

PROSPECT模型的特征波长优化与作物叶绿素含量检测

张俊逸^{1,2}, 高德华¹, 宋迪¹, 乔浪¹, 孙红¹, 李民赞^{1*}, 李莉¹

1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083
2. 河南牧业经济学院能源与智能工程学院, 河南 郑州 450046

摘要 叶绿素是作物生长诊断的重要参数, 对其进行高效检测是农田精细化管理的基础。PROSPECT模型是作物光谱学检测研究的重要工具, 可为建立高精度叶绿素诊断模型提供数据集基础。为了建立具有普适性的田间玉米作物叶绿素含量检测模型, 使用PROSPECT模型输入叶片结构参数和生化参数模拟叶片400~2500 nm波段反射率曲线10650条。在其他参数设置保持不变的情况下, 分析光谱反射率曲线对叶绿素含量参数的敏感性, 结果显示叶绿素含量仅在400~780 nm区间对光谱反射率曲线产生影响。讨论了3种叶绿素检测特征波长筛选策略, 分别为: 根据敏感性分析结果, 选出548~610和694~706 nm区域共计76个波长, 记为SEN-BAND; 基于反向区间偏最小二乘法(Bi-PLS)筛选5个区间共计91个波长, 记为BP-BAND; 基于连续投影算法(SPA), 在叶绿素影响区域400~780 nm筛选10个特征波长, 记为SPA-BAND。进而使用2019年、2020年两年期田间实测玉米叶片光谱反射率曲线和叶绿素含量数据, 分别应用上述3种方法选取的特征波长构建玉米叶片叶绿素含量检测模型。结果显示, 使用SPA-BAND特征波长构建的模型, 在两年期数据中均得到最佳结果。2019年数据模型建模集决定系数(R_c^2)为0.8156, 建模集均方根误差RMSEC为2.9086, 验证集决定系数(R_v^2)为0.7995, 验证集均方根误差RMSEV为2.9977。2020年数据模型建模集决定系数(R_c^2)为0.9492, 建模集均方根误差RMSEC为0.9768, 验证集决定系数(R_v^2)为0.9102, 验证集均方根误差RMSEV为1.5629。表明, 基于PROSPECT模型筛选叶绿素含量特征波长建立的叶绿素诊断模型具有普适性。

关键词 PROSPECT模型; 叶绿素; 波长筛选; SPA; Bi-PLS; PLSR

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)05-1514-08

引言

叶绿素进行光合作用对作物的生长至关重要。快速检测玉米冠层叶片叶绿素含量对评价其长势与田间水肥管理决策具有现实意义^[1]。相比于传统的破坏式采样与实验室叶绿素测定的方法, 光谱分析技术因其无损和高效的优点, 已经在作物叶绿素、水分、氮素等含量的检测中得到了广泛的应用^[2-4]。

围绕玉米叶绿素含量检测相关研究发现, 叶绿素a的吸收峰位于435, 670~680和740 nm, 叶绿素b的吸收峰位于480和650 nm^[5]。根据叶绿素的光谱吸收特性, 古东东等^[6]利用640, 660和910 nm三个波长漫反射技术设计了实验装

置, 并选取了3种玉米品种构建回归模型。Qi等^[7]通过在可见光与近红外波段构建NDSI(R-520, R-528), RSI(R-748, R-561), DSI(R-758, R-602)和SASI(R-753, R-624)植被指数, 构建了高精度花生叶片叶绿素含量反演模型。董哲等^[8]使用550, 705, 710, 750和760 nm的波长构建植被指数, 建立玉米叶片叶绿素含量指标(SPAD值)估算模型得到了较好的结果。上述研究表明特征波长是建立高精度叶绿素含量光谱学诊断模型的基础。然而Li等^[9]研究指出在不同空间尺度、种植密度、生育阶段和含水量等因素的影响下, 玉米冠层结构变化会影响反射光谱响应特性, 限制基于冠层光谱特征变量构建的检测模型在田间应用的鲁棒性和普适性。

基于叶片内部辐射传输机制的PROSPECT模型可以模拟不同生化含量和叶肉结构叶片光谱, 一方面它可以提供大

收稿日期: 2021-03-25, 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题(2018YFD0300505-1), 国家自然科学基金项目(31971785, 31971786), 中国农业大学研究生教学改革建设项目(JG2019004, YW2020007, JG202026)资助

作者简介: 张俊逸, 1988年生, 中国农业大学信息与电气工程学院博士研究生 e-mail: junyizh@cau.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: limz@cau.edu.cn

量的数据集,提高建模的鲁棒性;另一方面,模型输入参数可控,降低了反射光谱的干扰因素,被用于叶片结构参数和叶绿素等色素体的光谱学反演^[10]。雷祥祥等^[11]利用 PROSPECT 模型拟合了三种叶片的反射率光谱,进而反演了叶片的叶绿素含量和 SPAD 值。针对田间采集的作物光谱样本集小导致的叶绿素诊断模型精度不高的问题,吕杰等^[12]通过 PROSPECT 模型模拟玉米光谱和所对应的叶绿素含量建立训练数据集,建立基于支持向量机的估测模型,经实测数据集验证,叶绿素含量实测值与叶绿素含量估测值高度相关($R^2=0.871$)。Verrelst 等^[13]以 PROSPECT+SAIL 模型为基础,基于主动学习算法构建了叶绿素和 LAI 反演模型,模型决定系数均在 0.9 以上。尽管这些研究表明了基于 PROSPECT 模型反演田间作物叶绿素含量的可行性,但是 PROSPECT 基于“平板假设”而提出,它简化了实际田间土壤背景与植株结构对冠层叶片光谱的影响因素和剔除过程。利用 PROSPECT 模拟反射光谱并用于大田玉米冠层叶片叶绿素含量检测时,是否可以通过特征波长寻优进一步提高其检测精度和应用普适性值得深入讨论和验证。因此,本研究利用 PROSPECT 模型在多变量因素下构建叶片反射率光谱,基于敏感性分析,筛选并对比叶绿素含量的敏感响应特征波长,通过两年期数据构建叶绿素含量 PLS 检测模型,以验证光谱筛选的特征在叶绿素含量检测中的普适性。通过叶绿素含量检测模型绘制田间叶绿素动态分布图,以期为田间精细化施肥提供指导依据。

1 实验部分

1.1 田间光谱数据采集与生化参数测定

实验分别于 2019 年 8 月及 2020 年 8 月在河北省衡水市旱作所实验基地进行,试验田大小为 30 m×40 m,分 72 个样区,分为六种施肥等级,施肥量分别为: A1: N-0 kg·ha⁻¹, P-0 kg·ha⁻¹; A2: N-90 kg·ha⁻¹, P-60 kg·ha⁻¹; A3: N-180 kg·ha⁻¹, P-120 kg·ha⁻¹; A4: N-360 kg·ha⁻¹, P-240 kg·ha⁻¹; A5: N-540 kg·ha⁻¹, P-360 kg·ha⁻¹; A6: N-720 kg·ha⁻¹, P-480 kg·ha⁻¹。每个小区中心点采样,2019 年和 2020 年各获取 72 个样本数据。田间玉米叶片反射率测量采用 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 便携式地物光谱仪,光谱范围为 325~1 075 nm,分辨率<3.0 nm。同时采集对应的叶片,密封带回实验室,利用紫外分光光度法测定叶片叶绿素和胡萝卜素含量。叶绿素含量真值用于建立检测模型,胡萝卜素含量真值作为 PROSPECT 模型的输入参数以输出理论光谱曲线。

化学测定中,去除玉米叶片主茎,剪碎、混匀并称取 0.4 g,用浓度为 95% 的乙醇溶液 40 mL 浸泡至完全褪绿,浸泡过程中摇晃 2~3 次,加速色素的提取。用分光光度计测量玉米叶片萃取液 470, 649 和 665 nm 三个波段的吸光度值。利用式(1)~式(4)计算玉米叶片叶绿素含量及胡萝卜素含量

$$c_a = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649} \quad (1)$$

$$c_b = 24.94 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665} \quad (2)$$

$$c_{ab} = c_a + c_b \quad (3)$$

$$c_{ar} = (1\ 000 \times A_{470} - 2.05 \times c_a - 114.8 \times c_b) \div 245 \quad (4)$$

其中, A_{470} , A_{649} 和 A_{665} 分别是玉米叶片萃取液在 470, 645 和 663nm 处的吸光度值, c_a 为叶绿素 a 的含量, c_b 为叶绿素 b 的含量, c_{ab} 为叶绿素总量, c_{ar} 为胡萝卜素含量。

1.2 光谱数据模拟

1.2.1 基于 PROSPECT 模型的反射光谱模拟

PROSPECT 模型根据输入叶片生化参数(叶绿素 c_{ab} 、胡萝卜素 c_{ar} 、花青素 c_{anth} 、棕色素 c_{brown} 、等效水含量 c_w 和干物质含量 c_m)和结构参数(N)模拟叶片定向半球反射率和透射率。本工作应用改进的 PROSPECT-D 模型^[14]模拟玉米叶片在不同生化参数和结构参数下 400~2 500 nm 的理想反射率曲线。PROSPECT-D 模型对每种颜料的特定吸收系数进行校准外,添加了花青素含量参数(c_{anth})。进行光谱反射率模拟时的参数取值范围如表 1 所示,根据不同参数对光谱反射率影响的大小不同,设置相应步长取值,模拟不同输入参数下的反射率曲线。

表 1 PROSPECT 模型输入参数

Table 1 Input parameters of PROSPECT model

参数	符号	单位	光谱模拟参数范围	步长
结构参数	N		(1, 5)	1
叶绿素含量	c_{ab}	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	(10, 80)	1
胡萝卜素含量	c_{ar}	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	4.37	
花青素含量	c_{anth}	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	(1, 2)	0.2
棕色素	c_{brown}		0	
等效水含量	c_w	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.015	
干物质含量	c_m	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	(0.005, 0.025)	0.005

1.2.2 PROSPECT 模型叶绿素敏感度分析

研究通过敏感性分析确定反射光谱中对叶绿素含量变化响应强烈的波段区间。基于 PROSPECT 模型的敏感度计算公式为

$$S = \sum_i^{n-1} \frac{|R_i - R_{i+1}|}{R_i} \quad (5)$$

式(5)中, i 为 PROSPECT 模型输入参数叶绿素含量, R_i 为叶绿素含量为 i 时的光谱反射率。使用 PROSPECT 模型进行叶绿素含量敏感度分析时,叶绿素含量参数取值区间为 10~100 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 其他参数根据经验取模型的输入初始值^[10]。

1.3 光谱预处理

分别对大田采集的冠层叶片光谱和 PROSPECT 模型输出的反射光谱进行预处理。针对大田环境,由于玉米冠层叶片表面不均匀导致的反射光程不同、光散射等原因产生的光谱噪声,使用小波分解去噪的方式消除。首先,对光谱数据进行小波分解,选择 DB4 小波基函数进行 5 层分解。分解后,仅保留第五层低频小波系数进行重构,得到去噪后的光谱反射率曲线。然后,分别对小波去噪后的实测反射率曲线和 PROSPECT 模型输出的反射率曲线采用标准正态变量(standard normal variate, SNV)方法进行预处理,消减散射效应引入的噪声。

1.4 叶绿素含量敏感特征波长筛选

叶绿素含量检测的特征波长是建立检测模型的基础。以 1.2.2 节所确定的 PROSPECT 模型叶绿素敏感响应区域为基础, 筛选用于叶绿素含量检测的特征波长, 包括: 基于敏感度选择、基于反向区间偏最小二乘法 (backward interval PLS, Bi-PLS) 和基于连续投影算法 (successive projections algorithm, SPA) 的三种方法。其中, Bi-PLS 将全波段均匀的分成 N 个区间, 循环判别均方根误差 (root mean square error, RMSE) 结果并减少区间数量, 当均方根误差 RMSE 最小时所剩余的区间, 为与叶绿素含量敏感且建模误差最小的特征区间。SPA 是一种使矢量空间共线性最小化的前向变量选择算法, 其优势在于提取全波段的几个特征波长, 能够消除原始光谱矩阵中冗余的信息, 用于确定具体的特征波长位置。

1.5 样本集划分与检测模型构建

使用排序法划分建模集和验证集, 建模集与验证集样本数量比例为 2:1。基于 PROSPECT 模型筛选的特征区间与特征波长, 使用偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR) 在真实数据集中构建叶绿素含量检测模型, 并用决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 评价模型效果。以上 PROSPECT 模型、光谱预处理、特征筛选与建模的算法均基

于 MATLAB2020 软件编程实现。

2 结果与讨论

2.1 PROSPECT 模型叶绿素敏感度分析及光谱反射率模拟

在 $10 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 参数取值区间进行叶绿素含量敏感度分析。在 $400 \sim 2500 \text{ nm}$ 区域内, 当叶绿素含量发生变化而其他参数保持不变时, 结果如图 1(a) 所示, $400 \sim 780 \text{ nm}$ 区间的光谱反射率强度随着叶绿素含量的增加而降低; 在 $780 \sim 2500 \text{ nm}$ 区间, 光谱反射率与叶绿素变化响应无关。其中, $400 \sim 780 \text{ nm}$ 是 PROSPECT 模型叶绿素响应的敏感区域, 且存在两个高敏感区间, 如图 1(b) 所示分别为以 570 nm 为中心的绿-黄光区域和以 700 nm 为中心的红光区域。敏感性分析结果说明在其他参数不变的情况下, 叶绿素含量变化敏感的波长位于 $400 \sim 780 \text{ nm}$ 范围。

田间样本实测胡萝卜素含量最大值为 $4.94 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 最小值为 $3.6 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 标准差为 $0.175 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 研究中取胡萝卜素含量平均值 $4.37 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 作为 PROSPECT 模型的输入参数。结合叶绿素敏感性分析结果, 依照表 1 确定取值范围, 共模拟出 10 650 条不同输入参数下的光谱反射率曲线。

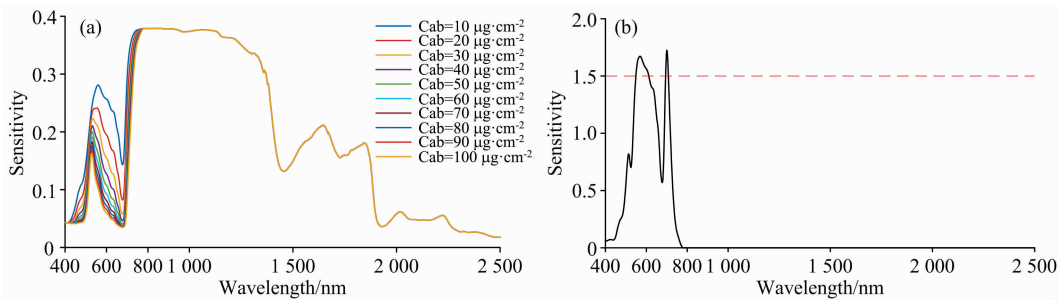


图 1 PROSPECT 模型叶绿素敏感性分析

(a): 不同叶绿素含量反射率曲线; (b): 叶绿素含量敏感性分析结果

Fig. 1 Sensitivity analysis of chlorophyll content using PROSPECT model

(a): Reflectivity curves for different chlorophyll contents;

(b): Sensitivity analysis of chlorophyll content

2.2 田间实测光谱反射率预处理

田间实测 2019 年和 2020 年玉米植株冠层叶片原始反射光谱如图 2(a, b) 所示, 观察可知光谱曲线存在严重的噪声信息。经过小波分解重构处理后光谱曲线的噪声点明显消减, 如图 2(c, d) 所示; 但是样本间反射光谱存在严重的散射效应, 经过 SNV 校正后光谱曲线的离散性显著较小, 如图 2(e, f) 所示。

小波分解平滑结合 SNV 校正后的 2019 年和 2020 年玉米冠层叶片光谱曲线如图 2(e, f) 所示, 总体而言, 在可见光波段, 由于叶片色素对蓝、红光的强吸收, $400 \sim 500 \text{ nm}$ 与 $611 \sim 710 \text{ nm}$ 存在低反射率区, 并在 400 和 680 nm 附近出现吸收谷。由于叶片色素对绿光的强反射, $520 \sim 610 \text{ nm}$ 为高反射区, 并在 550 nm 附近出现反射峰。近红外区域, 由于叶肉的海绵组织结构内有很大的反射表面空腔, 所以 $711 \sim 760 \text{ nm}$ 反射率陡增, 呈现“快速攀升”趋势; 在 $761 \sim 1000 \text{ nm}$ 为

强反射区, 曲线呈现“高反射平台”, 并由于水分的吸收在 970 nm 附近出现微弱的吸收谷。

2.3 基于 PROSPECT 模型的叶绿素含量检测特征波长筛选

PROSPECT 模型在 $400 \sim 780 \text{ nm}$ 区间, 分别应用叶绿素敏感性分析、Bi-PLS 和 SPA 方法筛选叶绿素特征波长。首先, 以叶绿素含量敏感性 1.5 为阈值, 如图 3(a) 所示, 筛选出 $548 \sim 610$ 和 $694 \sim 706 \text{ nm}$ 两个波段共计 76 个波长记为 SEN-BAND。其次, 基于 Bi-PLS 以 RMSE 作为评价指标筛选叶绿素含量敏感波段, RMSE 最小时得到 5 个敏感波段, 如图 3(b) 所示分别是 $514 \sim 532$, $533 \sim 551$, $590 \sim 608$, $647 \sim 665$ 和 $723 \sim 741 \text{ nm}$, 记作 BP-BAND。再者, 基于 SPA 算法, 在 $400 \sim 780 \text{ nm}$ 区间筛选出 10 个作为叶绿素含量敏感波长 (记为 SPA-BAND), 如图 3(a) 中红色圈所示。统计三种特长波长的筛选结果如表 2 所示。

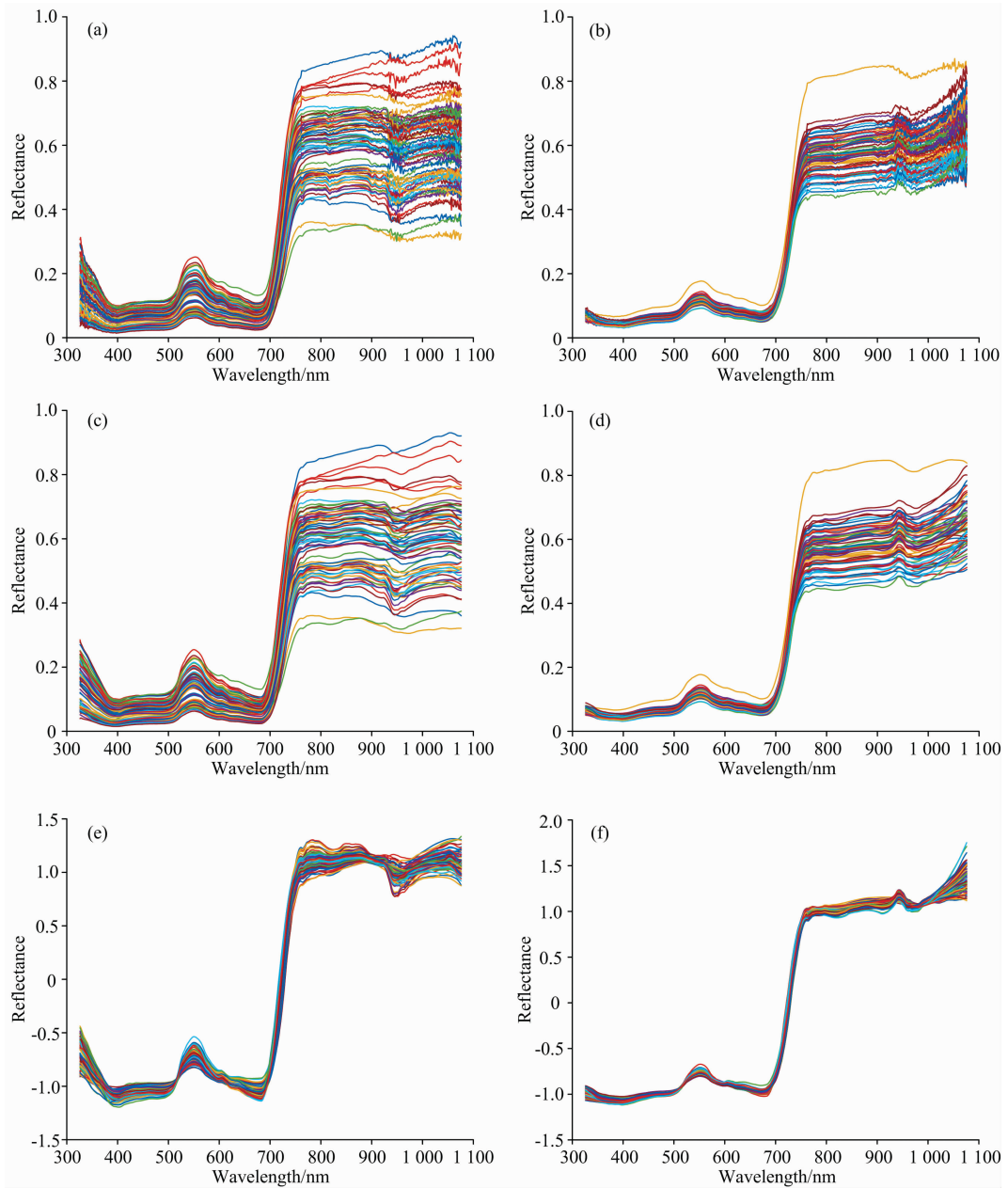


图 2 实测光谱反射率曲线

(a): 2019 年实测光谱曲线; (b): 2020 年实测光谱曲线; (c): 小波去噪后的 2019 年光谱曲线;
 (d): 小波去噪后的 2020 年光谱曲线; (e): SNV 处理后的 2019 年光谱曲线; (f): SNV 处理后的 2020 年光谱曲线

Fig. 2 The measured reflectivity spectra

(a): Measured in 2019; (b): Measured in 2020; (c): Wavelet denoised spectra in 2019;
 (d): Wavelet denoised spectra in 2020; (e): SNV processed spectra in 2019; (f): SNV processed spectra in 2020

2.4 实测数据建模及验证结果

基于筛选的 SEN-BAND, BP-BAND, SPA-BAND, 分别使用 2019 年和 2020 年的田间实测数据, 建立 PLSR 回归模型, 建模及验证结果如表 3 所示。2019 年数据集中, 使用 SPA-BAND 构建的 PLS 模型效果最好, 建模集决定系数 R^2 为 0.815 6, RMSEC 为 2.908 6; 验证集决定系数 R^2 为 0.799 5, RMSEV 为 2.997 7。2020 年数据集中, 使用 BP-BAND 构建的 PLS 模型建模集效果最好, 但是验证集精度

较 SPA-BAND 构建的模型有较大差距, 综合建模集与验证集的效果来看, 基于 SPA-BAND 构建的 PLS 模型总体效果最佳, 建模集和验证集均表现出较高的精度, 且建模集决定系数与验证集决定系数较为接近, 体现出模型较好的稳定性。2020 年数据集 SPA-BAND 构建的模型建模集决定系数 R^2 为 0.949 2, RMSEC 为 0.976 8; 验证集决定系数 R^2 为 0.910 2, RMSEV 为 1.562 9。

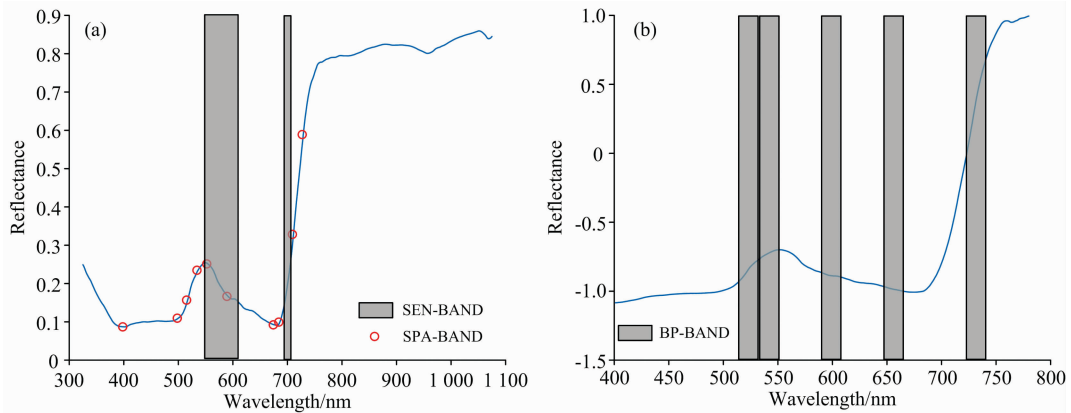


图 3 特征波段筛选结果

(a): SEN-BAND, SPA-BAND; (b): BP-BAND

Fig. 3 Sensitive band filtering results

(a): SEN-BAND, SPA-BAND; (b): BP-BAND

表 2 特征波段分布统计

Table 2 Statistics of sensitive band distribution

特征	敏感波段/nm
SEN-BAND	548~610, 694~706
BP-BAND	514~532, 533~551, 590~608, 647~665, 723~741
SPA-BAND	400, 500, 517, 536, 554, 591, 676, 686, 711, 729

表 3 叶绿素含量 PLS 检测模型结果统计

Table 3 Detection results of PLS model of the chlorophyll content

数据集	特征波长	变量个数	R_c^2	RMSEC	R_v^2	RMSEV
2019 年数据集	SEN-BAND	76	0.806 2	2.981 6	0.727 0	3.643 5
	BP-BAND	95	0.812 8	2.930 0	0.755 5	3.508 0
	SPA-BAND	10	0.815 6	2.908 6	0.799 5	2.997 7
2020 年数据集	SEN-BAND	76	0.860 2	1.621 4	0.792 0	1.785 6
	BP-BAND	95	0.962 5	0.839 7	0.803 4	2.014 6
	SPA-BAND	10	0.949 2	0.976 8	0.910 2	1.562 9

比较三种变量筛选方法可知, 基于敏感性分析筛选的 SEN-BAND 波段体现了基于理论机理的叶绿素含量变化对反射率的影响波段, 基于 Bi-PLS 算法筛选的 BP-BAND 波段体现了基于统计特征的叶绿素含量反演特征波段。但是, 两种方式筛选出的相邻波长数量过多, 特征波段之间存在多重共线性, 易导致建模回归的显著性降低^[15]。同时, 过多的特征数量也容易导致模型的过拟合, 影响模型的精度。从模型结果也可以看出, 使用 SEN-BAND 和 BP-BAND 构建的模型, 建模集决定系数和验证集决定系数之间的差值相比于使用 SPA-BAND 构建的模型较大。与之相对, SPA 算法筛选出的特征波长离散性较好, 不仅涵盖了敏感性分析和统计分析筛选的特征波段区间, 也涵盖了 400 和 500 nm 的蓝光区域和 680 nm 附近的“红谷”区域。其中 400~520 nm 的蓝光

区域叶绿素与类胡萝卜素吸收比例最大, 对光合作用影响最大, 而 680 nm 附近的“红谷”区域也是叶绿素的强吸收区域, 因此 SPA 算法筛选的特征波长包含了更多叶绿素含量的关键信息, 提高了模型的检测精度。综上所述, 基于 PROSPECT 模型筛选出的 SPA-BAND 特征波长, 在不同年份的实测数据集中均得到较为理想的检测结果, 具有普适性。基于 SPA-BAND 特征波长的 2019 年和 2020 年建模及验证结果如图 4 所示。

2.5 田间叶绿素动态分布

针对如图 5(a) 所示的 3 列 24 行共 72 个样区, 根据 SPA-BAND 建立 2019 年和 2020 年叶绿素含量检测模型, 并绘制田间叶绿素动态分布图分别如图 5(b) 和 (c) 所示。两年的叶绿素分布显示中间列及右侧列的上部和下部小区, 玉米叶绿素均存在含量较低现象, 证明该区域玉米长势较差, 有待进行施肥管理。由此说明通过该叶绿素检测模型, 可以有效掌握田间叶绿素分布情况, 对指导田间水肥精细化管理, 具有现实意义。

3 结论

使用 PROSPECT 模型进行了叶绿素含量对光谱反射率曲线的敏感性分析, 并模拟了不同输入参数下的反射率曲线, 基于敏感性分析、SPA 及 Bi-PLS 三种方法分别筛选特征波长, 应用 2019 年及 2020 年田间实测数据建立了玉米叶绿素含量检测模型并进行了验证。主要结论如下:

通过 PROSPECT 模型敏感性分析可知, 叶绿素含量变化对光谱反射率曲线的影响, 主要集中在 400~780 nm 以内的可见光区域, 对于 780 nm 以后的红外光区域, 在没有其他因素影响的情况下, 叶绿素含量的变化不会对光谱反射率造成影响。

对比三种变量筛选方法, 基于 SPA 算法筛选叶绿素含量检测敏感波长在两年期的实测数据集中具有良好的表现, 其中 2019 年数据建模集决定系数 (R_c^2) 为 0.815 6, 建模集均方根误差 RMSEC 为 2.908 6, 验证集决定系数 (R_v^2) 为 0.799 5,

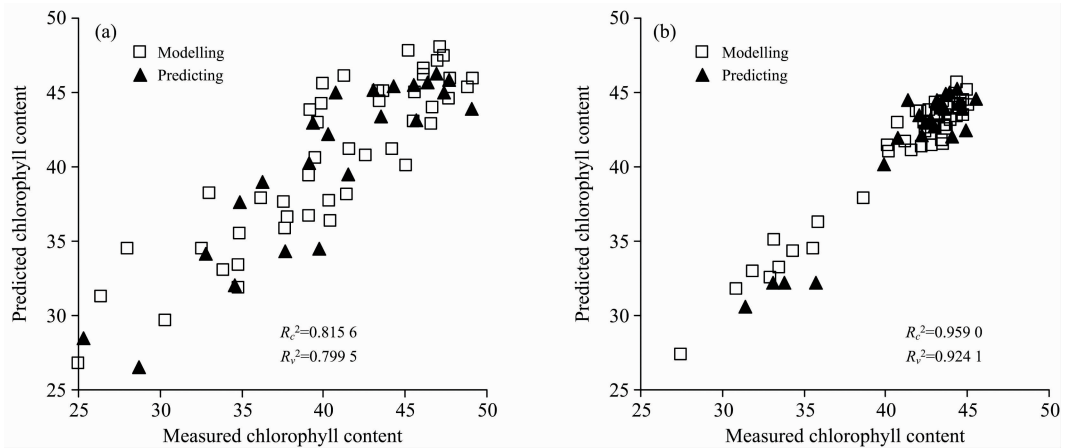


图 4 基于 SPA-BAND 敏感波长的 2019 年及 2020 年建模和验证结果

(a): 2019 年建模和验证结果; (b): 2020 年建模和验证结果

Fig. 4 Modeling and verification results with SPA-BAND sensitive bands in 2019 and 2020

(a): In 2019; (b): In 2020

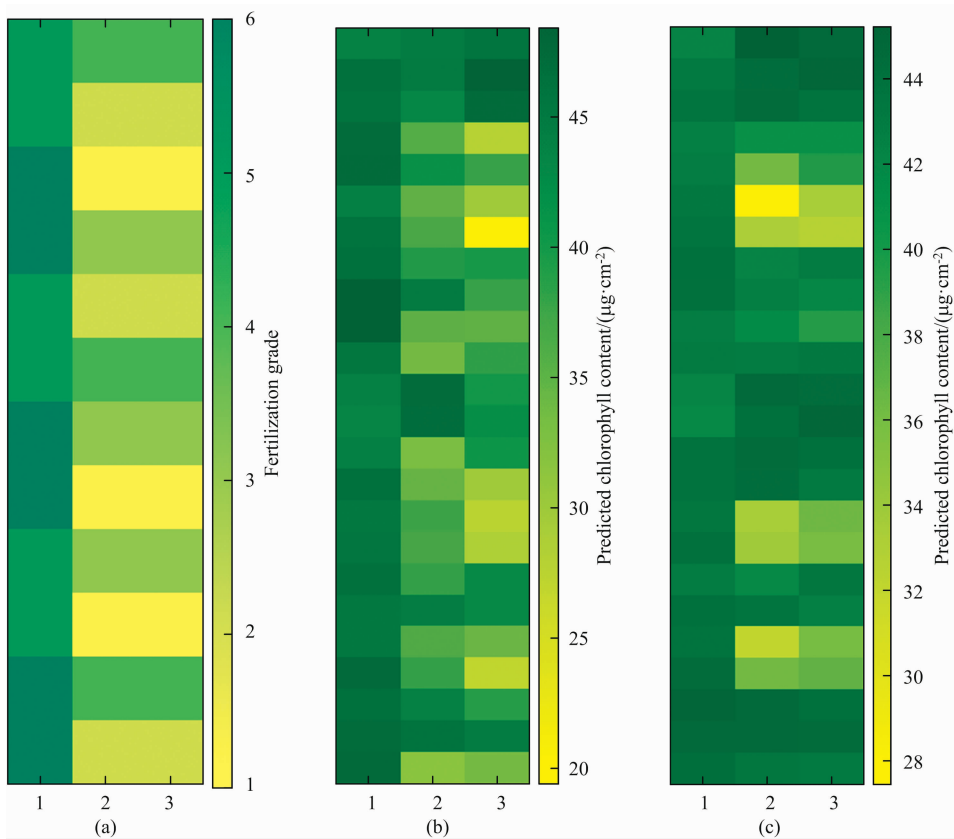


图 5 基于 PLSR 模型的田间叶绿素动态分布结果

(a): 田间施肥等级分布; (b): 2019 年田间叶绿素分布; (c): 2020 年田间叶绿素分布

Fig. 5 Dynamic chlorophyll distribution results based on PLSR model

(a): Field fertilization distribution; (b): Detected distribution in 2019; (c): Detected distribution in 2020

验证集均方根误差 RMSEV 为 2.997 7; 2020 年数据建模集决定系数 (R^2) 为 0.949 2, 建模集均方根误差 RMSEC 为 0.976 8, 验证集决定系数 (R^2) 为 0.910 2, 验证集均方根误差

差 RMSEV 为 1.562 9。

通过绘制田间叶绿素分布图, 可分析田间施肥与作物营养差异, 对田间精细化管理具有指导意义。

References

- [1] HE Yong, PENG Ji-yu, LIU Fei, et al(何勇, 彭继宇, 刘飞, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(3): 174.
- [2] WANG Hao-yun, CAO Xue-lian, SUN Yun-xiao, et al(王浩云, 曹雪莲, 孙云晓, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2021, 52(3): 202.
- [3] WANG Qi, SONG Xiao-yu, YANG Gui-jun, et al(王琦, 宋晓宇, 杨贵军, 等). China Agriculture Information(中国农业信息), 2018, 30(6): 35.
- [4] SUN Hong, CHEN Xiang, SUN Zi-chun, et al(孙红, 陈香, 孙梓淳, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2018, 49(3): 173.
- [5] QIU Nian-wei, WANG Xiu-shun, YANG Fa-bin, et al(邱念伟, 王修顺, 杨发斌, 等). Chinese Bulletin of Botany(植物学报), 2016, 51(5): 667.
- [6] GU Dong-dong, WANG Wan-zhang, HU Jian-dong, et al(古冬冬, 王万章, 胡建东, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(S2): 179.
- [7] Qi Haixia, Zhu Bingyu, Kong Lingxi, et al. Applied Science-Basel, 2020, 10(7): 2259.
- [8] DONG Zhe, YANG Wu-de, ZHANG Mei-jun, et al(董哲, 杨武德, 张美俊, 等). Crops(作物杂志), 2019, 190(3): 132.
- [9] Li Dong, Chen Jingming, Zhang Xiao, et al. Remote Sensing of Environment, 2020, 248: 111985.
- [10] Berger Katja, Atzberger Clement, Danner Martin, et al. Remote Sensing, 2018, 10(1): 85.
- [11] LEI Xiang-xiang, ZHAO Jing, LIU Hou-cheng, et al(雷祥祥, 赵静, 刘厚诚, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(10): 3256.
- [12] LÜ Jie, WANG Kang-ning, LI Chong-gui, et al(吕杰, 汪康宁, 李崇贵, 等). Journal of China University of Mining & Technology(中国矿业大学学报), 2016, 45(2): 405.
- [13] Verrelst Jochem, Dethier Sara, Rivera Juan-Pablo, et al. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(7): 1012.
- [14] Feret J B, Gitelson A A, Noble S D, et al. Remote Sensing of Environment, 2017, 193: 204.
- [15] CHENG Jie-hong, CHEN Zheng-guang, ZHANG Qing-hua(程介虹, 陈争光, 张庆华). Journal of Agricultural Science and Technology(中国农业科技导报), 2020, 22(1): 162.

Wavelengths Optimization and Chlorophyll Content Detection Based on PROSPECT Model

ZHANG Jun-yi^{1,2}, GAO De-hua¹, SONG Di¹, QIAO Lang¹, SUN Hong¹, LI Min-zan^{1*}, LI Li¹

1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Energy and Intelligence Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China

Abstract Chlorophyll is an important biochemical parameter involved in crop growth. Accurate detection of chlorophyll in real-time has great significance for the precision management of farmland. The PROSPECT model can simulate the reflectivity and transmissibility of leaf at 400~2 500 nm based on leaf's input structural and biochemical parameters. This study used the PROSPECT model to generate 10 650 reflectivity curves of maize leaf under different input parameters. The sensitivity of the spectral reflectance curve to the chlorophyll content parameter was analyzed when other parameters remained unchanged. The result shows that the chlorophyll content only affects the spectral reflectance curve in the range of 400~780 nm. According to the sensitivity analysis result, 76 wavelengths in 548~610 and 694~706 nm were selected as the characteristic wavelengths of chlorophyll content, which were recorded as SEN-BAND. Based on Backward Interval PLS (Bi-PLS), 5 intervals of 91 characteristic wavelengths were selected, recorded as BP-BAND. Based on the Successive Projections Algorithm (SPA), 10 characteristic wavelengths were selected in chlorophyll-influenced area in 400~780 nm, recorded as SPA-BAND. The PLS detection model of chlorophyll content based on the three characteristic wavelengths was constructed with measured field data in 2019 and 2020. The results show that the SPA-BAND model has the best results in both 2019 and 2020 datasets. In the 2019 dataset, the coefficient of determination (R_c^2) of the modeling set is 0.815 6, the root mean square error (RMSEC) of the

modeling set is 2.908 6, the coefficient of determination (R_v^2) of the validation set is 0.799 5, and the root means square error (RMSEV) of the validation set is 2.997 7. In the 2020 database, the coefficient of determination (R_c^2) of the modeling set is 0.949 2, the root mean square error (RMSEC) of the modeling set is 0.976 8, the coefficient of determination (R_v^2) of the validation set was 0.910 2, and the root means square error (RMSEV) of the validation set was 1.562 9. Therefore, the characteristic wavelength of chlorophyll content can be selected under the influence of multiple factors by constructing spectral reflectance curves with multi-parameter input based on the PROSPECT model and the characteristic wavelengths of chlorophyll content can be verified in multi-year data.

Keywords PROSPECT model; Chlorophyll; Wavelength selection; SPA; Bi-PLS; PLSR

(Received Mar. 25, 2021; accepted Jun. 2, 2021)

* Corresponding author

本 刊 声 明

近期以来,一些不法分子假冒《光谱学与光谱分析》期刊社名义,以虚假网站等形式欺骗广大作者、读者。这些虚假网站公然假冒《光谱学与光谱分析》期刊名义进行大肆的征稿并骗取作者的审稿费和版面费。经部分作者及读者举报,现有有关部门已就此介入调查。本刊将通过法律途径向假冒者追究相应的责任,维护本刊权利。

本刊官方网站已正式开通,网址为

<http://www.gpxygpfx.com/>

在此郑重声明,本网站为《光谱学与光谱分析》期刊唯一开通运行的官方网站。本刊从未授权任何单位或个人以任何形式(包括网上网下)代理本刊征稿、审稿等业务。

希望广大读者和作者切实维护好自身的合法权益,防止受骗上当。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2019年3月15日