 Planet NICFI 與參考影像 Landsat 之間的均方根誤差， $RMSE^{HM}$ 表示基於直方圖匹配的校正結果的均方根誤差， $RMSE^{MAD}$ 表示基於 MAD 的校正結果的均方根誤差， $RMSE^{IRMAD}$ 表示基於 IR-MAD 的校正結果的均方根誤差。由該結果可知，校正後的影像均方根誤差均小於校正前，說明影像校正方法可以減小原始影像與參考影像間的輻射差異，但不同時期、不同波段存在效果差別。總體而言三種方法的均方根誤差非常接近，IR-MAD 法在細微尺度上數值更小，說明在保留影像之間的相似性上稍強於另外兩種方法，且表現較為穩定。其次是 MAD 法校正的結果。直方圖匹配法在大部分時期具有最大的均方根誤差值。但有些時期會出現直方圖匹配法的均方誤差在三種方法中最小的情況，表明增強直方圖的相似性有時會使結果比基於線性原理的方法更能增加像元間的相似性，但該結果並不穩定，濕潤季節及乾燥季節偶爾都會出現這種情況，並且多出現在紅光波段及近紅外波段。

由原理可知，直方圖匹配法的核心在於增強影像直方圖的相似性，順帶可以較好消除視覺色差。它的優勢在於該方法較為成熟，可在軟體提供的拓展包中直接進行操作，計算便捷，無需設定參數，可自動尋找變換函數。但它需要使用影像全局的信息進行歸一，消除了影像對之間所有的光譜差別，其中包括一些由於地物本身發生變化引起的光譜差異和必須保留的變化。本研究中，由傳統衛星拍攝的參考影像在濕潤季節存在一些雲霧覆蓋造成的干擾，因此在操作直方圖匹配前不得不進行去雲操作，這一方面會導致全局影像會存在一定資料缺失，這部分原始影像無法參與到直方圖匹配的計算中，影響到直方圖分佈的準確性及後續校正的結果。另一方面雲層可以通過裁剪直接去除，但水汽的干擾是難以消除的，在影像受到雲層干擾同時整體的輻射都受到氣候條件影響而產生了較大誤差，這種誤差在全局影像中也並不同質，因此均衡全局影像的色差反而會使一些資料質量尚可的區域也受到噪聲區域的影響。因此直方圖匹配在參考影像質量較好、不存在明顯噪聲干擾的情況下才會發揮更好的效果。而本研究的研究對象處於熱帶地區，選用傳統衛星作為參考影像難以避免濕潤

季節影像干擾問題，因此直方圖匹配的結果未取得理想效果，在濕潤季節存在明顯偏差（由圖 13 及表 8 中 2021 年 8 月極高的均方根誤差可說明）。

相較而言，基於典型相關分析原理的操作比直方圖匹配稍顯複雜，需要自行編寫算法，但輻射校正結果則可更好保持每個影像對之間的相似性，並且有效避免顏色差異的傳遞。而其中，IR-MAD 法在最濕潤季節，直方圖匹配和 MAD 法都不能正常開展時（圖 18）也能取得較好效果，並且在大部分時間取得了更小的均方根偏差，因此整體表現最為穩定。同時，和基於分佈的直方圖原理相比，該方法不需要先行進行去雲處理。因其可以計算出數學意義上的不變區域點，意味其可以自行篩選出質量最高的點位參與到相對輻射歸一，避免了直方圖匹配在濕潤季節參考影像質量不佳的情況下使用全局影像參與計算的弊端。總結而言，該方法可以建立多幅影像間的公共輻射尺度參考，保證影像對之間輻射一致性，可以較好消除傳感器受外部干擾引起的變化，而增強我們感興趣的光譜變動，即影像發生本質變化的地物、影像的光譜季節性變化。

總體而言，上述實驗結果證明基於典型相關分析原理的 IR-MAD 法在該研究區域應用於相對輻射校正的可行性，該方法處理快速，對原始影像和參考影像間的時相差異沒有嚴格約束條件，對於參考影像也沒有嚴格質量約束，在熱帶地區濕潤季節也能穩定開展。

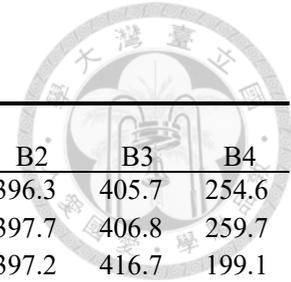


表 8 原始影像對與經過三種相對輻射校正後影像對的均方根誤差

	2021.5				2021.6				2021.7				2021.8			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
$RMSE^{ori}$	3.820	9.015	5.210	4.528	3.678	4.004	9.549	41.71	2.091	3.146	9.822	41.31	421.0	396.3	405.7	254.6
$RMSE^{HM}$	4.612	5.067	4.923	2.388	3.408	4.083	6.118	40.75	2.079	3.087	2.596	20.37	420.8	397.7	406.8	259.7
$RMSE^{MAD}$	3.206	3.035	4.250	2.239	3.124	3.758	7.321	38.31	2.398	3.099	3.302	20.70	419.3	397.2	416.7	199.1
$RMSE^{IRMAD}$	3.354	3.045	4.355	2.244	3.213	3.724	6.137	38.29	2.340	3.043	3.157	20.42	418.9	396.0	415.4	196.3
	2021.9				2021.10				2021.11				2021.12			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
$RMSE^{ori}$	10.84	38.85	28.08	39.10	4.537	9.079	15.24	29.18	8.487	10.66	15.82	54.17	4.105	10.36	9.701	35.61
$RMSE^{HM}$	4.227	5.426	4.334	7.735	1.991	2.722	2.431	18.59	4.256	5.934	5.134	48.43	2.466	3.235	3.614	21.42
$RMSE^{MAD}$	11.14	3.396	22.48	6.204	1.909	2.650	2.399	18.66	3.650	5.666	4.794	45.22	2.379	3.286	3.675	21.10
$RMSE^{IRMAD}$	10.95	3.248	21.84	6.759	2.009	2.618	2.358	18.64	3.553	5.608	4.575	48.69	2.369	3.280	3.667	20.87
	2022.1				2022.2				2022.3				2022.4			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
$RMSE^{ori}$	3.947	5.988	5.747	34.94	4.028	4.730	12.91	44.75	9.281	12.81	33.63	26.95	4.988	6.970	16.21	90.76
$RMSE^{HM}$	3.673	4.620	5.877	16.90	3.933	4.782	8.331	16.83	4.675	5.326	10.46	15.63	4.818	7.546	9.566	29.78
$RMSE^{MAD}$	3.408	4.328	5.810	17.27	3.927	4.782	8.406	17.32	4.650	5.246	10.53	15.85	4.681	5.058	8.617	33.85
$RMSE^{IRMAD}$	3.397	4.320	5.818	17.40	3.913	4.739	8.395	17.08	4.604	5.226	10.47	16.19	4.604	4.990	8.430	30.95
	2022.5															
	B1	B2	B3	B4												
$RMSE^{ori}$	21.15	27.13	27.74	71.50												
$RMSE^{HM}$	25.80	33.52	33.39	79.40												
$RMSE^{MAD}$	21.12	26.53	27.35	73.24												
$RMSE^{IRMAD}$	21.06	26.49	27.23	71.94												



4.2 相對輻射校正後 Planet NICFI 反映的季節變化

評估相對輻射校正對 Planet NICFI 植被季節性監測增強的效果，將從以下兩個角度進行：

- 1) 從森林生態系統 (forest ecosystem scale) 尺度，分析研究區範圍所有波段季節光譜變化及反映在整體範圍內平均植被指數的變動，植被指數包括 NDVI 和 EVI。
- 2) 從精細空間尺度 (fine spatial scale)，分析提取出的單個像元點的光譜反射率季節性趨勢，以區分常綠植被覆蓋區及落葉植被覆蓋區光譜季節性增強的效果。

4.2.1 整體區域光譜季節變化趨勢

全幅影像代表區域的整體變動可以視為區域森林生態系統尺度上的變動。在校正之後整體區域各個波段的光譜反射率均有較大變化 (圖 22 (a)、圖 22 (b)、圖 22 (c)、圖 22 (d) 分別代表藍光、綠光、紅光、近紅外地表反射率變化)。圓形、方形、三角形符號分別代表直方圖匹配、MAD、IR-MAD 校正後的 Planet NICFI。從整體平均的角度來看不論哪種方法均可以和十字符號代表的原始 Planet NICFI 產生較大差別。原始光譜反射率季節性差異不強，特別是反映植被生長變化的紅光與近紅外部分在濕潤季節與乾燥季節轉化的浮動變化並不明顯。而歸一化後的結果能讓整體光譜波動範圍增大。一方面突出了濕潤季節的生長：此時為植被生長的旺盛期，無論常綠區域與落葉區域植被均很茂盛，整體植被以綠色呈現。校正後的生長季節紅光波段反射率更低，近紅外反射率更高。另一方面突出乾燥季節生長停滯：此時非落葉林的生長季節，氣候變乾燥，落葉林葉片逐漸失去水分和葉綠素，導致近紅外反射率下降，紅光反射率增加，產生了黃色、棕色的葉片顏色。校正後的乾燥季節突出了這種變化。兩種植被生長季節反射差異的增加使得全年的季節性變化有所突出。

植被指數的差異可以更為直觀的顯示校正前後反映的植被生長變化。在校正後平均 NDVI (圖 22 (e))、平均 EVI (圖 22 (f)) 均有更為明顯的月際變化。其中 EVI 數值整體浮動相比 NDVI 更明顯。從校正後的植被指數變動中可以明顯區分出濕潤季節與乾燥季節。由此可見，Planet NICFI 資料傾向於在高範圍時低估植被指數，而在低範圍時高估植被指數，對於落葉區域的植被變化不敏感。而相對輻射校正可以使 Planet NICFI 資料反映整體區域植被生長變動的能力得以改善。

除此以外，校正後 Planet NICFI 既整合了 Landsat 在輻射解析度上的優勢，也保留了自身高空間解析度的優勢。圖 23 使用色彩合成順序為 RGB=NIR-red-green，即假彩色合成，植被的生長狀況以紅色顯示。從對比可知，Landsat 一方面空間解析度較低，影像模糊，另一方面濕潤季節難以擺脫雲層覆蓋影像。而校正後 Planet NICFI 影像相比 Landsat 具有更豐富的空間細節，能更精確地展現出細部的植物生長變化的同時具有更清晰的邊界信息，可以更好分辨出不同植被之間的差異。從目視可以看出從濕潤季節過度到乾燥季節紅色區域逐漸減小，綠色、灰色區域增加，而到最右側最為乾燥的季節區域間差異最明顯，此時可以更好區分常綠區域與落葉區域生長的不同。

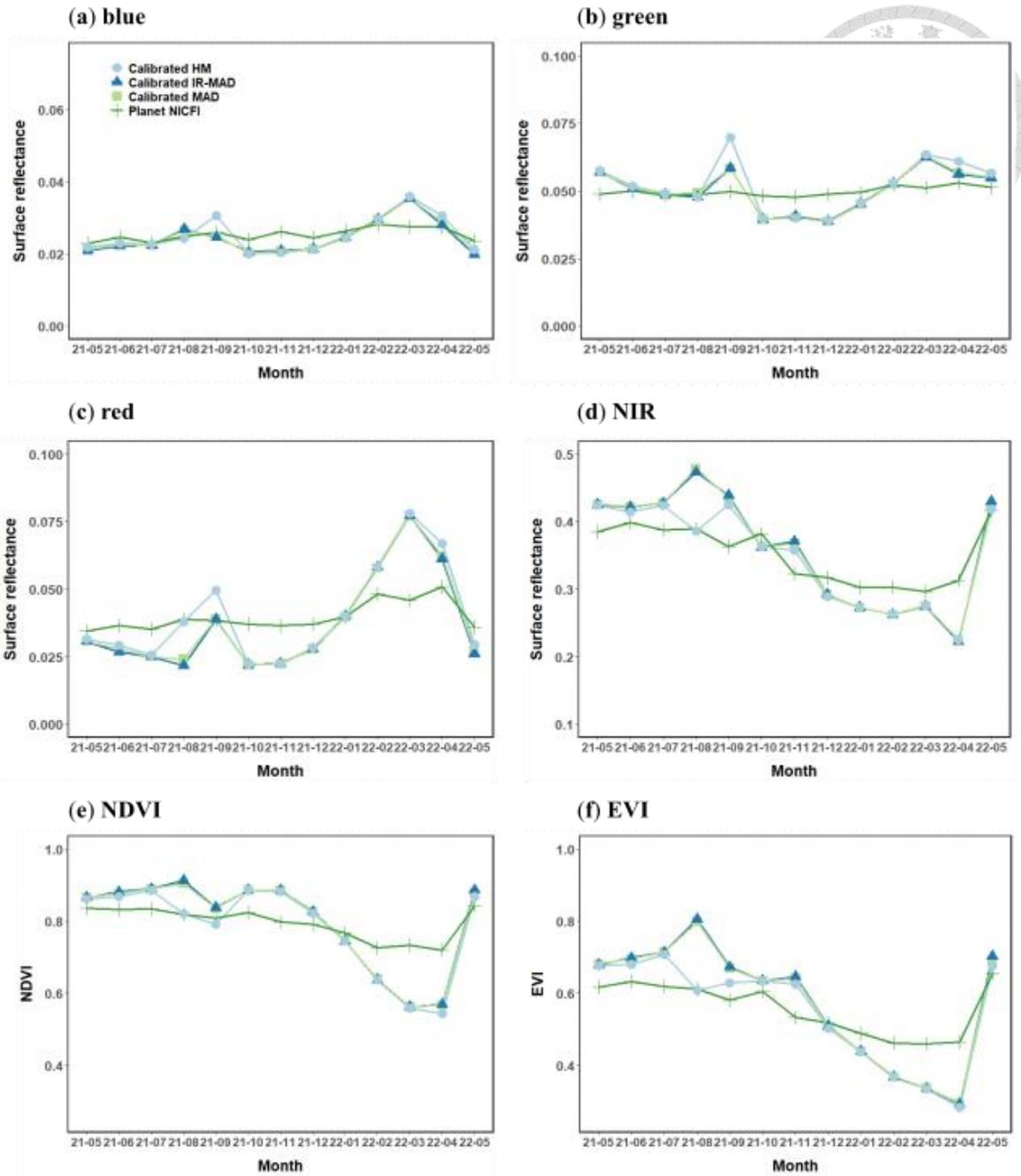


圖 22 Planet NICFI 校正前後反射率季節性對比

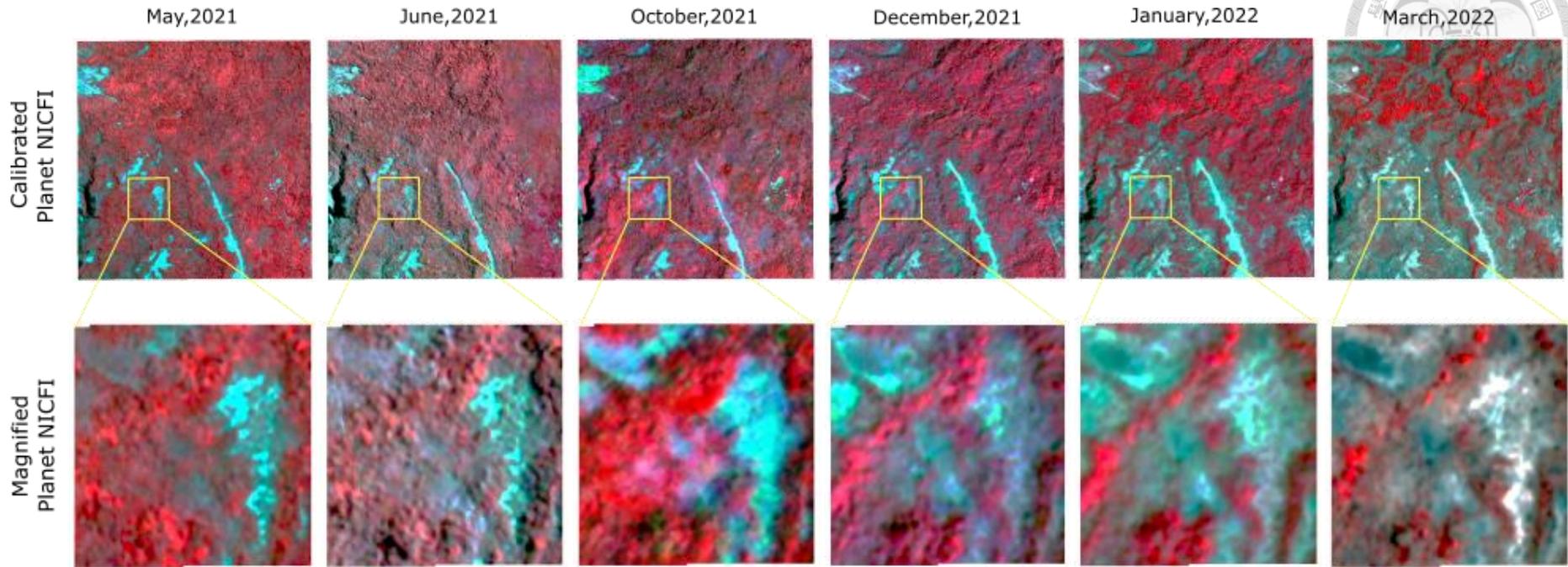


圖 23 校正後 Planet NICFI 精細尺度季節差異

此處選取研究區部分矩形區域進行展示。第二排為第一排中黃框區域的放大。使用色彩合成順序為 RGB=NIR-red-green。為了方便展示，在 12 個月份的影像中選取了較具代表性的、季節前後變化較大的 6 個月份影像。



4.2.2 特定像元光譜曲線變化趨勢

特定像元點代表的地物的光譜變化可以在精細尺度上反映增強季節輻射變動的效果。因受到了輻射畸變及不同傳感器的特性影響，導致特定像元的光譜曲線有很大的差異，相對輻射校正的目的就是消除這些差異。地物的光譜曲線越相似，說明地物的反射特性越接近，地物光譜曲線的變化在一定程度上可以說明相對輻射校正的效果。本文分別從經過 WorldView 影像分類得出的常綠林區域及落葉林區域選取一個像元點，對該點位的原始待校正 Planet NICFI、參考影像 Landsat 和經過 IR-MAD 法校正（經過前文比較，在三種方法中表現最穩定）後的影像進行光譜曲線變化分析。從圖 24 可以看出，經輻射校正後的影像，其典型地物光譜曲線向參考影像拉近，說明校正具有可見效果。常綠林區域全年植被生長變化不大，校正之後變化幅度稍有增加；落葉區域變化幅度範圍有明顯增加，尤其是在乾燥季節，紅光和近紅外的曲線幅度變緩。其中近紅外波段在校正之前就是差異最大的，校正之後乾濕季之間差異進一步擴大。推測可能因為在近紅外波段光譜響應函數差異大於其他三個可見光波段的差異（圖 5）。

綜上可知，校正後的結果主要改善了乾燥季節落葉林的地表反射率，從而使整體光譜季節變動得以增強。結合上一小節的結果，相對輻射歸一對改善小衛星資料質量具有可行性，它可以很好結合兩個傳感器之間的優勢，提供一種更為經濟、空間解析度更高的監測熱帶乾燥林植被的方法。

總結上述實驗成果，從植被指數及圖像結果可看出，該熱帶乾燥林研究區域具有很高的植被豐富度及很強的季節降水差異帶來的物候變化，因此給運用衛星影像監測帶來較大挑戰，一方面需要注意雲層的干擾，另一方面因植被豐富度高，若影像空間解析度較低則可能對像元進行混淆，難以區分出不同植被的差異。而以 Landsat 代表的傳統衛星具有以上兩種弊端：濕潤季節影像容易受到雲層干擾，空間解析度較低影響辨別出細部植被變化。以 Planet 代表的立方衛星等商業小衛星則可解決以上弊端：具有空間解析度上的優勢，因傳感器數

量眾多可以拼湊出不受雲層干擾的影像。它的問題在於輻射精度不高，但經過資料校正後它的輻射資料質量可以得到改善，能夠更精確展現乾季植被的光譜變化，在細部尺度的植被監測上展現出應用潛力。除此以外，Planet NICFI 還存在一種優勢是完全免費，具有很強經濟性。

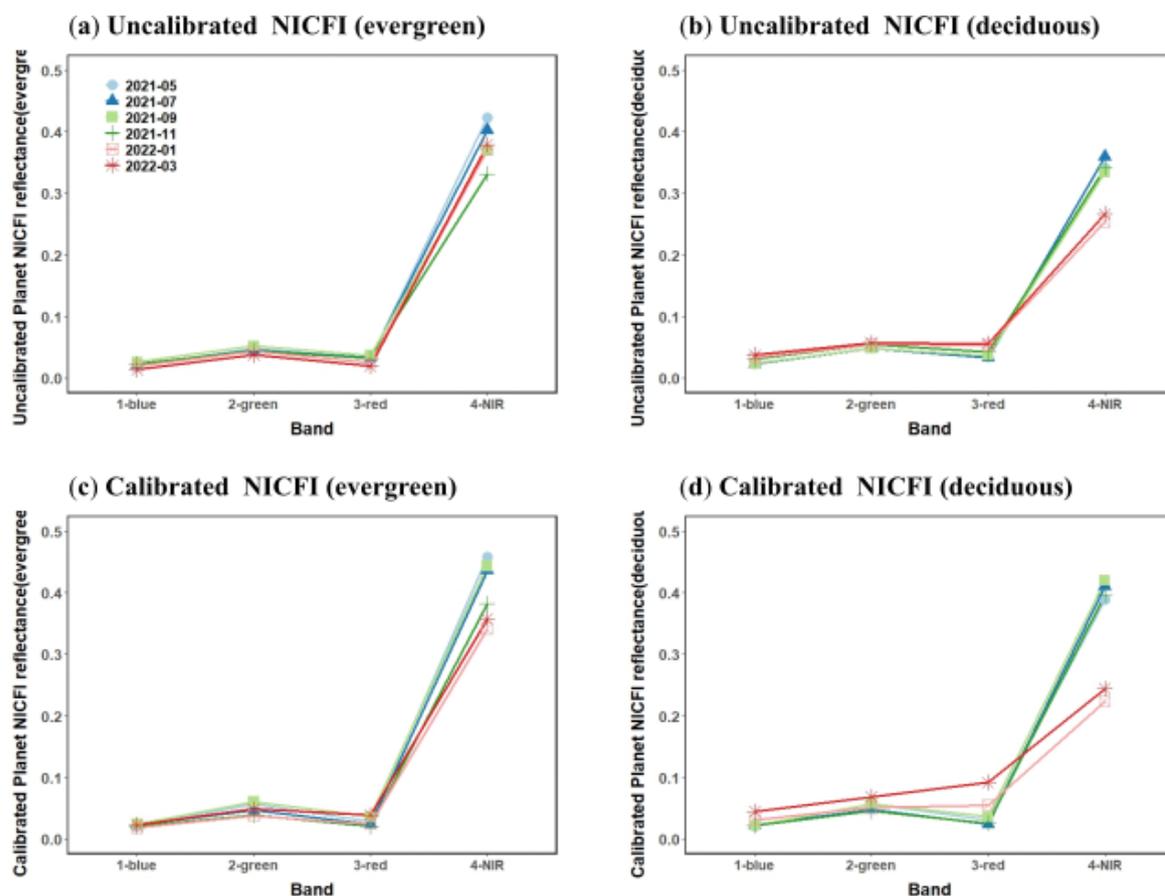


圖 24 特定像元點校正前後的光譜變化



第五章 結論與討論

Planet 的 Planetscope 衛星群為熱帶植被觀測帶來了前所未有的潛力，能夠以 4.77m 解析度在可見光及近紅外捕獲濕潤季節無雲影像。然而目前由許多因素限制了直接使用這部分資料進行高精度的地表監測。目前階段的 Planetscope 產品，雖然尚未有全面的輻射質量的內容公開，但已有多個研究證實小衛星的輻射不確定性高於嚴格校準的傳統式推掃傳感器（pushbroom sensor），例如具有 3% 反射率誤差規範的 Landsat 8 OLI 傳感器。

本文在此處首先進行的關鍵工作是對比了 Planet NICFI 資料與 Landsat 8/9 OLI 之間的輻射差異，證實 Planet NICFI 受到傳感器性能本身及小衛星本身資料合成方法（多個傳感器資料進行組合）的影響，與 Landsat 8/9 OLI 之間的一致性很差，並且這種差異在不同波段與不同時間均不穩定。實際上，即使採用強力的資料校正技術，例如本文使用的相對輻射校正方法，只能一定程度增加其與目前高質量資料間的相似性，並不能保證絕對的精度。儘管小衛星技術的出現是為了革新衛星觀測模式，但現階段難以說達到了可以直接應用的標準。但該技術畢竟尚未發展成熟，還在進行不斷更新迭代，例如 Planet 近期開始發佈 pre-launch calibrated at-sensor radiance product，該產品打算利用多傳感器通過對偽不變參考目標的觀測實現更嚴格的交叉校準，因此未來小衛星的資料質量還存在很多改善空間。

本文進行的第二項關鍵工作是使用相對輻射校正的方法以 Landsat 8/9 OLI 為參照對 Planet NICFI 輻射資料進行校正。鑒於尚未有研究表明 Planetscope 或者 Planet NICFI 資料適宜的相對輻射校正方法，本文選用了長期以來研究得到研究廣泛應用、被證明有效並且操作簡單的三種方法。在本研究的研究區中，三種方法顯示出了穩定性的差異。實驗過程顯示出，基於分佈原理的直方圖匹配法儘管從操作來說最簡單快捷，但因為其原理是對目標影像和參考影像建立完全映射，因此強烈依賴於參考影像的質量。鑒於傳統衛星 Landsat 的參考影像在熱帶濕潤季節受到雲霧干擾明顯，直方圖匹配法難以取得理想效果。而基於線性原理的 MAD 法和 IR-MAD 法更普遍可用，因為他們自動地揀選出了變化

最小的點，受雲霧干擾的部分被有效排除。其中 IR-MAD 法即使在影像受到干擾最大的月份也能夠正常運作。因此就本文的資料狀況來說 IR-MAD 法的處理結果最穩定。

從最終效果來看，相對輻射校正可以有效地改善 Planet NICFI 對乾燥季節落葉植被變化的不敏感，能夠讓像元區分度增強、光譜曲線和參考影像之間一致性變強。校正後整體區域光譜季節變動得以增強，全年植被指數變化乾季與濕季差異更明顯，進而更能反映植被因季節降水差異引起的生長狀況變化。這證實了相對輻射校正對於改善小衛星資料質量以增強其應用能力的可行性。一方面其不需要其他實測資料，避免增加更多經濟成本，另一方面其操作相對便捷、處理速度快，因此現階段在難以直接應用小衛星資料的情況下對其進行相對輻射校正的方法改善資料質量是一種高性價比的方法。校正後的資料相比 Landsat 具有兩方面優勢：能夠以 4.77m 的較高解析度展現熱帶植被生長變化，並且在濕潤季節也能保證完整的研究區無雲影像。相較於其他高解析度商業影像，該小衛星資料是能獲取的免費影像中空間解析度最高的。

最後，本文所開展工作的另一個關鍵意義是嘗試將小衛星的資料應用在熱帶乾燥林植被監測中。熱帶乾燥林在熱帶碳循環中具有關鍵位置，長期以來熱帶乾燥林的研究開展並不順利。儘管近年研究對於熱帶乾燥林的關注有所提升，有更多研究指出了熱帶乾燥林的重要意義，表明熱帶乾燥林在熱帶碳循環中具有關鍵位置，並且因其生態結構具有脆弱性，是最容易受到氣候變遷影響的生態系統之一，但目前熱帶乾燥林的系統性研究還十分缺乏，包括對其森林結構、物候變化、生物多樣性/棲息地、植物性狀和氣候干擾等方面還缺少很多了解。部分原因在於其難以進行大規模遙測監測。一方面地處熱帶，熱帶稀樹草原氣候的濕潤季節降水豐富程度和雨林類似，因此會干擾到傳統衛星的影像質量，導致難以對全年植被生長進行光學影像監測。另一方面因其植被相較於熱帶雨林等常綠森林，異質性更強，大多數傳統衛星的空間解析度都太粗糙，無法捕捉到景觀多樣性，導致許多像素會成為不同植被類型的混合體。特別是常用衛星如 MODIS 或 Landsat 的像素比木質樹冠的結構更粗糙，導致木質和草本結構在影像上難以進行區分。小衛星的出現提供了克服上述雲層覆蓋及空間解析度問題的機會。在免費的 Planet NICFI 產品推出之後，一些研究將其應用

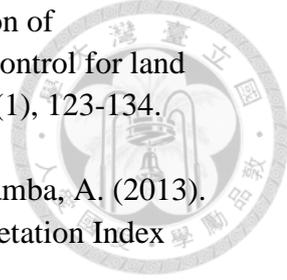
在熱帶監測的各種領域，包括調查樹木死亡狀況、繪製森林覆蓋圖及調查森林退化狀況、農業監測（放牧草坪監測）等，而目前鮮有研究以熱帶乾燥林地區作為研究對象。就本文所知，本文可能是第一個嘗試將 Planet NICFI 資料應用於監測熱帶乾燥林植被生長的研究，本文的結果展示了小衛星資料在長期難以推進的熱帶乾燥林監測中可能具有的應用潛力。未來，高光譜的小衛星可以提供更多波段的觀測資料，包括 yellow、red edge 在內，從而提供有關植被的更多信息，可以應用在熱帶乾燥林物候監測、植被分類、樹冠尺度監測等多種細分領域。

本文選用的免費資料，與需付費的原始 Planetscope 影像不同，原始 Planetscope 可以達到以日為單位的時間解析度，而 NICFI 項目開放的資料為以月為單位進行合成的影像，使用者不能得知該合成影像具體的拍攝時間及合成資料的來源。因此相比原始資料免費資料會存在精度缺失，不能完全展現出小衛星的真實狀況。未來研究可以就小衛星的真實資料與傳統衛星進行更多對比與校正，並且若可收集到質量更好的參考影像，則可取得更為精確的校正結果。同時，本研究為避免增加方法複雜性帶來的不確定性，選用的影像相對輻射校正方法較為簡單，在方法細節上為了簡化操作也都是選用最基礎的處理方法。例如在進行 IR-MAD 法確定偽不變特征點時除了人工依據卡方分佈設定閾值以外，許多學者的研究表明，使用算法自動選取的精度更高。例如使用最大期望算法（EM）、K-means 聚類方法，能夠檢視資料特征自動將其劃分為兩個類別。另外，當前研究在 MAD 和 IR-MAD 法的原理上又有許多升級版本的算法，一些方法結合了機器學習原理。相對輻射校正方法需依據研究資料本身的特性進行選取，更詳細的方法比對還有待未來研究的進一步深入，同時未來研究亦可引入更多實測資料說明在進行校正後小衛星可以達到的精度狀況。

參考文獻



- 曾聖凱,福衛二號絕對輻射校正及全球動態量程之建立,碩士論文,國立中央大學
太空科學研究所,2017.
- Addo-Bediako, A., Chown, S. L., & Gaston, K. J. (2000). Thermal tolerance, climatic variability and latitude. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 267(1445), 739-745. doi:DOI 10.1098/rspb.2000.1065
- Allen, K., Dupuy, J. M., Gei, M. G., Hulshof, C., Medvigy, D., Pizano, C., . . . Powers, J. S. (2017). Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? *Environmental Research Letters*, 12(2). ARTN 023001. doi:10.1088/1748-9326/aa5968
- Bai, Y., Tang, P., & Hu, C. M. (2018). kCCA Transformation-Based Radiometric Normalization of Multi-Temporal Satellite Images. *Remote Sensing*, 10(3). ARTN 432.doi:10.3390/rs10030432
- Canty, M. J., & Nielsen, A. A. (2006). Visualization and unsupervised classification of changes in multispectral satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(18), 3961-3975. doi:10.1080/01431160500222608
- Canty, M. J., & Nielsen, A. A. (2008). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1025-1036. doi:10.1016/j.rse.2007.07.013
- Canty, M. J., Nielsen, A. A., & Schmidt, M. (2004). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4), 441-451. doi:10.1016/j.rse.2003.10.024
- Curnick, D. J., Davies, A. J., Duncan, C., Freeman, R., Jacoby, D. M. P., Shelley, H. T. E., . . . Pettorelli, N. (2021). SmallSats: a new technological frontier in ecology and conservation? *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. doi:10.1002/rse2.239
- Dash, J., & Ogutu, B. O. (2016). Recent advances in space-borne optical remote sensing systems for monitoring global terrestrial ecosystems. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 40(2), 322-351. doi:10.1177/0309133316639403
- de Carvalh, O. A., Guimaraes, R. F., Silva, N. C., Gillespie, A. R., Gomes, R. A. T., Silva, C. R., & de Carvalho, A. P. F. (2013). Radiometric Normalization of Temporal Images Combining Automatic Detection of Pseudo-Invariant Features from the Distance and Similarity Spectral Measures, Density Scatterplot Analysis, and Robust Regression. *Remote Sensing*, 5(6), 2763-2794. <https://doi.org/10.3390/rs5062763>
- Denaro, L. G., & Lin, C. H. (2020). Hybrid Canonical Correlation Analysis and Regression for Radiometric Normalization of Cross-Sensor Satellite Imagery. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 976-986. doi:10.1109/Jstars.2020.2971857

- 
- Du, Y., Teillet, P. M., & Cihlar, J. (2002). Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, 82(1), 123-134. doi:Pii S0034-4257(02)00029-9
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J., & Anyamba, A. (2013). Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799-4818. doi:10.3390/rs5104799
- Elvidge, C. D., Yuan, D., Weerackoon, R. D., & Lunetta, R. S. (1995). Relative Radiometric Normalization of Landsat Multispectral Scanner (Mss) Data Using an Automatic Scattergram-Controlled Regression. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(10), 1255-1260. <Go to ISI>://WOS:A1995RX96200008
- Frazier, A. E., & Hemingway, B. L. (2021). A Technical Review of Planet Smallsat Data: Practical Considerations for Processing and Using PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*, 13(19). ARTN 3930. doi:10.3390/rs13193930
- Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E., & Goetz, S. J. (1991). Radiometric Rectification - toward a Common Radiometric Response among Multidate, Multisensor Images. *Remote Sensing of Environment*, 35(1), 11-27. doi:Doi 10.1016/0034-4257(91)90062-B
- Henebry, G. M., & Su, H. P. (1993). Using Landscape Trajectories to Assess the Effects of Radiometric Rectification. *International Journal of Remote Sensing*, 14(12), 2417-2423. doi:Doi 10.1080/01431169308954046
- Hill, R. (2005). Day length seasonality and the thermal environment. In D. K. Brockman & C. P. van Schaik (Eds.), *Seasonality in primates: Studies of living and extinct human and non-human primates* (pp. 197–214). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hong, G., & Zhang, Y. (2008). A comparative study on radiometric normalization using high resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(2), 425-438. doi:10.1080/01431160601086019
- Houborg, R., Fisher, J. B., & Skidmore, A. K. (2015). Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 1-6. doi:10.1016/j.jag.2015.06.001
- Houborg, R., & McCabe, M. F. (2016). High-Resolution NDVI from Planet's Constellation of Earth Observing Nano-Satellites: A New Data Source for Precision Agriculture. *Remote Sensing*, 8(9). ARTN 768. doi:10.3390/rs8090768
- Houborg, R., & McCabe, M. F. (2018). A Cubesat enabled Spatio-Temporal Enhancement Method (CESTEM) utilizing Planet, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 209, 211-226. doi:10.1016/j.rse.2018.02.067
- Janzen, D. H. (1988). Management of Habitat Fragments in a Tropical Dry Forest - Growth. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75(1), 105-116. doi:Doi 10.2307/2399468

- Kayyali, M. S. (2002). *Digital image processing*. Lima: Facultad de Ingenieria y Arquitectura de la Universidad de San Martin de Porres.
- Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., and Richardson, W. (1969) 'Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition.' *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 97-131
- Lanza, B. (1976). Phenology and Seasonality Modeling - Lieth,H. *Scientia*, 111(5-8), 518-520.
- Latte, N., & Lejeune, P. (2020). PlanetScope Radiometric Normalization and Sentinel-2 Super-Resolution (2.5 m): A Straightforward Spectral-Spatial Fusion of Multi-Satellite Multi-Sensor Images Using Residual Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, 12(15). <https://doi.org/ARTN 2366>
- Li, J., & Roy, D. P. (2017). A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sensing*, 9(9). ARTN 902. doi:10.3390/rs9090902
- Mandl, I., Holderied, M., & Schwitzer, C. (2018). The Effects of Climate Seasonality on Behavior and Sleeping Site Choice in Sahamalaza Sportive Lemurs, *Lepilemur sahamalaza*. *International Journal of Primatology*, 39(6), 1039-1067. doi:10.1007/s10764-018-0059-1
- Markham, B., Storey, J., & Morfitt, R. (2015). Landsat-8 Sensor Characterization and Calibration. *Remote Sensing*, 7(3), 2279-2282. doi:10.3390/rs70302279
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., . . . Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491-505. doi:10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x
- Morfitt, R., Barsi, J., Levy, R., Markham, B., Micijevic, E., Ong, L., . . . Vanderwerff, K. (2015). Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Radiometric Performance On-Orbit. *Remote Sensing*, 7(2), 2208-2237. doi:10.3390/rs70202208
- Nielsen, A. A., Conradsen, K., & Simpson, J. J. (1998). Multivariate alteration detection (MAD) and MAF postprocessing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. *Remote Sensing of Environment*, 64(1), 1-19. doi:Doi 10.1016/S0034-4257(97)00162-4
- Ocon, J. P., Ibanez, T., Franklin, J., Pau, S., Keppel, G., Rivas-Torres, G., . . . Gillespie, T. W. (2021). Global tropical dry forest extent and cover: A comparative study of bioclimatic definitions using two climatic data sets. *Plos One*, 16(5). ARTN e0252063. doi:10.1371/journal.pone.0252063
- Rahman, M. M., Hay, G. J., Couloigner, I., Hemachandran, B., & Bailin, J. (2015). A comparison of four relative radiometric normalization (RRN) techniques for mosaicing H-res multi-temporal thermal infrared (TIR) flight-lines of a complex urban scene. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 106, 82-94. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.05.002
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D.W. (1974) 'Monitoring

- Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.' *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, vol. 1, p. 48-62.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., . . . Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, *145*, 154-172. doi:10.1016/j.rse.2014.02.001
- Sadeghi, V., Ebadi, H., & Ahmadi, F. F. (2013). A new model for automatic normalization of multitemporal satellite images using Artificial Neural Network and mathematical methods. *Applied Mathematical Modelling*, *37*(9), 6437-6445. doi:10.1016/j.apm.2013.01.006
- Schott, J. R., Salvaggio, C., & Volchok, W. J. (1988). Radiometric Scene Normalization Using Pseudoinvariant Features. *Remote Sensing of Environment*, *26*(1), 1-&. doi:Doi 10.1016/0034-4257(88)90116-2
- Stan, K., & Sanchez-Azofeifa, A. (2019). Tropical Dry Forest Diversity, Climatic Response, and Resilience in a Changing Climate. *Forests*, *10*(5). ARTN 443. doi:10.3390/f10050443
- Stevens, G. C. (1989). The Latitudinal Gradient in Geographical Range - How So Many Species Coexist in the Tropics. *American Naturalist*, *133*(2), 240-256. doi:Doi 10.1086/284913
- Syariz, M. A., Lin, B. Y., Denaro, L. G., Jaelani, L. M., Nguyen, M. V., & Lin, C. H. (2019). Spectral-consistent relative radiometric normalization for multitemporal Landsat 8 imagery. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *147*, 56-64. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.007
- Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, *8*(2), 127-150. doi:Doi 10.1016/0034-4257(79)90013-0
- Van Schaik, C. P., & Brockman, D. K. (2005). Seasonality in primate ecology, reproduction, and life history: An overview. In D. K. Brockman & C. P. van Schaik (Eds.), *Seasonality in primates* (pp. 3–20). Cambridge: Cambridge University Press.
- Yang, X. J., & Lo, C. P. (2000). Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *66*(8), 967-980.
- Ye, W. T., van Dijk, A. I. J. M., Huete, A., & Yebra, M. (2021). Global trends in vegetation seasonality in the GIMMS NDVI3g and their robustness. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *94*. ARTN 102238. doi:10.1016/j.jag.2020.102238
- Yuan, D., & Elvidge, C. D. (1996). Comparison of relative radiometric normalization techniques. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *51*(3), 117-126. doi:Doi 10.1016/0924-2716(96)00018-4