

DOI: 10.5846/stxb201507091460

郭超凡,郭道宇.基于可见光波段包络线去除的湿地植物叶片叶绿素估算研究.生态学报,2016,36(16): - .

Guo C F, Guo X Y. Estimation of wetland plant leaf chlorophyll content based on continuum removal in the visible domain. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (16): - .

基于可见光波段包络线去除的湿地植物叶片叶绿素估算研究

郭超凡^{1,2,3,4}, 郭道宇^{1,2,3,4,*}

1 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048

2 北京市城市环境过程与数字模拟重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,北京 100048

3 三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048

4 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京 100048

摘要:研究采用芦苇和香蒲叶片光谱及实测叶绿素含量数据,选取波段谱带范围为可见光波段 400—760nm(为了避免近红外波段受叶片水分含量的影响,降低构建模型的稳定性),利用相关分析与逐步回归分析的统计学分析方法,建立叶面尺度下不同包络线去除衍生转换光谱:BD (band depth)、CRDR (continuum-removed derivative reflectance)、BDR (band depth ratio)、NBDI (normalized band depth index) 与叶绿素含量估算模型。通过对入选波段的统计表明在 550—750nm,特别是 700—750nm(红边)波段范围内产生了较多的有效波段,是今后进行生物参量反演的重点波段范围。舍一交叉验证结果表明芦苇、香蒲和混合样本叶绿素含量估测的最佳模型分别为 BD、CRDR 和 NBDI 模型,其交叉验证决定系数依次为 0.87、0.83 和 0.81,交叉验证均方根误差 RMSE 依次为 0.16、0.15 和 0.33。并在此基础上利用独立样本非参数检验和多因子方差分析,探讨相关因素对于生化参量估算模型精度的影响。结果表明物种差异、数据类型差异对于叶绿素回归模型的影响较大,而光谱类型差异及光谱数据与数据类型交互作用对于回归模型精度的影响较小。

关键词:湿地植物;包络线去除;高光谱;叶绿素含量;可见光波段

Estimation of wetland plant leaf chlorophyll content based on continuum removal in the visible domain

GUO Chaofan^{1,2,3,4}, GUO Xiaoyu^{1,2,3,4,*}

1 College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Urban Environmental Processes and Digital Modeling Laboratory, Beijing 100048, China

3 Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, MOST, Beijing 100048, China

4 Beijing Municipal Key Laboratory of Resources Environment and GIS, Beijing 100048, China

Abstract: Increasing amounts of recycled water are being used in urban wetlands; as such, monitoring the growth of wetland plants over large areas is of great significance to assessing the restoration and reconstruction of wetlands created by recycled water. At present, remote-sensing technology is considered an important method for monitoring the growth of plants on a large scale. In this study, typical wetland plants (*Phragmites australis* and *Typha angustifolia*) growing in the South Park Wetland of Olympic Park were selected as research subjects. Spectral reflectance was determined at a domain ranging from 400 to 760 nm to avoid the influence of leaf water on the established model. Chlorophyll content was obtained from data

基金项目:国家自然科学基金(40901281);北京市教育委员会科技计划面上项目(KM201310028012)

收稿日期:2015-07-09; **修订日期:**2016-03-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyucnu@126.com

sources. Statistical analysis, including correlation and stepwise regression analysis, was conducted to establish chlorophyll content inversion models with different derivative transformation spectrums at the leaf level for: (i) band depth (BD), (ii) continuum-removed derivative reflectance (CRDR), (iii) band depth ratio (BDR), and (iv) normalized band depth index (NBDI). We found that 550 nm to 750 nm, particularly 700 nm to 750 nm (red edge range), was the key range to estimate biochemical parameters. Single removal cross-validation results indicated that optimal models of chlorophyll content inversion in reeds, cattails, and combined samples were BD, CRDR, and NBDI, respectively. Corresponding R^2 values were 0.87, 0.83, and 0.81, and the respective RMSE values were 0.16, 0.15, and 0.33, respectively. Kruskal-Wallis non-parametric tests and multi-way ANOVAs were performed to elucidate the influence of relevant factors individually and in combination with one another on the regression results of biochemical parameters of plant water. Results showed that vegetation type (reed, cattail) and data type (single or mixed species) greatly influenced the inversion model. In contrast, the spectral derivative transformation (BD, CRDR, BDR, and CRDR) and the interaction between spectral derivative transformation and data types did not significantly affect the inversion model. In this study, an estimation model of wetland plant biochemical parameters was established and functions of related factors in the estimation model were analyzed. Our results could be used as a scientific basis for non-destructive monitoring of growth in wetland plants. This study also provided a reference for the use of recycled water in restoration and management.

Key Words: wetland plan; continuum removal; hyperspectrum; chlorophyll content; visible spectrum

叶绿素作为植物光合作用的主要色素,直接参与光能的吸收、传递、分配和转化等过程,其含量的多少不仅反映植物的营养条件、生长发育状况及生理代谢水平,还可作为环境生理研究的重要参考指标^[1]。因此,实时、准确掌握叶绿素的含量、分布及变化情况对于监测植物生长状态和生境适宜性评价具有重要的意义。

植物叶片的光合作用、呼吸、蒸散发和分解等生物过程与叶片的生化参量如叶片叶绿素、水分、氮和纤维素等浓度具有密切的关系^[2],而植物受叶片内叶肉细胞结构、叶绿素、水分含量、氮素含量以及其他生理生化参量的影响表现出不同的反射光谱曲线^[3-4]。大量文献成功借助于植物冠层或叶片光谱特征对植物生化参量进行实时监测和快速诊断,其结果对于理解大范围的生态系统功能特性具有重要的意义^[5]。其中,早期的生化参量遥感诊断研究多集中于借助指数模型进行敏感波段的判别,但指数模型在实际应用中容易受植物品种、生育期、生长环境的影响^[6],其反演精度存在不稳定性和普适性较差的问题。其次指数模型对于高光谱数据丰富的光谱信息而言极其有限,容易造成重要信息的丢失^[7]。为克服指数模型的局限性,许多学者通过寻求各种统计方法构建基于多变量反射光谱特征的植物生化参量估算模型。其中采用逐步回归的方法(在测定的谱段范围内判别与植物生化参量密切相关的吸收特征波段)得到了广泛的应用^[8-9]。同时,为了提高生物参量反演模型的精度和稳定性,更多的学者开始尝试通过对原始光谱进行预处理即衍生变换,以便更好的挖掘生物参量的敏感波段,创建更加稳定有效的回归模型。其中对原始光谱进行包络线去除变换,由于该方法能够抑制背景光谱,扩大弱吸收特征信息,被认为是一种具有很大潜力的数据挖掘工具。Kokaly 和 Clark (1999) 提出通过光谱吸收特性的连续移除法、带深标准化分析和多元逐步线性回归相结合的模型构造方法以提高反演模型的回归精度和鲁棒性^[10];Curran 等(2001)选取多种生物参量进行反演研究,进一步验证了 Kokaly 和 Clark 方法的可靠性,促进了包络线去除方法在生物参量反演研究的应用^[11]。但该方法容易受到叶片水分等因素的影响,在湿生叶片生化参量的估算研究中适用性较差^[12]。

由于水分的吸收谱带主要位于近红外波段,对于可见光谱带范围内的反射率影响较小;考虑到植物色素(主要是叶绿素)浓度变异是决定可见光(400—760nm)反射光谱特征的主要因素已得到普遍认同^[8,13],为基于利用可见光谱带范围内反射率反演叶绿素含量提供了科学依据。同时,O.Mutanga 等人利用可见光范围内反射光谱,通过波深分析方法对新鲜牧草的多种生物参量进行了成功估算^[14],进一步证明了利用可见光谱带范围的反射率反演生物参量的可行性。因此,本研究以奥林匹克公园南园湿地优势挺水植物芦苇和香蒲为研

究对象,选取 400—760nm(可将光)谱带范围的反射光谱和实测叶绿素含量为数据源,通过对原始光谱进行包络线去除变换,并基于逐步线性回归分析构建湿地挺水植物叶片叶绿素含量的反演模型。研究结果以期为湿地植物生长的遥感监测提供科学依据,为再生水利用的城市湿地恢复与管理提供参考和借鉴。

1 研究区概况

奥林匹克公园南园湿地地处北京市区北部,位于奥林匹克公园内(图 1)。该区属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候。多年平均气温 11—12℃,极端最高气温 41.6℃,极端最低气温 -21.2℃。多年平均水面蒸发量在 1200mm 左右,多年平均降雨量约 600mm。降雨年内分配不均,多集中在汛期 6—9 月,约占全年的 85%。奥林匹克公园以清河、北小河再生水处理厂的出水为补水水源,并循环利用,且补水入湖前流经南园湿地以改善水质。南园湿地以再生水处理湿地和循环水处理湿地为核心,植物氧化塘、生态氧化塘为辅助,混合生态功能区为补充,形成多层次的湿地净化系统^[15](图 1)。该净化系统的各个部分均布有大量水生植物,主要包括芦苇、香蒲、水葱、千屈菜等。通过植物的净化作用出水水质可以达到地表Ⅲ类水水质标准(GB3838-2002)。

2 研究方法

2.1 湿地植物光谱与叶片叶绿素含量测定

选择研究区主要的湿地植物芦苇和香蒲为光谱采集对象。根据两种湿地植物在每个水质净化子系统(再生水处理湿地,循环水处理湿地,植物氧化塘,生态氧化塘,混合生态功能区)的分布情况,设置光谱采样点 77 个,其中芦苇光谱采样点 39 个,香蒲光谱采样点 38 个。于 2011 年 8—10 月分五次进行湿地植物叶片光谱测量,测量仪器采用美国 ASD (Analytical Spectral Device) 公司 FieldSpec[®]3 光谱仪加载的手持叶夹式叶片光谱探测器进行。这种探测器内置石英卤化灯,光源稳定;测量时叶片置于叶片夹的叶室中,然后夹紧叶片,保证叶片水平且被探测面积相同,以消除背景反射、叶片表面弯曲造成的光谱波动及叶片内部变异造成的影响,每组数据采集前均进行标准白板校正^[16]。光谱采样范围为 350—2500nm,光谱分辨率在 700nm 时为 3nm,在 1400nm 时为 8.5nm,在 2100nm 时为 6.5nm,光谱采样间隔在 350—1000nm 为 1.4nm,在 1000—2500nm 为 2nm。

叶绿素的测量采用分光光度计法。将选取的与光谱测量相应的叶片剪碎,放入丙酮和乙醇 1:1 混合液中,根据叶绿素 a、b 在特定提取溶液中对特定波长的光有最大吸收的原理,使用分光光度计(UV-1600 Spectrophotometer)测定在 645nm 和 663nm 处的光密度,计算叶绿素浓度^[17]。公式如下:

$$C_a = (12.7 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645}) \times v/m \quad (1)$$

$$C_b = (22.9 \times A_{645} - 7.32 \times A_{663}) \times v/m \quad (2)$$

$$C_T = C_a + C_b \quad (3)$$

式中, A_{663} 、 A_{645} 分别代表在 663,645 波段处的光密度值, C_a 为叶绿素 a 含量, C_b 为叶绿素 b 含量, C_T 为总叶绿素含量, v 为提取液体积, m 为样品重。

2.2 数据处理

2.2.1 光谱数据预处理

本文选取的波段范围是 400—760nm,对每个采样点光谱进行平均。为减少数据冗余度,对光谱进行重采

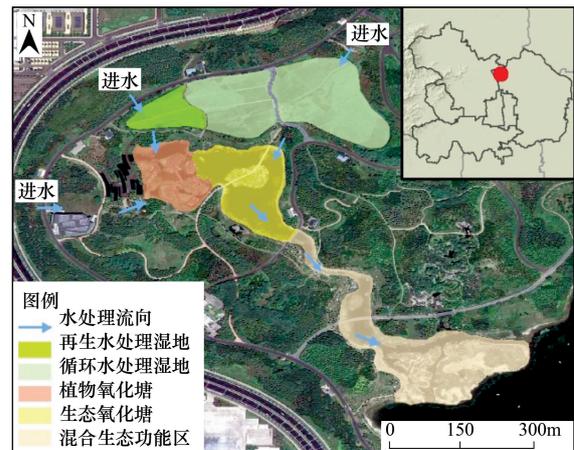


图 1 奥林匹克公园南园湿地地理位置及净化系统布置图

Fig.1 Location and distribution of the purification system in the South Wetland

样(仪器输出光谱自动重采样为 1nm 的分辨率),采样间隔为 5nm,并采用 Savitzky-Golay 方法进行平滑,该方法为窗口移动多项式最小二乘平滑,能够保留光谱细微特征并减少随机噪声,提高光谱信噪比^[18]。

2.2.2 原始光谱包络线去除及标准化处理

包络线去除即通过将反射光谱吸收强烈部分的波段特征进行转换,在一个共同基线的基础上比较反射光谱的吸收特征,从而进行光谱吸收特征分析和光谱特征波段选择。如图 2 所示:

对光谱进行包络线去除是为了增强生化参量敏感波段的光谱吸收特征。考虑到叶绿素的吸收特征主要集中在蓝、红波段,且参照 Curran 等^[11]在测试叶片多种生物参量时选取的波段中心,结合本研究的实际光谱数据,最终确定包络线去除区域为 405—520nm、550—750nm,波深中心分别为 495nm 和 680nm。在确定包络线区域后,对原始光谱进行包络线去除,具体过程公式如下:

$$R'_{cj} = \frac{R_j}{R_{start} + k(\lambda_j + \lambda_{start})} \quad (4)$$

$$K = \frac{R_{end} + R_{start}}{\lambda_{end} + \lambda_{start}} \quad (5)$$

式中: λ_j 是第 j 波段; R'_{cj} 是波段 j 的包络线去除值; R_j 是波段 j 的原始光谱反射率; R_{end} 和 R_{start} 是吸收曲线里的起始节点和末端节点的原始光谱反射率; λ_{end} 和 λ_{start} 是在吸收曲线里的起始节点波长和末端节点波长; K 在吸收曲线里起始节点和末端节点波段间的斜率。

此外,考虑到遥感影像处理中为降低土壤背景、传感器信噪比、大气吸收水分等因素的影响,通常会对影像进行标准化处理。为实现地面测量与高空遥感的有效结合,本文对包络线去除后的光谱进行进一步的标准化处理,降低噪声影响,参照 O. Mutanga 等^[19],本研究选取四种衍生光谱:BD (Band depth)、CRDR (Continuum-removed derivative reflectance)、BDR (Normalised band depth ratio)和 NBDI (Normalised band depth index)进行生物参量回归模型的构建。其具体计算公式如下表:

$$BD = 1 - R' \quad (6)$$

$$CRDR = (R'_{\lambda(i+1)} - R'_{\lambda(i-1)})/2\lambda \quad (7)$$

$$BDR = BD/D_c \quad (8)$$

$$NBDI = (BD - D_c)/(BD + D_c) \quad (9)$$

其中 R' 为光谱反射率包络线去除值, D_c 为波深。

2.2.3 模型建立与精度评价

基于 spss 等软件,通过进行逐步多元回归分析,建立 4 类包络线去除衍生光谱(BD、CRDR、BDR、NBDI)与叶绿素含量的回归模型;模型精度检验采用舍一交叉验证方法(Leave-One-Out, LOO,评价指标为交叉验证决定系数(R^2)和交叉验证均方根误差(RMSE),并绘制叶绿素含量最优模型的实测值与估计值之间的 1:1 关系图。

3 分析与讨论

3.1 生物参量分析

本文首先对获取的样本叶绿素含量进行了统计分析,其结果如表 1 所示。77 个样本的叶绿素含量波动区间为 $2.10\% \pm 0.17\%CL$ (Confidence limit of the mean),其中芦苇的波动范围为 $2.72\% \pm 0.15\%CL$,香蒲的波动

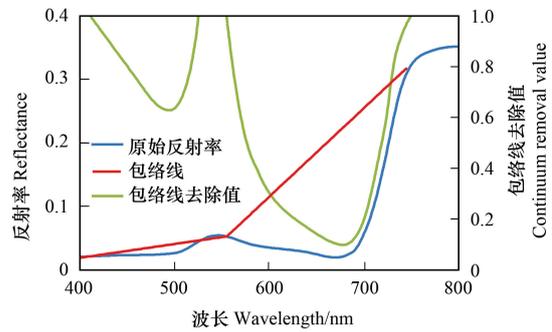


图 2 包络线去除法示意图

Fig.2 Continuum removal reflectance spectral curve

范围为 $1.46\% \pm 0.12\% \text{CL}$; 这种波动为研究植物光谱与叶绿素含量的关系奠定了基础。此外, 芦苇的叶绿素含量均高于香蒲。

表 1 不同分类条件下叶绿素含量水平统计表

Table 1 Descriptive statistics of the chlorophyll content measured						
生物参量 Biochemical	物种 Specie	样本数 No. of samples	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	置信区间 CL(95%)
叶绿素 Chlorophyll/($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	芦苇	39	2.72	1.99	3.50	0.147
	香蒲	38	1.46	0.82	2.17	0.123
	合并	77	2.10	0.82	3.50	0.171

3.2 相关性分析

为探索植物反射光谱特征与生物参量间的关联性, 分别对样本的 4 类包络线去除衍生光谱 (CRDR、BD、BDR、NBDI) 与叶绿素含量进行相关性分析, 结果如图 2 所示。

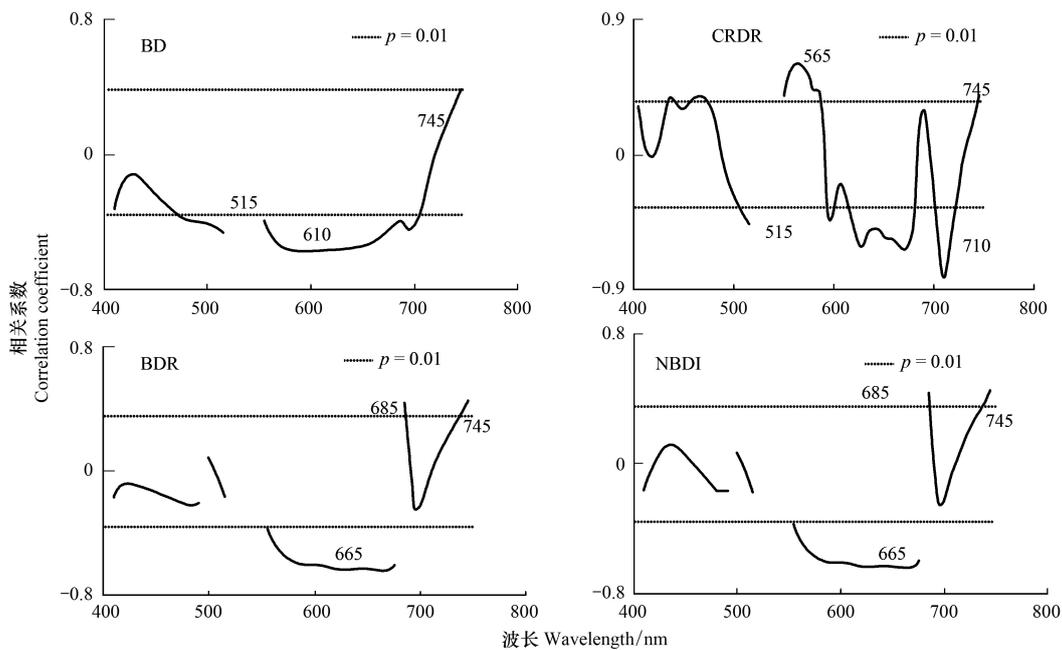


图 3 芦苇、香蒲包络线去除衍生光谱与叶绿素含量的相关系数图

Fig.3 Coefficients of correlation relating BD、CRDR、BDR、NBDI to contents of chlorophyll from overall data

图 3 表示样本的叶绿素含量与其对应的四种包络线去除衍生光谱之间相关关系。其中 BD 曲线中达到极显著水平的波段分布在蓝、绿、黄、橙和红五个波段, 极值点为 515nm、610nm 和 745nm。CRDR 曲线中达到极显著水平的波段分布在蓝(靛)、绿、黄、橙和红五个波段, 极值点为 515nm、565(560)nm、670nm 和 745nm。BDR 和 NBDI 曲线中达到极显著水平的波段一致, 分布在绿、黄、橙和红四个波段, 极值点为 665(670)nm、685nm 和 745nm。这些高相关波段为湿地植物生物参量的估测提供了保障。其中橙光波段是植物胁迫的敏感波段, 相对于在红波段的强吸收来说, 叶绿素在该波段的吸收较弱, 因此该波段对于叶绿素的微小变换十分敏感^[20]。黄光波段反映了叶绿素和类胡萝卜素对黄光的反射特征^[21], 蓝(靛)光波段反映植物光合作用色素(叶绿素, 类胡萝卜素)对蓝光的吸收特征^[22]。

3.3 模型构建及精度评价

运用逐步线性回归分别构建 BD、CRDR、BDR、NBDI 与叶绿素含量的回归模型。设置显著性 F 检验的概率值(Use probability of F)采用 spss 中的默认设置, 进入 0.05, 删除 0.10。在构建回归方程时, 需注意入选参数

之间是否具有多重共线性。将入选参数进行共线性诊断,对不符参量($VIF > 10$)进行筛选、剔除,确保参量间不存在多重共线性。

表 2 叶绿素含量估算模型的结果及入选波段

Table 2 The evaluation results of chlorophyll content prediction model from different models

生物参量 Biochemical	光谱数据 Spectral data	物种 Species	入选波段/nm Selected wavebands	R^2	RMSE
叶绿素 Chlorophyll	BD	芦苇	515,735,505,645,730	0.87	0.16
		香蒲	700,740	0.75	0.19
		合并	650,745,570,410	0.74	0.38
	CRDR	芦苇	705,630	0.84	0.18
		香蒲	710,485,600,685	0.83	0.15
		合并	710,580,630,475	0.76	0.37
	BDR	芦苇	465,445,515,670,735	0.86	0.17
		香蒲	740,580,685	0.74	0.19
		合并	665,745,635,410	0.78	0.35
	NBDI	芦苇	545,725,695,720	0.84	0.18
		香蒲	740,580,685	0.74	0.19
		合并	635,410,545,640,735	0.81	0.33

BD: Band depth; CRDR: Continuum-removed derivative reflectance; BDR: Normalised band depth ratio; NBDI: Normalised band depth index

建立估算模型后,为了检验估算模型的可靠性和实用性,采用了交叉验证决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)2个指标对估算模型进行评定(表2)。在叶绿素回归模型中,芦苇的回归模型 R^2 介于0.84—0.87, RMSE 0.16—0.18,其中BD模型具有最大的 R^2 值和最小的RMSE值,是芦苇叶绿素回归的最优模型;香蒲的回归模型 R^2 介于0.74—0.83, RMSE 介于0.15—0.19,其中CRDR模型具有最大的 R^2 值和最小的RMSE值,是香蒲叶绿素回归的最优模型;混合样本的回归模型 R^2 介于0.74—0.81, RMSE 介于0.33—0.38,其中NBDI模型具有最大的 R^2 值和最小的RMSE值,是全部叶绿素回归的最优模型。

为了直观的展示叶绿素含量最优估算模型的拟合度和可靠性,绘制了预测值与实测值之间的1:1关系图,如图4。

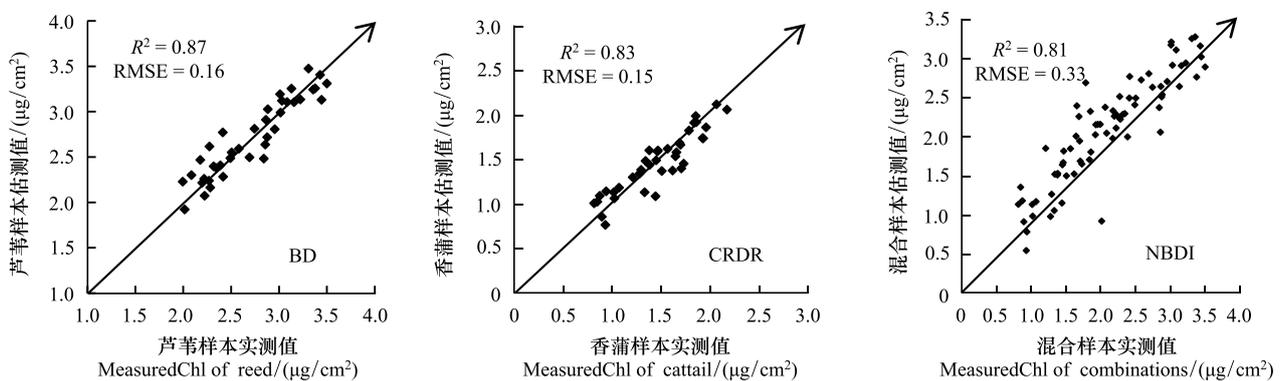


图 4 不同分类条件下叶绿素含量最优模型的实测值与估计值之间的 1:1 关系图

Fig.4 The 1:1 Chl content relationship between the estimated value and measured value in cross validation of optimal model from different data sources

3.4 入选波段

Curran^[11]等研究发现 430nm、460nm、570nm、640nm、660nm、以及红边波段(700—750nm)为可见光范围内生物参量的敏感波段,入选波段位于敏感波段 ± 12 nm 范围,说明该波段具有明确的生理生化因果含义,属于有效波段。考虑到本研究中光谱重采样间隔为 5nm,本文选取 ± 15 nm 作为敏感波段的波动范围。对叶绿素

反演模型入选波段的统计结果如下:

表 3 叶绿素反演模型入选波段统计

Table 3 Frequency of wavebands selected by stepwise regression using four sets of spectral data (BD、CRDR、BDR、NBDI) and their relation with known absorption wavelengths

波段范围 Absorption feature centre	易受生化参量 影响波段/nm Wavelengths of known chemical influence	对应生理 生化参量 Known causal biochemical	参考文献 Reference	入选波段频率(±15nm) Frequency of bands selected
R _{405—520}	430	叶绿素 a	(Curran, 1989; Kumar et al., 2001)	1
	460	叶绿素 b	(Curran, 1989; Kumar et al., 2001)	2
	未分类			7
	合计			10(3)
R _{550—750}	570	叶绿素+氮	(Penuelas et al., 1994)	4
	640	叶绿素 b	(Curran, 1989; Kumar et al., 2001; Curran et al., 2001)	6
	660	叶绿素 a	(Curran, 1989; Kumar et al., 2001; Curran et al., 2001)	3
	(700—750)	叶绿素+氮	(Clevers and Buker, 1991; Curran et al., 1991; Fillella&Penuelas, 1994; Horler et al., 1983; Mutanga et al., in review)	16
	未分类			6
	合计			35(29)

在叶绿素模型中,共有 45 个波段入选,其中在 405—520nm 波段范围内产生 10 个入选波段,仅有 3 个波段具有明确生理生化含义。550—750nm 波段范围内共产生了 35 入选波段,有效波段为 29 个,占全部波段的 82%以上。说明 550—750nm 波段范围能更有效的反映植物叶片的叶绿素含量。

相关研究发现 680nm 附近是色素的强吸收波段,被广泛用于植被生化参量估算模型的构建^[23-24];550—580nm 属于绿光波段,该波段范围内的许多光谱指数与叶绿素和氮具有较好的相关关系^[8,25];而 700—750nm 波段属于红边波段,这些波段是生化参量的敏感波段^[26]。这些相关研究所利用的光谱波段与本研究具有一定的相似性,说明一些关键波段在植被研究中具有普遍适用性。

3.5 模型的影响因素分析

在叶面尺度下,生物参量叶绿素含量的估测模型中哪些因素对于模型的回归精度影响较大,为了探索这个问题,本文利用独立多样本的非参数检验“Kruskal-Wallis”检验和多因子方差分析计算模型精度评价指标 R^2 和 RMSE,推断模型的衍生光谱类型(CRDR、BD、BDR、NBDI)、数据类型(单一物种、混合物种)、物种差异(芦苇、香蒲)及其交互作用对于模型反演结果的影响。结果如表 4 所示:

表 4 反演模型影响因素分析结果

Table 4 The results of non-parametric Kruskal-Wallis test and multiple factor variance analysis on the evaluation indicators R^2 and RMSE for regression models

ANOVA type	影响因子 Factors	R^2		RMSE	
		显著性 p	因子等级 Rank performance	显著性 p	因子等级 Rank performance
K-W 检验	光谱类型	0.955	CRDR>(BD、NBDI、BDR)	0.955	CRDR<(BD、NBDI、BDR)
Kruskal-Wallis test	物种差异	0.019	芦苇>香蒲	0.234	芦苇<香蒲
	数据类型	0.304		0.006	单一物种<合并物种
多因子方差分析	光谱类型	0.973		0.632	
Multiple factor	数据类型	0.444		0.000	
variance analysis	光谱类型-数据类型	0.840		0.258	

从表4可以看出,对于湿地植物野外光谱数据,衍生光谱数据所对应的 R^2 和RMSE概率 p 值分别为:0.955和0.955,均远大于显著性水平(0.05),说明不同标准化处理获取的包络线去除光谱对于叶绿素估算模型的影响不显著,但总体来说CRDR较其他转换模型具有更好的反演精度;芦苇和香蒲间物种差异所对应的 R^2 概率 p 值为0.019,小于显著性水平,说明芦苇和香蒲的叶绿素反演模型精度存在差异,且芦苇的具有更好的拟合效果,对应的RMSE概率 p 值为0.234,大于0.05,说明芦苇、香蒲间的物种差异对于RMSE的影响不显著,但总的来说芦苇具有更好的反演结果;单一物种与混合物种所对应的 R^2 概率 p 值为0.304,说明该因素对于反演结果影响较小;RMSE概率为0.006,说明水生植被中单一物种较混合物种数据回归结果更接近实测值。而Mutanga等(2003)关于热带牧草类型与多种生化参量的估测模型的研究也进一步证明了单一物种在植被生化参量估测中的优势。因此研究植物光谱特征,判别植物识别的最佳波段,应该作为今后研究的一个重点内容。

多因素方差分析的目的是分析多个控制变量的作用、多个控制变量交互作用以及其他随机作用是否对观察变量的分布产生显著影响。如表4所示,光谱类型、数据类型等影响因素所对应的 R^2 和RMSE的相伴概率分别为0.973、0.632和0.444、0.000,说明基于野外光谱数据建立的反演模型光谱类型的差异对于模型精度的影响较小;而数据类型差异对于模型精度有较大影响。与上述非参数检验结果一致。

从因素交互作用造成模型反演精度差异的检验结果来看,光谱类型和数据类型交互作用对应的 R^2 和RMSE概率值分别0.840和0.258,远大于0.05,说明这两个因素的交互对于叶绿素回归模型的影响较小。

4 结论

本次研究采用奥林匹克公园南园典型湿地挺水植物芦苇和香蒲叶片光谱及实测叶绿素含量数据,利用相关分析与逐步回归分析的统计学分析方法,建立叶面尺度下不同数据源叶绿素含量的估算模型,模型精度验证采用舍一交叉验证的方法,并在此基础上利用独立样本非参数检验和多因子方差分析,探讨相关因素对于叶绿素估算模型精度的影响。结论如下:

(1)通过对入选波段的统计表明,在叶绿素含量估测模型中71%(45个入选波段中有32个波段位于敏感波段的 $\pm 15\text{nm}$ 内)的入选波段与叶片叶绿素含量具有较好的生化含义,属于有效波段。通过对波段选区区域对比,在405—520nm波段范围内产生10个入选波段,仅有3个波段具有明确生理生化含义,占总数的30%。550—750nm波段范围内共产生了35个入选波段,有效波段为29个,约占总数的83%,说明550—750nm能更有效的反映植物叶片的叶绿素含量,是以后研究的重点波段。

(2)本文选取可见光波段范围内的反射光谱进行生化参量估算模型的构建,并采用舍一交叉法验证构建模型的鲁棒性,结果统计表明叶绿素含量估测模型的交叉验证系数 R^2 介于0.74—0.87, RMSE介于0.15—0.41。说明利用叶面可见光波段反射率反演植物参量,不仅能够避免水分含量对于回归模型的影响,构建的回归模型具有较好的精度。

(3)通过独立多样本的非参数检验“Kruskal-Wallis”检验和多因子方差分析分析反演模型的评价指标 R^2 和RMSE,推断模型的光谱类型、物种差异、数据类型及其交互作用对于模型反演结果的影响,结果表明物种差异、数据类型差异对于叶绿素回归模型的影响较大,而光谱类型差异及光谱数据与数据类型交互作用对于回归模型精度的影响较小。根据上述结论,在后期的研究中利用高光谱进行植物物种区分应该作为研究的一个重点方面。

总的来说,本研究利用叶面反射光谱成功构建了湿地植被叶片生物参量叶绿素含量的反演模型,为后期基于卫星遥感数据进行大面积生物参量监测提供了科学依据,为大范围的生态系统功能特性管理提供一定的参考、借鉴。

致谢:感谢林川、张翼然、段光耀、杨典华、袁德阳、尹川、朱先芳、熊薇参与了大量野外采样和室内化验分析

工作。

参考文献 (References):

- [1] 邓祥元, 高坤, 张丽娟. 桑叶叶绿素光谱特征及其含量测定的初步研究. *安徽农业科学*, 2010, 38(31): 17423-17424, 17426-17426.
- [2] Goetz S J, Prince S D. Remote sensing of net primary production in boreal forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(3/4): 149-179.
- [3] 王纪华, 赵春江, 黄文江. 农业定量遥感基础与应用. 北京: 科学出版社, 2008: 4-5.
- [4] 林川, 宫兆宁, 赵文吉. 叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型. *生态学报*, 2011, 31(22): 6645-6658.
- [5] Dawson T P, Curran P J, North P R J, Plummer S E. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(2): 147-159.
- [6] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 田永超. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展. *遥感学报*, 2003, 7(1): 73-80.
- [7] 王圆圆, 李贵才, 张立军, 范锦龙. 利用偏最小二乘回归从冬小麦冠层光谱提取叶片含水量. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1070-1074.
- [8] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(3): 199-211.
- [9] 颜春燕, 牛铮, 王纪华, 刘良云, 黄文江. 光谱指数用于叶绿素含量提取的评价及一种改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型. *遥感学报*, 2005, 9(6): 742-750.
- [10] Kokaly R F, Clark R N. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3): 267-287.
- [11] Curran P J, Dungan J L, & Peterson D L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76, 349-359.
- [12] Bortolot Z J, Wynne R H. A method for predicting fresh green leaf nitrogen concentrations from shortwave infrared reflectance spectra acquired at the canopy level that requires no in situ nitrogen data. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 619-624.
- [13] Gitelson, A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(12): 2691-2697.
- [14] Mutanga O, Skidmore A K, Kumar L, Ferwerda J. Estimating tropical pasture quality at canopy level using band depth analysis with continuum removal in the visible domain. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(6): 1093-1108.
- [15] Deng Z Z. On Water System and Rainwater Harvesting System in Beijing Olympic Green. Beijing: China Water Power Press, 2009: 54-88.
- [16] 宫兆宁, 赵雅莉, 赵文吉, 林川, 崔天翔. 基于光谱指数的植物叶片叶绿素含量的估算模型. *生态学报*, 2014, 34(20): 5736-5745.
- [17] 崔勤, 李新丽, 翟淑芝. 小麦叶片叶绿素含量测定的分光光度计法. *安徽农业科学*, 2006, 34(10): 2063-2063.
- [18] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [19] Mutanga O, Skidmore A K. Continuum-removed absorption features estimate tropical savanna grass quality in situ//Proceedings of the 3rd Earsel Workshop on Imaging Spectroscopy. Germany: EARSeL, Hersching, 2003: 13-16.
- [20] Mutanga O, Skidmore A K, Prins H H T. Predicting in situ pasture quality in the Kruger National Park, South Africa, using continuum-removed absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 393-408.
- [21] Carter G A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 1993, 80(3): 239-243.
- [22] 刘克, 赵文吉, 郭道宇, 胡德勇, 宫兆宁, 龙娟. 野鸭湖典型湿地植物光谱特征. *生态学报*, 2010, 30(21): 5853-5861.
- [23] Katz J J, Dougherty R C, Boucher L J. 7-Infrared and nuclear magnetic resonance spectroscopy of chlorophyll. *The Chlorophylls*, 1996: 185-251.
- [24] Peñuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, Merino J, Field C B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 135-146.
- [25] Buschmann C, Nagel E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(4): 711-722.
- [26] Lichtenthaler H K. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plants. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(1/2): 4-14.