

估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数

刘占宇^{1,2}, 黄敬峰^{1,3}, 王福民^{1,2}, 王 渊^{1,2}

(¹浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310029; ²浙江大学环境与资源学院环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310029;

³浙江省农业遥感与信息技术重点研究实验室, 杭州 310029)

摘要: 【目的】叶面积指数 (LAI) 是描述植物冠层结构、群落生长分析和陆地生态系统研究的重要参数, 提高叶面积指数的估算精度是遥感工作者的重要研究方向之一。【方法】通过不同氮素营养水平的水稻小区实验, 利用 2004 年中稻高光谱反射率数据, 模拟中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 前四个通道, 提出包含蓝、绿、红和近红外四个谱段的调节型归一化植被指数 ANDVI (adjusted-normalized difference vegetation index)。对 ANDVI 和归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index)、增强型植被指数 EVI (enhanced vegetation index)、绿波比值指数 GRI (green ratio index)、红边比值指数 RRI (red-edge ratio index) 等 5 个光谱植被指数与水稻 LAI 的相关关系进行了分析。利用 2004 年晚稻试验数据, 对与 LAI 相关关系较好的 ANDVI 进行验证。【结果】ANDVI 指数模型预测效果最好, 均方根误差为 1.771, 估算精度达到 63.1%。【结论】说明 ANDVI 具有进行在大面积范围内监测水稻 LAI 的能力。

关键词: 水稻; 叶面积指数; 植被指数; 中等分辨率成像光谱仪; 高光谱反射率

Adjusted-Normalized Difference Vegetation Index for Estimating Leaf Area Index of Rice

LIU Zhan-yu^{1,2}, HUANG Jing-feng^{1,3}, WANG Fu-min^{1,2}, WANG Yuan^{1,2}

(¹Institute of Agricultural Remote Sensing & Information System Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029; ²Ministry of Education Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecological Health, Zhejiang University, Hangzhou 310029; ³Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing & Information System in Zhejiang Province, Hangzhou 310029)

Abstract: 【Objective】Leaf area index (LAI) is an important parameter for describing vegetation canopy structure and community development condition in the terrestrial ecosystem. To improve the estimation accuracy of leaf area index is the main research direction for the remote sensed scholars. 【Method】In this study the mid and late maturing rice at the different nitrogen fertilizer level was planted in 2004 yr, and the hyperspectral canopy reflectance of mid rice was obtained. The front four bands of Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) (i.e. red, near-infrared, blue and green regions) were simulated to develop, and the adjusted-normalized difference vegetation index (ANDVI). A comparison of ANDVI with other VIs, such as Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), enhanced Vegetation Index (EVI), Green Ratio Index (GRI) and Red-edge Ratio Index (RRI) for estimation of LAI was made. The efficiency of ANDVI was validated with the hyperspectral canopy reflectance data of late maturing rice in 2004. 【Result】Results show that the estimation precision of exponential equation of ANDVI was 63.1%, the root mean square error was 1.771, 【Conclusion】and ANDVI has the potential of monitoring LAI in an extensive area.

Key words: Rice; Leaf area index (LAI); Vegetation index; MODIS; Hyperspectral canopy reflectance

0 引言

【研究意义】叶面积指数 (LAI) 是一个重要的

植物学参数和评价指标, 是陆地生态系统的十分重要的结构参数, 它控制着植被的许多生物物理过程, 如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等, 在农学、

收稿日期: 2006-08-21; 接受日期: 2007-05-22

基金项目: 国家自然科学基金 (40571115) 和国家高技术发研究展计划项目 (2007AA10Z205)

作者简介: 刘占宇 (1979-), 男, 河南南阳人, 博士, 研究方向为高光谱遥感。Tel: 0571-86971830; E-mail: zdrsbond@zju.edu.cn

林学以及生物学、生态学等领域得到广泛应用^[1-3]。LAI 的传统测量方法如称纸法、方格计算法、点接触法等,多属于破坏性测量,且存在不易在大面积范围内开展的缺陷。遥感技术的迅速发展,使得在大范围内快速准确地测算 LAI 成为现实,遥感测量且具有简便快速、灵敏准确、非破坏性等优点^[4]。【前人研究进展】遥感方法的原理是利用地物在不同波段的反射光谱差异,通过构建不同的指数来反演 LAI。早在 20 世纪 70 代,Wiegand 等就研究了光谱特征与 LAI 之间的关系,随后比值植被指数 RVI (ratio vegetation index)、归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index)、增强型土壤大气修正植被指数 EVI (enhanced vegetation index) 和绿波大气阻抗指数 GARI (green atmospherically resistant index) 等相继被提出并用来反演叶面积指数,且具有较高的估算精度^[5-8]。近年来,随着高光谱遥感的兴起,基于植被反射光谱波形分析的“三边”参数也越来越多地用于反演叶面积指数^[9-14],如 Andres Vina 提出绿波比值指数 GRI (green ratio index) 和红边比值指数 RRI (red-edge ratio index) 等,都可以有效的预测 LAI。【本研究切入点】现有的植被指数,多是基于早期卫星传感器波段较少、谱段较宽的现实情况而提出的,除了 EVI、GARI 外,大多仅考虑可见光红光和近红外谱段反射率,而忽略了红光、近红外谱段变化不同步的事实,没有考虑蓝、绿光谱段的变化。【拟解决的关键问题】本文分析了水稻不同生育期在可见光、近红外波段的光谱特征后,提出了一个包含可见光蓝、绿、红和近红外谱段的调节型归一化植被指数 ANDVI (adjusted-normalized difference vegetation index); 利用实测田间高光谱冠层反射率数据,模拟中等分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 传感器的前 4 个波段; 并与其它几个指数 (NDVI、EVI、GRI、RRI) 进行比较分析,以探讨预测水稻叶面积指数的最佳光谱植被指数,为大面积范围内的水稻长势实时监测提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 田间试验设计

1.1.1 试验材料 试验水稻品种为秀水 110 (常规粳稻,全生育期约 145 d) 和协优 9308 (杂交籼稻,全生育期约 140 d)。按照播种时间分为中稻和晚稻。中稻 2004 年 6 月 7 日播种,7 月 8 日移栽;晚稻 6 月 21 日播种,7 月 20 日移栽。秀水 110 全生育期株型挺立,

属直立紧凑型;协优 9308 叶型随着发育由披散转为直立。试验地设计为 4.76 m×4.68 m 的小区,行、株距为 0.17 m×0.13 m,单本插,设 3 个重复,试验小区完全随机排列。试验地点设在浙江大学现代化农业研究示范中心,东经 120°10'E,北纬 30°14'N。

1.1.2 肥料设计 设 3 种氮素水平: 0、120、240 kg·ha⁻¹ (折合成尿素分别为 0、266.7、533.3 kg·ha⁻¹), 分别记为 N0、N1、N2。氮肥分 3 次施用,分别为基肥 50%、分蘖肥 35%、穗肥 15%,人为造成无肥、氮肥适中、氮肥超量 3 种情况。另外,施用过磷酸钙 533.3 kg·ha⁻¹ 作基肥,氯化钾 300 kg·ha⁻¹ 作穗肥 (等量分 2 次于孕穗始期和抽穗始期均匀施入)。供试土壤为砂壤土 (砂粒 83.49%、粉粒 12.15%、黏粒 4.36%), 土壤全氮含量为 1.15 g·kg⁻¹, 速效氮含量为 188.5 mg·kg⁻¹, 全磷 1.21 g·kg⁻¹, 全钾 72.7 mg·kg⁻¹, 有机质 9.96 g·kg⁻¹, pH 6.78。

1.2 光谱数据的测定

1.2.1 测量仪器 光谱仪选用美国 ASD (Analytical Spectral Device) 公司的 ASD FieldSpec Pro FRTM 光谱仪,波段值为 350~2 500 nm,其中,350~1 000 nm 光谱采样间隔 (波段宽) 为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm; 1 000~2 500 nm 光谱采样间隔 (波段宽) 为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。

1.2.2 冠层光谱测定 选择晴朗无云无风天气,于每天 10: 00~14: 00,在分蘖、拔节、孕穗、抽穗、乳熟期和成熟期等生育期,测定水稻冠层高光谱反射率。测量时,传感器探头垂直向下,视场角为 25°,探头距冠层高度为 1.7 m。每个小区内选定一固定位置,进行光谱采样,以 10 条光谱为一采样光谱,即每次记录 10 个光谱,以其平均值作为该小区的光谱反射值。每一次测量前后立刻进行标准白板校正 (标准白板反射率为 1,这样所测得的目标物光谱是无量纲的相对反射率)。

1.3 叶面积指数 LAI 测定

冠层光谱数据测定后,在对应测定冠层光谱的位置连根整穴取样,放入盛水塑料桶内,运回室内进行叶片分离,再用扫描仪对叶片进行扫描,最后在 GIS 软件内矢量化,计算 LAI。中稻、晚稻的采样数目分别为 108、90,叶面积指数的平均值分别为 3.874、3.988,标准差分别为 2.28、2.245。在接下来的分析中,将利用中稻数据进行建模,用晚稻数据进行验证。

1.4 植被指数的计算

健康绿色植被在可见光谱段内,光谱特性主要受

叶片中以叶绿素为主的各种色素的支配^[15]。在以 0.45 μm 为中心的蓝波段及以 0.67 μm 为中心的红波段, 由于叶绿素强烈吸收辐射能而呈吸收谷。在以 0.54 μm 为中心的绿波段由于叶绿素吸收辐射能相对减少, 形成一个低反射峰。由于植物叶片内部组织结构(细胞结构)多次反射散射, 形成近红外反射高原区(0.7~0.9 μm)。与植被光谱相比, 土壤光谱反射率曲线的“峰—谷”变化较弱, 其形态远没有植物复杂^[16]。唐世浩等^[17]认为土壤光谱在绿到近红外波段近似线性变化。图 1 中的土壤光谱曲线为稻田附近裸土光谱的多次测量平均值, 由于水分含量较高(15%~20%), 故在红光波段(0.65~0.69 μm) 出现了一个低吸收谷。图 1 中水的光谱曲线, 是在稻田积水约为 5 cm 时, 10 次测量的平均光谱。上述分析表明, 裸土、稻田积水和水稻冠层光谱具有明显差别, 说明可以从光谱特征中对其加以区分。

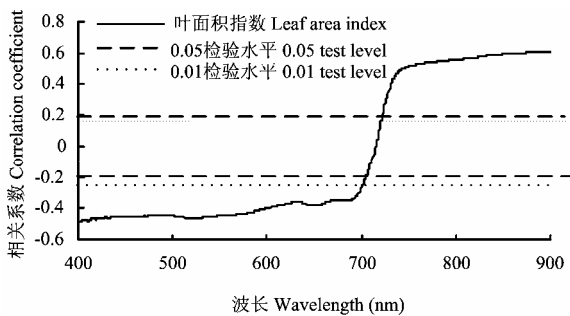


图 1 LAI 与水稻冠层高光谱反射率变量相关系数图(2004 年)

Fig. 1 Correlogram of hyperspectral reflectance of paddy rice canopy to LAI (2004)

同时, 实验证明, 植物在生长发育的不同阶段, 植被在可见光、近红外谱段的反射率有很大差异, 这是由植株体内色素浓度、叶片细胞结构、含水量、株型变化、冠层结构等的变化引起的^[15]。植被指数就是选用多光谱遥感数据经过加、减、乘、除等线性或非线性的分析运算, 产生的对植物长势(如叶面积指数)、生物量等有一定意义的数值。但是, 植被指数都不同程度的存在饱和现象, 即随着绿色生物量达到一定程度后, 植被指数不再增长, 而处于“饱和”状态^[15,16]。为了解决饱和问题, Gitelson 等^[8]利用绿波段代替红波段, 提出了绿波归一化植被指数(green NDVI)及引入绿波段的绿波大气阻抗指数(GARI), 可以更好地

探测叶绿素浓度。唐世浩等^[17]则提出, 包含绿、红光和近红外的三波段梯度差值植被指数, 能有效地反演植被覆盖度和叶面积指数。借鉴 Gitelson 和唐世浩等人研究成果, 本文作者提出调节型归一化植被指数, 即 ANDVI, 在 NDVI 的基础上, 引进蓝、绿光波段, 计算公式为:

$$ANDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R + (1+L)(\rho_G - \rho_B)}{\rho_{NIR} + \rho_R + (1+L)(\rho_G + \rho_B)} \quad (1)$$

式中, ρ_R 、 ρ_{NIR} 、 ρ_B 和 ρ_G 分别代表红光、近红外、蓝光和绿光 4 个波段, 波宽为 0.62~0.67 μm 、0.841~0.876 μm 、0.459~0.479 μm 和 0.545~0.565 μm , 对应于传感器 MODIS 的 1、2、3 和 4 波段; L 为调节系数。处理数据时, 为减低仪器和环境噪声^[18], 进行了五点滑动平均; 后对各波段内的光谱值进行算术平均, 以此模拟 MODIS 波段。分析该植被指数可以看出, 对于土壤、植被反射率来说, 近红外一般高于红光, 绿光大于蓝光, ANDVI 取值区间为[0, 1]; 对于清澈水体反射率来说, 蓝光反射率大于绿光, 绿光大于红光, 近红外部分几乎吸收全部的入射能, 反射能接近为零, ANDVI 取值范围为[-1, 0]。总体而言, ANDVI 的值域为[-1, 1]。借鉴 Huete 等^[19]的土壤调节植被指数(SAVI)中 L 的取值范围, 因植被类型、覆盖度或叶面积指数大小而异, 由实际区域条件所决定, 值域为[0, 1]。当 L=0.5 时, 对较宽幅度的 LAI 值具有较好地降低土壤噪声的作用。为了从侧面验证 ANDVI 的有效性, 选择 NDVI 等 4 个植被指数与之进行比较(表)。

2 结果与分析

2.1 水稻叶面积指数 LAI 与高光谱反射率的相关分析

研究表明, 通过分析植被生理参数与不同谱段的相关关系, 有助于寻找不同参数的敏感波段, 从而构建植被指数, 借此实现遥感参数对地表参数的定量反演。如图 1 所示, 在波长小于 0.715 μm 的整个可见光谱段内, LAI 与高光谱反射数据呈负相关关系, 小于 0.7 μm 的波段区域则达到了 0.01 的极显著性相关水平。LAI 与蓝波段反射率的相关程度, 要优于绿波段和红光波段, 而绿波段则更优于红光波段。这也说明了在设计植被指数时, 考虑蓝、绿波段的重要性和必要性。而在波长大于 0.715 μm 的近红外谱段内, LAI 则与高光谱反射数据呈正相关关系, 在 0.725 μm 处即达到极显著相关, 从 0.750 μm 处开始相关系数增长速

表 植被指数计算公式

Table Formulae of vegetation index in this paper

植被指数 Vegetation index	计算公式 VI formulae	来源 Reference
归一化植被指数 NDVI Normalized difference vegetation index	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$	Rouse et al (1973)
增强型植被指数 EVI Enhanced vegetation index	$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{1 + \rho_{NIR} + 6\rho_{Red} - 7.5\rho_{Blue}}$	Huete et al.(1996)
绿波比值指数 GRI Green ratio index	$GRI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{(540-560)}} - 1$	Andres Vina (2004)
红边比值指数 RRI Red-edge ratio index	$RRI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{(705-715)}} - 1$	Andres Vina (2004)

表中的各波段范围选择与公式 (1) 一致

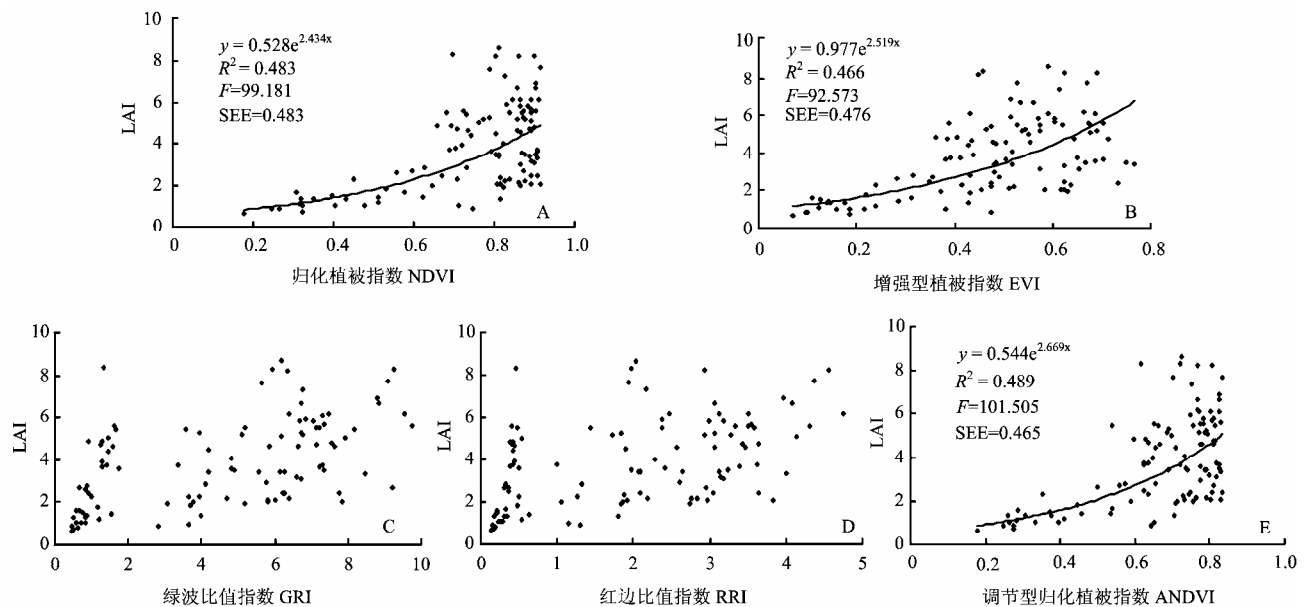
The spectral regions of VI formulae in Table were consistent with those of Formula one

度减缓，形成一个微坡。

2.2 ANDVI 与其它植被指数的估算效果比较

图 2 显示，不同的植被指数对 LAI 的变化响应差别很大。在中低 LAI (<5) 时，NDVI、EVI 和 ANDVI 对 LAI 的变化反应较好，尤以 ANDVI 最好；在中高 LAI (>5) 时，上述 3 个指数不同程度地出现饱和现象 (图 2-A、B 和 E)。GRI 和 RRI 对 LAI 的变化几乎没有响应 (图 2-C 和 D)，而 NDVI、EVI 和 ANDVI

与 LAI 呈比较明显的渐进关系，这种渐进关系用指数方程来拟合表现最好，均通过了 0.01 极显著性检验水平。在 NDVI、EVI 和 ANDVI 3 个植被指数中，尤以 ANDVI 的表现最好，它与 LAI 的指数拟合方程可以解释样本间方差的 48.9%，分别高出 NDVI、EVI 0.6% 和 2.3%；ANDVI 的 F 检验值最大为 101.505，高于 NDVI、EVI 的 99.181 和 92.573，说明 ANDVI 对 LAI 样本的解释能力最强；估计标准误为 0.465，低于 NDVI、



图中 SEE 代表估计标准误
SEE represents the standard error of estimation in figures

图 2 不同植被指数与 LAI 的非线性关系 NDVI, EVI, GRI, RRI 和 ANDVI (n=108)

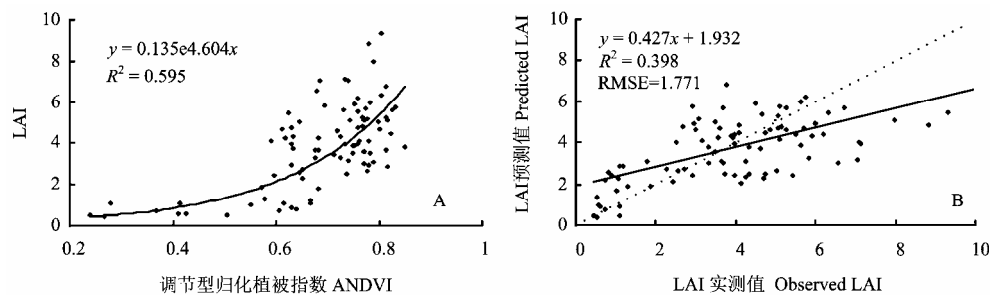
Fig. 2 Non-linear relationships between NDVI, EVI, GRI, RRI and ANDVI vs. LAI for paddy rice during the growing season in 2004(n=108)

EVI 的 0.483 和 0.476。以上分析表明,新植被指数 ANDVI 与 LAI 建立的回归方程具有最优拟合度,而指数方程则可取得最佳的拟合效果。

2.3 ANDVI 预测模型的检验

为了检验 ANDVI 的指数回归方程,在估算 LAI 时的稳定性、可靠性,利用 2004 年晚稻数据进行测试、验证。2004 年晚稻数据,包含了两种类型(直立型和披散型)、3 种施肥条件和重复,共 5 个生育期的 90 个样本,建立 LAI 与 ANDVI 间的回归方程,结果显示指数方程能够解释 LAI 样本方差的 59.5%(图 3.A)。运用所建立的指数回归方程,估算晚稻的 LAI,预测值和实测值之间的测定系数 R^2 为 0.398,均方根误差

RMSE 为 1.771,估算精度为 63.1%。图 3-B 也表明,当 LAI 大于 4.0 小于 6.0 时,指数 ANDVI 的估算值与实测值变异较大,降低了总体预测精度。除不同生育期 LAI 变化外,水稻是嗜水作物,需要充足的水分供给^[20],相比其他旱田农作物(小麦、玉米、大豆等),所测定的冠层光谱除受叶片方位角分布、辐照度倾角、植被阴影等影响外,还受田间积水影响,为植被和积水的混合光谱,这也是降低估算精度的重要原因^[21]。在之前的研究中,冠层光谱观测时,多是刻意避开稻田积水这一条件,而笔者并没有这样做,目的是要增加所设计指数、预测模型的普适性和鲁棒性(robustness)。



虚线对应 1 : 1 拟合线 (即实测值=预测值) (n=90)
Dotted line correspond to the 1 to 1 line (i.e. observed = predicted) (n=90)

图 3 以调节型归一化植被指数 ANDVI 为自变量的指数方程 (A) 及其估算 LAI 的预测值与实测值的相关分布图 (B)

Fig. 3 Validation of the adjusted-normalized difference vegetation index exponential model for LAI prediction during the growing season in 2004 for the second seeding date of paddy rice

3 讨论

叶面积指数 LAI 对植物光合作用和能量交换意义重大。植物群体的叶面积越大,植物群体的反射率增强。正因为 LAI 与植被生态生理、叶片生物化学性质、蒸散、冠层光截获、地表净第一生产力等密切相关,使它成为研究陆地生态系统的一个十分重要的参数。前人对此进行了大量的研究,提出了许多遥感参数用来监测叶面积指数^[22,23]。该研究在分析水稻冠层高光谱反射率和总结前人研究的基础上,利用冠层高光谱反射率,提出包含蓝、绿、红和近红外谱段的调节型归一化植被指数 ANDVI,波段宽度模拟传感器中等分辨率成像光谱仪 MODIS 的前 4 个波段。

本研究中,调节型归一化植被指数 ANDVI、归一化植被指数 NDVI 和增强型植被指数 EVI 与 LAI 之间

存在显著的非线性相关关系,研究结果与 Andres Vina^[14]一致。不同的是,Andres Vina 认为绿波比值指数 GRI 和红边比值指数 RRI 与 LAI 的非线性关系明确,相关程度高,而笔者的研究并没有得到相同的结论。Andres Vina 利用 GRI 和 RRI 二指数估算玉米和大豆的 LAI 取得很好的效果。相比宽波段植被指数,窄波段植被指数更容易受仪器、环境噪声和背景等的影响^[6],因为大豆和玉米为旱作、阔叶作物,而水稻为嗜水、窄叶作物,受到外界影响更多,这可能是造成研究结果差异的重要原因。选择 ANDVI、NDVI 和 EVI 与 LAI 进行非线性回归分析,结果表明指数回归模型是预测水稻 LAI 的最优拟合模型,与前人研究结论一致^[24-28]。3 个植被指数当中,尤以 ANDVI 的指数回归方程预测效果最好,无论 F 检验值,还是测定系数 R^2 ,都比其它两个指数高;而估计标准误差则最小。

本研究的不足之处主要在两个方面: 其一, 参试水稻品种只有两个, 致使在某一生育期的样本数目较少, 因而, 本研究并没有对新提出的指数 ANDVI, 进行品种间差异及特定生育期的表现验证; 其二, 冠层光谱反射数据是在田间积水的情况下获取的, 并没有做不同灌溉水平处理, 因而, 无法详尽考察 ANDVI 在不同背景条件下的表现。

4 结论

运用 2004 年中稻冠层光谱数据, 提出调节型归一化植被指数 ANDVI, 模拟中等分辨率成像光谱仪 MODIS 的前 4 个波段(红、近红外、蓝和绿波段), 进行植被指数与水稻生理参数 LAI 间的相关分析, 结果表明: ANDVI 的指数回归模型为 LAI 的最佳估算模型。利用同年晚稻数据, 对植被指数 ANDVI 的指数回归模型进行测试验证, 受水稻品种、施肥条件、生育期、植被生长状况、太阳高度角和背景等因素的影响, 测定系数 R^2 仅为 0.398, 均方根误差 RMSE 为 1.771, 估算精度达到 63.1%。说明 ANDVI 指数模型在估算 LAI 时具有很好普适性和鲁棒性, 同时也说明, 模拟中等分辨率成像光谱仪(MODIS)波段的 ANDVI 具有在大范围内监测水稻 LAI 的能力。

References

- [1] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究和应用进展. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, Xu C Y. Research and application advances in leaf area index (LAI). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 537-541. (in Chinese)
- [2] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 82-83.
Pu R L, Gong P. *Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 82-83. (in Chinese)
- [3] Veroustraete F, Patyn J, Myneni R B. Estimating net ecosystem exchange of carbon using the normalized difference vegetation index and an ecosystem model. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 115-130.
- [4] Jennifer L M. Quantification of biomass and leaf-area index Charleston, SC Estuary using low-altitude AVIRIS imagery. Ph.D. Dissertation of University of South Carolina, 2000.
- [5] Elvidge C D, Chen Z K. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54: 38-48.
- [6] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 289-298.
- [7] Huete A R, Liu Q, Batchily K, van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59: 440-451.
- [8] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8: 127-150.
- [9] 陈 健, 倪绍祥, 李云梅, 李静静. 芦苇地叶面积指数的遥感反演. 国土资源遥感, 2005, 64(2): 20-23.
Chen J, Ni S X, Li Y M, Li J J. Remote sensing LAI retrieval of reed mash. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2005, 64(2): 20-23. (in Chinese)
- [10] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 王人潮. 水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型. 遥感学报, 2004, 8(1): 81-88.
Wang X Z, Huang J F, Li Y M, Wang R C. The study on hyperspectral remote sensing estimation models about LAI of rice. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1): 81-88. (in Chinese)
- [11] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 王绍华. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究. 植物生态学报, 2004, 28(1): 47-52.
Xue L H, Cao W X, Luo W H, Wang S H. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(1): 47-52. (in Chinese)
- [12] 姚延娟, 阎广建, 王锦地. 多光谱多角度遥感数据综合反演叶面积指数方法研究. 遥感学报, 2005, 9(3): 117-123.
Yao Y J, Yan G J, Wang J D. The approach on leaf area index inversion using multi-angular and multi-spectral data sets. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 117-123. (in Chinese)
- [13] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76: 156-172.
- [14] Andres Vina. *Remote Sensing of Leaf Area Index and Biomass in Corn and Soybean*. Lincoln, Nebraska, University of Nebraska. 2004.
- [15] 赵英时, 李小文, 杨立明. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 372-396.
Zhao Y S, Li X W, Yang L M. *Theory and Method in Remote Application*. Beijing: Science Press, 2003: 372-396. (in Chinese)
- [16] 谭昌伟, 王纪华, 黄义德, 黄文江, 刘良云. 运用光谱技术改进 Beer-Lambert 定律的量化化及其应用研究. 中国农业科学, 2005, 38(3): 498-503.
Tan C W, Wang J H, Huang Y D, Huang W J, Liu L Y. Quantitative

- improvement of Beer-Lambert Law with spectral remote sensing technology and its application. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 498-503. (in Chinese)
- [17] 唐世浩, 朱启疆, 王锦地, 周宇宇, 赵 峰. 三波段梯度差值植被指数的理论基础及其应用. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(11): 1094-1102.
Tang S H, Zhu Q J, Wang J D, Zhou Y Y, Zhao F. Theoretical foundation and its application of three-band gradient difference vegetation index. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(11): 1094-1102. (in Chinese)
- [18] Kobayashi T, Kanda E, Kitada K, Ishiguro K, Torigoe Y. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners. *Phytopathology*, 2001, 91: 316-323.
- [19] Huete A R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25: 295-309.
- [20] 沈恒胜, 陈君琛, 曾大力, 涂杰峰, 汤葆莎, 滕 胜. 低纤维基因突变水稻稻草细胞壁组分动态发育分析. *中国农业科学*, 2004, 37(7): 943-947.
Shen H S, Chen J C, Zeng D L, Tu J F, Tang B S, Teng S. Dynamic analysis on composition of cell wall for low-fiber mutation rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 943-947. (in Chinese)
- [21] Wittlinger S K. Hyperspectral remote sensing of subtidal macrophytes in optically shallow water. M. S. Dissertation of San Jose State University, 2002.
- [22] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 倪绍祥. 植被叶面积指数遥感监测模型. *生态学报*, 2005, 6: 1491-1495.
Li K L, Jiang J J, Mao R Z, Ni S X. The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 6: 1491-1495. (in Chinese)
- [23] 张林青, 马爱京. 高产水稻群体茎蘖组成和叶面积指数及其关系的研究. *云南农业大学学报*, 2004, 19(2): 179-183.
Zhang L Q, Ma A J. Study on the constitution of LAI and stems and tillers and their relationship in early stage of high-yielding population in rice. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2004, 19(2): 179-183. (in Chinese)
- [24] Cheng Q. Multisensor comparisons for validation of MODIS vegetation indices. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 362-370.
- [25] 焦险峰, 杨邦杰, 裴志远, 王 飞. 基于植被指数的作物产量监测方法研究. *农业工程学报*, 2005, 4: 104-108.
Jiao X F, Yang B J, Pei Z Y, Wang F. Monitoring crop yield using NOAA/VHRR-based vegetation indices. *Transactions of the CSAE*, 2005, 4: 104-108. (in Chinese)
- [26] Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70: 29-51.
- [27] Tang Y L, Wang R C, Huang J F. Relations between red edge characteristics and agronomic parameters of crops. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 467-474.
- [28] 席建超, 张红旗, 张志强. 应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数. *北京林业大学学报*, 2004, 26(6): 36-39.
Xi J C, Zhang H Q, Zhang Z Q. Retrieving effective leaf area index of conifer forests using Landsat TM images. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(6): 36-39. (in Chinese)

(责任编辑 吴晓丽, 郭银巧)