

DOI: 10.5846/stxb201509111879

卫亚星,王莉雯.乌梁素海湿地芦苇最大羧化速率的高光谱遥感.生态学报,2017,37(3): - .

Wei Y X, Wang L W. Maximum carboxylation rates of reed in the Wuliangsuhai wetland using hyperspectral remote sensing. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

乌梁素海湿地芦苇最大羧化速率的高光谱遥感

卫亚星^{1,2,3,*}, 王莉雯^{1,2,3}

1 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心,大连 116029

2 辽宁师范大学自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室,大连 116029

3 辽宁师范大学城市与环境学院,大连 116029

摘要:湿地植被生产力和固碳潜力的研究是全球碳循环和全球变化的热点研究问题。湿地植被的光合能力能够指示其生长的健康状态。最大羧化速率是重要的植被光合参数之一,对精确模拟湿地植被光合作用和气体交换模型中的固碳过程具有重要的作用。本文以内蒙古乌梁素海湖泊湿地为研究区,进行了芦苇叶片光合参数和光谱的测量。芦苇叶片最大羧化速率(V_{cmax})数值是基于 Farquhar 光合作用模型,从光合测量获取的 A-C_i 曲线计算并校正到 25 °C 得到的。分别基于 bootstrap PLSR 模型、单波段和高光谱植被指数(包括简单比值指数 SR 和归一化差值指数 ND),构建湿地芦苇叶片最大羧化速率(V_{cmax})估算模型。基于高光谱遥感图像 HJ-1A HSI,采用 ND 高光谱指数中具有较高 V_{cmax} 估算精度的入选波段 702 和 756 nm,获取研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布图。研究结果表明,湿地植被光谱特征和高光谱植被指数,可用于估算湿地芦苇 V_{cmax} ,其中最高精度产生于基于 bootstrap PLSR 模型的建模方法($R^2=0.87$, RMSECV=3.90, RPD=2.72),ND 高光谱指数的 V_{cmax} 估算精度高于 SR 高光谱指数的估算精度;从获取的 V_{cmax} 空间分布图上提取估算值,其与测量值对比,存在较好的相关性($R^2=0.80$, RMSE=4.74)。
关键词:最大羧化速率;高光谱遥感;湿地植被光合;bootstrap PLSR;乌梁素海湿地

Maximum carboxylation rates of reed in the Wuliangsuhai wetland using hyperspectral remote sensing

WEI Yaxing^{1,2,3,*}, WANG Liwen^{1,2,3}

1 Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

3 College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Studies on wetland vegetation productivity and their carbon sequestration potential are becoming an important focus of the global carbon cycle and global climate change research. The photosynthetic capacity of wetland vegetation can indicate the health status of its growth. In addition, an accurate estimate of maximum carboxylation rate (V_{cmax}) is important for accurately simulating wetland vegetation photosynthesis and carbon sequestration processes with a gas exchange model. Here, the wetland of Wuliangsuhai (Inner Mongolia) was chosen as the study area, and the photosynthetic parameters and spectral reflectance of reed leaves were measured. Based on the Farquhar model of photosynthesis, reed leaf V_{cmax} values were calculated from A-C_i curves, and subsequently standardized to 25 °C. Estimation models of V_{cmax} for reed leaves in the wetland were constructed with a bootstrap PLSR model and single band and hyperspectral vegetation indices (e.g., simple ratio index (SR) and normalized difference index (ND)). Based on hyperspectral remote sensing images from HJ-1A HSI, the bands of 702 and 756 nm, which had a higher estimation accuracy for V_{cmax} , were selected from the ND hyperspectral

基金项目:国家自然科学基金项目(41271421);教育部人文社会科学研究规划基金项目(14YJA630064)

收稿日期:2015-09-11; 网络出版日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyx9585@sina.com

indices. Subsequently, a spatial distribution map of V_{cmax} for wetland reed was acquired for the study area. The results showed that the spectral characteristics of wetland vegetation, combined with hyperspectral vegetation indices, could be used effectively to accurately estimate reed V_{cmax} in the wetland. The highest accuracy was produced from the modeling method based on a bootstrap PLSR model ($R^2 = 0.87$, RMSECV = 3.90, RPD = 2.72). Furthermore, the accuracy of V_{cmax} estimations from the ND hyperspectral indices was higher than that from the SR hyperspectral indices. Overall, the estimated values extracted from the spatial distribution map of V_{cmax} had a good correlation with the measured values ($R^2 = 0.80$, RMSE = 4.74).

Key Words: maximum carboxylation rate; hyperspectral remote sensing; wetland vegetation photosynthesis; bootstrap PLSR; Wuliangsu hai wetland

陆地生态系统碳循环过程与碳源、碳汇问题的研究已成为 20 世纪 90 年代以来科技界的最大热点之一。近 20 年来国内外已经发展了大量的陆地生态系统模型,其中光合作用生化模型是陆地生态机理模型的核心。这些模型多以植被叶片最大羧化速率作为关键参数进行光合作用的模拟^[1]。一些经典生化模型在模拟植被光合作用时,通常将最大羧化速率设置为常数,或仅考虑了温度的影响,但没有考虑其它环境影响因素,以及由此导致的植被最大羧化速率的时空变化。植物最大羧化速率的空间差异和季相变化的准确模拟,为精确评估陆地生态系统生产力、碳收支及对气候变化的响应提供依据^[2]。

最大羧化速率(maximum carboxylation rate, V_{cmax})是重要的植被光合生理参数,是植被光合作用过程中重要限速反应——羧化反应的速率,对光合速率起着决定性的作用,它决定了植物的最大净光合速率、光下线粒体呼吸、光呼吸等过程^[3]。植被叶片最大羧化速率是植被光合作用过程中由核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)催化的最大羧化反应速率,即植被叶片在单位时间单位面积固定的最大 CO_2 摩尔数。不同类型植被叶片的 V_{cmax} 差异较大,其值在 $6\text{--}194\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间变化。同一类型植被叶片的 V_{cmax} 在不同生长环境下也不相同,并且呈现年际和季相变化特征^[4]。

基于植被叶片或冠层尺度的光谱特征,采用遥感分析技术可以估算植被生化、生理和结构特性参数^[5-8]。采用遥感反演技术,有助于在不同尺度上获取植被特定光谱特征与最大羧化速率的响应关系,由此准确估算植被光合作用关键参数的时空变化。

随着对植被光合作用和生产力的深入研究,一些研究对影响植物光合和呼吸作用的 V_{cmax} 及其影响因子进行了观测和模拟。其中,采用光谱分析技术模拟 V_{cmax} 空间和时相变化的研究也开始出现。Dillen 等观测了两个树种在生长季叶片反射率与光合参数(包括 V_{cmax} 等参数)的季相变化^[9]。研究了红边位置指数与光合参数的相关关系,认为光谱植被指数具有指示关键光合参数生长季变化的潜力。Jin 等的研究表明,不同尺度获取的植被指数与 V_{cmax} 存在紧密相关性,所建立的相关关系可以用于反演光合参数的季相变化^[10]。Serbin 等基于叶片反射光谱对 V_{cmax} 估算进行了研究,发现光谱反射率数据可以有效捕捉短期山杨树叶片 V_{cmax} 对温度变化的响应^[11]。Gamon 等对 PRI 指数进行了研究,他们从研究结果推论出,光合参数会受到同等的调节作用, PRI 指数可用于探测植被 V_{cmax} 和气孔导度的变化^[12]。虽然有关植被 V_{cmax} 的光谱反演研究还较少,但 V_{cmax} 对植被生理生态的重要性,会促使植被 V_{cmax} 光谱研究成为一个值得探索的研究方向。

本文以干旱区湖泊湿地芦苇作为研究对象,采用高光谱遥感技术,探索湿地植被主要光合参数最大羧化速率高光谱估算技术,并且模拟其空间分布状况,为准确模拟湿地生态系统碳同化和碳收支,评估湿地植被群落健康状态和湿地净化能力提供科学依据。

1 研究区概况

乌梁素海湿地位于内蒙古自治区西部巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,地理坐标为东经 $108^{\circ}43'\text{--}108^{\circ}57'$,

北纬 $40^{\circ}36' - 41^{\circ}03'$, 是河套地区最大的湖泊湿地。乌梁素海系黄河改道后形成的牛轭湖, 湖区水域面积约为 293 km^2 , 是干旱区典型的大型草型淡水湖泊。乌梁素海湿地区域属于温带大陆性干旱气候, 年平均气温 7.3°C , 年平均降水量 220 mm 。乌梁素海湿地植物以芦苇、香蒲、菖蒲、眼子菜为优势种。芦苇生长茂密, 成大片或带状分布于湖中。近年来, 随着人类活动干扰强度的不断增加, 乌梁素海湿地出现了水量逐年减少和水体污染较为严重的问题, 各项富营养化指标也呈现逐年上升的趋势^[13]。

2 数据来源和预处理

2014 年 7 月在乌梁素海湿地进行了野外实验。根据研究区芦苇群落的分布特征, 选定了 73 个采样区域 (图 1), 在选定的 73 个采样区域内设定单位面积为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的芦苇生长样方。野外实验选择晴朗无云的天气进行, 测量时间控制在 $10:00 - 12:00$ 之间, 以避免可能发生的“光合午休”。在每个样方内随机选择 5 株长势良好且基本一致的芦苇植株, 待测叶片选择完全展开、长势一致、对应叶位一致的 3 片成熟叶片。每片叶片分别进行 3 次光合参数测量和 10 次光谱测量。计算每个样方所测叶片光合参数的平均值作为该样方芦苇叶片光合参数测量结果, 计算每个样方所测叶片光谱的平均值作为该样方叶片反射光谱曲线, 以此消除偶然误差。

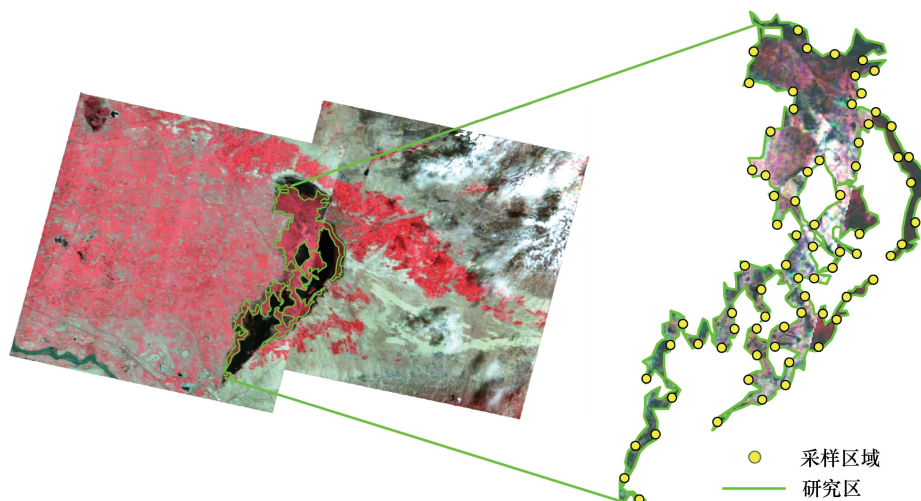


图 1 乌梁素海湿地研究区和采样区域位置图

Fig.1 Locations of the study area and experiment sites in the Wuliangsu Hai wetland

2.1 芦苇光合参数测量和计算

使用 LI-6400 便携式光合系统分析仪 (Li-cor, Lincoln, NE, USA), 进行了芦苇叶片光合参数、气体交换参数和环境参数的测量, 包括叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度、叶面温度、大气温度、相对空气湿度、空气 CO_2 浓度和光合有效辐射等。

测定光响应曲线时, 控制 CO_2 的浓度为 $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, 设定光合强度梯度为 $0, 50, 100, 150, 200, 400, 650, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。测定 CO_2 响应曲线时, 控制光合强度为 $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 设定 CO_2 浓度梯度为 $0, 50, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 。采用二次曲线方程, 分别进行光响应曲线拟合和 CO_2 响应曲线拟合, 绘制光合 ($A - \text{PAR}$) 响应曲线和光合- CO_2 ($A - C_i$) 响应曲线 (A 为测量叶片的净光合速率, PAR 为光合有效辐射, C_i 为 CO_2 浓度), 计算表 1 所列其它光合参数。

基于 Farquhar 等提出的生化模型和 $A - C_i$ 响应曲线^[14], 采用非线性回归方法, 拟合 V_{cmax} 数值^[10]:

$$\frac{dA}{dC} = \frac{V_{\text{cmax}}}{\Gamma_* + K_c(1 + O/K_o)}$$

式中, Γ_* 为缺乏暗呼吸下的 CO_2 补偿点; K_c 和 K_o 分别为羧化作用和加氧作用的 Michaelis - Menten 常数。在 $A-C_i$ 响应曲线初始部分, 即 C_i 低值区间, A 主要受 V_{cmax} 的限制。因此, V_{cmax} 和光下的暗呼吸速率 (R_d^*), 基于 $C_i < 250 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 的部分 $A-C_i$ 曲线进行估算。在缺乏 $R_d^* (\Gamma_*)$ 下的 CO_2 补偿点和 Michaelis - Menten 常数, 采用 Brooks 等^[15] 提出的叶温转换方法和 Von Caemmerer 等^[16] 的算法进行估算:

$$A = \left(1 - \frac{0.5O}{\tau C_i} \right) \frac{V_{cmax} C_i}{C_i + K_c (1 + O/K_o)} - R_d$$

式中, O 和 C_i 分别是胞间 O_2 分压和胞间 CO_2 分压; τ 是 Rubisco 特异性因子; R_d 为在光下的线粒体呼吸速率。随后, 基于 Harley 等提出的温度响应算法^[17], 将计算获得的 V_{cmax} 校正到 25°C :

$$\text{Parameter}(V_{cmax}) = \exp(c - H_a/RT_k) / [1 + \exp\{(DST_k - H_d)/RT_k\}]$$

式中, H_a 为活化能; H_d 为钝化能; c 为尺度转换常数; ΔS 为熵期, 取值为 $0.65 \text{ kJ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$; R 为气体常数; T_k 为叶温。

2.2 芦苇叶片光谱测量

芦苇叶片光谱测量使用了 ASD FieldSpec Pro FR 野外光谱辐射仪。光谱测量范围为 $350-2500 \text{ nm}$ 。传感器探头采取垂直向下的位置进行观测, 测量视场角为 25° , 距离所测芦苇叶片上方约 1 cm 处。实验中使用了 99% 的朗伯体白板作为参考板。

2.3 高光谱图像

环境与灾害监测预报卫星 HJ-1A 上搭载有超光谱成像仪 (hyperspectral imaging radiometer, HSI) 传感器。其空间分辨率为 100 m , 工作光谱谱段 115 个, 光谱范围 $459-956 \text{ nm}$ 。相比于 EO-1 Hyperion、MODIS 等传感器, 其光谱监测性能有所提高, 从而有效提高了对地物信息的提取能力, 适用于植被生长状况、生化组分信息等多种专题研究^[18]。

研究采用了 2014 年 7 月覆盖研究区的 HSI 高光谱图像, 轨道号为 11/65 和 12/65。对高光谱图像依次进行了格式转换、绝对辐亮度值转换、大气校正和几何精校正等数据预处理。采用 ENVI 的 FLAASH 模型 (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes) 进行图像的大气校正。以 TM 为参考影像, 使用二次多项式法进行了图像的几何精校正, 校正误差控制在 0.5 个像元, 得到归一化地表反射率图像。

3 研究方法

3.1 高光谱参量选取

本文基于单波段和高光谱植被指数, 进行湿地芦苇光合参数最大羧化速率的回归分析。单波段光谱采用 ASD 光谱辐射仪测量获取的高光谱数据 ($400-2350 \text{ nm}$ 波谱范围)。高光谱植被指数采用了两种基本类型的指数, 分别为简单比值指数 (SR) 和归一化差值指数 (ND):

$$SR = \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \quad (1)$$

$$ND = \frac{R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}}{R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2}} \quad (2)$$

式中, R_{λ_1} 为波段 λ_1 的反射率, R_{λ_2} 为波段 λ_2 的反射率, $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 。在本研究中, 在 $400-2350 \text{ nm}$ 波谱范围内 (去除波段除外), 采用了由此波谱区间内任意两个波段构建的 SR 和 ND 高光谱指数。

3.2 基于 bootstrap 的 PLSR 模型

本研究采用了 bootstrap 技术结合偏最小二乘回归模型 (PLSR) 的回归建模方法。

bootstrap 技术是利用有限的样本进行随机、等概率、有放回的多次重复抽样, 建立起足以代表母体样本分布之新样本, 从而实现扩大样本容量进行数据模拟。因此, 基于再抽样和数据模拟的 bootstrap 技术, 能够有效提高所建模型的估算精度^[19]。

本研究在 MATLAB 平台上完成建模的编程计算。具体建模步骤包括:基于原始样本数据采用 PLSR 回归建模方法构建估算模型,获得初始回归系数集;在原始数据集中随机抽取一个样本点 $(y_i^{(1)}, x_{i1}^{(1)}, x_{i2}^{(1)}, \dots, x_{ip}^{(1)})$,记录其值后再放回原始数据集,重复 n 次,得到一个 bootstrap 样本:

$$S^{(1)} = \{y_i^{(1)}, x_{i1}^{(1)}, x_{i2}^{(1)}, \dots, x_{ip}^{(1)} (i = 1, 2, 3, \dots, n)\} \quad (3)$$

x 是自变量数据, y 是因变量数据;基于 bootstrap 样本 $S^{(1)}$,采用 PLSR 回归建模方法,建立估算模型:

$$\hat{y} = \beta_1^{(1)} x_1 + \beta_2^{(1)} x_2 + \dots + \beta_p^{(1)} x_p \quad (4)$$

β 是回归系数;重复(3)、(4)步骤,得到估算模型回归系数组,构建基于 bootstrap 样本的回归系数集;计算基于 bootstrap 样本的回归系数与初始回归系数差值的绝对值,取绝对值的 90%分位点作为拒绝域的临界值;比较回归系数的绝对值与临界值,判断其是否通过显著性检验;将经过显著性检验的自变量在原数据集上重新构建 PLSR 估算模型;重复上述步骤,直到所有变量均通过显著性检验。

3.3 模型建立及精度验证

研究采用 4 种方法构建湿地芦苇叶片最大羧化速率估算模型:(1)采用线性回归建立单波段与芦苇叶片 V_{cmax} 的回归模型;(2)采用线性回归建立 SR 高光谱指数与芦苇叶片 V_{cmax} 的回归模型;(3)采用线性回归建立 ND 高光谱指数与芦苇叶片 V_{cmax} 的回归模型;(4)采用基于 bootstrap PLSR 模型建立预处理后光谱与芦苇叶片 V_{cmax} 的回归模型。

所建模型估算精度评价指标选用了 R^2 (determination coefficient, 决定系数)、RMSECV (root mean square error of cross-validation, 交叉验证均方根误差)和 RPD (the ratio of performance to deviation)。研究基于留一交叉算法 (leave-one-out) 计算 RMSECV。即对有 N 个样本的原始数据,每个步骤取出其中的 1 个样本,只使用其余 $N-1$ 个样本建立预测模型,用以预测被取出的样本值。这个过程一直重复至每个样本都被取出 1 次。本文计算标准差 (SD) 与 RMSECV 的比值作为 RPD 值。

3.4 基于高光谱图像的湿地芦苇最大羧化速率空间分布估算

湿地植被最大羧化速率空间分布的获取,有利于较为精确地描述其空间变化状况,改进区域或全球尺度湿地生态系统生产力与碳收支模型中光合参数的精度。

在本文使用的 4 种方法中,选取一种适宜的湿地芦苇最大羧化速率估算方法,将该方法应用于 HSI 高光谱图像。从经过预处理的 HSI 图像上,提取 73 个采样区域对应像素的反射光谱曲线。将 73 组样本数据 (包括从图像上提取的反射光谱曲线和测量计算获取的 V_{cmax}),随机分成 2 组,包括建模样本数据 ($n=50$) 和验证样本数据 ($n=23$)。基于建模样本数据,构建芦苇 V_{cmax} 估算模型,获取研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布图。基于验证样本数据,采用 R^2 和 RMSE 对 V_{cmax} 估算精度进行评价。

4 结果与分析

4.1 研究区湿地芦苇光合生理参数特征

野外实验测量在 7 月进行,研究区芦苇长势较好,种群密度 92 株/ m^2 ,平均株高 2.68 m,叶面积指数 3.64 m^2/m^2 。从表 1 可以看出,芦苇光饱和点和光补偿点之间的光能利用区间较宽,这导致芦苇具有较高的生产力。芦苇叶片较高的光饱和点和光补偿点,也从一方面表明了其属于不耐荫的阳性植物^[20]。从各光合生理参数指标综合来看,研究区湿地芦苇呈现较强的光合能力。

4.2 湿地芦苇叶片光谱特征

图 2 为经实验测量获取的芦苇叶片平均反射光谱曲线。曲线中剔除了水分吸收带、大气影响以及噪声干扰较大的部分。曲线呈现出绿色植物叶片的一般光谱特征:在可见光波段,在叶绿素等色素吸收和反射作用影响下,叶片光谱反射率值较低,在 542 nm 存在明显的反射峰,在 683 nm 存在明显的吸收谷;在近红外波段,683—760 nm 波段范围呈现“红边”特征,760—1335 nm 波段之间光谱反射率值较高,在 1063 nm 达到峰值,这是叶片细胞结构高反射率影响所致;在短波红外 (SWIR) 波段,受叶片含水量的影响,光谱反射率值降低,以

1450、1950 nm 为中心形成了水分吸收带。

表 1 乌梁素海湿地芦苇叶片光合生理参数
Table 1 Photosynthetic physiological parameters of reed leaves in Wuliangsu hai wetland

参数 Parameters	获取和计算方法 Acquisition and calculation method	数值 Values
光饱和点/($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Light saturation point	当光合速率达到最大值时的光合有效辐射,从 A-PAR 曲线获取	1982.41
光补偿点/($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Light compensation point	维持光合作用的最小光合有效辐射,从 A-PAR 曲线获取	35.36
表观量子效率 Apparent quantum yield	计算 A-PAR 曲线在 0—200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 范围内的斜率	0.058
CO_2 饱和点/($\mu\text{mol mol}^{-1}$) Saturation point for CO_2	最大光合速率时 CO_2 达到饱和的浓度,从 A- C_i 曲线获取	1742.59
CO_2 补偿点/($\mu\text{mol mol}^{-1}$) Compensation point for CO_2	近似计算净光合速率为 0 时的 CO_2 浓度,从 A- C_i 曲线获取	69.03
最大净光合速率/($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Maximum net photosynthetic rate	根据拟合的 A-PAR 曲线方程,计算最大净光合速率	24.14
羧化效率/($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Carboxylation efficiency	对 A- C_i 曲线在 0—200 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 低 CO_2 浓度范围内的数据进行线性回归,计算该响应曲线的斜率	0.078
蒸腾速率/($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Transpiration rate	使用 LI-6400 便携式光合系统分析仪测量获取	4.97
水分利用效率/($\mu\text{mol mmol}^{-1}$) Water use efficiency	计算光合速率和蒸腾速率的比值	4.51
最大羧化速率/($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) Maximum carboxylation rate	采用本文所述 V_{cmax} 计算方法,基于 Farquhar 光合作用模型从 A- C_i 曲线中计算并校正到 25 $^{\circ}\text{C}$ 得到	75.4

4.3 湿地芦苇叶片最大羧化速率估算精度对比

表 2 为本文中采用的 4 种方法估算芦苇叶片 V_{cmax} 的结果及精度评价指标对比。图 3 为采用上述 4 种方法构建芦苇叶片 V_{cmax} 估算模型,入选较高估算精度的波段或波段组合,进行 V_{cmax} 估算值与测量值比较。总体来看,最高估算精度产生于基于 bootstrap PLSR 模型的 V_{cmax} 估算建模方法 ($R^2=0.87$, $\text{RMSECV}=3.90$, $\text{RPD}=2.72$)。ND 高光谱指数的 V_{cmax} 估算精度 (R^2 介于 0.85—0.79),高于 SR 高光谱指数的估算精度 (R^2 介于 0.80—0.74)。基于单波段构建的 V_{cmax} 线性估算模型精度最低 (R^2 介于 0.55—0.48)。

RPD 常被用来评价预测模型的精度。一些研究根据估算结果总结出,RPD 值越大预测模型的估算能力越好。当 $\text{RPD}>2$ 时表示模型具有较好的预测能力; $2>\text{RPD}>1.4$ 时表示模型的估算结果可以被接受,存在改进空间; $\text{RPD}<1.4$ 时说明模型预测的可靠性在减小; $\text{RPD}<1$ 时表示模型预测能力较差,不能应用于样本估算^[21]。在本研究中,基于 bootstrap PLSR 模型、ND 高光谱指数、SR 高光谱指数中的 657 和 794 波段组合(表 2),其 RPD 值均超过 2,说明这些估算方法可以获得精度较高的芦苇叶片 V_{cmax} 预测值。

本研究中所采用的 bootstrap 技术结合 PLSR 回归建模方法,获取了芦苇叶片 V_{cmax} 的最高估算精度。在本文中,采用了基于 bootstrap 的 PLSR 回归建模方法,利用 bootstrap 技术可以有效提高估算模型精度,证明 bootstrap 和 PLSR 结合的建模方法,适用于基于高光谱数据的芦苇叶片 V_{cmax} 估算。但是,存在的问题是,在类似生态和地理参数光谱估算研究中,通常使用整个光谱测量波段数据(包括上千个波段),这导致在 PLSR 模

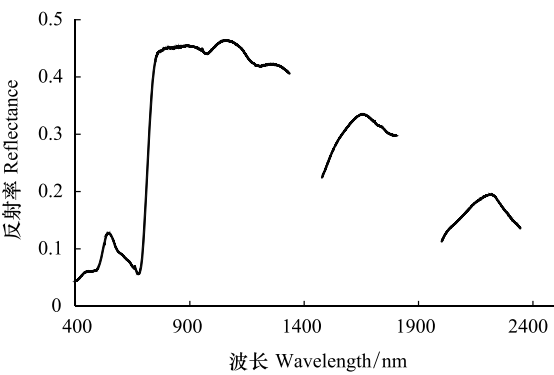


图 2 湿地芦苇叶片平均反射光谱曲线
Fig.2 The spectral curve of the average reflectance for reed leaves in wetlands

型中,部分光谱变量对估算变量不具有重要性影响(例如,影响系数接近于 0)或者负影响^[11]。当空间尺度由局地测量上升至宽尺度遥感应用时,可利用的波段数量较为有限,需要较多成分变量的 PLSR 建模方法将导致较大估算误差。因此,基于宽波段星载光谱数据时,PLSR 并不是理想的建模方法,其应用会受到该问题的限制,而光谱指数的应用却更为普遍。

表 2 4 种方法估算乌梁素海湿地芦苇叶片最大羧化速率结果和评价指标对比

Table 2 The results of estimating maximum carboxylation rate of reed leaves in Wuliangsuhai wetland using 4 methods and the comparisons of evaluation indicators ($n=73$)

构建 V_{cmax} 估算模型方法 Methods of constructing V_{cmax} estimation models	入选估算波段/nm Selected estimation bands	评价指标 Evaluation indices		
		R^2	RMSECV	RPD
单波段 Single band	696 _(a)	0.55	7.34	1.46
	2142 _(b)	0.51	7.80	1.38
	713 _(c)	0.48	8.09	1.31
SR 高光谱指数 SR hyperspectral vegetation index	657, 794 _(a)	0.80	5.07	2.07
	645, 734 _(b)	0.76	5.79	1.83
	462, 2178 _(c)	0.74	5.73	1.87
	675, 1504 _(a)	0.85	4.11	2.58
ND 高光谱指数 ND hyperspectral vegetation index	702, 756 _(b)	0.83	4.55	2.35
	460, 2053 _(c)	0.79	5.01	2.11
基于 bootstrap PLSR 模型 Based on bootstrap PLSR model	12 (成分个数)	0.87	3.90	2.72

入选估算波段一列,下标 a、b、c 分别代表在同一种估算芦苇叶片 V_{cmax} 的方法中,综合各估算精度评价指标,并且考虑实际应用中特征波段经常发生偏移,以及星载波段的设置,a 为估算精度最高的入选波段,b 和 c 为估算精度较高的入选波段。 R^2 : 决定系数 determination coefficient; RMSECV: 交叉验证均方根误差 root mean square error of cross-validation; RPD: the ratio of performance to deviation

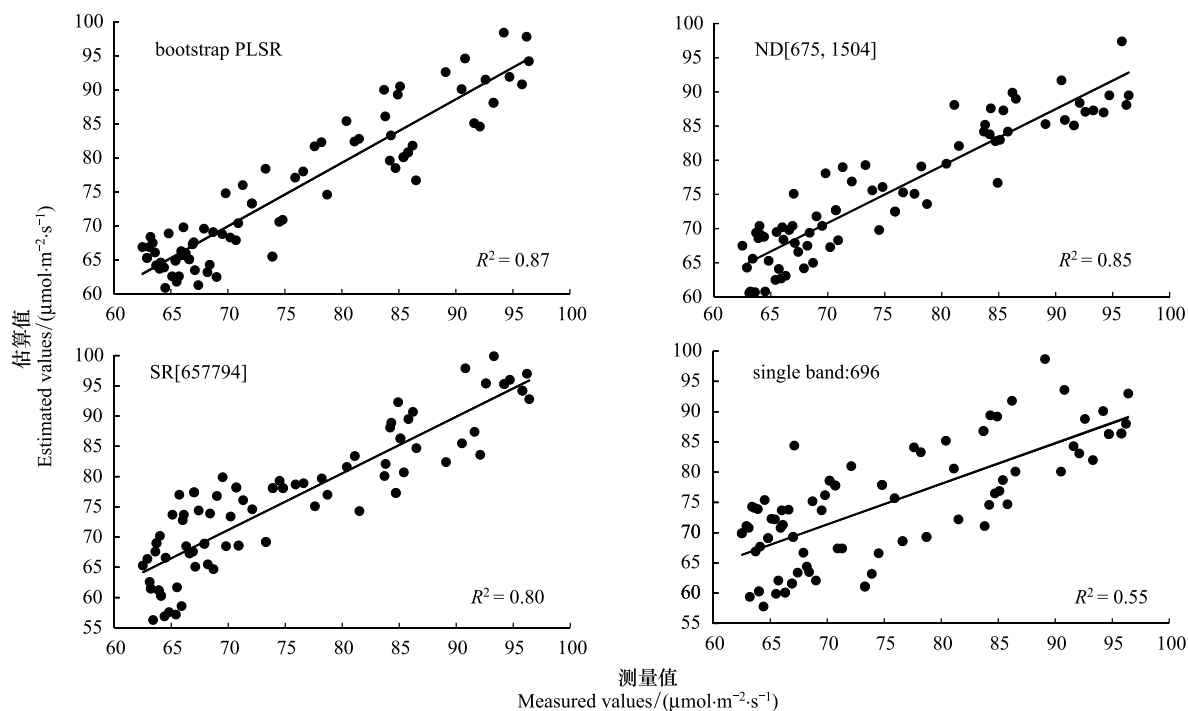


图 3 4 种方法对芦苇叶片 V_{cmax} 最高精度的估算值与测量值比较

Fig.3 Measured versus estimated V_{cmax} with the highest accuracy for reed leaves based on four kinds of estimation methods ($n=73$)

归一化植被指数(NDVI[705, 750])、光化学植被指数(PRI[531, 570])等,在已有研究中证明了其估算植被光合参数的可行性^[22]。本研究,采用了 ND 形式和 SR 形式的高光谱指数,估算湿地芦苇叶片 V_{cmax} 。

值得注意的是,ND 形式中标记为 b 的高光谱指数,利用了 702 和 756 nm 波段,这与上文提及的 705 和 750 nm 波段较为接近,这两个波段被认为与植被叶片叶绿素含量相关性较高,而叶绿素含量在很大程度上决定了叶片的光合能力^[23]。尤其是在星载光谱数据中,相近的这两对波段可能各自位于同一卫星波段中。探索高光谱指数对植被光合参数(例如,最大羧化速率、最大光合电子传递速率等)的估算研究,有利于在不同尺度上开展其时空变化监测及对环境影响因素的响应。

表 2 显示,入选估算波段分别位于蓝光(460、462 nm)、红光(645、657、675、696 nm)、近红外(702、713、734、756、794 nm)、SWIR 波段(1504、2053、2142、2178 nm)。其中,696、702、713、734、756 nm 位于近红外波段的“红边”区域。可以看出,主要入选估算波段位于红外、近红外、SWIR 光谱范围。一些研究证明,许多中心位于红光和近红外的波段在植被叶片和冠层光合参数的指示方面具有潜能^[24]。表 2 中,ND[702, 756]、SR[657, 794]和 SR[645, 734]即为此类高光谱指数,它们表现出了对芦苇叶片 V_{cmax} 较好的估算能力。在本研究中,一些 SWIR 波段也显示出能够指示芦苇叶片的 V_{cmax} 。Rubisco 在 SWIR 波段存在几个较宽的光谱吸收特征波段,主要位于 1500、1680、1740、1940、2050、2170、2290、2470 nm 波段^[25]。另一方面,叶片中氮素的 30%—50%分配于蛋白质核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)中,叶片氮素状态与净光合速率显著相关^[25]。而氮素在 SWIR 波段的吸收波段中心位置,主要位于 1510、1940、2060、2180、2300、2350 nm^[5]。将 Rubisco、氮素吸收特征波段和表 2 中入选估算波段相对比,在 SWIR 波段,入选的 1504、2053、2178 nm 与前两者相应的吸收特征波段较为接近。一些研究表明,SWIR 波段的入选有利于提高预测模型的估算精度,主要源于其独特的光谱特性^[5],这在本文中也有所体现。

4.4 研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布

本文采用的高光谱遥感图像为 HJ-1A HSI,其光谱范围为 459—956 nm。根据该高光谱图像的波谱覆盖范围,以及实际推广应用的可行性和实用性,选择 ND 高光谱指数中具有较高 V_{cmax} 估算精度的入选波段 702 和 756 nm,即采用 ND[702, 756] 高光谱指数估算芦苇 V_{cmax} 。

图 4 为根据 23 组验证样本数据的空间位置,从研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布图(图 5)上提取的估算值与测量值对比。图 4 显示,估算值与测量值之间存在较好的相关性($R^2=0.80$, RMSE=4.74)。结果表明,高光谱指数 ND[702, 756] 以较好的精度估算了湿地芦苇最大羧化速率的变化,即基于光谱特征的植被指数可以较为精确地估算湿地植被最大羧化速率。

图 5 为基于高光谱指数 ND[702, 756]、50 组建模样本数据和线性回归模型,获取的研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布图。湿地芦苇最大羧化速率估算值介于 62.3—94.8 之间,平均值为 $76.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。在乌梁素海湿地的研究区,北部和东部沿岸地区呈现芦苇最大羧化速率的高值区。在这些区域,芦苇生长密集度大,而且单个植株长势旺盛。

5 结论

本文主要研究结论为:

(1) 基于芦苇叶片测量光谱和高光谱遥感图像 HSI,所获取的植被光谱特征和高光谱植被指数,可用于以

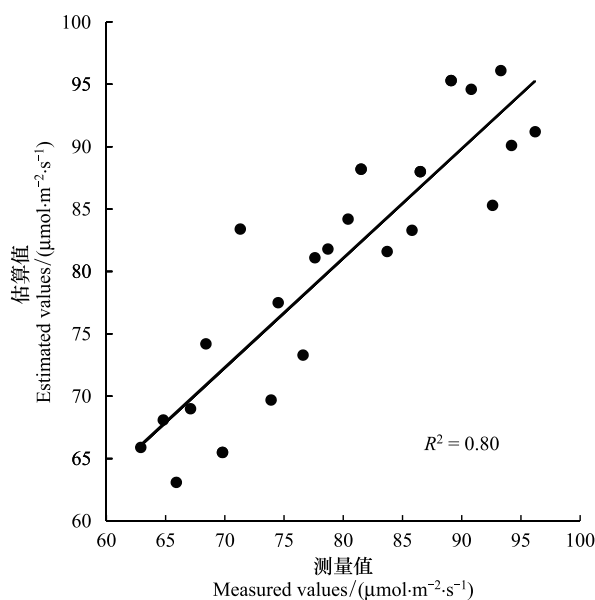


图 4 基于高光谱图像 HSI 的湿地芦苇最大羧化速率估算值与测量值比较 ($n=23$)

Fig.4 Measured versus estimated maximum carboxylation rate of wetland reeds based on HSI hyperspectral image

较高精度估算湿地芦苇最大羧化速率,从而获得湿地植被最大羧化速率的空间分布。

(2)用于估算湿地芦苇叶片 V_{cmax} 的 4 种方法中,最高估算精度产生于基于 bootstrap PLSR 模型的 V_{cmax} 估算建模方法 ($R^2 = 0.87$, RMSECV = 3.90, RPD = 2.72)。ND 高光谱指数的 V_{cmax} 估算精度高于 SR 高光谱指数的估算精度。单波段的 V_{cmax} 估算精度最低。

(3)基于高光谱遥感图像 HSI,采用 ND[702, 756] 高光谱指数估算芦苇 V_{cmax} ,获取了研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布图。经验证,估算值与测量值之间存在较好的相关性 ($R^2 = 0.80$, RMSE = 4.74)。

(4)估算湿地芦苇叶片 V_{cmax} 的入选估算波段,主要位于蓝光(460、462 nm)、红光(645、657、675、696 nm)、近红外(702、713、734、756、794 nm)、SWIR 波段(1504、2053、2142、2178 nm)。其中,696、702、713、734、756 nm 位于近红外波段的“红边”区域。

(5)对比 Rubisco、氮素吸收特征波段和本文获得的 V_{cmax} 入选估算波段,在 SWIR 波段,入选的 1504、2053、2178 nm 与前两者相应的吸收特征波段较为接近。

植被最大羧化速率是表征植被光合能力的重要光合参数。植被光合作用过程不仅与植物自身的生理生态特性(包括叶片构造、叶龄、叶位等)有密切关系,还受到环境因素的影响(包括光照、温度、水分、 CO_2 浓度、土壤养分等)。随着遥感空间技术的发展,已存在的多种传感器可以在不同空间和时间尺度上持续提供海量的地物光谱信息,如此大数据的光谱数据有助于精确捕捉植被光合参数的时空变化。

参考文献 (References):

- [1] Houborg R, Cescatti A, Migliavacca M, Kustas W P. Satellite retrievals of leaf chlorophyll and photosynthetic capacity for improved modeling of GPP. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 10-23.
- [2] 闫霜, 张黎, 景元书, 何洪林, 于贵瑞. 植物叶片最大羧化速率与叶氮含量关系的变异性. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 640-652.
- [3] 张彦敏, 周广胜. 植物叶片最大羧化速率对多因子响应的模拟. *科学通报*, 2012, 57(13): 1112-1118.
- [4] Wullschlegel S D. Biochemical limitations to carbon assimilation in C_3 plants—a retrospective analysis of the A/C_i curves from 109 species. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(5): 907-920.
- [5] 王莉雯, 卫亚星. 植被氮素浓度高光谱遥感反演研究进展. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(10): 2823-2827.
- [6] Soudani K, Hmimina G, Dufrêne E, Berveiller D, Delpierre N, Ourcival J M, Rambal S, Joffre R. Relationships between photochemical reflectance index and light-use efficiency in deciduous and evergreen broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 144: 73-84.
- [7] Wu C Y, Niu Z, Gao S. The potential of the satellite derived green chlorophyll index for estimating midday light use efficiency in maize, coniferous forest and grassland. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 66-73.
- [8] Raymond Hunt Jr E, Doraiswamy P C, McMurtrey J E, Daughtry C S T, Perry E M, Akhmedov B. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 103-112.

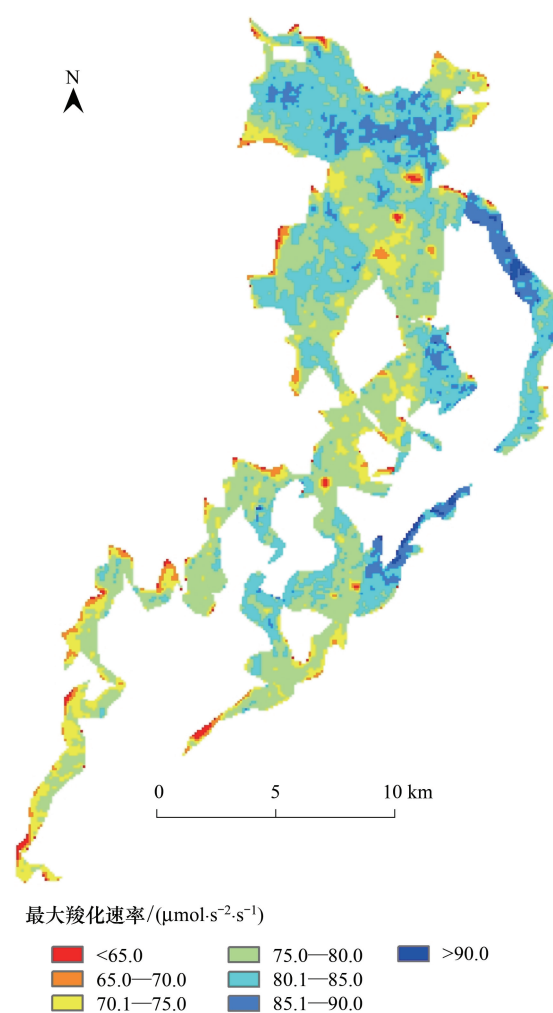


图5 研究区湿地芦苇最大羧化速率空间分布

Fig.5 The spatial distribution of reed maximum carboxylation rate in the wetland of study area

- [9] Dillen S Y, de Beeck M O, Hufkens K, Buonanduci M, Phillips N G. Seasonal patterns of foliar reflectance in relation to photosynthetic capacity and color index in two co-occurring tree species, *Quercus rubra* and *Betula papyrifera*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 160: 60-68.
- [10] Jin P B, Wang Q, Iio A, Tenhunen J. Retrieval of seasonal variation in photosynthetic capacity from multi-source vegetation indices. *Ecological Informatics*, 2012, 7(1): 7-18.
- [11] Serbin S P, Dillaway D N, Kruger E L, Townsend P A. Leaf optical properties reflect variation in photosynthetic metabolism and its sensitivity to temperature. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(1): 489-502.
- [12] Gamon J A, Bond B. Effects of irradiance and photosynthetic downregulation on the photochemical reflectance index in Douglas-fir and ponderosa pine. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 135: 141-149.
- [13] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 高兴东, 樊庆云, 薛红喜. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局. *地理研究*, 2006, 25(6): 1003-1012.
- [14] Farquhar G D, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [15] Brooks A, Farquhar G D. Effect of temperature on the CO₂/O₂ specificity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. *Planta*, 1985, 165(3): 397-406.
- [16] Von Caemmerer S, Evans J R, Hudson G S, Andrews T J. The kinetics of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in vivo inferred from measurements of photosynthesis in leaves of transgenic tobacco. *Planta*, 1994, 195(1): 88-97.
- [17] Harley P C, Tenhunen J D. Modeling the photosynthetic response of C₃ leaves to environmental factors // Boote K J, Loomis R S, eds. *Modeling Crop Photosynthesis-from Biochemistry to Canopy*. Geneva: American Society of Agronomy, 1991: 17-39.
- [18] 陈雪洋, 蒙继华, 吴炳方, 朱建军, 杜鑫. 基于 HJ 星高光谱数据红边参数的冬小麦叶面积指数反演. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(增刊): 213-220.
- [19] 王惠文, 吴载斌, 孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法. 北京: 国防工业出版社, 2006: 267-274.
- [20] 付为国, 李萍萍, 卞新民, 吴沿友, 曹秋玉. 镇江北固山湿地芦苇光合日变化的研究. *西北植物学报*, 2006, 26(3): 496-501.
- [21] Anne N J P, Abd-Elrahman A H, Lewis D B, Hewitt N A. Modeling soil parameters using hyperspectral image reflectance in subtropical coastal wetlands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 33: 47-56.
- [22] 王莉雯, 卫亚星. 植被光能利用率高光谱遥感反演研究进展. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(6): 15-22.
- [23] Wu C Y, Chen J M, Desai A R, Hollinger D Y, Altaf Arain M, Margolis H A, Gough C M, Staebler R M. Remote sensing of canopy light use efficiency in temperate and boreal forests of North America using MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 60-72.
- [24] Inoue Y, Peñuelas J, Miyata A, Mano M. Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 156-172.
- [25] Elvidge C D. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1775-1795.