

基于 Sentinel-2 卫星数据的水稻叶片叶绿素含量反演研究

杨旭, 卢学鹤, 石晶明, 李晶, 居为民*

南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023

摘要 叶绿素含量是评价农作物健康状况、生产能力和环境胁迫的重要指标, 实时、快速、准确获取农作物叶片叶绿素含量对监测农作物生长状况具有重要意义。遥感是获取区域和全球农作物叶片叶绿素含量的有效途径, 但已有的作物叶片叶绿素含量遥感反演研究未充分考虑下垫面背景的干扰, 影响了反演精度。为此, 以 Sentinel-2 遥感卫星影像为数据源, 结合典型水稻田的观测数据, 使用 PROSAIL 辐射传输模型建立了水稻田叶片叶绿素含量反演查找表, 评估了利用绿光波段和不同红边波段构建的叶绿素指数(CI)和两个不同红边波段构建的 Zarco and Miller 指数(ZM)反演叶片叶绿素含量的差异, 引入 G(Greenness index)指数减小背景干扰对叶片叶绿素含量反演的影响。研究表明: (1)基于不同波段构建的光谱指数反演的叶片叶绿素含量精度存在差异, 其中 CI_{740} ($R^2=0.79$, $RMSE=9.02 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) 反演精度最高, 其次为 ZM ($R^2=0.71$, $RMSE=10.53 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)、 CI_{705} ($R^2=0.69$, $RMSE=9.17 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) 和 CI_{783} ($R^2=0.67$, $RMSE=10.84 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); (2)水稻叶片叶绿素含量反演结果受背景影响明显, 特别在水稻生长早期, 由于背景干扰较大, 反演结果明显偏低[平均相对误差(MRE)为 $-18.87\% \sim -31.94\%$]; (3)引入 G 指数构建的 CI/G 和 ZM/G 可以有效消除背景的影响, 提高水稻叶片叶绿素含量反演精度(MRE 为 $8.11\% \sim 18.11\%$)。结果对提高水稻不同叶面积指数水平下的叶片叶绿素含量遥感反演精度具有重要参考意义。

关键词 叶片叶绿素含量; 遥感反演; Sentinel-2; PROSAIL

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0866-07

引言

叶绿素是植物吸收太阳辐射进行光合作用的重要色素, 叶片叶绿素含量与叶片光合能力紧密联系, 显著影响叶片的光合速率和植被生产力, 是植被生长状况监测的重要参数^[1]。实时、快速、准确获取植物叶片叶绿素含量有助于精准监测植被生长状况, 科学减缓干旱胁迫等对生态系统功能的影响。水稻是我国主要粮食作物之一, 实现水稻叶绿素含量的精准估测对其长势监测和田间精准管理具有重要意义。

叶片叶绿素含量可以在实验室中通过化学溶剂萃取加以测量, 该方法的精度较高, 但是费时费力, 仅能获取有限站点的观测数据^[2]。随着技术的发展, 遥感成为获得区域尺度叶片叶绿素含量的有效手段。现有的叶片叶绿素遥感方法可以分为基于辐射传输模型的反演和基于经验/半经验的统计模型估算两大类。卫星观测的冠层反射率受冠层结构、单叶片反射率(与叶片叶绿素含量紧密联系)、背景和观测几何等

多因子的影响, 而经验/半经验的统计模型通常针对特定植被类型和特定传感器建立, 通用性较差^[3-4]。辐射传输模型定量描述植被冠层或叶片反射光谱对叶片叶绿素等生理生化参数的响应^[5], 成为大尺度叶片叶绿素遥感反演的重要工具。Jay 等^[6]在 2017 年使用 PROSAIL 模型成功反演了甜菜的叶片叶绿素含量。Croft 等^[7]在 2020 年采用 4 尺度几何光学模型和 SAIL 模型反演了全球植被叶片叶绿素含量。

叶片叶绿素含量遥感反演的理论基础是叶片光谱对叶绿素含量变化的响应及其在不同波段的差异。卫星观测的冠层反射率不仅仅与叶片反射率有关, 而且受到其他因子(冠层结构和背景等)的影响, 在利用卫星遥感数据反演叶片叶绿素含量时面临的一大挑战是如何消除冠层结构的影响。目前解决这一问题的途径主要三类, 第一类是 Zhang 等^[8]提出的两步反演方法。该方法首先对观测的冠层反射率进行分解得到阳光直接辐射阳叶的光谱, 再利用叶片辐射传输模型(如 PROSPECT)反演叶片的叶绿素含量。这类方法需要叶面积指数作为先验输入。第二类方法是通过模拟寻找对冠层结构

收稿日期: 2021-02-08, 修订日期: 2021-04-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600202), 国家自然科学基金项目(42077418, 41871334)资助

作者简介: 杨旭, 1996 年生, 南京大学国际地球系统科学研究所硕士研究生 e-mail: yuninesun@163.com

* 通讯作者 e-mail: juweimin@nju.edu.cn

不敏感而对叶绿素含量敏感的波段或光谱指数, 直接由观测的冠层反射率反演叶片叶绿素含量^[9], 这类方法的优点是不需要叶面积指数作为先验输入, 但难以充分消除冠层结构对反演结果的影响。第三类方法是利用耦合的冠层和叶片辐射传输模型(如 PROSAIL)构建不同叶面积指数条件下由冠层光谱或光谱指数反演叶片叶绿素含量的查找表, 反演叶片叶绿素含量^[10]。这种方法易于实现, 且能顾及冠层结构对叶绿素反演的影响, 但也需要叶面积指数作为输入。

在典型的叶片反射光谱中, 红边是光谱范围 680~800 nm 的反射率增加最快的区域, 对叶片叶绿素含量变化非常敏感。叶片叶绿素含量通过对叶片光谱的作用而影响红边波段的冠层反射特性^[11], 因此红边波段反射率常被用于植被叶片叶绿素含量的估算或反演。2014 年 Croft 等^[11]总结了常用于叶绿素遥感估算的光谱指数。它们一般由两个红边波段或由一个红边波段和一个可见光波段组合而成。这些光谱指数已成功用于不同地区不同类型植被叶片叶绿素含量的反演或估算^[12-13]。随着技术的进步, 不少卫星(如 MERIS、Sentinel-2 和高分六号)可以提供多个红边波段的观测数据。但是不同传感器在红边波段的中心波长及谱宽等方面存在差异; 研究不同红边波段数据反演叶片叶绿素含量的差异对利用遥感监测该参数有重要参考意义。此外, 卫星观测的冠层顶反射率包括了冠层和背景的背景反射率, 背景反射率的变化对叶片叶绿素含量遥感反演具有明显影响。特别在冠层覆盖度较低时, 背景的影响更加显著^[14]。因此, 在卫星数据反演叶片叶绿素含量时如何消除背景影响仍有待研究。

本研究以中国南方典型水稻田为研究对象, 采用具有 3 个红边波段的 Sentinel-2 卫星数据, 以冠层辐射传输模型为工具, 模拟建立不同叶面积指数条件下由冠层光谱计算的光谱指数与叶片叶绿素含量之间关系的查找表, 反演水稻不同生长阶段叶片叶绿素含量; 比较采用不同红边波段光谱指数反演叶片叶绿素的精度差异; 评价背景反射率变化对水稻不同生长阶段叶片叶绿素含量反演精度的影响; 构建顾及背景变化的光谱指数, 提高水稻叶片叶绿素含量的反演精度。

1 实验部分

1.1 研究区概况

以南京大学在江苏省句容市后白农场建立的句容生态实验站为试验区, 该实验站位于江苏省南京市东南方向约 60 km 处(31°48'24.59"N, 119°13'2.15"E), 处于亚热带半湿润季风气候, 年均降水量和年均蒸发量为 1 099.1 和 1 425.5 mm, 年平均太阳辐射和年平均日照时间分别为 4 860.6 和 1 999.3 h。

1.2 数据采集与处理

1.2.1 Sentinel-2 遥感影像

欧洲委员会和欧空总署局(ESA)分别于 2016 年 6 月 23 日和 2017 年 3 月 7 日发射了 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 卫星。双星在轨道运行的重返周期为 5 d。Sentinel-2(包括两颗卫星)配备了新的高分辨率多光谱成像仪(MSI)。MSI 具有从可见光、近红外到短波红外 13 个光谱波段, 并具有 10, 20

和 60 m 的三种不同空间分辨率。Sentinel-2 卫星有 3 个红边光谱波段, 为动态监测植被叶绿素提供了更多的波段选择。Sentinel-2 影像可通过 <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> 下载获得 L1C 级产品, 本研究通过使用 ESA 提供的 SNAP 软件和 Sen2cor 模型对其进行大气校正、重采样、裁剪操作获得所需的试验区遥感反射率影像数据。选取的 2017 年和 2018 年两年水稻生长季 Sentinel-2 数据的信息如表 1 所示。

表 1 使用的遥感影像数据及观测的叶片叶绿素含量(Cab)和叶面积指数(LAI)数据

Table 1 Remote sensing data used and concurrent measured leaf chlorophyll content (Cab) and leaf area index (LAI)

实测日期	遥感影像日期	实测 Cab/($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	实测 LAI
17/07/16	17/07/18	48.89	1.68
17/07/30	17/07/28	57.57	3.31
17/08/07	17/08/07	63.14	5.23
17/08/28	17/08/27	63.66	5.37
17/10/08	17/10/09	40.95	4.85
17/10/21	17/10/24	35.64	4.47
17/10/30	17/10/31	27.3	4.44
17/11/14	17/11/15	9.55	4.12
18/07/19	18/07/18	42.18	1.96
18/08/01	18/08/02	43.78	2.38
18/08/10	18/08/10	52.11	4.18
18/09/04	18/09/04	63.44	4.87

1.2.2 叶片叶绿素含量测量

于 2017 年和 2018 年的水稻生长季节(7 月至 10 月)先后 12 次前往句容实验站观测叶面积指数(LAI), 并采集水稻叶片样品用于叶片叶绿素含量(Cab)测定。在 10 m×10 m 的样方内每次采集 3 株水稻, 每株水稻选取上层和中层叶片各一片, 以两片叶片叶绿素含量均值代表该株水稻的叶片叶绿素含量。在测量中, 使用 3/16 inch 打孔器, 均匀剪取 6~8 个小圆片, 浸泡于 10 mL 丙酮-乙醇混合液(95%乙醇, 纯丙酮等体积混合), 然后将样品静置, 每隔 4 h 摇晃一次, 当浸泡的叶片完全变白时, 使用 Shimadzu UV-1700 分光光度计在 663.8, 646.8 和 480 nm 下测定提取液吸光度, 计算叶片叶绿素含量。采用 LAI-2200 观测 LAI。

1.3 反演模型与方法

采用 PROSAIL 模型进行正向模拟实现叶片叶绿素含量的反演。PROSAIL 耦合了 PROSPECT-5^[15] 和 SAIL^[16] 辐射传输模型。其中, PROSPECT-5 能够基于光线入射角、叶片折射指数、平板透射系数、叶片结构、叶绿素含量、叶片水含量和叶片干物质含量等参数模拟叶片的反射率和透射率。SAIL 模型是一个冠层二向反射率模型, 它假设植物冠层是由方位随机分布的水平、均一旦无限扩展的各向同性叶片组成的混合体, 并且叶子的反射、散射均具有漫反射性质。当给定叶片的反射率和透射率、冠层结构(包括 LAI、热点参数、漫反射系数)和观测几何等参数时, SAIL 可以模拟任何

观测几何条件下的冠层反射率和透射率。PROSAIL 与其他复杂的三维辐射传输模型相比,该模型的输入参数更少、计算量更小^[16]。

利用 PROSAIL 模型构建查找表反演叶片叶绿素含量。在建立查找表时,根据已有研究^[6, 9, 14]确定参数的变化范围和步长(表 2)。由于叶片类胡萝卜素和水含量主要影响蓝光和短波红外波段的反射率,在建立查找表时分别将它们设置为 $8 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 0.02 cm 的固定值。在反演时,根据冠层遥感反射率数据计算的光谱指数,结合观测几何信息和观测的 LAI,从查找表检索叶片叶绿素含量。

表 2 正向模拟时 PROSAIL 模型参数设置
Table 2 Model parameter settings in the forward simulations of PROSAIL

参数	最小值	最大值	步长
叶子结构 N	1	1.5	0.1
叶片叶绿素含量 Cab/ $(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0	80	0.5
叶面积指数 LAI	0	7	0.5
类胡萝卜素含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	8	8	/
干物质含量 $c_M/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.001	0.005	0.002
水含量 c_W/cm	0.02	0.02	/
土壤因子 P_{soil}	0	1	0.5
平均叶倾角 ALA/ $(^\circ)$	30	30	/
太阳天顶角/ $(^\circ)$	20	50	5
观测天顶角/ $(^\circ)$	8	8	/
观测相对方位角/ $(^\circ)$	120	150	5

1.4 光谱指数选取

有研究指出基于绿光和红边波段反射率的叶绿素指数(chlorophyll index, CI)对叶绿素含量变化敏感^[13-14]。为比较利用不同红边波段反射率计算的 CI 反演水稻叶片叶绿素含量的差异,分别使用 Sentinel-2 卫星的绿光波段和 3 个红边波段反射率计算 CI (CI_{705} , CI_{740} 和 CI_{783}) (表 3) 进行叶片叶绿素含量的反演,并与 2 个红边波段光谱指数 ZM^[7, 11-12] 的反演结果进行对比分析。

表 3 本研究使用的光谱指数

Table 3 The spectral indices used in this study

叶绿素指数	缩写	公式	Sentinel-2 波段
Red-edge chlorophyll index	CI_{705}	$\rho_{705}/\rho_{\text{green}} - 1$	band 3, band 5
	CI_{740}	$\rho_{740}/\rho_{\text{green}} - 1$	band 3, band 6
	CI_{783}	$\rho_{783}/\rho_{\text{green}} - 1$	band 3, band 7
Zarco and Miller	ZM	ρ_{740}/ρ_{705}	band 5, band 6

1.5 反演精度评价方法

选用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)对反演结果进行评价,其具体计算公式如式(1)~式(3)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{Cab}_i - \overline{Cab})^2}{\sum_{i=1}^n (Cab_i - \overline{Cab})^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{Cab}_i - \overline{Cab})^2}{n}} \quad (2)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\widehat{Cab}_i - Cab_i}{Cab_i} \times 100\% \right] \quad (3)$$

其中, \widehat{Cab}_i 是水稻叶片叶绿素含量反演值, \overline{Cab} 为观测的水稻叶片叶绿素含量的均值, Cab_i 为各叶片水稻叶绿素含量观测值, n 为样本数($n=12$)。

1.6 背景影响的消除

PROSAIL 模型采用参数 P_{soil} 表示背景的变化, P_{soil} 等于 0 时,代表湿润土壤,背景反射率低; Q_{soil} 等于 1 时,代表干土壤,背景反射率高。 P_{soil} 变化导致的土壤背景反射率变化在不同波段存在差异。利用 PROSAIL 模型进行模拟分析,评价不同 LAI 条件下,背景反射率变化对叶片叶绿素含量反演的影响。参考文献[13]的方法,将绿度指数(greenness index, $G = \rho_{\text{green}}/\rho_{\text{red}}$),其中 ρ_{green} 和 ρ_{red} 分别为绿光和红光波段反射率^[17] 与 CI 和 ZM 结合订正背景变化对叶片叶绿素含量反演的影响,比较利用 CI 和 ZM 反演的叶片叶绿素含量精度与利用和反演的叶片叶绿素含量精度差异。

2 结果与讨论

2.1 叶绿素反演精度评价

Sentinel-2 卫星 3 个红边波段的中心波长为分别 705 nm (b_5), 740 nm (b_6) 和 783 nm (b_7)、绿光波段(b_3)的中心波长为 560 nm。利用 3 个红边波段结合绿光波段反射率计算的 CI_{705} , CI_{740} 和 CI_{783} 反演的叶片叶绿素含量与观测数据比较的 R^2 分别为 0.69, 0.79 和 0.67, RMSE 分别为 9.17, 9.02 和 $10.84 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ [图 1(a-d), 表 4]。基于 ZM 反演的叶片叶绿素含量精度与观测数据比较的 R^2 为 0.71 和 RMSE 为 $10.53 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ [图 1(d)]。Blackburn 等^[18] 研究指出 765 nm 处的反射率与类胡萝卜素含量有较强的相关性, Croft 在 2014 年的研究^[12] 中指出, 750~900 nm 的波段反射率对植被结构比较敏感。Sentinel-2 第 7 波段的中心波长为 783 nm, 范围为 769~797 nm。本研究在构建查找表时类胡萝卜素含量设为固定值;此外,尽管建立查找表时,模拟了不同叶面积指数条件下,叶片叶绿素含量与冠层光谱之间的映射关系,但是难以完全消除冠层结构对叶片叶绿素含量反演的影响,所以利用 CI_{783} 的反演精度最低。

2.2 背景对叶片叶绿素反演结果的影响

在水稻的生长早期($Cab < 50 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, $LAI < 3$), 利用 4 种光谱指数反演的叶片叶绿素含量都比观测明显偏低[图 1(a-d)]; 当 $LAI < 3$ 时, 利用 CI_{705} , CI_{740} , CI_{783} 和 ZM 反演的叶片叶绿素含量的平均相对误差分别为 -18.87%, -31.65%, -27.54% 和 -31.94%。当 $LAI > 3$ 时, 反演的叶片叶绿素含量与观测数据基本一致, 不存在明显偏低的现象(图 1), 利用 CI_{705} , CI_{740} , CI_{783} 和 ZM 反演的叶片叶绿素含量的平均相对误差分别为 6.41%, -1.73%, 8.75% 和 -4.50% (图 2)。

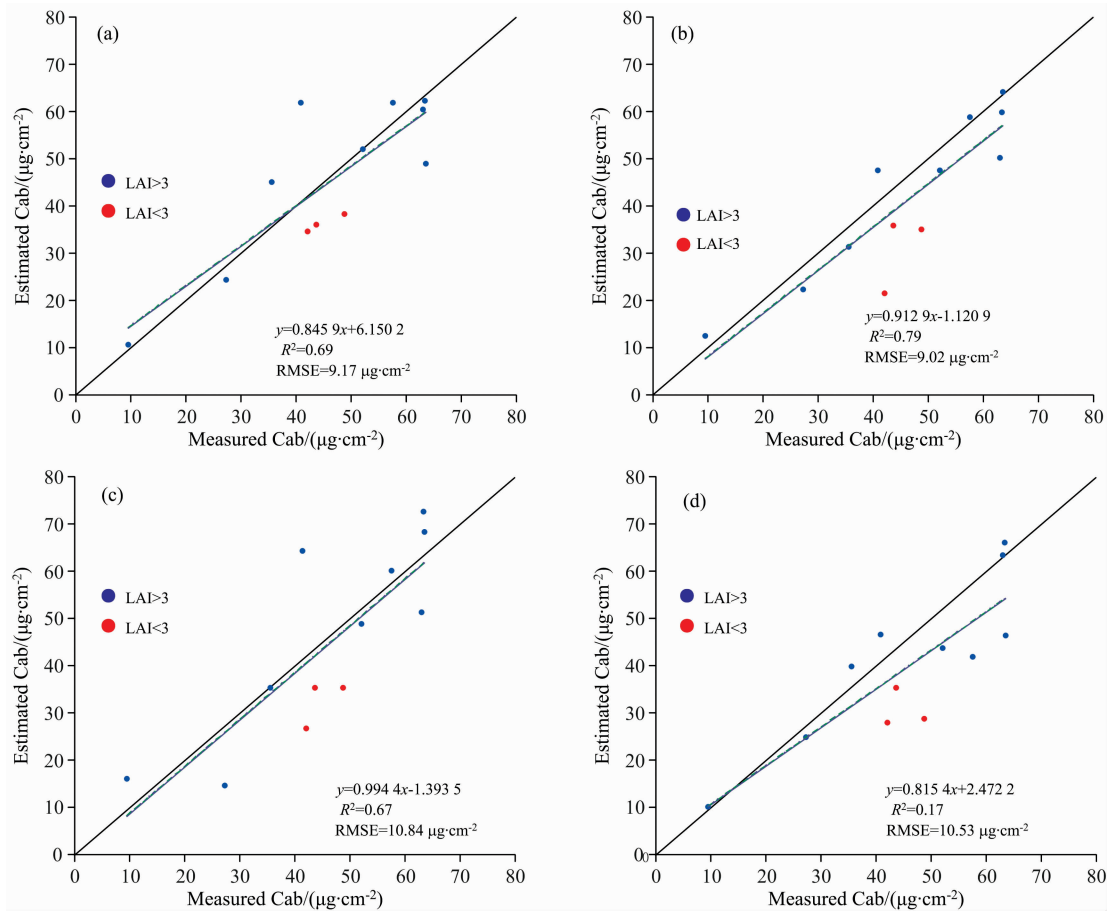


图 1 基于 CI_{705} (a), CI_{740} (b), CI_{783} (c) 和 ZM(d) 反演的叶片叶绿素含量与观测的比较

Fig. 1 Leaf chlorophyll content inverted using CI_{705} (a), CI_{740} (b), CI_{783} (c), and ZM (d) against measurements

表 4 基于四种光谱指数反演的叶片叶绿素含量与观测比较的统计结果

Table 4 Statistics of leaf chlorophyll content inverted using four different spectral indices against measurements

光谱指数	一元线性回归方程	R^2	RMSE/ ($\mu g \cdot cm^{-2}$)	MRE/ %
CI_{705}	$y=0.8459x+6.1502$	0.69	9.17	0.09
CI_{740}	$y=0.9129x-1.1209$	0.79	9.02	-9.21
CI_{783}	$y=0.9944x-1.3935$	0.67	10.84	-0.32
ZM	$y=0.8154x+2.4722$	0.17	10.53	-11.11

分析认为导致上述现象的原因是当 LAI 较低时，卫星观测的冠层反射率显著受到背景的影响。PROSAIL 模型用土壤因子 (P_{soil}) 参数描述植被背景土壤湿润程度和颗粒粗糙程度导致的背景反射率变化。以光谱指数 CI_{740} 为例，在 PROSAIL 模型中通过调整 P_{soil} 值改变土壤背景反射率，计算土壤背景 CI_{soil} 值，分析水稻田背景变化对叶片叶绿素反演的影响。从图 3(a) 中可以看出，当 LAI 为 1 时，根据冠层 CI_{740} 反演的叶片叶绿素含量受 CI_{soil} 影响明显。当 CI_{740} 大于 1.5，对于给定的冠层 CI_{740} ，反演的叶片叶绿素含量随着 CI_{soil} 增大而减小，高估背景的 CI 值会导致反演的叶片叶绿素含量偏低，反演的叶片叶绿素含量对背景变化的敏感性随着冠层

CI_{740} 的增大而上升。随着 LAI 的升高，背景反射率变化对反演的叶片叶绿素含量影响降低，当 LAI 等于 4 时，对于给定的冠层 CI_{740} ，不同土壤背景条件下反演的叶片叶绿素含量几乎相同 [图 3(b)]。在水稻生长早期，水稻田的背景为水面，水的 CI 值低于土壤的 CI 值，高估背景的 CI 是导致反演的水稻叶片叶绿素含量偏低的主要原因。PROSAIL 模型没有背景为水体的设置，需要对其进行进一步发展，以更好地适应于水稻叶绿素含量的反演。

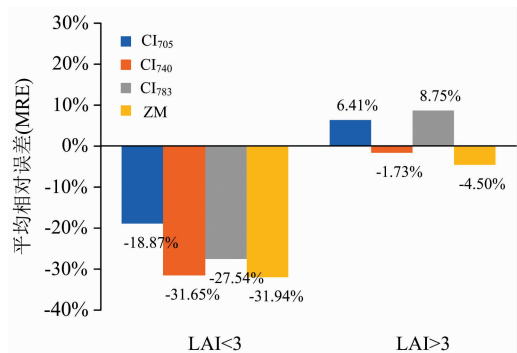


图 2 四种光谱指数在不同 LAI 条件下的平均相对误差

Fig. 2 Relative errors of leaf chlorophyll content inverted using four spectral indices under different LAI conditions

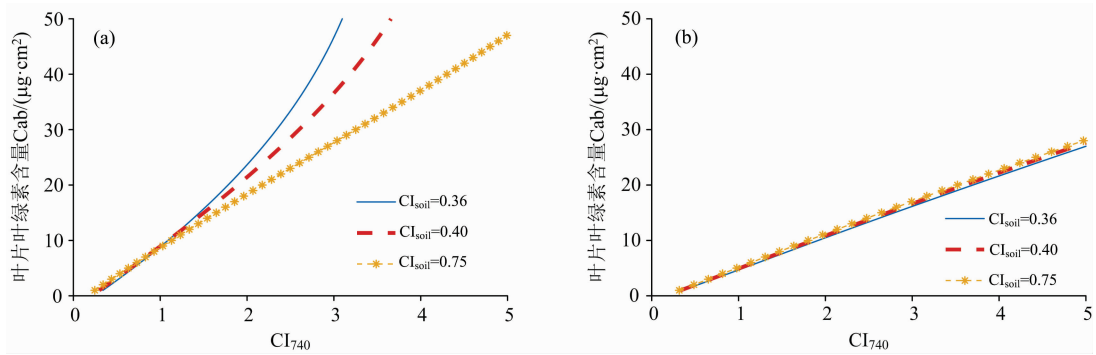


图 3 模拟的不同土壤背景条件下叶片叶绿素含量随冠层 CI_{740} 的变化

(a): LAI=1; (b): LAI=4

注: CI_{soil} 等于 0.36, 0.4 和 0.75 分别对应于 P_{soil} 取 1(干土壤)、0.5 和 0(湿润土壤)

Fig. 3 Simulated change of leaf chlorophyll content with canopy CI_{740} under different background conditions

(a): LAI=1; (b): LAI=4

Note: CI_{soil} values of 0.35, 0.55 and 0.75 correspond to P_{soil} equal to 1 (dry soil), 0.5, and 0 (wet soil)

2.3 背景影响订正及其效果

以上分析发现,在水稻生长的早期, LAI 较低,背景反射率变化显著影响叶片叶绿素含量的反演结果。为订正背景反射率变化对叶片叶绿素反演的影响,引入了绿色指数 $G = \rho_{green} / \rho_{red}$ (greenness index), 利用其与 CI 和 ZM 组合生成 CI/G 和 ZM/G 反演叶片叶绿素含量。模拟发现, CI/G 和 ZM/G 显著降低了背景变化对叶片叶绿素含量反演结果的影响。以

CI_{740}/G 为例,当 LAI 为 1 时,对于同一冠层 CI_{740}/G 值,不同土壤背景条件下反演的叶片叶绿素含量基本相同[图 4(a)]。随着 LAI 的升高,背景反射率变化对反演的叶片叶绿素含量影响进一步降低,当 LAI 等于 4 时,对于给定的冠层 CI_{740}/G ,不同土壤背景条件下反演的叶片叶绿素含量几乎相同[图 4(b)]。

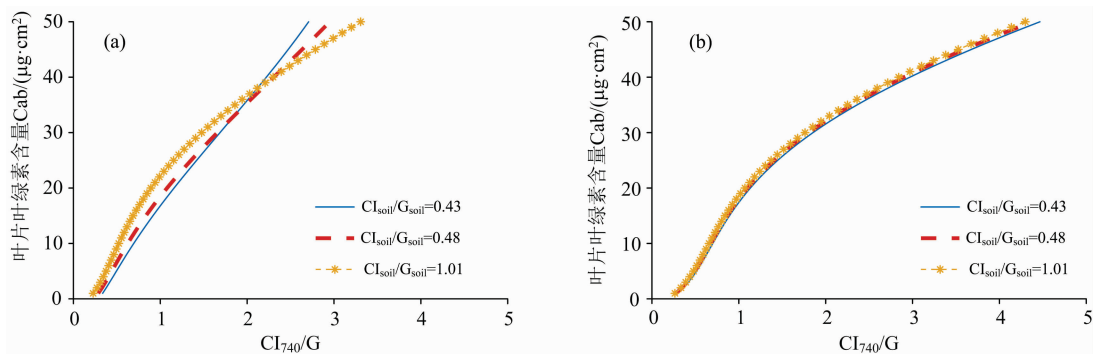


图 4 模拟的不同土壤背景条件下叶片叶绿素含量随冠 CI_{740}/G 层的变化

(a): LAI=1; (b) LAI=4

注: 等于 0.43、0.48 和 1.01 分别对应于 P_{soil} 取 1(干土壤)、0.5 和 0(湿润土壤)

Fig. 4 Simulated change of leaf chlorophyll content with canopy CI_{740}/G under different background conditions

(a): LAI=1; (b) LAI=4

Note: CI_{soil}/G_{soil} values of 0.43, 0.48, and 1.01 correspond to P_{soil} equal to 1 (dry soil), 0.5, and 0 (wet soil)

使用 CI_{705}/G , CI_{740}/G , CI_{783}/G 和 ZM/G 反演的叶片叶绿素含量与观测数据比较的结果分别如图 5(a—d) 所示,反演的叶片叶绿素含量与观测数据之间的一致性明显增强,特别是在水稻生长早期(LAI<3)利用 CI_{705} , CI_{740} , CI_{783} 和 ZM 反演的叶片叶绿素含量比观测明显偏低的现象得到有效纠正,平均相对误差分别为 8.11%, 9.11%, 14.94% 和 18.11%。全部样本的验证结果显示,基于 CI_{705}/G , CI_{740}/G ,

CI_{783}/G 和 ZM/G 反演的叶片叶绿素含量与观测比较的 R^2 分别为 0.83, 0.91, 0.86 和 0.88, 比利用 CI_{705} , CI_{740} , CI_{783} 和 ZM 反演结果的 R^2 明显上升; RMSE 分别为 6.95, 5.09, 7.01 和 6.88 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 比利用 CI_{705} , CI_{740} , CI_{783} 和 ZM 反演结果的 RMSE 明显下降; MRE 分别为 6.85%, 6.45%, 11.63% 和 12.32%(表 5)。

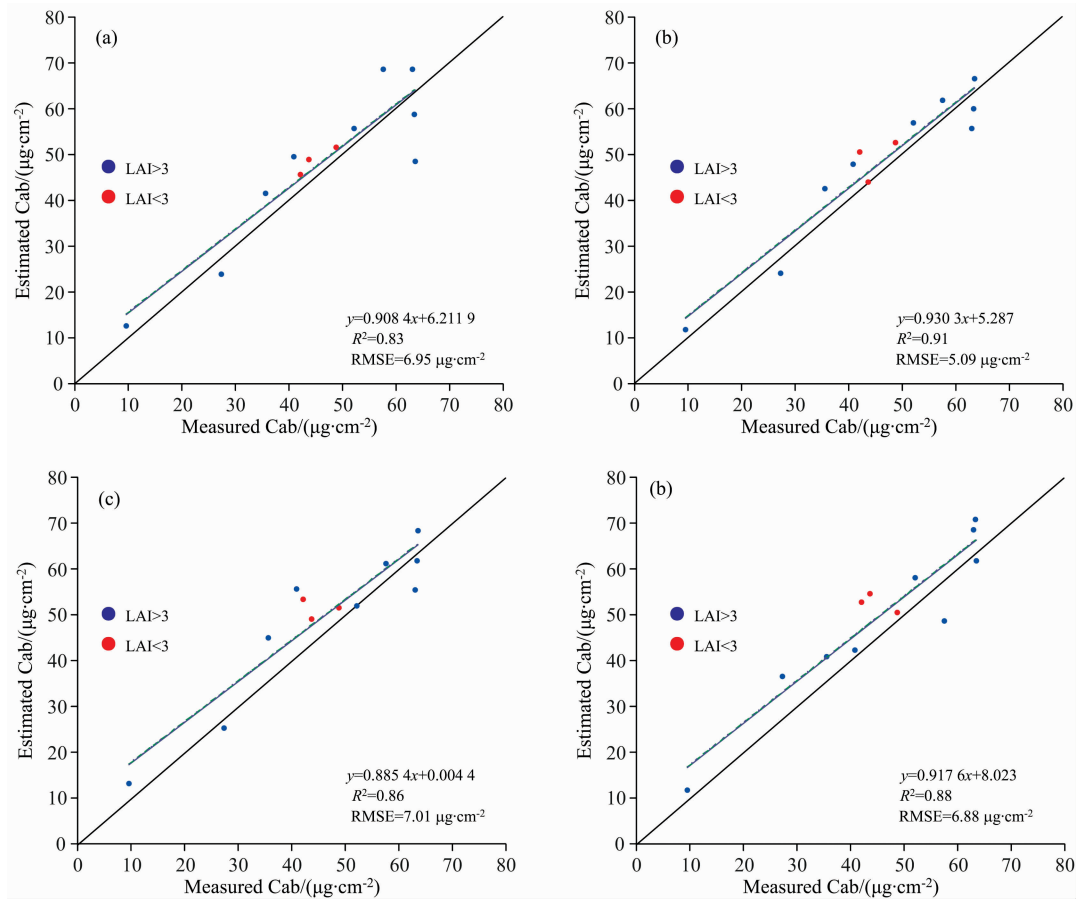


图 5 基于 CI₇₀₅/G (a), CI₇₄₀/G (b), CI₇₈₃/G (c) 和 ZM/G (d) 反演的叶片叶绿素含量与观测的比较

Fig. 5 Leaf chlorophyll content inverted using CI₇₀₅/G (a), CI₇₄₀/G (b), CI₇₈₃/G (c), ZM/G (d) against measurements

表 5 四种光谱指数校正后反演结果精度

Table 5 Accuracy of inversion results after correction of four spectral indices

改进光谱指数	一元线性回归方程	R ²	RMSE / ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	MRE / %
CI ₇₀₅ /G	$y=0.908 4x+6.211 9$	0.83	6.95	6.85
CI ₇₄₀ /G	$y=0.930 3x+5.287$	0.91	5.09	6.45
CI ₇₈₃ /G	$y=0.885 4x+9.004 4$	0.86	7.01	11.63
ZM/G	$y=0.917 6x+8.023$	0.88	6.88	12.32

3 结 论

利用 PROSAIL 模型进行正向模拟建立叶片叶绿素含量反演查找表, 比较了基于由 Sentinel-2 绿光波段和 3 个红边波段反射率计算的 CI 以及 2 个红边波段反射率计算的 ZM 反演水稻不同生长阶段叶片叶绿素含量的差异, 并提出了背景对反演结果影响的订正方法, 主要结论如下:

References

[1] Houborg R, Cescatti A, Migliavacca M, et al. Agricultural & Forest Meteorology, 2013, 177: 10.

(1) 基于 CI₇₀₅, CI₇₄₀, CI₇₈₃ 和 ZM 四种光谱指数对水稻叶片叶绿素含量反演 R² 分别为 0.69, 0.79, 0.67 和 0.71; RMSE 分别为 9.17, 9.02, 10.84 和 10.53 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; MRE 分别为 0.09%, -9.21%, -0.32% 和 -11.11%。其中 CI₇₄₀ 的反演精度最高, CI₇₈₃ 反演精度最低。

(2) 在水稻生长早期 (Cab < 50 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, LAI < 3), 背景对叶片叶绿素含量反演结果的影响显著, 基于 CI₇₀₅, CI₇₄₀, CI₇₈₃ 和 ZM 反演的叶片叶绿素含量明显偏低, MRE 分别为 -18.87%, -31.65%, -27.54% 和 -31.94%。当 LAI > 3 时, 反演结果与观测数据基本一致。

(3) CI/G 和 ZM/G 可以有效减弱背景对叶片叶绿素含量反演结果的影响, 基于 CI₇₀₅/G, CI₇₄₀/G, CI₇₈₃/G 和 ZM/G 反演的叶片叶绿素含量与观测数据比较的 R² 分别上升至 0.83, 0.91, 0.86 和 0.88, RMSE 分别降低至 6.95, 5.09, 7.01 和 6.88 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; 在水稻生长早期, 反演的叶片叶绿素含量比观测数据明显偏低的现象得到有效纠正。

- [2] Xue L, Yang L. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 97.
- [3] Combal B, Baret F, Weiss M, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(1): 1.
- [4] Darvish Z R, Skidmore A, Schlerf M, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(4): 1222.
- [5] Houborg R, Soegaard H, Ryad B, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 39.
- [6] Jay S, Maupas F, Bendoula R, et al. *Field Crops Research*, 2017, 210: 33.
- [7] Croft H, Chen J M, Wang R, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111479.
- [8] Zhang Y, Chen J M, Miller J R, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(7): 3234.
- [9] Xu M, Liu R, Chen J M, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 60.
- [10] Hilker T, Lênio S G, Arago L E O C, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 58: 278.
- [11] Croft H, Chen J M, Zhang Y. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 119.
- [12] Zarco T P J, Miller J R, Noland T L, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(7): 1491.
- [13] Gitelson A A, Merzlyak M N. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(12): 2691.
- [14] Yin C, He B, Quan X W, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(3): 615.
- [15] Feret J B, Francois C, Asner G P, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 112(6): 3030.
- [16] Verhoef W, Jia L, Xiao Q, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1808.
- [17] Zarco T P J, Berjón A, Lozano L R, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(3): 271.
- [18] Blackburn G A. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 273.

Inversion of Rice Leaf Chlorophyll Content Based on Sentinel-2 Satellite Data

YANG Xu, LU Xue-he, SHI Jing-ming, LI Jing, JU Wei-min*

International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract Chlorophyll content is an important indicator of crop health, plant productivity, and environmental stress. Real-time, fast and accurate acquisition of leaf chlorophyll content of crops is of significant for monitoring crop growth. Remote sensing is an effective way to retrieve leaf chlorophyll content of crops at regional and global scales. However, previous studies retrieving leaf chlorophyll content of crops does not fully consider the impact of underlying surface background, limiting retrieval accuracy. To this end, this paper aims at the inversion of rice leaf chlorophyll content from Sentinel-2 remote sensing satellite data using a look-up table based approach. The look-up table was simulated using the PRAOSAIL radiation transfer model. The applicability of chlorophyll indices (CI) calculated from the reflectance of the green band and different red-edge bands and the spectral index (Zarco and Miller, ZM) constructed by two different red edge bands in inverting leaf chlorophyll content was evaluated using field measurements. The greenness index (G) was integrated with CI and ZM to constrain the impact of background on the inversion of leaf chlorophyll content. The main findings of this study are: (1) The accuracy of leaf element content inversion based on the spectral index constructed in different bands is different, and CI_{740} performed the best ($R^2 = 0.79$, $RMSE = 9.02 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), followed by ZM ($R^2 = 0.71$, $RMSE = 10.53 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), CI_{705} ($R^2 = 0.69$, $RMSE = 9.17 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), and CI_{783} ($R^2 = 0.67$, $RMSE = 10.84 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); (2) The inverted leaf chlorophyll content is significantly affected by the background, especially at the early stage of rice growth. The inverted leaf chlorophyll content was systematically lower than observations (mean relative error (MRE) in the range from -18.87% to -31.94%) owing to strong background interference; (3) CI/G and ZM/G can effectively eliminate the influence of background and improve the accuracy of rice leaf chlorophyll inversion. At the early stage of rice growth, inversion based on CI/G and ZM/G significantly improves agreement between inverted and observed leaf chlorophyll content (MRE in the range from 8.11% to 18.11%). These findings are of great significance for improving the inversion of leaf chlorophyll content under different leaf area index levels of rice from remote sensing data.

Keywords Leaf chlorophyll content; Remote sensing inversion; Sentinel-2; PROSAIL

* Corresponding author

(Received Feb. 8, 2021; accepted Apr. 1, 2021)