

玉米叶片全磷含量高光谱遥感监测诊断模型研究*

刘冰峰 李军 贺佳

(西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在2012—2014年连续实施夏玉米磷素营养监测定位试验,在4种不同施磷量和2个夏玉米品种处理下,分别测定了拔节期、大喇叭口期、吐丝期和灌浆期玉米叶片光谱反射率及其对应叶片的全磷含量。选取了9个代表性光谱波段及其组合,利用前2年归一化光谱数据分品种与叶片全磷含量分别进行回归拟合。在各生育时期,每个品种选择决定系数和 F 值最高的4个模型,并利用第3年测定的光谱和全磷含量数据分别对两个品种进行均方根误差和相对误差的验证,选择均方根误差和相对误差较小的拟合模型。结果表明,在拔节期、大喇叭口期和灌浆期,玉米叶片全磷含量最佳的拟合光谱参量分别为波段(830+880)、(830+940)、(880+1100) nm的归一化指数。

关键词: 玉米 全磷 高光谱 诊断模型

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0252-07

Total Phosphorus Content Estimation Models of Summer Maize Leaves Based on Hyperspectral Remote Sensing

Liu Bingfeng Li Jun He Jia

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: An on-site field experiment of four phosphorus fertilizer rates treatments and two cultivars of summer maize was conducted at Northwest A&F University in 2012—2014. Crop canopy normalized spectra and total phosphorus content of maize leaves were measured at jointing, huge bellbottom, silking, filling and milk stages. Nine normalized spectra wavelengths and combinations of canopy hyperspectral remote sensing of the first and second year data were chosen to establish linear, log, quadratic and exponential function regression relationships between leaf total phosphorus content and spectra parameters for each cultivar. Four models with high determination coefficients and F values of each cultivar at each growth stage were chosen to verify the models with the third year data of normalized spectra and total phosphorus content of two cultivars separately. The models with the smallest root mean square error and relative error were taken as the best models. The results showed that the spectra parameter for the best fitting regression relationship with leaf total phosphorus content were the normalized spectra of (830 + 880) nm, (830 + 940) nm and (880 + 1100) nm at the jointing, bellbottom and filling stages of maize, respectively.

Key words: Maize Phosphorus Hyperspectral Diagnosis model

引言

磷素是植物生长发育不可缺少的三大营养元素

之一,在植物体内磷素以多种化合物形态参与各种代谢过程,促进作物高产和保持品种优良特性^[1]。磷素在土壤中有较强的后效作用,需要根据作物磷

收稿日期: 2015-05-18 修回日期: 2015-06-31

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102902)和国家自然科学基金资助项目(31071374、30771280)

作者简介: 刘冰峰,博士生,主要从事作物遥感监测研究,E-mail: lbf@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 李军,教授,博士生导师,主要从事旱作农业生态、高效农作制度和数字农作技术等研究,E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

素水平和生长状况,按需精准施用磷肥,才能够提高产量,并能节约肥料和节能减排。因而,作物生育中期磷素营养诊断是实现磷肥精准管理的关键技术措施。

与氮素光谱研究相比,植物中磷素营养与光谱特性关系研究相对较少^[2-5]。研究表明,植物磷素含量对光谱特性有较大影响,但其影响不像氮营养水平那样一致^[6]。Al-Albba 等研究表明,缺磷玉米叶片在 830、940、1 100 nm 波段光谱反射率较高。Osborne 等研究指出,玉米在缺磷较为严重的生长早期,蓝光区(440~445 nm)和近红外波段(730~930 nm)为敏感波段,可进行植物体内磷素含量的诊断,而在生长晚期和土壤中磷浓度较高时,其敏感度明显下降^[7]。程一松等研究指出,夏玉米在 580~710 nm 波段光谱反射率随磷肥用量增加而提高,且较为明显,在可见光波段范围内,其光谱特征与氮相反^[8]。王磊等研究指出,近红外反射波段 770~790 nm 也可作为玉米磷素营养监测的敏感波段^[9]。

综上所述,作物磷素营养光谱诊断研究尚欠深入,因作物品种不同与试验条件差异,导致其研究结果也不尽相同。在前人已有研究的基础上,本文基于 2 个夏玉米品种 4 个生育期测定的数据,比较不同磷肥梯度处理下夏玉米不同品种各生育期叶面积指数(LAI)和叶片磷素含量的差异,分析叶片归一化光谱与叶片磷素含量的相关关系,寻找玉米各个生育时期磷素营养含量诊断的敏感波段,构建夏玉米磷素营养诊断模型,并进行品种间误差分析,以期对玉米磷素营养状况高光谱遥感监测与诊断提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2012—2014 年在西北农林科技大学北校区农作一站(北纬 34°29', 东经 108°06')设置夏玉米营养高光谱遥感诊断田间试验。试验地位于陕西关中平原西部杨凌示范区,为暖温带半湿润气候,海拔高度 400 m 左右。试验田供试土壤为红油土,质地为粉砂粘壤土,0~20 cm 土层养分质量比为:有机质 10.48 mg/kg、全氮 1.20 g/kg、碱解氮 36.48 mg/kg、速效磷 12.49 mg/kg。试验采取二次裂区设计,磷肥为主处理,氮肥为副处理,品种为副副处理,并实行多年连续定位施肥处理。磷肥(含 P₂O₅ 质量分数 16%)处理设置 P0、P1、P2、P3 等 4 个施磷量处理,分别为 0、60、120、180 kg/hm² P₂O₅,磷肥作为底肥一次性施入。氮肥(含氮质量分数 46% 的尿素)处理设置 N0、N1、N2、N3、N4 等 5 个施氮量处理:0、75、150、225、300 kg/hm² 纯氮,总氮肥 60% 作为基

肥,40% 作为追肥。2 个供试玉米品种为豫玉 22(平展型)和郑单 958(紧凑型),种植密度:豫玉 22 为 5.25 × 10⁴ 株/hm²,郑单 958 为 6.75 × 10⁴ 株/hm²。

1.2 叶片光谱反射率与全磷含量测定

在夏玉米拔节期(6 月 26 日)、大喇叭口期(7 月 10 日)、吐丝期(8 月 4 日)和灌浆期(8 月 18 日),选择晴朗无云、无风天气,用 ASD FieldSpec 3 高光谱仪,选取有代表性玉米植株,在 10:30—13:30 测定相同叶位单叶片光谱反射率。测量时夹住玉米果穗叶(第 6 叶)的中部位置,光谱采样每 10 个为一组,每次测定 2 组,以其平均值作为该叶片光谱反射值。

采用仪器配套的夹状探头测定玉米单叶片光谱反射率,此法的优点是:①当采用自然光源测量反射光谱时,在 1 350~1 450 nm 和 1 800~1 950 nm 水分吸收带有较大噪声干扰,而采用此测量方法则无水分吸收带的噪声干扰,增加了可选择的敏感波段。②叶片距离感光原件距离相对较近,且采用了内置光源,增加了测量的稳定性及准确性。

夏玉米冠层 LAI 测量与冠层光谱反射率采集同步进行。测完光谱反射率后,在同一取样范围内,以美国 Decagon 公司生产的 AccuPAR LP-80 型植物冠层分析仪测量玉米群体 LAI,测量时为保证所得数据准确有效,每个小区测 3 次重复,每个点在平行于垄间、垂直垄间各测 3 次,取算数平均值为该测量点 LAI。

在田间光谱测量后,立即剪取测定叶片并带回实验室,进行杀青和干燥处理,采用钒钼黄吸光度法测定叶片全磷含量。

1.3 高光谱遥感估算模型的精度检验

原始光谱反射率(R_i)归一化变换($N(R_i)$)

$$N(R_i) = \frac{r_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i}$$

式中 r_i ——光谱波段

1.4 高光谱遥感估算模型的精度检验

在选择作物营养元素诊断估算模型时,不仅要求回归模型的确定系数和 F 值均要高,而且需要具有可重复性和不同品种间的普遍适用性。因此采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)检验模型的拟合精度。

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对夏玉米各生育期叶片磷含量与 LAI 的影响

表 1、2 数据显示,在夏玉米不同生育期,在相

表1 不同施氮、磷量处理下各生育期玉米叶片全磷含量

Tab.1 Leaf phosphorus content under different nitrogen and phosphorus treatments at different maize growth stages

氮肥处理	磷肥处理	mg/g							
		拔节期		大喇叭口期		吐丝期		灌浆期	
		郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22
N0	P0	1.31 ^c	1.26 ^c	0.92 ^d	0.96 ^c	0.67 ^d	0.75 ^c	0.63 ^c	0.62 ^b
	P1	1.41 ^b	1.45 ^b	1.05 ^c	1.03 ^c	0.83 ^c	0.85 ^c	0.69 ^c	0.61 ^b
	P2	1.44 ^b	1.48 ^b	1.24 ^b	1.25 ^b	0.95 ^b	1.08 ^b	0.83 ^b	0.94 ^a
	P3	1.73 ^a	1.76 ^a	1.34 ^a	1.38 ^a	1.23 ^a	1.12 ^a	0.93 ^a	0.97 ^a
N1	P0	1.63 ^c	1.59 ^c	1.15 ^b	1.11 ^b	0.97 ^c	0.97 ^b	0.70 ^b	0.72 ^b
	P1	1.73 ^b	1.69 ^b	1.18 ^b	1.17 ^b	0.96 ^c	0.95 ^b	0.73 ^b	0.78 ^b
	P2	1.71 ^b	1.72 ^b	1.33 ^a	1.33 ^a	1.12 ^b	1.07 ^a	0.78 ^b	0.84 ^{ab}
	P3	1.85 ^a	1.83 ^a	1.35 ^a	1.33 ^a	1.20 ^a	1.07 ^a	1.01 ^a	0.95 ^a
N2	P0	1.72 ^c	1.72 ^c	1.19 ^c	1.15 ^c	1.09 ^c	0.93 ^c	0.74 ^d	0.67 ^c
	P1	1.73 ^{bc}	1.73 ^c	1.20 ^c	1.20 ^c	1.00 ^c	1.02 ^c	0.89 ^c	0.75 ^c
	P2	1.93 ^b	1.90 ^b	1.46 ^b	1.48 ^b	1.25 ^b	1.20 ^b	1.02 ^b	0.99 ^b
	P3	2.13 ^a	2.13 ^a	1.64 ^a	1.60 ^a	1.39 ^a	1.41 ^a	1.30 ^a	1.12 ^a
N3	P0	1.77 ^c	1.77 ^c	1.42 ^b	1.44 ^b	1.14 ^b	1.29 ^b	0.91 ^b	1.01 ^c
	P1	1.99 ^b	2.03 ^b	1.50 ^b	1.46 ^b	1.23 ^b	1.30 ^b	1.00 ^b	1.09 ^c
	P2	2.41 ^a	2.42 ^a	1.50 ^b	1.45 ^b	1.38 ^a	1.33 ^b	1.03 ^b	1.16 ^b
	P3	2.45 ^a	2.46 ^a	1.73 ^a	1.74 ^a	1.44 ^a	1.53 ^a	1.42 ^a	1.36 ^a
N4	P0	1.92 ^b	1.92 ^b	1.52 ^c	1.51 ^c	1.32 ^c	1.38 ^b	1.17 ^b	1.27 ^b
	P1	2.07 ^b	2.08 ^b	1.61 ^{bc}	1.58 ^c	1.47 ^b	1.36 ^b	1.18 ^b	1.30 ^{ab}
	P2	2.43 ^a	2.44 ^a	1.63 ^b	1.66 ^b	1.46 ^b	1.36 ^b	1.38 ^a	1.26 ^b
	P3	2.45 ^a	2.46 ^a	1.82 ^a	1.80 ^a	1.60 ^a	1.54 ^a	1.42 ^a	1.35 ^a

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平。下同。

表2 不同施氮、磷量处理下各生育期玉米叶面积指数

Tab.2 Leaf area index (LAI) under different nitrogen and phosphorus treatments at different maize growth stages

氮肥处理	磷肥处理	mg/g							
		拔节期		大喇叭口期		吐丝期		灌浆期	
		郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22
N0	P0	0.63 ^b	0.38 ^c	1.23 ^b	1.08 ^c	1.46 ^c	1.30 ^c	3.57 ^c	3.40 ^c
	P1	0.67 ^b	0.50 ^b	1.46 ^a	1.33 ^b	1.88 ^b	1.80 ^b	3.87 ^b	3.71 ^b
	P2	0.67 ^b	0.55 ^a	1.50 ^a	1.33 ^b	2.00 ^b	1.78 ^b	3.93 ^b	3.81 ^b
	P3	0.70 ^a	0.59 ^a	1.53 ^a	1.42 ^a	2.55 ^a	2.43 ^a	4.40 ^a	4.24 ^a
N1	P0	0.66 ^c	0.52 ^b	1.65 ^b	1.50 ^b	1.98 ^c	1.80 ^c	3.80 ^c	3.62 ^c
	P1	0.77 ^b	0.58 ^b	1.66 ^b	1.47 ^b	2.11 ^c	1.79 ^c	4.15 ^b	4.03 ^b
	P2	0.87 ^a	0.72 ^a	1.77 ^a	1.67 ^a	2.54 ^b	2.39 ^b	4.14 ^b	4.01 ^b
	P3	0.89 ^a	0.73 ^a	1.75 ^a	1.71 ^a	2.71 ^a	2.61 ^a	4.62 ^a	4.49 ^a
N2	P0	0.70 ^b	0.58 ^b	1.77 ^b	1.59 ^b	2.34 ^d	2.15 ^c	4.20 ^c	4.05 ^c
	P1	0.85 ^{ab}	0.74 ^a	1.75 ^b	1.58 ^b	2.70 ^c	2.52 ^b	4.56 ^b	4.39 ^b
	P2	0.91 ^a	0.77 ^a	2.29 ^a	2.15 ^a	2.97 ^b	2.87 ^a	4.74 ^a	4.56 ^{ab}
	P3	0.92 ^a	0.77 ^a	2.35 ^a	2.22 ^a	3.11 ^a	2.98 ^a	4.83 ^a	4.66 ^a
N3	P0	0.95 ^a	0.79 ^a	1.94 ^c	1.76 ^c	2.47 ^c	2.28 ^c	4.09 ^b	3.98 ^b
	P1	0.95 ^a	0.83 ^a	1.97 ^c	1.86 ^c	2.79 ^b	2.59 ^b	4.64 ^a	4.45 ^a
	P2	1.00 ^a	0.83 ^a	2.30 ^b	2.15 ^b	3.09 ^a	2.97 ^a	4.68 ^a	4.49 ^a
	P3	1.03 ^a	0.86 ^a	2.43 ^a	2.46 ^a	3.23 ^a	3.04 ^a	4.72 ^a	4.52 ^a
N4	P0	0.99 ^b	0.86 ^b	2.07 ^c	1.88 ^b	2.71 ^b	2.57 ^b	4.55 ^c	4.40 ^c
	P1	1.06 ^b	0.93 ^{ab}	2.28 ^b	2.09 ^b	3.25 ^a	3.00 ^a	4.95 ^b	4.81 ^b
	P2	1.14 ^a	0.98 ^a	2.69 ^a	2.50 ^a	3.25 ^a	3.05 ^a	5.28 ^a	5.10 ^a
	P3	1.14 ^a	1.00 ^a	2.73 ^a	2.60 ^a	3.27 ^a	3.08 ^a	5.32 ^a	5.14 ^a

同氮肥水平下,随着施磷量增加,2个玉米品种叶片全磷含量与 LAI 随之升高(表 1、2 中数据为 3 年测

量叶片全磷含量及 LAI 的平均值);在相同磷肥水平下,随着施氮量增加,2个玉米品种叶片全磷含量

与 LAI 随之升高。在同一生育期,高磷水平(P3)与不同氮素梯度耦合条件下,叶片含磷量与 LAI 均高于低磷素(P0)水平下的氮磷耦合。如大喇叭口期郑单 958 高磷与低磷施肥处理条件下,叶片磷素含量分别相差 0.42、0.20、0.45、0.31、0.30 mg/g; LAI 差值分别为 0.20、0.10、0.58、0.49、0.66。拔节期玉米对磷素需求量不高,高氮磷耦合的磷肥处理间叶片磷含量差异不显著。在玉米生长早期,不同施磷量处理叶片全磷含量差异较明显,而在玉米生育晚期,不同施磷量处理叶片含磷量差异逐渐趋于不明显,这与 Osborne 等的研究结果相似^[10]。

2.2 不同生育期玉米叶片全磷含量与叶片归一化光谱相关关系

图 1 显示,在 400 ~ 2 500 nm 光谱范围内,不同生育期夏玉米叶片磷含量与叶片归一化光谱相关关系差异较大,但相关系数动态走势基本相似。在同一生育期,2 个玉米品种叶片含磷量与归一化光谱相关关系变化动态基本相似,且相关系数差异均不大。在拔节期,2 个夏玉米品种的全磷含量与归一化光谱在 740 ~ 1 320 nm 波段有较高且稳定的正相关关系,且为极显著相关;在大喇叭口期 740 ~ 1 380 nm 波段,夏玉米叶片全磷含量与叶片归一化光谱均具有较高且稳定的正相关性,且均达到极显著正相关。在吐丝期,叶片全磷含量与归一化光谱走势与拔节期和大喇叭口期的相关动态走势基本相似,但未达到显著相关水平,这与王磊等的研究结论相似^[11],这可能是在此生育期,决定光谱特征的化

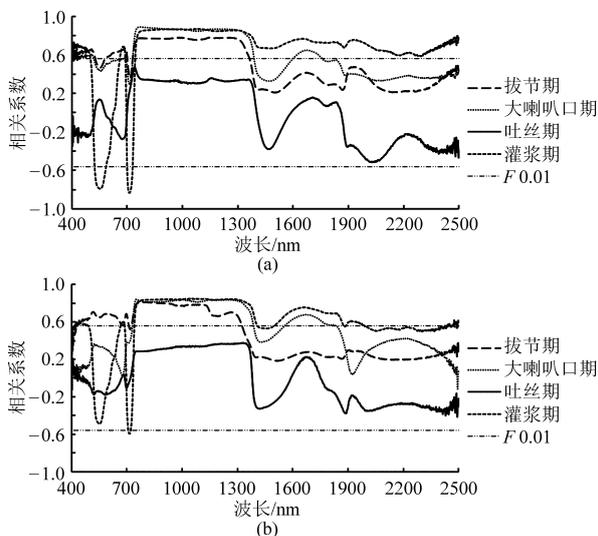


图 1 不同生育期夏玉米不同品种叶片全磷含量与叶片归一化光谱的相关系数

Fig. 1 Correlation coefficient between leaf total phosphorus content and normalized spectra of summer maize cultivar ZD958 and YY22 at different growth stages

(a) 郑单 958 (b) 豫玉 22

学和物理因素变动较大或较紊乱,导致反射光谱监测不敏感。在灌浆期,2 个夏玉米品种叶片含磷量与归一化光谱有相似的相关关系,在 750 ~ 2 500 nm 波段,叶片含磷量与归一化光谱显著正相关,且相关关系较稳定;在 740 ~ 1 400 nm 具有稳定的正相关关系。表 3 列出了叶片归一化光谱与全磷含量在 400 ~ 2 500 nm 光谱范围内达到稳定显著相关水平的波段及相关系数。

表 3 不同生育期夏玉米叶片磷含量与归一化光谱的敏感波段及相关系数

Tab. 3 Sensitive bands and correlation coefficient between leaf phosphorus content and normalized spectra at different maize growth stages

生育期	敏感波段/nm	品种	相关系数	平均相关系数
拔节期	740 ~ 1 320	郑单 958	0.718 ~ 0.781	0.769
		豫玉 22	0.586 ~ 0.811	0.757
大喇叭口期	740 ~ 1 380	郑单 958	0.666 ~ 0.890	0.859
		豫玉 22	0.630 ~ 0.845	0.821
灌浆期	750 ~ 2 500	郑单 958	0.583 ~ 0.869	0.748
		豫玉 22	0.497 ~ 0.850	0.681

2.3 玉米叶片归一化光谱特征波段的选择及其组合

根据上述敏感波段的筛选,并综合 Al-Abbas 等^[7-8,12-13]的研究结论,选择 9 个波段归一化光谱、双波段组合(16 组)成特征光谱参数(表 4),与叶片含磷量做进一步相关分析。由于光谱相关系数在 1 350 ~ 1 400 nm 具有较大波动,所以以此为界,将波段分为 2 组,并进行双波段组合。由表 4 可知,多数双波段组合与叶片全磷含量的相关系数普遍高于单波段。2 个品种的相关系数有一定的差异,但总体趋势相同。

磷素对玉米归一化光谱的影响较为复杂,植物对磷素吸收不仅与植物的根系特性和土壤中磷素有效性、浓度有关^[14-15],还受到其他养分含量变化^[16]及其与磷素营养交互作用^[17]的影响。因此,不同磷素营养水平直接影响了叶片的理化性状,从而间接影响了叶片归一化光谱。所以吐丝期归一化光谱与叶片磷含量相关性未达到显著水平,而拔节期、大喇叭口期和灌浆期均达到极显著相关水平。

在拔节期、大喇叭口期的近红外短波波段(780 ~ 1 100 nm)为极显著相关。伴随着夏玉米生育期的推进,在灌浆期的相关系数多为极显著相关。不同施磷量条件下,在不同生育期叶片内化学成分及物理组成变化较大,进而影响了光谱反射的特征。

2.4 叶片全磷含量光谱诊断模型构建及其精度检验

本品种检验指利用本品种数据检验模型精度,

表4 不同生育期夏玉米叶片全磷含量与特征光谱值的相关系数

Tab.4 Correlation coefficients between leaf total phosphorus content and typical spectra parameters of summer maize at different growth stages

特征波段及 其组合/nm	拔节期		大喇叭口期		吐丝期		灌浆期	
	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22	郑单 958	豫玉 22
830	0.771 *	0.809 *	0.881 *	0.817 *	0.065	0.068	0.857 *	0.838 *
880	0.767 *	0.802 *	0.874 *	0.819 *	0.071	0.053	0.863 *	0.841 *
940	0.770 *	0.796 *	0.864 *	0.829 *	0.075	0.045	0.867 *	0.843 *
1 100	0.759 *	0.785 *	0.849 *	0.818 *	0.078	0.013	0.866 *	0.847 *
1 430	0.243	0.228	0.351	0.387	0.291	0.343	0.671 *	0.535
1 580	0.309	0.221	0.518	0.600 *	0.252	0.227	0.735 *	0.702 *
1 650	0.407	0.272	0.638 *	0.674 *	0.204	0.190	0.768 *	0.755 *
1 740	0.349	0.256	0.593 *	0.635 *	0.189	0.212	0.730 *	0.721 *
2 200	0.221	0.198	0.375	0.423	0.304	0.316	0.606 *	0.533
830 + 880	0.769 *	0.806 *	0.878 *	0.818 *	0.068	0.060	0.860 *	0.840 *
830 + 940	0.771 *	0.803 *	0.873 *	0.824 *	0.070	0.056	0.862 *	0.841 *
830 + 1 100	0.766 *	0.799 *	0.867 *	0.820 *	0.072	0.041	0.862 *	0.843 *
880 + 940	0.775 *	0.799 *	0.870 *	0.819 *	0.073	0.049	0.861 *	0.842 *
880 + 1 100	0.764 *	0.795 *	0.863 *	0.820 *	0.075	0.033	0.865 *	0.844 *
940 + 1 100	0.765 *	0.791 *	0.858 *	0.825 *	0.077	0.029	0.866 *	0.845 *
1 430 + 1 580	0.280	0.226	0.439	0.502	0.279	0.289	0.714 *	0.631 *
1 430 + 1 650	0.332	0.253	0.499	0.540	0.256	0.277	0.734 *	0.666 *
1 430 + 1 740	0.302	0.245	0.475	0.517	0.247	0.286	0.711 *	0.641 *
1 430 + 2 200	0.233	0.213	0.365	0.406	0.299	0.330	0.649 *	0.537
1 580 + 1 650	0.358	0.246	0.579 *	0.637 *	0.228	0.210	0.752 *	0.730 *
1 580 + 1 740	0.329	0.238	0.556	0.618 *	0.222	0.220	0.732 *	0.712 *
1 580 + 2 200	0.268	0.211	0.448	0.519	0.281	0.273	0.684 *	0.635 *
1 650 + 1 740	0.378	0.264	0.616 *	0.655 *	0.197	0.201	0.750 *	0.739 *
1 650 + 2 200	0.320	0.237	0.509	0.558	0.257	0.259	0.707 *	0.673 *
1 740 + 2 200	0.289	0.229	0.485	0.535	0.248	0.268	0.680 *	0.646 *

注: * 表示相关系数显著水平 $P < 0.01$, 样本数 $n = 20$, $r = 0.561$ 。

品种间交叉检验指利用另一品种数据检验该模型精度。从表4中,在每个生育期每个品种选择相关系数较高的4个指数进行线性、对数、二次和指数回归拟合分析,选择决定系数和 F 值较高的方程进行模型精度检验(表5)。在拔节期,在本品种检验中,只有豫玉22的(830 + 880)、(830 + 940) nm 拟合方程有较低的均方根误差和相对误差,但(830 + 940) nm 拟合方程在交叉检验中上述值较高,不适用于郑单958品种。在大喇叭口期,本品种检验的RMSE和RE均差异较小,但只有豫玉22所建立的(830 + 940) nm 模型在交叉检验中具有较低的RMSE和RE,具有品种间的适用性。在灌浆期,2个品种拟合模型均具有较低的均方根误差和相对误差,选择决定系数和 F 值相对较高,且在两个品种的检验结果中具有较低值的(830 + 940) nm 为最适模型。

本研究结果表明,敏感波段均为近红外短波段,而在可见光波段,相关系数变化动态的波动较大,可能是受花青苷等磷素敏感色素的影响,导致在400 ~ 700 nm 波段内叶片光谱反射率波动较大,不

适宜磷素的营养监测。在近红外长波段(1 100 ~ 2 500 nm),受木质素、淀粉和水分等的影响,相关系数变化动态稳定性亦不如近红外短波段。

3 讨论

合理分配和利用磷肥是农业精准施肥和测土配方施肥的重要任务,准确、快速、及时地对作物磷素营养状况做出判断是农田精确施肥的基础。通过分析特征光谱参数与叶片含磷量之间的关系,选定农作物生长特征的光谱波段及其衍生参数,能够构建准确性高、稳定、误差低的作物含磷量预测拟合模型,可为合理施肥和营养检测、诊断提供现实依据。本研究采用不同夏玉米品种、不同磷素水平和不同生育期的3年田间试验数据,比较分析了不同光谱参数下叶片全磷含量的模拟效果及其模型预测能力,筛选出了各生育期最佳叶片含磷量预测拟合模型,为夏玉米叶片磷营养遥感监测提供了科学依据。

分品种分析了不同施磷量对夏玉米各生育期叶片磷含量及LAI的影响,分品种对夏玉米叶片全磷

表 5 不同生育期夏玉米叶片全磷含量与光谱变量回归模型及检验

Tab. 5 Regression models and verification between leaf total phosphorus content and spectral parameters of summer maize at different growth stages

生育期	品种	拟合方程	特征波段及其 组合/nm	R^2	F 值	本品种检验		交叉检验	
						RMSE	RE	RMSE	RE
拔节期	郑单 958	$Y = 4.943 + 3.337 \ln x$	830	0.598	26.762	0.231	9.69	0.242	10.29
		$Y = -14.342 + 71.340x - 76.559x^2$	940	0.640	15.104	0.226	9.56	0.267	13.35
		$Y = -1.378 + 4.093x$	830 + 940	0.592	26.113	0.232	9.77	0.240	10.52
	豫玉 22	$Y = -14.136 + 35.047x - 18.710x^2$	880 + 940	0.639	15.055	0.240	10.63	0.216	11.19
		$Y = 0.067e^{8.059x}$	830	0.663	35.425	0.214	8.79	0.226	9.33
		$Y = 7.168 + 5.958 \ln x$	880	0.652	33.324	0.216	8.95	0.235	9.31
大喇叭口期	郑单 958	$Y = 0.068e^{4.019x}$	830 + 880	0.664	35.078	0.205	7.77	0.217	8.44
		$Y = 3.084 + 6.047 \ln x$	830 + 940	0.661	33.410	0.206	7.80	0.235	9.80
		$Y = -10.065 + 49.005x - 53.360x^2$	830	0.795	32.892	0.098	7.88	0.120	10.65
	豫玉 22	$Y = 3.324 + 2.540 \ln x$	880	0.789	61.691	0.102	8.73	0.114	9.37
		$Y = -0.9966 + 24.292x - 13.215x^2$	830 + 880	0.791	32.256	0.107	9.24	0.131	10.77
		$Y = 1.579 + 2.561 \ln x$	830 + 940	0.783	59.053	0.097	7.74	0.100	7.90
灌浆期	郑单 958	$Y = -4.303 + 21.984x - 20.078x^2$	880	0.675	17.616	0.100	8.51	0.126	10.80
		$Y = 3.367 + 2.265 \ln x$	940	0.682	38.551	0.110	9.15	0.115	10.45
		$Y = 1.797 + 2.291 \ln x$	830 + 940	0.690	38.213	0.105	8.87	0.106	9.88
	豫玉 22	$Y = 1.799 + 2.269 \ln x$	940 + 1 100	0.699	39.716	0.099	8.05	0.120	10.55
		$Y = 5.820 + 4.999 \ln x$	940	0.799	63.717	0.108	8.88	0.124	10.14
		$Y = 5.890 + 5.081 \ln x$	1 100	0.796	68.382	0.110	8.86	0.140	12.14
灌浆期	郑单 958	$Y = -3.784 + 6.251x$	880 + 1 100	0.812	69.341	0.128	9.25	0.123	10.26
		$Y = 2.356 + 5.023 \ln x$	940 + 1 100	0.770	60.304	0.114	8.92	0.141	12.05
		$Y = 0.012e^{11.120x}$	940	0.784	65.390	0.111	9.19	0.122	10.26
	豫玉 22	$Y = 0.011e^{11.327x}$	1 100	0.789	67.155	0.108	9.04	0.132	11.24
		$Y = 1.215 - 5.835x + 6.968x^2$	880 + 1 100	0.784	44.580	0.107	8.72	0.109	9.02
		$Y = 1.580 - 6.818x + 7.646x^2$	940 + 1 100	0.798	68.536	0.117	10.46	0.125	10.38

注: $\alpha=0.01$, $F(1, 18) = 8.29$ 。x 指敏感波段的归一化指数, Y 指叶片全磷含量(mg/g)。

含量与归一化光谱等参量进行了相关性分析,从中选择出相关系数高的组合进行线性回归方程拟合,并进一步比较其决定系数、 F 值,且分别对 2 个品种的均方根误差和相对误差进行了检验,选择得到了同时适合 2 个夏玉米品种的叶片全磷含量高光谱遥感预测模型,具有较好的预测性、代表性、通用性和稳定性。

在前人对养分含量和光谱众多变量预测模型研究中,主要偏重于氮素的研究,对于磷素的研究相对较少,且结果也不尽一致^[18-19]。这是因为植物轻度缺磷时,叶绿素浓度有可能提高,但在严重缺磷时,叶片光谱分析才能用于磷营养诊断。因为缺磷的植物叶片的细胞其伸长受影响的程度超过叶绿素所受的影响,因此其单位叶面积中叶绿素含量较高,较正常植株叶片呈暗绿色;又因为缺磷的植株,体内碳水化合物代谢受阻,有糖分积累,易形成花青素^[1]。所以,叶绿素和花青素对缺磷植物叶片反射光谱的影响较大,导致光谱分析过程较为复杂,其分析结果也较为不一致。

在前文论述中,测试的 2 个玉米品种敏感波

段均为近红外波段,且不同生育期的敏感波段有所不同。在生育早期,敏感波段在 740 ~ 1 320 nm,在生育中后期,增加了近红外长波段为敏感波段。叶片反射光谱在近红外波段区域主要是 N—H 和 O—H 化学键弯曲、伸展共同作用的结果,但这两种化学键为水、纤维素、糖、淀粉和木质素等吸收光谱所共有的,所以一个波长可能对应多种化合物^[20]。此现象增加了磷素营养监测的难度,并且导致预测磷素营养的模型波段不为单一敏感波段,并且其敏感波段随着生育期的改变而发生相应的变化。

综合植物营养学、相关波段和相关系数可看出,拔节期和大喇叭口期对养分的吸收和利用效率最高,740 ~ 1 320 nm 和 740 ~ 1 380 nm 分别为这两个生育期的敏感波段。不同的磷肥水平导致了叶片磷素含量的差异,进而影响玉米叶片内部生化成分和细胞物理排列等,导致了不同磷营养水平下不同的光谱特征。因为磷素含量的多少,直接影响与磷素有关的植物体内一系列重要物质的含量及生理代谢。如核酸、磷脂、植素、ATP 含 P 的酶和蛋白质的含量及组成比,参与光合作用及碳水化合物的合成

与运转等过程中,也有大量的磷素代谢和运输,如光合磷酸化和蔗糖磷酸酯运输等。此类生物大分子受到一定强度的光照辐射后,部分化学键会发生相应的物理化学变化,如电子跃迁等,形成有特征的光谱反射曲线,以此反演叶片磷素含量。

目前,关于磷素光谱变量回归分析包括单波段变量、窄波段变量、宽波段变量、一阶导数变量和众多光谱特征参量等,基于不同作物也进行了大量相关研究^[21-23]。研究表明,基于不同作物的众多磷素模型的精度和敏感波段也有较大差异,且对于不同磷肥水平和生育期,其敏感度也有一定的差异。所以在对玉米磷素的高光谱模型的建立中,磷素与归一化光谱的敏感波段及众多光谱参量的相关性受不同玉米品种、磷肥水平和生育期的影响,这为构建普适性遥感模型带来了较大困难。今后,需要加强对不同品种和各生育期均具有普适性的磷素高光谱

遥感模型研究,并提高在不同磷肥水平下模型的适用性,适用于磷素测定的参量的选择及精度检验还须进一步进行相关论证。

4 结论

(1)随施磷量增加,玉米叶片全磷含量与 LAI 随之升高。不同施磷量处理玉米叶片生长早期全磷含量差异较明显,而生育晚期逐渐趋于不明显。拔节期、大喇叭口期和灌浆期适于叶片全磷含量的监测。

(2)本研究结果表明,拔节期、大喇叭口期和灌浆期夏玉米叶片全磷含量与(830 + 880)、(830 + 940)、(880 + 1 100) nm 波段的归一化指数光谱参量拟合效果最好,其最优预测方程分别为 $Y = 0.068e^{4.019x}$ 、 $Y = 1.579 + 2.561\ln x$ 和 $Y = 1.215 - 5.835x + 6.968x^2$ 。

参 考 文 献

- 1 陆景陵. 植物营养学:上册[M]. 北京:中国农业大学出版社,2003.
- 2 Sembiring H, Raun W R, Johnson G V, et al. Detection of nitrogen and phosphorus nutrient status in *bermudagrass* using spectral radiance[J]. *Plant Nutrition*, 1998, 21(6): 1189 - 1206.
- 3 Chen Ming, Glaz B, Gilbert R A, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of phosphorus in sugarcane leaves[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(6): 1324 - 1331.
- 4 Ponzoni F J, Goncalves L M. Spectral features associated with nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies in *Eucalyptus saligna* seedling leaves[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(11): 2249 - 2264.
- 5 Milton N M, Ager C M, Eiswerth B A, et al. Arsenic- and selenium-induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(3): 263 - 269.
- 6 Milton N M, Eiswerth B A, Ager C M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36(2): 121 - 127.
- 7 Al-Abbas A H, Barr R, Hall J D, et al. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves[J]. *Agronomy Journal*, 1974, 66(1): 16 - 20.
- 8 程一松, 胡春胜, 王成, 等. 养分胁迫下的夏玉米生理反应与光谱特征[J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 54 - 58.
Cheng Yisong, Hu Chunsheng, Wang Cheng, et al. Physiological response and spectral characteristics of summer corn under nutrient stress condition[J]. *Resources Science*, 2001, 23(6): 54 - 58. (in Chinese)
- 9 王磊, 自由路, 陈仲新, 等. 低温胁迫下的夏玉米苗期高光谱特征[J]. *农业网络信息*, 2004(4): 27 - 33.
- 10 Osborne S L, Sehepers J S, Francis D D, et al. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(1): 1215 - 1221.
- 11 王磊, 自由路, 杨俐苹. 春玉米磷素营养的光谱响应及诊断[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 802 - 808.
Wang Lei, Bai Youlu, Yang Liping. Spectral response and diagnosis of phosphorus nutrition in corn [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 802 - 808. (in Chinese)
- 12 Li Bingqing, Liew O W. Pre-visual detection of iron and phosphorus deficiency by transformed reflectance spectra [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2006, 85(2): 131 - 139.
- 13 高洪燕, 毛罕平, 张晓东. 生菜叶中磷含量的光谱定量分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(增刊): 276 - 280.
Gao Hongyan, Mao Hanping, Zhang Xiaodong. Quantitative determination of phosphorus in lettuce leaf using spectroscopy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(Supp.): 276 - 280. (in Chinese)
- 14 Anghinoni I, Barber S A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply [J]. *Agronomy Journal* 1980, 72(4): 685 - 688.
- 15 郭玉春, 林文雄, 石秋梅, 等. 低磷胁迫下不同磷效率水稻苗期根系的生理适应性研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 61 - 65.
Guo Yuchun, Lin Wenxiong, Shi Qiumei, et al. Physiological adaptability of seeding rice genotypes with different P uptake efficiency under low P-deficient stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 61 - 65. (in Chinese)

1424.

Wu Yun, Zeng Yuan, Zhao Yan, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai River Basin based on MODIS data [J]. Resources Science, 2010, 32(7):1417-1424. (in Chinese)

- 17 牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(1):27-30. Niu Baoru, Liu Junrong, Wang Zhengwei. Remote sensing information extraction based on vegetation fraction in drought and half-drought area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(1):27-30. (in Chinese)
- 18 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2896-2903. Li Dengke, Fan Jianzhong, Wang Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage(FVC) in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11):2896-2903. (in Chinese)
- 19 陈晓光, 李剑萍, 韩颖娟, 等. 宁夏近20年来植被覆盖度及其与气温降水的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9):1375-1383. Chen Xiaoguang, Li Jianping, Han Yingjuan, et al. Vegetation coverage and its relationships with temperature and precipitation in Ningxia in 1981-2004[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9):1375-1383. (in Chinese)
- 20 孙红雨, 王长耀. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3):204-211. Sun Hongyu, Wang Changyao. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3):204-211. (in Chinese)
- 21 郭锐, 韩天虎, 王静, 等. 玛曲退牧还草工程生态效果的遥感监测[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1):154-160. Guo Ni, Han Tianhu, Wang Jing, et al. Ecological effects of restoring grazing to grassland project in Maqu County[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(1):154-160. (in Chinese)
- 22 刘志红, 郭伟玲, 杨勤科, 等. 近20年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1):16-23. Liu Zhihong, Guo Weiling, Yang Qinke, et al. Vegetation cover changes and their relationship with rainfall in different physiognomy type areas of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(1):16-23. (in Chinese)
- 23 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学:D辑, 2007, 37(11):1504-1514. Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Zheng Wei. Climate change and human activities impact on the Loess Plateau vegetation cover change [J]. Science in China Press, 2007, 37(11):1504-1514. (in Chinese)
- 24 张岩, 张清春, 刘宝元. 降水变化对陕北黄土高原植被覆盖度和高度的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2):268-272. Zhang Yan, Zhang Qingchun, Liu Baoyuan. Study on vegetative coverage and height variation in Northern Loess Plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2):268-272. (in Chinese)

(上接第258页)

- 16 Fredeen A L, Rao I M, Terry N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max* [J]. Plant Physiology, 1989, 89(1):220-280.
- 17 郑绍建, 杨志敏, 胡霁堂. 玉米、小麦细胞磷、锌营养及交互作用的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2):150-155. Zheng Shaojian, Yang Zhimin, Hu Aitang. Study on the nutrition of phosphorus and zinc interaction in corn and wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(2):150-155. (in Chinese)
- 18 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):247-260. Shi Zhou, Liang Zongzheng, Yang Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):247-260. (in Chinese)
- 19 Graeff S, Steffens D, Schubert S. Use of reflectance measurements for the early detection of N, P, Mg, and Fe deficiencies in *Zea mays* L. [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001, 164(4):445-450.
- 20 Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3):271-281.
- 21 李颖, 薛利红, 潘复燕, 等. 氮磷互作对水稻冠层光谱的影响及 PNN 识别 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(14):2742-2750. Li Ying, Xue Lihong, Pan Fuyan, et al. Effect of interaction of N and P on rice canopy spectral reflectance and its PNN identification [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(14):2742-2750. (in Chinese)
- 22 刘炜, 常庆瑞, 郭曼, 等. 冬小麦导数光谱特征提取与缺磷胁迫神经网络诊断 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4):1092-1096. Liu Wei, Chang Qingrui, Guo Man, et al. Diagnosis of phosphorus nutrition in winter wheat based on first derivative spectra and radial basis function neural network [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(4):1092-1096. (in Chinese)
- 23 黄双萍, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于高光谱的柑橘叶片磷含量估算模型实验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(4):202-207. Huang Shuangping, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Hyperspectral estimation model of total phosphorus content for citrus leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):202-207. (in Chinese)