

## 基于高光谱的夏玉米叶片 SPAD 值估测模型研究

王俞茜<sup>1,2,3</sup>, 韩娜娜<sup>1,2,3</sup>, 周青云<sup>1,2,3</sup>, 张宝忠<sup>2</sup>, 彭致功<sup>2</sup>

(1. 天津农学院 水利工程学院, 天津 300392; 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 100083; 3. 中美生态农业与水环境保护国际联合研究中心, 天津 300392)

**摘要:** 快速、准确估测夏玉米叶片 SPAD 值, 为大区域监控夏玉米长势提供数据支撑, 通过 PROSPECT 模型模拟拔节期、抽雄期、灌浆期和乳熟期等不同生育阶段叶片光谱反射率, 探讨基于高光谱技术估算 SPAD 值的建模方法。结果表明: (1) 针对每个生育期, 提出利用最优高光谱指数估测 SPAD 值的模型 (简称最优模型), 对应的最优高光谱指数分别为: REIP、mND705、mND705、G-M, 模型的确定系数 ( $R^2$ ) 分别为: 0.625 9、0.691 2、0.591 9 和 0.579 9, 均方根误差 ( $RMSE$ ) 分别为: 14.4、12.3、6.3 和 9.4, 相对误差 ( $RE$ ) 分别为: 29.1%、22.1%、9.3% 和 16.9%。(2) 针对整个生育期提出利用通用高光谱指数 mND705 估测 SPAD 值的模型 (简称通用模型), 在这四个生育期模型的  $R^2$  分别为: 0.597 3、0.691 2、0.591 9 和 0.402 4,  $RMSE$  分别为: 12.5、12.0、6.4 和 7.3,  $RE$  分别为: 24.2%、21.5%、10.4% 和 11.8%。对比分析得到, 通用模型  $R^2$  高,  $RE$  低, 因此, 本文提出的通用模型具有较好的估测能力, 对夏玉米叶片 SPAD 值的反演具有较高精度。

**关键词:** SPAD; PROSPECT 模型; 高光谱指数; 通用模型

**中图分类号:** S513

**文献标识码:** A

## Study on the estimation model of summer maize leaf SPAD value based on hyperspectrum

Wang Yuxi<sup>1,2,3</sup>, Han Nana<sup>1,2,3</sup>, Corresponding Author, Zhou Qingyun<sup>1,2,3</sup>, Zhang Baozhong<sup>2</sup>, Peng Zhigong<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100083, China; 3. Sino-US International Joint Research Center for Ecological Agriculture and Water Environment Protection, Tianjin 300392, China)

**Abstract:** Quick and accurate estimation of SPAD values of summer maize leaves can provide data support for monitoring the growth of summer maize in a large area. The spectral reflectance of summer maize leaves at different growth stages, such as jointing stage, tasseling stage, filling stage and milky stage, was simulated by PROSPECT model, the modeling method of estimating SPAD value based on hyperspectral technique. The results showed that: (1) the optimal hyperspectral index estimation model for SPAD value was proposed for each growth period, and the corresponding optimal hyperspectral indexes were REIP, mND705, mND705, and G-M. The decision of the model coefficients ( $R^2$ ) are: 0.625 9, 0.691 2, 0.591 9 and 0.579 9, the root mean square error ( $RMSE$ ) are: 14.4, 12.3, 6.3 and 9.4, and the relative error ( $RE$ ) are: 29.1%, 22.1%, 9.3% and 16.9%. (2) A general hyperspectral index mND705 model was proposed to estimate SPAD value for the whole growth period. The  $R^2$  of the model were 0.597 3, 0.691 2, 0.591 9 and 0.402 4, the  $RMSE$  were 12.5, 12.0, 6.4 and 7.3, and the  $RE$  were 24.2%, 21.5%, 10.4% and 11.8%, respectively. Through comparative analysis, it is concluded that the general model  $R^2$  is high and  $RE$  is low. Therefore, the general model proposed in this paper has better estimation ability and high precision for the inversion of SPAD value of summer maize leaves.

**Key words:** SPAD; PROSPECT model; hyperspectral index; universal model

叶绿素含量是作物生长过程中一个重要的生理指标, 可以反映光合作用能力、植物营养状况<sup>[1]</sup>。SPAD 值是叶绿素的相对含量, 与叶绿素具有良好的相关性, 因此 SPAD 值能够很好地反映作物叶绿素含量的变化<sup>[2]</sup>, 从而可以监测作物的长势。高

光谱技术为作物叶绿素含量提供了快速诊断、非破坏性的数据采集和处理方法。国内外学者在高光谱监测作物叶绿素含量方面进行了大量研究。采用 PROSPECT 模型进行建模验证时, 部分模拟数据用于建模, 其余数据进行验证<sup>[3-4]</sup>。施润和等<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项 (ID0154B082017); 国家自然科学基金资助项目 (51606170Z)

作者简介: 王俞茜 (1996—), 女, 硕士在读, 研究方向为灌溉排水理论与新技术。E-mail: 649830818@qq.com。

通信作者: 韩娜娜 (1979—), 女, 副教授, 硕士, 主要从事灌溉排水理论与新技术方面的研究工作。E-mail: hnn23144@163.com。

利用 PROSPECT 模型研究了多种高光谱植被指数定量反演叶片叶绿素含量,并分析比较了各指数的稳定性和抗干扰能力。吴伶等<sup>[6]</sup>利用 PROSPECT+SAIL 模型和微粒群算法对叶绿素含量进行反演。雷祥祥等<sup>[7]</sup>利用 PROSPECT 模型,以欧式距离作为评价函数,拟合蔬菜叶片光谱反射率,反演叶绿素含量和 SPAD 值。这样建模提高了模型的精度和可靠性,但未结合田间试验数据进行验证,缺乏实用性。部分学者对田间实测数据进行分析时,常采用经验统计方法建立光谱反射率或其他变化形式与 SPAD 值的回归方程进行预测<sup>[8-9]</sup>。王爱芳等<sup>[10]</sup>利用敏感波段以及它们的差值、比值、归一化差值指数与特定红边位置计算得到的光谱指数与 SPAD 值建立模型,相关性较好。李丹等<sup>[11]</sup>通过分析荔枝叶片的光谱反射曲线与荔枝秋梢老熟阶段叶片 SPAD 值的关系,进行荔枝叶片 SPAD 值估算。运用高光谱指数建模验证时,王凯龙等<sup>[12]</sup>比较了 15 种高光谱指数与 SPAD 值的相关性,确定了不同生育期估算小麦叶片 SPAD 值的最佳植被指数。蒋金豹等<sup>[13]</sup>利用微分指数建立了小麦叶绿素含量的估算模型,模型精度较高。

前人大多单独利用 PROSPECT 模型或田间试验数据研究作物不同生育期 SPAD 值的估测模型,对适用于夏玉米不同生育期的通用模型研究较少,且将 PROSPECT 模型和田间试验数据融合估测夏玉米叶片 SPAD 值也较少。因此本研究基于 PROSPECT 模型,结合 2018 年夏玉米叶片高光谱和田间试验数据,对夏玉米叶片 SPAD 值估测模型进行研究。具体步骤如下:利用 PROSPECT 模型模拟夏玉米叶片各个生育期的光谱反射率,筛选与夏玉米叶片 SPAD 值相关性较高的高光谱指数,构建不同生育期最优高光谱指数与 SPAD 值的估测模型,拟建立整个生育期的通用模型,利用 2018 年华北地区夏玉米实测高光谱反射率及其对应的 SPAD 值综合分析不同高光谱指数和不同建模方法在夏玉米 SPAD 值估测中的应用能力,以期为华北地区夏玉米 SPAD 值监测提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与试验设计

田间试验在国家节水灌溉北京工程技术研究中心大兴试验研究基地进行。该地属于暖温带半

干旱大陆性季风气候,四季分明,冬季干旱,夏季多雨。全年 80% 的降雨集中在 6—9 月,年平均气温 11.6 °C,平均风速 1.2 m/s,年平均降雨量 556 mm,年平均蒸发量 1 800 mm 以上,平均海拔 14~52 m。

试验作物夏玉米于 2018 年 6 月 15 日播种,同年 9 月 24 日收获,品种为‘纪元 168’。氮肥在播种前(选用“科霸”复混肥料)和拔节至抽雄期(选用尿素)分两次施用,设置 5 个处理,以探究不同氮处理条件下不同生育期 SPAD 值的变化。每次施肥量均为 0、225.0、337.5、450.0、675.0 kg/hm<sup>2</sup>,即 N0、N1、N2、N3、N4,每个处理设 3 个重复试验。田间高光谱数据采集和取样日期分别为:拔节期(2018 年 7 月 21 日)、抽雄期(2018 年 8 月 8 日)、灌浆期(2018 年 8 月 21 日)、乳熟期(2018 年 9 月 16 日)。

### 1.2 数据获取

#### 1.2.1 夏玉米叶片 SPAD 值测定

采用 SPAD-502plus 叶绿素仪,通过测量叶片在一定波长范围内的透光系数来间接确定叶绿素的相对含量(SPAD 值)。利用该仪器在夏玉米生育期内与测定叶片高光谱反射率同步进行 SPAD 值观测,每个小区选取 3 株长势相同的夏玉米,选取顶梢向下完全展开的顶 2、顶 3 叶片作为观测点,每个样点测 3 次,其平均值作为该叶片 SPAD 值。

#### 1.2.2 夏玉米叶片高光谱数据采集

夏玉米叶片高光谱数据采用美国 Analytical Spectral Devices 公司生产的 ASD HandHeld2 型手持式地物光谱仪,波段范围为 325~1 075 nm,光谱采样间隔为 1 nm,光谱分辨率为 3 nm。在天气晴朗、无风时测量,测定时间(北京)为 10:00—14:00。将采集 SPAD 值的叶片取样后平铺在田间土壤上,使其完全覆盖光谱视场范围,探头垂直向下,距叶片垂直高度 15 cm 处进行叶片高光谱数据采集。每次光谱采集前,用白板对光谱仪进行优化和标定。每个采样点保存 10 条光谱曲线,其平均值作为该采样点叶片的光谱数据。

本研究针对夏玉米四个生育期共进行了 4 次数据采集,每次获取 15 组数据,共获得 60 组有效 SPAD 值和高光谱数据。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 PROSPECT 模型简介

本研究采用 PROSPECT 模型,该模型能在可见光波段以最小的误差模拟叶片的光学性质<sup>[14]</sup>。

其模拟的基本参数为叶片结构参数  $N$ 、叶绿素含量  $C_{ab}$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )、干物质含量  $C_m$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )、等效水厚度  $EWT$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) 和棕色素  $C_{browg}$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )。通过该模型可以得到叶片的方向半球反射率和透射率。模型基本参数<sup>[15]</sup>见表1。在4个生育期内,该模型共生成60组有效的叶片光谱反射率。

表1 PROSPECT模型基本参数

模型基本参数	符号	单位	取值
叶片结构参数	$N$	—	1.4
叶绿素含量	$C_{ab}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$	10~95
干物质含量	$C_m$	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.005~0.015
等效水厚度	$EWT$	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.005~0.042
棕色素	$C_{browg}$	$\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	0

### 1.3.2 高光谱指数

高光谱指数是指由某些特定高光谱数据的反射率线性或非线性组合构成的一种光谱参数<sup>[16]</sup>。目前国内外学者提出了大量的高光谱指数,本研究从已发表的高光谱指数文献中筛选出与叶绿素含量、氮含量相关的25个高光谱指数进行分析,详见表2。

表2 高光谱指数及出处

高光谱指数	公式	文献出处
MTCI-B	$R_{434} / (R_{498} \times R_{401})$	[17]
NDVIg_b	$(R_{573} - R_{440}) / (R_{573} + R_{440})$	[18]
NDRE	$(R_{900} - R_{720}) / (R_{900} + R_{720})$	[19]
RVlinf_r	$R_{810} / R_{660}$	[20]
SAVI	$1.5 \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.5)$	[21]
TCARI/OSAVI	$\frac{3 \times [(R_{800} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{800} - R_{670}) \times (R_{800} / R_{670})]}{(1 + 0.16) \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)}$	[22]
mSR705	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	[23]
CHRed edge	$R_{780} / R_{710} - 1$	[24]
OSAVI	$1.16 \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	[25]
NDVI	$(R_{810} - R_{660}) / (R_{810} + R_{660})$	[26]
VARI	$(R_{550} - R_{660}) / (R_{550} + R_{660} - R_{470})$	[27]
MTCI	$(R_{740} - R_{705}) / (R_{705} - R_{665})$	[28]
ARI	$(1 / R_{550}) - (1 / R_{700})$	[29]
PRI	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	[30]
CTR	$R_{695} / R_{420}$	[31]
GNDVI	$(R_{810} - R_{550}) / (R_{800} + R_{550})$	[32]
SIPI	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	[33]
RGR	$(R_{612} + R_{660}) / (R_{510} + R_{560})$	[34]
MCARI	$[(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{670})] (R_{700} / R_{670})$	[35]

续表

高光谱指数	公式	文献出处
TCARI	$3 \times [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{670}) (R_{700} / R_{670})]$	[36]
REP	$700 + 40 \times \{[(R_{670} + R_{300}) / 2] - R_{700}\} / (R_{300} - R_{700})$	[37]
G	$R_{554} / R_{667}$	[38]
SRPI	$R_{430} / R_{680}$	[39]
G-M	$(R_{750} / R_{550}) - 1$	[40]
mND705	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2 \times R_{445})$	[41]

注:  $R$  为不同波长下光谱反射率;  $R$  下标表示波长

### 1.4 模型评价

为验证模型的预测精度,将模型预测值和实测值比较分析。本研究以决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 ( $RMSE$ ) 和相对误差 ( $RE$ ) 作为指标来评价模型的预测能力。计算公式见(1)~(3)。

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1, j=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j) \right]^2}{\sum_{i=1, j=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 (y_j - \bar{y}_j)^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_j)^2 / n} \quad (2)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_j - y_i|}{y_i} \quad (3)$$

式中:  $y_i$  为 SPAD 实测值,  $\bar{y}_i$  为 SPAD 实测值的平均值,  $y_j$  为 SPAD 预测值,  $\bar{y}_j$  为 SPAD 预测值的平均值,  $n$  为样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理下叶片 SPAD 的动态变化分析

由图1可知,夏玉米叶片 SPAD 值随着生育期的推进先增加后减小,且不同氮处理下表现出相对一致的变化规律。不同氮处理条件下,叶片 SPAD 值均在灌浆期达到峰值后逐渐下降。灌浆期之前玉米生长发育较旺盛,具有较强的光合作用,从而导致叶片 SPAD 值较大。在灌浆期之后,玉米叶片逐渐衰老,光合作用逐渐减弱,同时玉米叶片开始出现枯黄甚至死亡,导致 SPAD 值逐渐下降。施氮量对夏玉米叶片各个生育期的 SPAD 值均产生影响。N0 处理下夏玉米叶片 SPAD 值明显低于其他处理,氮肥的亏缺限制了叶绿素的生成以及叶片的光合能力,从而导致叶片 SPAD 值降低<sup>[42]</sup>。施加氮肥可以提高夏玉米叶绿素含量,有利于叶片绿色程度增加。

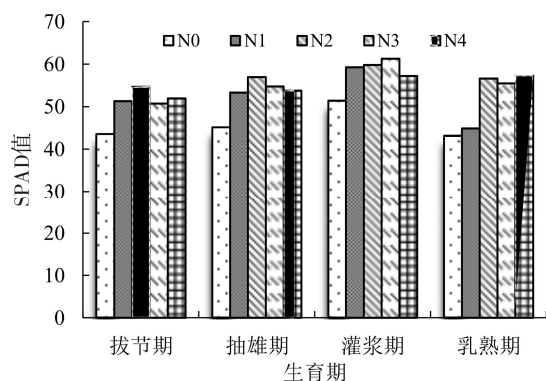
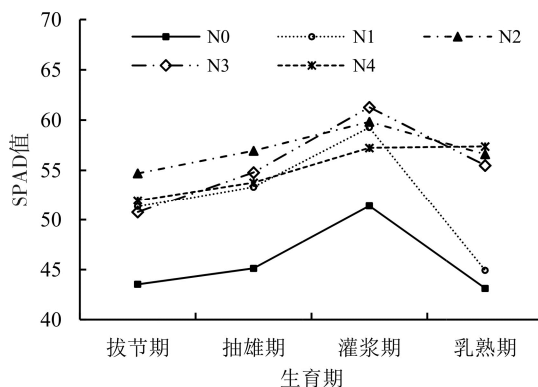


图1 夏玉米叶片 SPAD 值变化规律



## 2.2 不同生育期夏玉米叶片光谱反射率研究

由图2所示的实测叶片光谱反射率曲线可以看出,在拔节期、抽雄期、灌浆期、乳熟期夏玉米叶片光谱反射曲线形态基本一致。随着生育期的推进,350~100 nm 可见光波段反射率逐渐增大,700~1 075 nm 近红外区域反射率逐渐降低。不同生育期具有不同的物理结构和生态特征,同时,细胞结构、等效水厚度以及干物质含量有明显差别,从而导致吸收系数不同,进而导致反射率有明显差别,因此出现不同的光谱反射率特征。夏玉米叶片光谱具有一般植被光谱的“峰和谷”特征。在650~700 nm 形成一个低反射谷,由于在此波段内光辐射容易被叶绿素吸收,形成较低的反射谷。从500 nm 起叶片的吸收减少,产生了一个小的“反射峰”。在680~750 nm 反射率有一个较大的增加过程,在750 nm 之后趋于平缓,成为高反射区域。

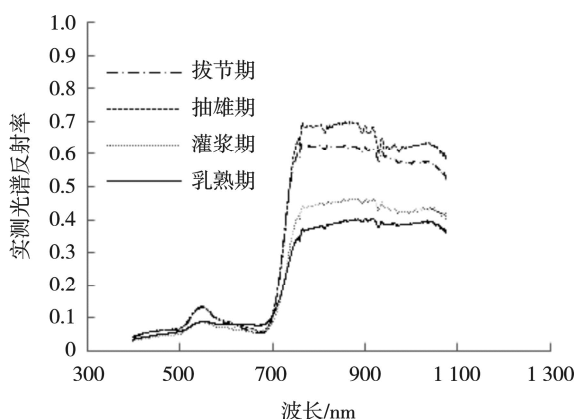


图2 不同生育期叶片光谱反射曲线

在 PROSPECT 模型中输入叶绿素含量、等效水厚度、干物质及叶片结构参数,便可得到不同生育期夏玉米叶片模拟光谱反射率。在本研究中,叶绿素含量由 SPAD 值计算得到,见公式(4)<sup>[43]</sup>。

$$Chl = 10^{(M^{0.265})} \quad (4)$$

式中:  $Chl$  表示叶绿素含量,单位:  $\mu\text{mol}/\text{cm}$ ,  $M$  表示 SPAD 值,无量纲。

PROSPECT 模型模拟的夏玉米光谱反射率与实测夏玉米光谱反射率基本趋势一致,且  $R^2$  为 0.988 2,  $RMSE=0.080$  2,拟合精度较高,如图3所示。

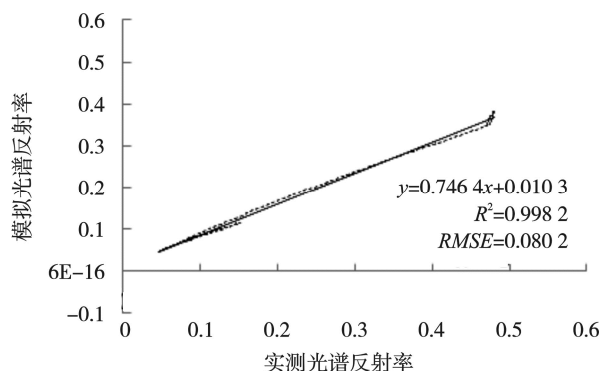


图3 叶片光谱实测反射率与模拟反射率关系

## 2.3 估算夏玉米叶片 SPAD 值的高光谱指数优选

不同生育期,建立 25 个高光谱指数与叶片 SPAD 值的关系,选择相关性较高的前 5 个高光谱指数,结果见表3。

表3 各生育期夏玉米叶片SPAD值估算模型

生育期	高光谱指数	模型关系	建模决定系数 ( $n=15$ ) $R^2$
拔节期	REIP	$y=3.664x-2\ 580.5$	0.985 2
	G-M	$y=14.394x+19.083$	0.971 6
	mND705	$y=87.865x+1.641$	0.969 5
	SRPI	$y=127.910x-90.396$	0.958 6
	CTR	$y=-26.509x+87.246$	0.952 6
抽雄期	mND705	$y=84.888x+4.527$	0.998 1
	GNDVI	$y=144.730x-25.987$	0.994 4
	G-M	$y=17.487x+12.975$	0.992 8
	REIP	$y=3.273\ 3x-2\ 298$	0.991 9
	NDRE	$y=197.840x+11.683$	0.991 8

续表

生育期	高光谱指数	模型关系	建模决定系数 ( $n=15$ ) $R^2$
灌浆期	mND705	$y=86.272x+3.043$	0.998 7
	REIP	$y=4.038x-2\ 849$	0.996 5
	GNDVI	$y=152.390x-31.338$	0.994 7
乳熟期	NDRE	$y=172.720x+15.996$	0.988 1
	G-M	$y=14.461x+19.262$	0.987 9
	G-M	$y=17.786x+12.410$	0.995 6
成熟期	GNDVI	$y=142.390x-24.874$	0.990 5
	mND705	$y=87.020x+3.160$	0.990 0
	REIP	$y=3.341x-2\ 347.3$	0.988 7
	MTCI	$y=12.151x+24.718$	0.981 3

注:  $y$  为 SPAD 值;  $x$  为相应的高光谱指数

由表 3 可知,不同生育期,与 SPAD 值相关性较高 ( $R^2>0.95$ ) 的 5 个高光谱指数,均可以建立 SPAD 值估测模型。本研究采用决定系数最高的高光谱指数建立 SPAD 值估测模型,简称最优模型。其中拔节期、抽雄期、灌浆期和乳熟期最优高光谱估测 SPAD 值模型相对应的光谱指数分别为:REIP ( $R^2=0.985\ 2$ )、mND705 ( $R^2=0.998\ 1$ )、mND705 ( $R^2=0.998\ 7$ )、G-M ( $R^2=0.995\ 6$ )。

对比分析 SPAD 值的估测模型,见表 3。可以看出:在 4 个生育期,与 SPAD 值相关性较高的前 5 个高光谱指数中,均有高光谱指数 mND705。该高光谱指数与 SPAD 值为线性关系且相关性较高 ( $R^2>0.960\ 0$ ),但线性关系系数  $a$ ,  $b$  在各个生育期数值不同。这可能是在不同生育期夏玉米叶片 SPAD 会有不同,总体呈现出随着生育期的推进先增加后减小的趋势。而不同生育期的划分则根据生长天数的变化,夏玉米的生长天数从播种日期计算。本文考虑系数  $a$ ,  $b$  可能与作物的生长天数之间有联系,因此分析了不同生育期 mND705 光谱模型中系数  $a$ ,  $b$  分别与夏玉米生长天数  $t$  之间的关系,结果见式 (5)、(6) 和图 4 所示。

$$a=0.184\ 4t+71.715 \quad (5)$$

$$b=-0.076\ 6t+9.581\ 2 \quad (6)$$

系数  $a$ ,  $b$  与夏玉米生长天数  $t$  之间的决定系数  $R^2$  分别为: 0.731 7 和 0.716 6, 相关系数较高。因此本研究基于高光谱指数 mND705 建立夏玉米全生育期适用的 SPAD 值估测模型,简称通用模型,见式 (7)。

$$y=(0.184\ 4t+71.715\ 0)x-0.077\ 6t+9.581\ 0 \quad (7)$$

式中:  $y$  为 SPAD 值,  $x$  为高光谱指数 mND705,  $t$  为生长天数。

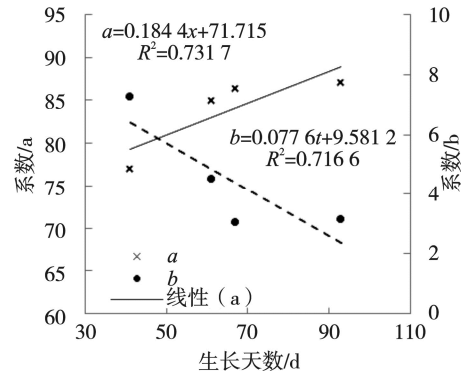


图 4 系数  $a$ ,  $b$  与生长天数  $t$  的关系

## 2.4 模型验证

分别对拔节期、抽雄期、灌浆期、乳熟期的最优模型及通用模型进行验证。

(1) 最优模型验证。其步骤是:不同生育期最优高光谱指数分别为:REIP、mND705、mND705、G-M,对应的估算模型见表 3,结合实测高光谱数据预测 SPAD 值,并与实测值进行分析比较。这 4 个生育期的  $R^2$  分别为: 0.625 9、0.691 2、0.591 9 和 0.579 9,  $RMSE$  分别为: 14.4、12.3、6.3 和 9.4,  $RE$  分别为: 29.1%、22.1%、9.3%和 16.9%,结果见图 5 中的验证 1。

(2) 通用模型验证。其步骤为:根据实测光谱反射率计算高光谱指数 mND705 和式 (7) 的通用模型,得到各生育期叶片 SPAD 估测值,并与实测 SPAD 值进行比较,这 4 个生育期的  $R^2$  分别为: 0.597 3、0.691 2、0.591 9 和 0.402 4,  $RMSE$  分别为: 12.5、12.0、6.4 和 7.3,  $RE$  分别为: 24.2%、21.5%、10.4%和 11.8%,结果见图 5 中的验证 2。

由图 5 可知,抽雄期和灌浆期最优模型与通用模型均采用高光谱指数 mND705,由于模型系数的值不同,两种模型的预测结果不完全一致,但差异较小。拔节期和乳熟期最优模型与通用模型采用的高光谱指数不一致,因此两种模型预测的结果相差较大,在拔节期,采用的高光谱指数分别为 REIP 和 mND705,二者的决定系数分别为 0.625 9 和 0.597 3,而在乳熟期,采用的高光谱指数分别为 G-M 和 mND705,二者的决定系数分别为 0.579 9、0.402 4,但拔节期和乳熟期通用模型的  $RMSE$ 、 $RE$  小,模型精度高。综合分析,采用通用模型在各个生育期模型的稳健性较好,预测精度较高。

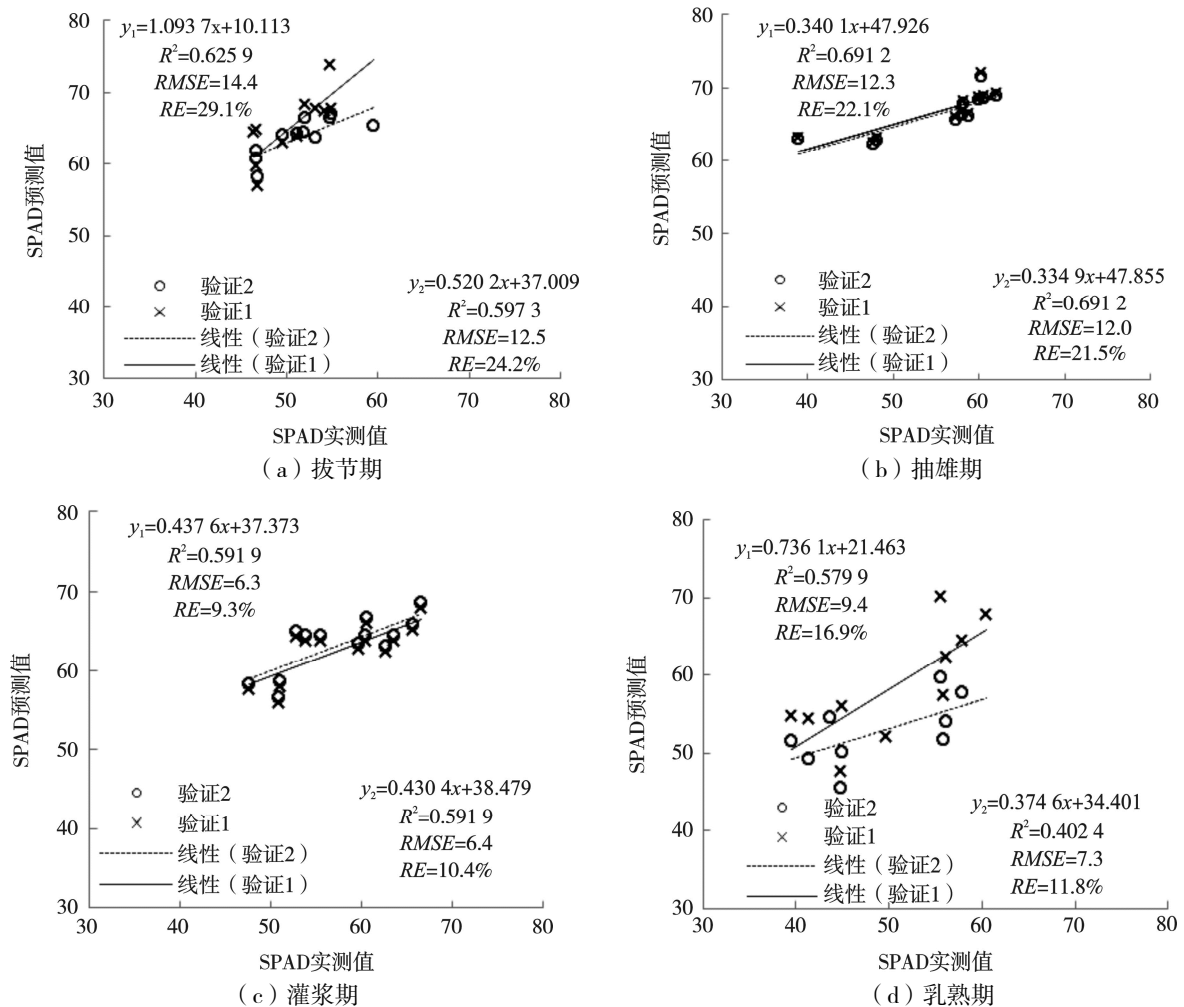


图 5 各生育期不同预测模型 SPAD 实测值与预测值关系图

### 3 讨论

SPAD 值是叶绿素仪通过测量叶片在红光 (650 nm) 和红外线 (940 nm) 两种波长范围内的透光系数来确定的, 而高光谱也是利用红光和近红光的特性, 两者之间都是利用光学特征, 因此两者之间通过光学特征能够建立很好的关系。由于在不同生育期作物的生理性状及外部环境的不同, 因此本研究针对夏玉米在拔节期、抽雄期、灌浆期、乳熟期分别开展了研究, 筛选了不同生育期最优高光谱指数及预测模型。宋晓<sup>[44]</sup>证实了同一作物同一植被指数在不同生育期的数值不同, 其与农学参数的相关性也有差异。文瑶等<sup>[45]</sup>在玉米苗期采用 LS-SVR 建立光谱指数 NDVI、RVI、DVI 与叶绿素含量的拟合模型, 效果较好。李媛媛等<sup>[46]</sup>在对西北地区乳熟期玉米采用一阶微分和高光谱特征参数的相关系数, 建立了夏玉米叶片 SPAD 值的 BP 神经网络验证模型。HU 等<sup>[47]</sup>

利用 CASI 数据构建 CCII 指数对小麦 SPAD 值进行估算。这与大多数学者的研究是一致的。

另外, 本研究采用高光谱指数 mND705 建立通用模型, 该高光谱指数是在传统 NDVI 指数的基础上, 考虑了对叶绿素含量敏感度较高的 705 nm 处的反射率, 并结合 445 nm 处的叶绿素吸收特征, 以及 750 nm 近红外反射而发展的一个植被指数<sup>[16, 43]</sup>。改进后的植被指数能削弱光谱散射以及吸收的不稳定对叶绿素的影响, 从而达到理想效果。前人在进行研究时, 只考虑到高光谱指数在不同生育期的敏感性, 从而在各生育期单独建立模型, 或在整个生育期采用一个高光谱指数进行模型。而本研究构建的通用模型为:  $y = (0.1844t + 71.715)x - 0.0776t + 9.5812$ , 不仅考虑到不同生育期高光谱指数的敏感性有差异, 同时也关注到通用模型在不同生育期的适用性。将本研究所获取的估测模型与无人机、遥感结合, 可以快速无损地对大区域夏玉米 SPAD 值进行监测研究。

## 4 结论

夏玉米氮营养状况与叶绿素含量密切相关,而叶绿素含量可以通过具有叶片光学特性的 SPAD 值反映,而 SPAD 观测的是单个叶片,为实现大区域范围内夏玉米长势及营养状况诊断,本文基于 PROSPECT 模型,利用高光谱技术探讨了夏玉米叶片 SPAD 值估测模型,提出了最优模型和通用模型。主要结论如下:

(1) 夏玉米叶片 SPAD 值呈现出随着生育期的推进先增加后减小的趋势,且施氮量对夏玉米叶片各个生育期的 SPAD 值均产生影响。随着施肥量的增加,夏玉米叶片 SPAD 值呈增加的趋势。

(2) 最优模型在拔节期、抽雄期、灌浆期、乳熟期对应的最优高光谱指数分别为: REIP、mND705、mND705、G-M,用上述最优高光谱指数模型验证时,  $R^2$  的范围为 0.579 9~0.625 9, RMSE 的范围为 6.3~14.4, RE 的范围为 9.3%~29.1%。

(3) 以高光谱指数 mND705 在 4 个生育期建立估测 SPAD 值通用模型,  $R^2$  的范围为 0.402 4~0.691 2, RMSE、RE 的范围分别为: 6.4~12.5, 6.4%~24.2%。表明以高光谱指数 mND705 在 4 个生育期建立估测 SPAD 值通用模型对夏玉米叶片 SPAD 值的反演具有较高精度,且模型在精确度、简单易用性等方面表现好。因此,本研究建立的通用估测模型可以有效预测夏玉米叶片 SPAD 值。

## 参考文献:

- [1] 程志庆,张劲松,孟平,等.杨树叶片叶绿素含量高光谱估算模型研究[J].农业机械学报,2015,46(8): 264-271.
- [2] 陈晓娜,赵庚星,周雪,等.基于高光谱的小麦冠层叶绿素(SPAD值)估测模型[J].天津农业科学,2018,24(2): 60-65.
- [3] 邹小波,张小磊,石吉勇,等.基于高光谱图像的黄瓜叶片叶绿素含量分布检测[J].农业工程学报,2014,30(13): 169-175.
- [4] 王洋,肖文,邹焕成,等.基于PROSPECT模型的植物叶片干物质估测建模研究[J].沈阳农业大学学报,2018,49(1): 121-127.
- [5] 施润和,庄大方,牛铮,等.基于辐射传输模型的叶绿素含量定量反演[J].生态学杂志,2006,40(5): 591-595.
- [6] 吴伶,刘湘南,周博天,等.利用PROSPECT+SAIL模型反演植物生化参数的植被指数优化模拟[J].应用生态学报,2012,23(12): 3250-3256.
- [7] 雷祥祥,赵静,刘厚诚,等.基于PROSPECT模型的蔬菜叶片叶绿素含量和SPAD值反演[J].光谱学与光谱分析,2019,39(10): 3256-3260.
- [8] 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.
- [9] 丁希斌,刘飞,张初,等.基于高光谱成像技术的油菜叶片SPAD值检测[J].光谱学与光谱分析,2015,35(2): 486-491.
- [10] 王爱芳,王妮,高明,等.基于高光谱的香樟叶绿素含量估测模型研究[J].黑龙江工程学院学报,2018,32(1): 14-19.
- [11] 李丹,彭智平,韩留生,等.基于高光谱数据的荔枝SPAD值快速估测[J].热带地理,2016,36(4): 710-716.
- [12] 王凯龙,熊黑钢,张芳,等.干旱区冬小麦不同生长阶段的光谱特征与叶绿素含量估测研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11): 45-49.
- [13] 蒋金豹,陈云浩,黄文江.用高光谱微分指数估测条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度[J].光谱学与光谱分析,2010,30(8): 2243-2247.
- [14] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: A model of leaf optical-properties spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2): 75-91.
- [15] FERET J. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6): 3030-3043.
- [16] 姜海玲,杨杭,陈小平,等.利用光谱指数反演植被叶绿素含量的精度及稳定性研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(4): 975-981.
- [17] BOEGH E, SOEGARRD H, BROGE N, et al. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 179-193.
- [18] HANSEN P M, SCHJOEING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4): 542-553.
- [19] FITZGERALD G J, RODRIGUEZ D, CHRISTENSEN L K, et al. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments[J]. Precision Agriculture, 2006, 7(4): 233-248.
- [20] YAO X, ZHU Y, TIAN Y C, et al. Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(2): 89-100.

- [21] HUET A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295–309.
- [22] 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.
- [23] SIMS D A, GAMOM J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2/3): 337–354.
- [24] SIMS D A, LUO H Y, HASTINGS S, et al. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in response to drought in a southern California chaparral ecosystem[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 103(3): 289–303.
- [25] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95–107.
- [26] 刘畅, 孙鹏森, 刘世荣. 植物反射光谱对水分生理变化响应的研究进展[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 80–91.
- [27] SCHNEIDER P, ROBERTS D A, KYRIAKIDIS P C. A VARI-based relative greenness from MODIS data for computing the Fire Potential Index[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1151–1167.
- [28] DASH J, CURRAN P J. MTCI: The MERIS terrestrial chlorophyll index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5403–5413.
- [29] GITELSON A A, MERZLYAK M N, CHIVKUNOVA O B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves[J]. Photochemistry and Photobiology, 2010, 74(1): 38–45.
- [30] GAMOM J A, PENUELAS J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1): 35–44.
- [31] CARTER G A. Ratios of leaf reflectance in narrow wavebands as indicators as indicators of plant stress[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(3): 697–704.
- [32] BARET F, GUYOT G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(3): 161–173.
- [33] PENUELAS J, BARET F, FILELLA I. Semi-empirical indices to assess carotenoids chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance[J]. Photosynthetica, 1995, 31(2): 221–230.
- [34] STEDDOM K, HEIDEL G, JONES D, et al. Remote detection of rhizomania in sugar beets[J]. Phytopathology, 2003, 93(6): 720–726.
- [35] DAUGHTNEY 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.
- [36] HABOUDANE D, JOHN R, MILLERA J R, 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.
- [37] DEMETRIADES-SHAH T H, STEVEN M D, CLARK J A. High resolution derivative spectra in remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 33(1): 55–64.
- [38] 孙林, 程丽. 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.
- [39] PENUELAS J, FILELLA I, GAMON J A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance[J]. New Phytologist, 2010, 131(3): 291–296.
- [40] GITELSON A, MERZLYAK M N. Quantitative estimation of chlorophyll a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, 1994, 22(3): 247–252.
- [41] SIMS D A, GAMON J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 337–354.
- [42] 曹高巍, 杜锦, 苏东伟, 等. 氮肥对春玉米‘中单 509’叶片生理特性及产量的影响[J]. 天津农学院学报, 2017, 24(2): 1–4.
- [43] MARKWELL J, OSTERMAN J C, MITCHELL J L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter[J]. Photosynthesis Research, 1995, 46(3): 467–472.
- [44] 宋晓. 小麦冠层反射光谱的角度效应及植株氮素监测研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- [45] 文瑶, 李民赞, 赵毅, 等. 玉米苗期冠层多光谱反射率反演与叶绿素含量诊断[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 193–199.
- [46] 李媛媛, 常庆瑞, 刘秀英, 等. 基于高光谱和 BP 神经网络的玉米叶片 SPAD 值遥感估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 135–142.
- [47] HU B X, QIAN S E, HABOUDANE D, et al. Retrieval of crop chlorophyll content and leaf area index from decompressed hyperspectral data: the effects of data compression[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 9(2): 139–152.

责任编辑: 杨霞