

基于高光谱的夏玉米冠层 SPAD 值监测研究

刘露^{1,2}, 彭致功², 张宝忠², 韩玉国¹, 魏征², 韩娜娜²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 开展夏玉米冠层 SPAD 值监测技术研究, 建立叶绿素含量与敏感波段、光谱指数间的定量关系模型, 以促进高光谱技术在玉米快速、无损长势监测及水肥精准管理的应用。以小型蒸渗仪夏玉米光谱反射率与植株冠层 SPAD 值的监测为基础, 研究了夏玉米植株冠层光谱信息与 SPAD 值的响应关系, 并优选出监测夏玉米冠层 SPAD 值的敏感波段与最优光谱指数。结果表明: 夏玉米冠层光谱反射率在可见光波段随玉米冠层 SPAD 值增加而下降, 在近红外波段却与之相反; 采用原始光谱反射率、一阶微分光谱监测夏玉米冠层 SPAD 值的最敏感波段分别为 700, 690 nm, 与 SPAD 值的相关性分别为 $-0.498 (p < 0.05)$ 和 $-0.538 (p < 0.01)$; 而根据多元逐步回归分析获得的最优波段组合由 405, 408, 700 nm 波段构成; 从已报道的 73 个光谱指数中筛选出与夏玉米冠层 SPAD 值相关性较高的 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 、MCARI//OSAVI、TCARI//OSAVI、SDr/SDb 和 MTCI 等 5 个光谱指数, 光谱指数 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 与 SPAD 值的相关性在各生育期均达极显著正相关, 且在全生育期相关系数高达 $0.697 (p < 0.01)$, 进一步优选出监测夏玉米冠层 SPAD 值最适宜的光谱指数为 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$; 在基于敏感波段、光谱指数和最优波段组合建立的夏玉米 SPAD 值的回归模型中, 按照模拟效果由高到低排序依次为最优波段组合、光谱指数、原始光谱反射率、一阶微分光谱, 其决定系数分别为 0.777, 0.539, 0.351, 0.282; 推荐以 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 指数构建的二次多项式模型与基于 405, 408, 700 nm 波段组合建立的线性回归监测模型作为夏玉米植株冠层 SPAD 值光谱监测适宜模型, 且 R^2 大于 0.539, RMSE 及 MAE 分别小于 6.194 和 4.702。

关键词: 夏玉米; 高光谱; 冠层 SPAD 值; 敏感波段; 光谱指数模型

中图分类号: S127; S513 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)01-0353-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.055

Monitoring of Summer Corn Canopy SPAD Values Based on Hyperspectrum

LIU Lu^{1,2}, PENG Zhigong², ZHANG Baozhong², HAN Yuguo¹, WEI Zheng², HAN Nana²

(1. Beijing Forestry University, College of Soil and Water Conservation, Beijing 100083;

2. The State Key Laboratory of Water Cycle Simulation and Regulation in the Watershed of the Chinese Academy of Water Conservancy and Hydropower Sciences, Beijing 100038)

Abstract: This study was an exploration into monitoring technology of summer corn canopy SPAD values. A small lysimeter was used in the experiment to monitor spectral reflectivity of summer corn and SPAD values of plant canopy, which provided the basis for investigation of the responsive relationship between canopy spectral information and SPAD values. From this relationship, the sensitive wave band and the optimum spectral index were determined for the SPAD values of the summer corn under investigation. The findings suggested that the canopy spectral reflectivity decreased with the increase of SPAD values in the visible light band, but increased with the increase of SPAD in the near infrared band. The band to which SPAD was most sensitive was 700 nm and 690 nm when monitoring the original spectrum and the first differential spectrum respectively and the correlations with SPAD values were $-0.498 (p < 0.05)$ and $-0.538 (p < 0.01)$. The multivariate stepwise regression analysis found an optimum band combination of 405 nm, 408 nm, and 700 nm. From 73 published spectral indices, five indices, i. e., $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$, MCARI//OSAVI,

收稿日期: 2018-08-01

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407703); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(ID0145B082017, ID0145B742017, ID0145B492017); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究项目(2016TS06)

第一作者: 刘露(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 18801090061@163.com

通信作者: 彭致功(1975—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事农业用水管理研究。E-mail: pengzhg@iwhr.com

TCARI/OSAVI, SDR/SDb, and MTCI, were chosen because they produced a higher correlation with SPAD values of summer corn canopy. Among the five indices, the most suitable index was found to be $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$, and the correlation coefficient was as high as 0.697 ($p < 0.01$) in the whole growth period. A combinational regression model of SPAD, built from sensitive band, spectral index, and optimum band, produced the following simulation performances in descending order: optimum band combination, spectral index, original spectral reflectivity, and first differential spectrum. A quadratic polynomial model built from $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ index, and a combinational linear regression model built from 405 nm, 408 nm, and 700 nm bands, were recommended as suitable models for spectral monitoring of summer corn canopy SPAD values.

Keywords: summer corn; high spectrum; SPAD value of canopy; sensitive band; spectral index model

叶绿素含量是植物生长过程中一个重要的生化参数,对植被光合能力、发育阶段以及营养状况具有指示作用^[1]。相比传统的叶绿素测定方法,高光谱遥感具有高分辨率光谱信息,能够分辨作物冠层光谱信息的微弱变化,因此可以快速、无损地实时监测作物的养分和生长情况。但基于叶片尺度的高光谱监测只能获得单株植物的叶绿素含量,冠层的叶绿素含量则需要通过遥感来获得。因此,实时观测作物冠层叶绿素含量的变化对作物长势监测、施肥调控与产量评估具有重要意义^[2]。

作物生长特性指标高光谱监测始于 20 世纪末,同期也开展了基于高光谱信息的典型作物叶绿素含量监测研究,分析了植株叶绿素含量与光谱反射率之间的相关性,建立了监测叶绿素含量的光谱指数^[3-4]。张俊华等^[5]对不同施肥条件下夏玉米光谱特征与叶绿素含量和叶面积指数的相关性进行了研究;陈志强等^[6-7]发现在不同年份之间,玉米叶片的 SPAD 值与光谱反射率、一阶微分光谱的相关性最大处的波段位置基本不变;并指出以 LCI、DSI(678, 717) 和 DSI(549, 678) 为基础构建的预测模型可以准确预测玉米穗位叶 SPAD 值; Hunt 等^[8]利用各种植被指数构建了估算作物冠层或叶片叶绿素含量的遥感模型; Gitelson 等^[9]以具有不同冠层结构类型的玉米为研究对象,建立了利用冠层反射率倒数估测叶绿素含量的模型。然而,大多研究仅以单个叶片叶绿素含量与其光谱反射率构建统计模型为主,而考虑冠层叶绿素与冠层光谱反射率构建模型偏少;在利用光谱指数监测植株叶绿素含量方面,也以单一光谱指数监测研究为主,而缺乏多种光谱指数监测效果对比研究。而玉米实际生长中冠层叶绿素含量会受到众多因素的影响,叶绿素与光谱反射率的关系也更为复杂^[10-11],亟待开展多种方法监测效果对比研究,以选取通用性强且模拟精度较高的监测模型,为利用作物冠层光谱信息进行作物冠层叶绿素精准监测提供技术支撑。

本文以夏玉米为研究对象,以手持式地物光谱仪

与 SPAD-502 型叶绿素仪为技术支持,对不同氮肥处理下玉米植株冠层叶绿素含量光谱监测技术进行研究,筛选出诊断夏玉米冠层叶绿素含量的敏感波段及适宜的高光谱估算模型,以期为华北地区高光谱诊断玉米冠层的叶绿素含量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2017 年 6 月 15 日至 9 月 25 日在中国水利水电科学研究院节水灌溉试验研究基地进行,该地属于暖温带半干旱大陆性季风气候,冬春干旱、夏季多雨。年平均降水量 540 mm,平均气温 12.1 °C,平均风速 1.2 m/s,年无霜期平均为 185 d,年平均水面蒸发量在 1 800 mm 以上,年日照时间约 2 600 h。

1.2 试验设计

本研究为小型蒸渗仪试验,试验箱规格(长×宽×高)为 1 m×0.75 m×1 m。土壤为砂壤土,其初始养分状况见表 1。供试玉米品种为“纪元 168”,于 2017 年 6 月 15 日播种,设置株、行距均为 25 cm,每个箱体种植 6 株,于 9 月 25 日收获。共设 4 个氮肥处理,供试肥料为复合肥(含 N 量 15%、含 P₂O₅ 量 15%、含 K₂O 量 15%)、尿素(含 N 量 46%),其中复合肥作为基肥施入,尿素为追肥在拔节—抽雄期施入,每次施肥量分别为 0, 225, 450, 675 kg/hm²,即 N₀、N₁、N₂、N₃ 处理,各处理 3 次重复。在玉米生育期内根据天气情况平均每 7~10 天测定 1 次冠层光谱反射率,并同期监测冠层 SPAD 值。

表 1 土壤初始养分状况

土层深度/cm	初始硝态氮含量/(mg·kg ⁻¹)	初始铵态氮含量/(mg·kg ⁻¹)
0—20	5.558	3.231
20—40	2.803	2.773
40—60	2.288	2.710
60—80	2.534	2.532

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株冠层高光谱的监测 夏玉米生育期内,在

天气晴朗、微风或无风条件下,采用美国 Analytical Spectral Devices (ASD) 公司 Field-Spec HandHeld2 型手持式地物光谱仪监测植株冠层光谱反射率,波段为 325~1 075 nm,采样间隔为 1 nm,分辨率为 3 nm,适宜时间为每天 10:00—14:00。测量过程中,及时采用反射率为 1 的标准白板校正。

1.3.2 植株冠层叶片 SPAD 值的测量 SPAD 值与叶绿素含量显著正相关,可以准确表示植株叶绿素含量^[8]。在田间无损状况下,SPAD-502 型叶绿素仪利用光学原理可以快速地获取植株单位面积叶片当前的叶绿素相对含量,即 SPAD 值^[12]。因此,利用 SPAD-502 型叶绿素仪在夏玉米生育期内与测定植株冠层高光谱反射率同步进行 SPAD 值的观测,将夏玉米冠层展开的第 2,3 叶片作为监测样点,监测时选取叶片中部并避开叶脉,每个样点测量 2 个 SPAD 值。

1.3.3 数据处理与统计分析 通过光谱仪的处理软件将监测的原始光谱反射率数据进行重采样并导出,将同一小型蒸渗仪各样点光谱反射率的算数平均值作为该小型蒸渗仪对应处理的夏玉米冠层的原始光谱反射率,对原始光谱反射率数据求一阶微分,并从一阶微分光谱中提取叶片的红边、蓝边和黄边的参数,用于夏玉米冠层的 SPAD 值与一阶微分光谱的相关性分析。

通过叶绿素仪在夏玉米生育期监测夏玉米冠层 SPAD 值,取同一小型蒸渗仪的所有 SPAD 值的算数平均值作为该小型蒸渗仪对应处理的冠层 SPAD 值。

文中所述相关系数 r 的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: n 为实测次数; x_i 为第 i 个夏玉米冠层的光谱反射率或一阶微分光谱; \bar{x} 为夏玉米冠层的光谱反射率的平均值或一阶微分光谱平均值; y_i 为第 i 个夏玉米冠层

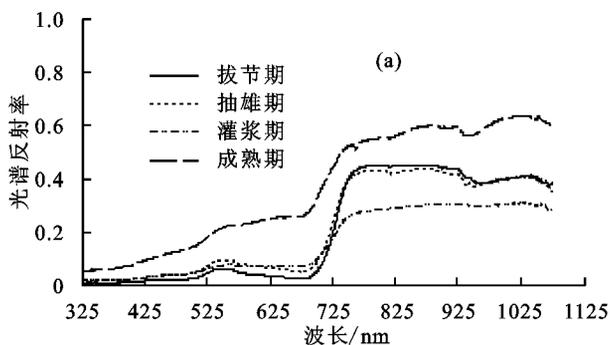


图 2 不同生育期和不同施肥水平下夏玉米植株冠层光谱反射曲线

由图 2(a)可知,在成熟期,夏玉米植株冠层光谱反射率最高;在其他生育期,夏玉米植株冠层光谱反射率在可见光波段随生育期推进逐渐升高,在近红外

SPAD 值; \bar{y} 为夏玉米冠层 SPAD 值的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下夏玉米植株冠层 SPAD 值

由图 1 可知,从夏玉米全生育期来看,施氮量大的处理其 SPAD 值总体上大于施氮量小的处理,其中在拔节期、抽雄期和成熟期夏玉米冠层 SPAD 值差异达显著水平($p < 0.05$)。随生育期推进夏玉米植株冠层 SPAD 值呈增加趋势,在灌浆期达到最大值,之后 SPAD 值随着叶片衰老呈下降趋势。

叶绿素在植株光合作用的过程中起主要作用,其含量对光合作用能力会产生直接影响,最终影响作物干物质的积累进而影响作物产量,而叶绿素的重要组成元素是氮素,因此随着施氮量增加,作物合成的叶绿素也将增加。

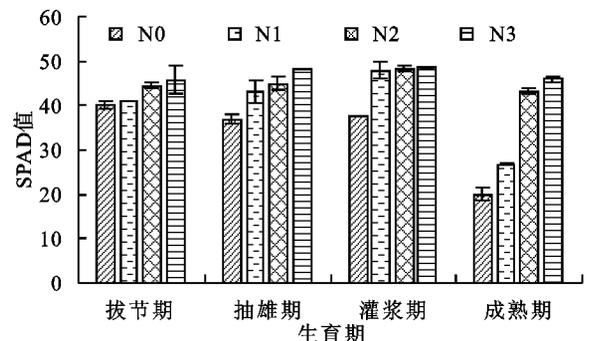
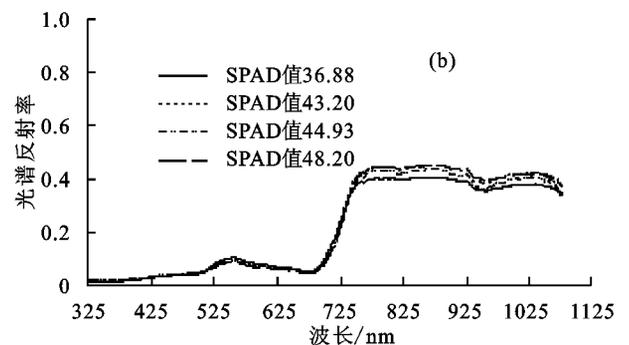


图 1 施氮水平对夏玉米植株冠层 SPAD 值的影响

2.2 夏玉米植株冠层光谱反射率的变化

由于叶绿素吸收大部分的红光和紫光,反射绿光,所以植株冠层的光谱反射率在可见光波段较低(图 2)。而在农作物进行光合作用的光吸收过程中,叶绿素起主导作用,因此在绿光波段的 550 nm 处和红光波段的 690 nm 处,光谱曲线分别形成一个反射峰和吸收谷;在 690~750 nm 区域光谱反射率急剧上升形成“红边”现象;在近红外区受夏玉米植株冠层内部构造的控制,冠层光谱反射率表现为一个高的反射区。



波段逐渐降低,在灌浆期光谱反射率降低到最小值,此时最大冠层光谱反射率仅达 31.15%。

夏玉米植株冠层的 SPAD 值不同,其对应的光

谱反射率也有差异,因此本文选择生育期内 SPAD 值差异显著的抽雄期进行光谱特征分析。由图 2(b)可知,在可见光波段范围内,SPAD 值越低,其冠层光谱反射率越高,随着 SPAD 值的增加而逐渐降低,在 SPAD 值最大为 48.20 时冠层光谱反射率最低;而在近红外区域,夏玉米植株冠层光谱反射率处理间变化规律则呈相反趋势,即随着 SPAD 值的增加植株冠层光谱反射率增加,在 SPAD 值最小为 36.88 时冠层光谱反射率最低,但处理间差异较小。

2.3 夏玉米植株冠层 SPAD 值光谱监测敏感波段筛选

夏玉米植株冠层光谱反射率与 SPAD 值进行相关分析结果(图 3(a))表明,在可见光区域 500~675 nm 波段,SPAD 值与冠层光谱反射率之间的相关性在拔节期不显著;在抽雄期呈显著正相关,相关系数为 0.418~0.532;而在灌浆期和成熟期呈负相关,相关系数波动较大,最大值分别稳定在 640,638 nm 波段,分别为 -0.489($p < 0.05$)和 -0.359($p > 0.05$)。在 675~760 nm 红光波段,相关性由负到正,其中拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期的相关系数分别在 -0.051~0.633, 0.382~0.665, -0.614~0.344, -0.400~0.006 的范围内变化,在拔节期和抽雄期,最大相关系数稳定在 760 nm 波段处,而灌浆期和成熟期则在 700 nm 波段

达到最大值。在近红外波段,相关系数比较稳定,随着生育期推进,二者间的相关系数分别稳定在 0.62, 0.68, 0.33, 0.16, 其中在拔节期和抽雄期呈极显著正相关,在灌浆期和成熟期不相关。综合全波段来看,抽雄期 SPAD 值与冠层光谱反射率的相关性最稳定且较高,对施肥具有实际指导意义。从夏玉米全生育期看,二者的相关系数在 500~675 nm 稳定在 -0.415~-0.487,在红光波段形成一个波谷位于 700 nm 处,在近红外波段形成一个波峰位于 760 nm 处,相关系数分别为 -0.498, 0.008。

由夏玉米植株冠层一阶微分光谱与 SPAD 值的相关系数(图 3)可知,由于求导过程中去除了土壤背景等因素对光谱反射率影响,部分波段一阶导数值与 SPAD 的相关系数高于原始光谱与 SPAD 的相关系数^[3]。在蓝光、绿光与近红外波段,二者间的相关系数较高但不稳定;在红光波段,二者在 712~754 nm 均呈正相关,具有较高且稳定的正相关性,相关系数稳定在 0.554~0.811。

综合对比夏玉米植株冠层光谱反射率及其一阶微分光谱与 SPAD 值的相关性,夏玉米植株冠层 SPAD 值最敏感波段位于 550 nm 波峰、640,690 nm 波谷、700,712~754,760 nm 波段之间。

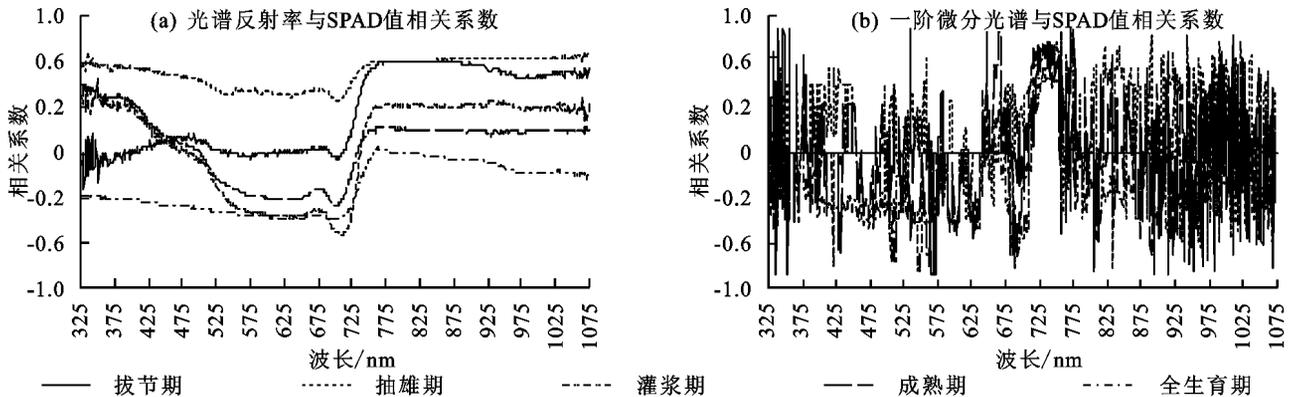


图 3 夏玉米植株冠层光谱反射率及一阶微分光谱与 SPAD 值的相关系数曲线

夏玉米可见光区域的绿边(550 nm)、红边(720 nm)、特征点波段(640,690,760 nm)以及根据逐步判别分析方法入选的 405,408,700 nm 波段冠层光谱反射率、一阶微分光谱和 SPAD 值的相关系数见表 2。结果表明,特征波段 405,408,550,640,760 nm 的冠层光谱反射率及一阶微分光谱与 SPAD 值只在部分生育期呈显著或极显著相关;在抽雄期、灌浆期和全生育期,光谱反射率与 SPAD 值的相关性在特征波段 690,700,720 nm 处均达到显著或极显著相关;对于一阶微分光谱与 SPAD 值的相关性,690 nm 在灌浆期、成熟期和全生育期均达显著相关,700 nm 仅在灌浆期达极显著相关,而 720 nm 除灌浆期外在

其他生育时段均达到极显著相关。综上,分别以特征波段光谱反射率和一阶微分光谱与 SPAD 值的相关性最高为选择标准,获得在全生育期采用光谱反射率、一阶微分光谱监测夏玉米植株冠层 SPAD 值的敏感波段分别为 700,690 nm。

2.4 夏玉米植株冠层 SPAD 值光谱监测指数模型优选

本研究以已见报道的 73 个 SPAD 值光谱监测指数(表 3 和表 4)为基础,通过对各个监测指数模型计算值与夏玉米植株冠层 SPAD 值进行相关性分析,优选出 5 个相关系数较高的光谱指数模型,分别是 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 、 $MCARI // OSAVI$ 、 $TCARI/OSAVI$ 、 SDr/SDb 和 $MTCI$ 。

表 2 夏玉米植株冠层 SPAD 值与光谱反射率及一阶微分光谱的相关系数

光谱特征 变量	生育时期	特征波段/nm							
		405	408	550	640	690	700	720	760
光谱反射率	拔节期	-0.012	0.047	-0.013	-0.006	0.013	-0.030	0.082	0.633**
	抽雄期	0.607**	0.617**	0.439*	0.425*	0.434*	0.385	0.461*	0.665**
	灌浆期	0.274	0.266	-0.405	-0.489*	-0.496*	-0.593**	-0.548**	0.341
	成熟期	0.348	0.337	-0.269	-0.354	-0.335	-0.399	-0.230	0.153
	全生育期	-0.354	-0.354	-0.453*	-0.487*	-0.484*	-0.498*	-0.433*	0.008
一阶微分光谱	拔节期	—	—	—	—	-0.195	-0.245	0.553**	0.256
	抽雄期	0.488*	0.504*	0.174	0.148	0.159	0.143	0.671**	-0.217
	灌浆期	—	—	-0.738**	—	-0.582**	-0.645**	0.289	0.088
	成熟期	0.342	0.011	—	—	-0.509*	-0.256	0.731**	0.193
	全生育期	-0.331	-0.385	-0.399	-0.019	-0.538**	-0.382	0.461*	0.430*

注: ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$; — 表示无相关性。下同。

表 3 本文采用 SPAD 值光谱特征参数

光谱参数	定义与算法	参考文献
绿峰幅值 Rg	绿光范围 510~560 nm 内的最大波段反射率	[13]
红谷幅值 Rr	红光范围 640~680 nm 内的最小波段反射率	[13]
$(Rg - Rr) / (Rg + Rr)$	绿峰反射率与红谷反射率归一化值	[13]
Rg/Rr	绿峰反射率与红谷反射率的比值	[13]
红谷偏度 Sr	波长 640~680 nm 范围内波段反射率的偏度	[14]
红谷峰度 kr	波长 640~680 nm 范围内波段反射率的峰度	[14]
绿峰偏度 Sg	波长 510~560 nm 范围内波段反射率的偏度	[14]
绿峰峰度 kg	波长 510~560 nm 范围内波段反射率的峰度	[14]
Sg/Sr	绿峰偏度(sg)与红谷偏度(sr)的比值	[14]
kg/kr	绿峰峰度(kg)与红谷峰度(kr)的比值	[14]
$(Sg - Sr) / (Sg + Sr)$	绿峰偏度(sg)与红谷偏度(sr)的归一化值	[14]
$(kg - kr) / (kg + kr)$	绿峰峰度(kg)与红谷峰度(kr)的归一化值	[14]
depth670	植被在 670 nm 处的吸收深度	[15]
Area670	植被在 560~760 nm 的吸收特征面积,为 560~760 nm 光谱范围内包络线与光谱反射率之间的面积	[15]
ND670	植被在 670 nm 处的归一化吸收深度,为吸收深度与面积的比值	[15]
红边幅值 Dr	红边 680~760 nm 范围内最大的一阶微分值	[16]
蓝边幅值 Db	蓝边 490~530 nm 范围内最大的一阶微分值	[16]
黄边幅值 Dy	黄边 550~582 nm 范围内最大的一阶微分值	[16]
红边面积 SDr	红边波长范围内一阶微分波段值的总和	[16]
蓝边面积 SDb	蓝边波长范围内一阶微分波段值的总和	[16]
黄边面积 SDy	黄边波长范围内一阶微分波段值的总和	[16]
SDr/SDb	红边内一阶微分值总和与蓝边内一阶微分值总和比值	[16]
SDr/SDy	红边内一阶微分值总和与黄边内一阶微分值总和比值	[16]
SDr-SDb	红边内一阶微分值总和与蓝边内一阶微分值总和的差值	[16]
$(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$	红边内一阶微分值总和与蓝边内一阶微分值总和归一化值	[16]
$(SDr - SDy) / (SDr + SDy)$	红边内一阶微分值总和与黄边内一阶微分值总和归一化值	[16]

由表 5 可知,在拔节期和抽雄期,除 MCARI//OSAVI 和 TCARI//OSAVI 光谱指数与 SPAD 值的相关性不显著, $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 、 SDr / SDb 和 MTCl 光谱指数均达到显著或极显著水平,且 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 指数与 SPAD 值的相关性最高,其相关系数分别为 0.545 和 0.667。在灌浆期和全生育期,所有光谱指数与 SPAD

值均达到极显著相关,其中 MTCl 指数在灌浆期相关性最高,相关系数为 0.701;在全生育期, $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 相关性最高,相关系数达 0.697。在成熟期,除 MCARI//OSAVI 光谱指数达到显著水平,其他光谱指数均达到极显著水平,且 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 与 SPAD 值相关系数高达 0.868。综合考虑各个生育期光谱指数与

SPAD 值的相关性, $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 指数在整个生育期均达到极显著相关; 结合图 1, 在拔节期、抽雄期和成熟期不同施氮量处理间冠层 SPAD 值差异显著, 考虑抽雄期 SPAD 监测值对施肥更具有实际指导意

义, 且在其他生育期 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 与 SPAD 值的相关性也较高, 所以本文推荐光谱指数 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 作为最适宜的玉米植株冠层 SPAD 值监测指数。

表 4 本文采用 SPAD 值光谱植被指数

光谱植被指数	定义与算法	参考文献
MCARI//OSAVI	$OSAVI = [(1 + 0.16)(R800 - R670)] / (R800 + R670 + 0.6)$	[4]
TGI	$-0.5 * [(670 - 480)(R670 - R550) - (670 - 550)(R670 - R480)]$	[8]
CI1(CTR2)	$R695/R760$	[13]
GM	$R750/R700$	[13]
GM-1	$R750/R550$	[13]
GM-2	$R750/R500$	[13]
PSSRa	$R800/R680$	[13]
PSSRb	$R800/R635$	[13]
SR705	$R750/R705$	[13]
SRPI	$R430/R680$	[13]
TVI-1	$R745/R675$	[13]
TVI-2	$R750/R670$	[13]
VOG1	$R740/R720$	[13]
ZMI	$R750/R710$	[13]
PSSRc	$R800/R470$	[13]
mSR705	$(R750 - R445) / (R750 + R445)$	[13]
ND705	$(R750 - R705) / (R750 + R705)$	[13]
NDCI	$(R762 - R527) / (R762 + R527)$	[13]
NDI	$(R800 - R680) / (R800 + R680)$	[13]
NPCI	$(R430 - R680) / (R430 + R680)$	[13]
NPQI	$(R415 - R435) / (R415 + R435)$	[13]
PSNDb	$(R800 - R635) / (R800 + R635)$	[13]
PSNDc	$(R800 - R470) / (R800 + R470)$	[13]
VOG2	$(R734 - R747) / (R715 + R726)$	[13]
VOG3	$(R734 - R747) / (R715 + R720)$	[13]
PSRI	$(R680 - R500) / R750$	[13]
Rch	$(R640 - R673) / R673$	[13]
TVI-3 和值	$60 * (RNIR - RGREEN) - 100(RRED - RGREEN)$ 和值	[13]
TVI-3 均值	$60 * (RNIR - RGREEN) - 100(RRED - RGREEN)$ 均值	[13]
MCARI1	$1.2 * [2.5 * (R800 - R670) - 1.3(R800 - R500)]$	[13]
修正红边归一化指数 m ND705	$(R750 - R705) / (R750 + R705 - 2 * R445)$	[13]
MCARI	$(R700 - R670) - 0.2 * (R700 - R550) * (R700 / R670)$	[13]
转换叶绿素吸收反射指数 TCARI	$3 * [(R700 - R670) - 0.2 * (R700 - R550)(R700 / R670)]$	[13]
TVIBL	$0.5 * [120(R750 - R500) - 200(R670 - R550)]$	[13]
CUR	$(R675 * R690) / (R683)^2$	[13]
MTVIa	$1.2 * [1.2 * (R800 - R550) - 2.5 * (R670 - R550)]$	[13]
MTVIb	$MTVIa / (MTVIa^{0.5} - 0.5)$	[13]
TCI	$1.2(R700 - R550) - 1.5(R670 - R550)(R700 / R670)^{0.5}$	[13]
TCARI/OSAVI	$OSAVI = [(1 + 0.16)(R800 - R670)] / (R800 + R670 + 0.6)$ $TCARI = 3 * [(R700 - R670) - 0.2 * (R700 - R550)(R700 / R670)]$	[17]
MTCI	$(R750 - R710) / (R710 - R680)$	[18]
G	$R554 / R677$	[19]
Lichtenthaler1	$R440 / R690$	[19]
Lichtenthaler2	$R440 / R740$	[19]
SR	$R774 / R677$	[19]
$(R935 - R705) / (R935 + R705)$	$(R935 - R705) / (R935 + R705)$	[19]
$(R774 - R677) / (R774 + R677)$	$(R774 - R677) / (R774 + R677)$	[19]
PISI	$(R800 - R450) / (R800 + R650)$	[19]

表 5 夏玉米植株冠层 SPAD 值与光谱指数相关系数

光谱指数	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期	全生育期
$(SDr - SDb) / (SDr + SDb)^{[16]}$	0.545**	0.667**	0.650**	0.868**	0.697**
MCARI//OSAVI ^[4]	-0.351	-0.252	-0.671**	-0.453*	-0.669**
TCARI//OSAVI ^[17]	-0.351	-0.252	-0.671**	-0.673**	-0.669**
SDr/SDb ^[16]	0.513*	0.661**	0.669**	0.870**	0.594**
MTCI=(R750-R710)/(R710-R680) ^[18]	0.533*	0.549**	0.701**	0.781**	0.581**

2.5 夏玉米植株冠层 SPAD 值光谱监测技术

选择与 SPAD 值相关性较大的 700 nm 原始光谱反射率、690 nm 一阶微分光谱、光谱指数 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 及利用逐步判别分析获得的最优波段组合等分别构建了基于特征波段、光谱指数及波段组合的夏玉米植株冠层 SPAD 值估测模型见表 6, 并采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 等指标对模型进行检验, 各评价指标具体涵义见文献[20]。从表 6 可以看出, 700 nm 光谱反射率、690 nm 一阶微分光谱及 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 指数对 SPAD 值的拟

合都以二次多项式方程最佳; 而以 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 的模拟效果最好, 其决定系数、均方根误差与平均绝对误差分别为 0.539, 6.194, 4.702。采用多元逐步回归分析法获得了基于波段最优组合的夏玉米植株冠层 SPAD 值监测模型, 其决定系数、均方根误差与平均绝对误差分别为 0.777, 4.308, 3.245。以 $R^2 > 0.49$ 模拟效果较好与模拟误差较小等为选取原则, 推荐以 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 指数构建的二次多项式模型与基于 405, 408, 700 nm 波段组合建立的线性回归监测模型作为夏玉米植株冠层 SPAD 值光谱监测适宜模型。

表 6 夏玉米全生育期冠层 SPAD 值光谱参数模型拟合与验证

光谱参数	拟合模型	模型评价指标		
		R^2	RMSE	MAE
700 nm	$y = -208.64(R_{700})^2 + 39.738(R_{700}) + 42.189$	0.282	7.724	6.126
690 nm	$y = -2E+06(R_{690}')^2 + 4398.3(R_{690}') + 41.681$	0.351	7.438	5.871
$(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$	$y = -232.66x^2 + 406.9x - 132.06$	0.539	6.194	4.702
405, 408, 700 nm	$y = 45.262 - 376.843R_{700} + 8052.458R_{408} - 6901.352R_{405}$	0.777	4.308	3.245

注: y 为夏玉米冠层 SPAD 值的模拟值; x 为光谱指数 $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 的值。

3 讨论

在可见光波段主要受叶绿素含量变化的影响, 随生育期推进, 叶面积增大, SPAD 值不断增加, 同时土壤背景噪音减小, 光谱反射率不断增大; 在近红外波段, 光谱反射率主要受叶片组织的光学特性和冠层结构影响, 叶片内部对光的多次反射和散射形成高反射平台, 且细胞间隙、形状、成分的不同对光谱的反射也造成影响^[16], 因此在近红外波段反射率随着生育期推进逐渐降低。植株冠层 SPAD 值与原始光谱反射率及一阶微分光谱都显著相关, 由于一阶微分光谱可减少土壤背景等噪声影响, 甚至部分波段 SPAD 值与一阶微分光谱的相关系数高于与原始光谱反射率的相关系数。为此, 可以根据光谱反射率及一阶微分光谱的变化筛选出敏感波段。

探索新的简单而可靠的光谱指数一直是光谱监测在农业遥感领域应用的重点和难点。相比基于敏感波段建立的回归模型, 光谱指数以及最优波段组合一般包含多个波段信息, 可减少土壤背景等噪音的影响, 本文通过逐步回归分析法建立了最优波段组合模型, 同时对以往叶绿素含量光谱监测指数模型进行优选获取适宜

的玉米冠层叶绿素含量光谱指数监测模型, 通过模型评价指标分析, 筛选的适宜光谱指数模型与构建的最优光谱波段组合回归模型, 都具有较好的稳定性与通用性, 为玉米冠层叶绿素含量光谱监测提供参考。

4 结论

(1) 在可见光波段范围内, 随着 SPAD 值增加光谱反射率值减小; 在近红外波段范围内, 随着 SPAD 值增加光谱反射率值增大。

(2) 在夏玉米全生育期采用原始光谱、一阶微分光谱监测冠层 SPAD 值的最敏感波段分别为 700, 690 nm; 采用多元逐步回归分析法获得的最优波段组合由 405, 408, 700 nm 波段构成。

(3) 对比其他光谱指数, $(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$ 与夏玉米冠层 SPAD 值的相关性在各生育期均达到极显著相关, 且相关系数大于 0.54, 表明该光谱指数的通用性较高。

(4) 在基于敏感波段、光谱指数和最优波段组合建立的夏玉米 SPAD 值的回归模型中, 按照模型模拟精度高低进行排序依次为最优波段组合、光谱指数、原始光谱反射率、一阶微分光谱; 以决定系数 $R^2 > 0.49$ 模拟效

果较好与模拟误差较低为选取原则,推荐以 $(SDr - SDb)/(SDr + SDb)$ 构建的二次多项式模型与基于 405, 408, 700 nm 波段组合建立的线性回归监测模型作为夏玉米植株冠层 SPAD 值光谱监测适宜模型。

参考文献:

- [1] 房贤一,朱西存,王凌,等. 基于高光谱的苹果盛果期冠层叶绿素含量监测研究[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16):3504-3513.
- [2] 李云梅,倪绍祥,王秀珍. 线性回归模型估算水稻叶片叶绿素含量的适宜性分析[J]. 遥感学报, 2003, 7(5):364-371.
- [3] 高鑫,高聚林,于晓芳,等. 基于不同玉米品种叶片高光谱的 SPAD 值估测模型研究[J]. 玉米科学 2016, 24(2): 108-114.
- [4] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229-239.
- [5] 张俊华,张佳宝,贾科利. 不同施肥条件下夏玉米光谱特征与叶绿素含量和 LAI 的相关性[J]. 西北植物学报, 2008, 28(7):1461-1467.
- [6] 陈志强,王磊,自由路,等. 整个生育期玉米叶片 SPAD 高光谱预测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析 2013, 33(10):2838-2842.
- [7] 陈志强. 不同氮素水平下玉米叶片的高光谱响应及其诊断[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
- [8] Hunt E R, Doraiswamy P C, Mc Murtrey J E, et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2013, 21(1): 103-112.
- [9] Gitelson A A, Viña A, Ciganda V, et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(8): 93-114.
- [10] 张晓华,常庆瑞,章曼,等. 基于高光谱植被指数的西北玉米不同时期叶绿素含量估测[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4):75-81.
- [11] 章曼,常庆瑞,张晓华,等. 不同施肥条件下水稻冠层光谱特征与叶绿素含量的相关性[J]. 西北农业学报, 2015, 24(11):49-56.
- [12] 王瑞,陈永忠,陈隆升,等. 油茶叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关分析[J]. 中南林业科技大学学报 2013, 33(2):77-80.
- [13] 贺佳. 冬小麦不同生育时期生态生理参数的高光谱遥感监测模型[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [14] 姚付启. 冬小麦高光谱特征及其生理生态参数估算模型研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [15] 蒋桂英. 新疆棉花主要栽培生理指标的高光谱定量提取与应用研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2004.
- [16] 李媛媛. 基于地物光谱仪与成像光谱仪耦合的玉米生长信息监测研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [17] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 416-426.
- [18] Dash J, Curran P J. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. Advances in Space Research, 2007, 39(1): 100-104.
- [19] 孙林,程丽娟. 植被叶片生化组分的光谱响应特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(11):3031-3035.
- [20] 彭致功,张宝忠,刘钰,等. 华北典型区冬小麦区域耗水模拟与灌溉制度优化[J]. 农业机械学报 2017, 48(11):238-246.