

冬小麦冠层光谱与土壤供氮状况相关性研究

李广信^{1,2} 王超¹ 冯美臣¹ 杨武德¹ 李方舟² 冯瑞云²

(1. 山西农业大学农学院, 太谷 030801; 2. 山西省农业科学院作物科学研究所, 太原 030031)

摘要: 通过设置2个冬小麦品种不同氮素水平的完全随机区组试验, 获取冬小麦关键生育期(返青期、拔节期、孕穗期、灌浆期)的土壤氮素、植株氮素和冠层光谱数据, 通过分析土壤氮素与植株氮素间的相关关系, 间接构建土壤氮素状况的光谱诊断模型。结果表明, 不同施氮水平冬小麦各生育期冠层光谱与麦田土壤氮素含量差异显著, 土壤硝态氮、碱解氮含量与冬小麦植株氮素含量的相关系数达到0.72以上, 相关系数分别在0.72~0.84和0.75~0.82之间, 均达极显著水平, 而土壤全氮含量与冬小麦植株含氮量的相关性相对较差; 研究证实土壤调节植被指数SAVI(1040,680)和比值植被指数RVI(1040,680)分别与土壤硝态氮、碱解氮含量具有重要的关系。另外, 基于光谱参数SAVI(1040,680)的土壤硝态氮估算模型($R^2 \geq 0.7396$)和基于RVI(1040,680)所构建的碱解氮含量估算模型($R^2 \geq 0.8100$)具有较好的估测能力, 可以实现利用冠层光谱对土壤氮素状况的实时、快速估测。

关键词: 冬小麦; 冠层光谱; 硝态氮; 碱解氮

中图分类号: S512.1⁺1; Q948.113 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)05-0275-07

Correlation between Soil Nitrogen Situation and Canopy Spectra of Winter Wheat

LI Guangxin^{1,2} WANG Chao¹ FENG Meichen¹ YANG Wude¹ LI Fangzhou² FENG Ruiyun²

(1. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

2. Institute of Crop Science, Shanxi Academy of Agricultural Science, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Soil nitrogen is important to crop production. The lower nitrogen efficiency is mainly caused by the reason that the nitrogen is commonly applied untimely or non-appropriately. In order to take advantage of winter wheat canopy spectra synchronous implementation indirectly and rapidly diagnose soil nitrogen status, experiment with completely randomized block was conducted for two wheat varieties with different nitrogen levels. Soil and plant nitrogen levels and real-time canopy spectra were measured at different growth stages of winter wheat, i.e., the reviving, jointing, booting and filling stages. Mathematical statistical methods were used to analyze the quantitative relationship between soil nitrogen and plant nitrogen, and build a remote monitoring model of soil nitrogen by using the canopy spectral reflectance. The results showed that the canopy spectral reflectance of winter wheat at each growth stage was significantly different from soil nitrogen content with the application of different levels of nitrogen fertilizer. There were significant relationship between soil nitrate nitrogen content, soil available nitrogen content and nitrogen content of winter wheat plants, and the correlation coefficient could exceed 0.72. However, the relationship between soil total nitrogen content and nitrogen content of winter wheat plants was hardly relevant. The spectra parameters of SAVI(1040,680) and RVI(1040,680) were determined to have important relationship with the soil nitrate nitrogen and available nitrogen contents, respectively. Moreover, the monitoring models of soil nitrate nitrogen and available nitrogen contents based on the spectra parameters performed the best with $R^2 \geq 0.7396$ and $R^2 \geq 0.8100$, respectively. The research result would supply some technical reference for the real-time monitor of soil nitrogen in winter wheat fields by using the canopy spectral reflectance.

Key words: winter wheat; canopy spectra; nitrate nitrogen; available nitrogen

收稿日期: 2017-01-12 修回日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371572、31201168)

作者简介: 李广信(1975—),男,博士生,山西省农业科学院副研究员,主要从事作物信息技术研究,E-mail: nkylgx@163.com

通信作者: 杨武德(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事作物生态和农业信息技术研究,E-mail: sxauywd@126.com

引言

氮素是作物生产中的重要营养元素,也是农业生态系统中最为活跃的元素之一^[1],合理施氮对于提高作物产量、品质、氮素利用率具有积极的作用,但是施氮不适量、不适时的现实情况,降低了氮肥利用率,甚至造成土壤质量下降和土壤生态环境的污染^[2]。实时、快速、准确掌握作物和土壤氮素状况是合理施氮的重要途径之一^[3]。但依靠传统室内化验分析的手段难以满足这一需求^[4-5]。近年来,高光谱分析技术的快速发展,为解决这一需求提供了有效的手段和方法^[6]。

作物冠层光谱分析作为一种无损监测技术,对获取作物营养和土壤养分信息,实施田间氮肥管理具有重要意义。CAMBOU等^[7]利用近红外光谱技术实现了土壤有机质的准确监测。NAWAR等^[8]在对光谱数据进行预处理后提高了土壤有机质和土壤粘粒含量的预测精度。ARAÚJO等^[9]利用光谱技术同时实现了土壤中12种理化性质的估测,效果较好。以上研究是在采集土壤样品后室内条件下进行的,研究结果难以直接应用于田间土壤理化性质的估测。虽然一些研究针对大田的裸露表土进行了一些土壤理化性质的估算,但是针对有作物生长的田间土壤养分的快速诊断仍然具有一定的局限性^[10-12]。诸多研究表明冬小麦冠层光谱与植株氮素密切相关,FEMANDEZ等^[13]用660 nm和545 nm波段的线性组合估测了冬小麦植株的氮素含量。王纪华等^[14]研究发现冬小麦中下层叶片光谱与氮素含量关系密切。王树文等^[15]采用单变量NDVI二次函数回归模型进行了玉米苗期冠层氮含量的准确估测,精度可达0.8。叶晓青等^[16]利用比值植被指数RVI(810,680)实现了烤烟植株中层、上中层、上中下层氮素积累量的准确反演。因此,探索利用冠层光谱进行土壤养分的估算具有一定的实践意义。CHRIST等^[17]研究指出棉花和大豆冠层光谱不仅能反映作物生长状况,并且与田间土壤肥力特征有着密切关系。DIKER等^[18]对冠层反射光谱与植株含氮量、植株含氮量与土壤无机氮含量做了相关研究,指出可以作物冠层反射光谱间接地对土壤无机氮含量进行预测。从统计学角度来看,随着生育期的推进,土壤剩余氮素会减少,作物氮素会增加,土壤中减少的氮素量与作物中增加的氮素量存在一定关系,不同生育期土壤氮素与作物氮素也存在某种关系。分析冠层光谱、作物氮素含量和土壤氮素含量之间的关系,实现作物氮素含量和土壤氮素含量状况的反演,对于田间管理具有重要的实践意义。

纵观国内外研究可以发现,利用光谱技术直接探测作物养分和土壤理化性质的研究较多,且取得了一定的效果。也有研究报道了利用作物为中间变量来探究冠层光谱与土壤理化性质的关系,并实现棉花和水稻土壤理化性质的快速、准确监测^[19-20]。本文通过分析冬小麦冠层光谱参数与土壤硝态氮、碱解氮含量以及全氮含量的关系,探究大田条件下利用冬小麦冠层光谱间接、实时评价土壤氮素状况的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验1:于2012—2013年在山西省闻喜县神柏乡下岭后村试验田(东经111°10'17"、北纬35°21'20")进行。供试土壤类型为褐土,土壤呈中性、微碱性,有机质、矿物质积累较多,肥力较高,腐殖质层较厚。土壤耕层全氮含量为0.46 g/kg,碱解氮含量为24.76 mg/kg,速效磷含量为15.26 mg/kg,有机质含量9.75 g/kg。供试品种为“运麦218”和“晋太170”,试验采用单因素随机区组排列,3次重复,各处理小区面积20 m²(8 m × 2.5 m)。设5个施氮水平,分别为0、75、150、225、300 kg/hm²纯氮,以尿素(含N质量分数46%)作氮肥,50%基肥、50%返青后期施入。磷、钾肥以基肥一次性施入,过磷酸钙(含P₂O₅质量分数16.5%)作磷肥,施磷量(P₂O₅)100 kg/hm²;氯化钾(含K₂O质量分数61.5%)作钾肥,施钾量(K₂O)100 kg/hm²。冬小麦返青后一次性追肥,田间光谱测试和采样时期分别为返青期、拔节期、孕穗期和灌浆期,试验资料用于监测模型的构建。

试验2:于2013—2014年,在山西省闻喜县东镇农田每隔一定距离选取样本37份,试验田各处理与下岭后村处理方法一致。分别在冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和灌浆期,测定冬小麦冠层光谱,采集土壤样本并测定氮素指标,试验资料用于监测模型的检验。

1.2 测定方法

1.2.1 冠层光谱测定

冬小麦的冠层光谱数据测量采用美国ASD (Analytical spectral device)公司生产的FieldSpec 3光谱仪,测量波长范围350~2500 nm,视场角度为25°。其中,350~1000 nm间的光谱采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm;1000~2500 nm的光谱采样间隔为2 nm,光谱分辨率为10 nm。测量时间为10:00—14:00。观测时,探头垂直向下,距冠层1.5 m。每块麦田重复测量3次,每次测量前先用白板校正。

1.2.2 氮素测定

在冬小麦返青期、拔节期、孕穗期、灌浆期,按五点法在各小区选取5株代表性植株,在105℃下杀青30 min之后,75℃下干燥至质量恒定,称干质量,然后粉碎,混合均匀。测定混合物的全氮含量用凯氏定氮法^[21]。同时在相对应小区位点处的耕层0~40 cm取土,每个小区取混合样,凯氏定氮法测定土壤全氮含量^[22],碱解扩散法^[23]测定土壤碱解氮含量,紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量。硝态氮、碱解氮、全氮含量取所测数据的平均值。

1.3 模型构建

以试验为基础,对处理过的冬小麦冠层光谱与

相应的土壤全氮、硝态氮和碱解氮含量进行相关性分析,从而筛选出特征波段,根据特征波段计算光谱参数,利用计算出的光谱参数与各种土壤类型氮相关性分析,筛选出相关性极显著的光谱参数,选用相关系数较大的光谱参数与土壤氮素建立监测模型。光谱数据采用ViewSpec Pro进行预处理,试验数据相关性分析和回归分析采用Matlab 7.0和Excel 2007软件进行。

为了提高氮素监测的普适性,选择应用广泛、普适度较高且能够表征作物长势指标的4个植被指数:RVI、NDVI、SAVI、DVI(表1)。

表1 典型的光谱参数计算方法

Tab.1 Algorithms of different spectral parameters

光谱参数	公式	文献序号
比值植被指数(RVI)	R_n/R_r	[24-25]
归一化植被指数(NDVI)	$(R_n - R_r)/(R_n + R_r)$	[26-27]
土壤调节植被指数(SAVI)	$(1 + 0.5)(R_n - R_r)/(R_n + R_r + 0.5)$	[28]
差值植被指数(DVI)	$R_n - R_r$	[29]

注: R_n 、 R_r 分别为近红外、红光波段光谱反射率。

2 结果与分析

2.1 土壤含氮量与冬小麦植株含氮量相关性分析

表2为不同生育期土壤含氮量与冬小麦植株含氮量的相关性分析结果。由表2可以看出,不同生育期土壤全氮含量与冬小麦植株含氮量的相关性较差,各生育期的相关系数都在0.5以下,土壤全氮含量能否评价土壤供氮能力有待进一步研究。土壤的硝态氮和碱解氮含量与各生育期冬小麦植株含氮量的相关系数分别在0.72~0.84和0.75~0.82之间,都达到了极显著水平,因此这2项指标都能客观反映土壤供氮水平和潜力。李生秀等^[30]在盆栽和大田试验研究中指出,作物的吸氮量与土壤硝态氮、碱解氮含量有着密切相关性,与本文结果相符。其原因可能是作为土壤速效氮的硝态氮和碱解氮决定着土壤的供氮强度,直接快速地反映植株的含氮

表2 不同生育期土壤含氮量与冬小麦植株含氮量的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between soil and plant nitrogen contents at different growth stages

生育期	硝态氮含量	碱解氮含量	全氮含量
返青期	0.81 **	0.79 **	0.49
拔节期	0.84 **	0.82 **	0.41
孕穗期	0.81 **	0.77 **	0.42
灌浆期	0.72 **	0.75 **	0.40

注:**表示相关系数达到极显著水平($P < 0.01$),下同。

量,而土壤全氮含量决定着土壤养分的供应容量,是潜在的肥力标志,全氮含量的多少不能快速反映植株的含氮量。

2.2 土壤含氮量与冬小麦冠层光谱参数相关性分析

为了达到对土壤氮素实时、简便的预测效果,有必要解决光谱波段冗余问题。在光谱波段中选择一些敏感波段进行信息提取,不仅能够为后续植被指数的构建提供较好波段选择来源,而且为植被指数的筛选提供较高的比较标准,从而建立所需的光谱监测模型。通过对冠层光谱进行测定,筛选出特征波段,计算植被指数,建立遥感监测模型。

图1为拔节期土壤硝态氮含量与冠层光谱反射率相关性分析图。由图1可知,650~690 nm冠层光谱反射率与土壤含氮量呈显著负相关关系,其中680 nm处反射率与土壤含氮量相关性最好。680 nm是诸多遥感学家构建植被指数监测植被长势时应用

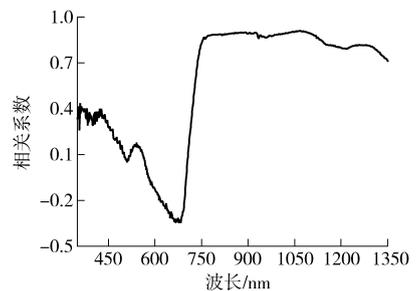


图1 土壤硝态氮含量与冠层光谱反射率的相关系数
Fig.1 Correlation coefficient between soil nitrate nitrogen content and canopy spectral reflectance

最为广泛的波长之一, SHARABIAN 等^[31]提取的 SPAD 的敏感波长也位于 680 nm 附近。这一波长范围属于叶绿素吸收波长范围, 叶绿素强烈吸收使反射率降低, 同时氮素与叶绿素有密切的相关性, 使得氮素敏感波长也在这一范围内^[32]。720 ~ 1 350 nm 冠层光谱反射率与土壤含氮量呈正显著相关关系, 其中 1 040 nm 处反射率与土壤含氮量相关性最好。这一波长范围属于近红外波段, 近红外区域比较高的反射率是叶片内部结构多次散射的结果, 而叶片内部结构与氮素密切相关, 因此该区域光谱反射率与氮素营养也有良好的相关性。同理, 筛

选出其他生育期碱解氮、全氮含量的特征波长, 经过分析, 相关性最佳的特征波长均为 680 nm、1 040 nm。

由于构成高光谱参数的可见光波段和近红外波段既包含了叶片中叶绿素的信息, 也包含了叶片组织机构方面的信息, 因此光谱参数与土壤氮素存在理论上的相关性。表 3 为不同生育期土壤硝态氮、碱解氮、全氮含量与冬小麦冠层光谱参数的相关性分析结果, 参数 SAVI、RVI、NDVI 和 DVI 分别代表土壤调节植被指数、比值植被指数、归一化植被指数和差值植被指数。

表 3 不同生育时期土壤氮含量与冬小麦冠层光谱参数的相关系数
Tab. 3 Correlation coefficients between soil nitrogen content and wheat canopy spectral reflectance at different growth stages

指标	生育期	光谱参数			
		SAVI(1040,680)	RVI(1040,680)	NDVI(1040,680)	DVI(1040,680)
土壤硝态氮含量	拔节期	-0.90 **	0.87 *	0.84 **	-0.38
	孕穗期	-0.86 **	0.85 **	0.79 **	-0.41
	灌浆期	-0.91 **	0.85 **	0.85 **	-0.46
土壤碱解氮含量	拔节期	-0.83 **	0.93 **	0.83 **	-0.48
	孕穗期	-0.90 **	0.81 **	0.81 **	-0.40
	灌浆期	-0.85 **	0.90 **	0.89 **	-0.63
土壤全氮含量	拔节期	-0.73	0.63	0.71	-0.44
	孕穗期	-0.68	0.65	0.62	-0.39
	灌浆期	-0.66	0.71	0.59	-0.43

由表 3 可知, DVI(1040,680) 与各生育期土壤硝态氮、碱解氮和全氮含量的相关关系都未达到显著水平, 土壤全氮含量与 SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 都未达到显著水平, 因此土壤全氮含量与光谱参数不做进一步分析。土壤硝态氮含量与 SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 相关关系都达到极显著水平, 其中与 SAVI(1040,680) 呈负相关, 与 RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 呈正相关; 土壤碱解氮含量与 SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 相关关系也都达到极显著水平, 其中与 SAVI(1040,680) 负相关, 与 RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 正相关, 与土壤硝态氮含量和光谱参数相关关系趋势相同。

2.3 基于土壤硝态氮、碱解氮含量的遥感监测模型

由表 3 可以看出, 土壤硝态氮、碱解氮含量与冬小麦各生育期冠层光谱参数 SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 的相关性较好, 都达到了极显著水平。其中, 土壤硝态氮与光谱参数相关性最小的是孕穗期的土壤硝态氮含量与 NDVI(1040,680), 相关系数为 0.79; 土壤碱解氮含量与光谱参数相关性最小的是孕穗期的土壤碱解氮含量

与 RVI(1040,680)、NDVI(1040,680), 相关系数为 0.81; 而 3 个生育期土壤全氮与光谱参数的相关系数最大为拔节期土壤全氮含量与 SAVI(1040,680), 相关系数为 0.73, 相关关系不显著。因此, 可以用光谱参数 SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)、NDVI(1040,680) 建立相应回归模型实现对土壤硝态氮、碱解氮含量的估测; 但土壤硝态氮、碱解氮含量与 DVI(1040,680) 的相关性较差, 都未达到显著水平。土壤全氮含量与这 4 个光谱参数的相关性也都未达到显著水平, 在一定程度上受到了土壤全氮含量和植株含氮量相关性较差的影响。

从表 3 中选取与土壤硝态氮、碱解氮含量相关性极显著的光谱参数 SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)、NDVI(1040,680), 分别与土壤硝态氮、碱解氮含量建立光谱监测模型(表 4), 由于这 3 个光谱参数与土壤全氮含量的相关性较差, 在此不建立土壤全氮含量的预测模型。

表 4 中所建线性回归模型中, Y 表示土壤硝态氮或碱解氮含量的预测值, X 表示光谱参数。其中, 对拔节期、孕穗期和灌浆期建立的土壤硝态氮含量线性预测模型中, 以 SAVI(1040,680) 为自变量时的决定系数最大, 相对误差(RE)、均方根误差

表 4 土壤硝态氮和碱解氮含量线性估测模型

Tab. 4 Linear models of soil nitrate nitrogen and available nitrogen contents based on spectral parameters

指标	生育期	光谱参数	线性回归模型	决定系数 R^2	相对误差	均方根误差/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
土壤硝态氮含量	拔节期	SAVI(1040,680)	$Y = -96.88X + 30.03$	0.850 0	0.121 6	0.031 7
		RVI(1040,680)	$Y = 3.99X + 3.05$	0.756 9	0.127 2	0.035 9
		NDVI(1040,680)	$Y = 36.28X - 0.10$	0.705 6	0.191 7	0.058 2
	孕穗期	SAVI(1040,680)	$Y = -164.65X + 30.27$	0.739 6	0.214 4	0.035 6
		RVI(1040,680)	$Y = 3.32X - 1.13$	0.722 5	0.247 2	0.040 4
		NDVI(1040,680)	$Y = 20.40X + 2.12$	0.624 1	0.259 2	0.048 9
	灌浆期	SAVI(1040,680)	$Y = -139.07X + 23.72$	0.828 1	0.110 9	0.031 5
		RVI(1040,680)	$Y = 1.94X + 1.21$	0.722 5	0.134 1	0.041 2
		NDVI(1040,680)	$Y = 22.16X - 0.92$	0.722 5	0.133 9	0.041 1
土壤碱解氮含量	拔节期	SAVI(1040,680)	$Y = -1393.39X - 311.07$	0.688 9	0.284 5	0.058 3
		RVI(1040,680)	$Y = 74.47X - 95.80$	0.864 9	0.109 1	0.031 1
		NDVI(1040,680)	$Y = 494X - 103.78$	0.688 9	0.293 1	0.059 8
	孕穗期	SAVI(1040,680)	$Y = -822.11X + 181.41$	0.656 1	0.291 5	0.061 0
		RVI(1040,680)	$Y = 14.79X + 29.46$	0.810 0	0.121 1	0.037 6
		NDVI(1040,680)	$Y = 132.31X - 31.52$	0.656 1	0.289 1	0.054 6
	灌浆期	SAVI(1040,680)	$Y = -844.46X + 181.33$	0.722 5	0.137 1	0.046 7
		RVI(1040,680)	$Y = 12.11X + 51.17$	0.810 0	0.123 2	0.039 7
		NDVI(1040,680)	$Y = 136.38X + 40.61$	0.792 1	0.130 1	0.043 8

(RMSE)最小,表明以 SAVI(1040,680)为自变量所建模型最好;建立的土壤碱解氮含量预测模型中,分别以 RVI(1040,680)为自变量时的决定系数最大, RMSE 最小,表明以 RVI(1040,680)为自变量所建模型最好。

为了检验模型的可靠性和普适性,利用试验 2

拔节期、孕穗期和灌浆期的数据对土壤硝态氮、碱解氮含量与光谱参数间的相关方程进行测试,采用 R^2 、RE、RMSE 对上述建立的模型分别进行检验(表 4)。对预测值和实测值作 1:1 线性关系图直观展示测试效果,如图 2 所示。

由图 2 可知,3 个生育期的土壤硝态氮和碱解

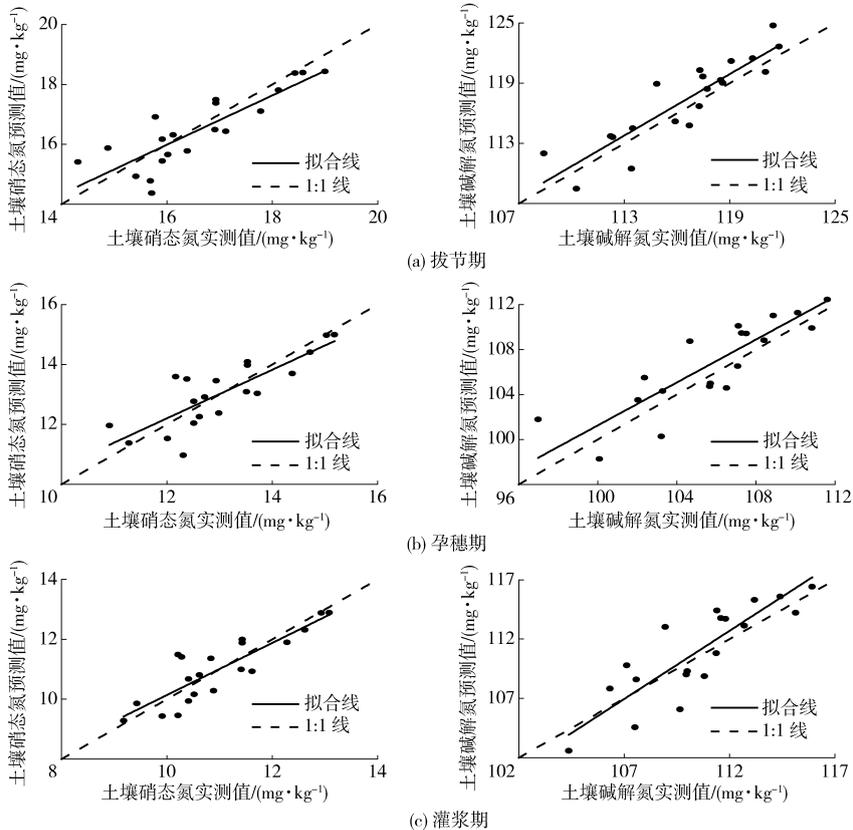


图 2 土壤硝态氮和土壤碱解氮含量实测值与预测值间的线性关系

Fig. 2 Liner relationships between measured and predicted values of soil nitrate nitrogen and soil available nitrogen

氮含量实测值和预测值拟合效果较好,且拟合系数都在0.6以上(表4)。其中,硝态氮含量以灌浆期预测精度最高,拔节期次之,孕穗期最小;而碱解氮含量则以拔节期预测精度最高,灌浆期次之,孕穗期最小。这与土壤硝态氮和碱解氮含量线性模型的决定系数规律、相对误差、均方根误差相一致,表明所建模型是可行的。

3 结 论

(1)不同生育期土壤全氮含量与冬小麦植株含氮量的相关性较差,相关系数都在0.5以下,能否作为土壤供氮能力的评价指标还有待进一步考量。土壤硝态氮、碱解氮含量与各生育期冬小麦植株含氮量的相关系数分别在0.72~0.84和0.75~0.82之间,达到了极显著水平,可客观地反映土壤供氮水平

和潜力。

(2)在可见光波段,光谱反射率随施氮水平的增加而降低,而在近红外波段则随着施氮水平的增加而增加。土壤氮素类型与植株氮素的相关率数达到0.72以上,为极显著水平。因此,从数学角度来看,土壤氮素类型与冠层光谱也存在一定的相关关系。

(3)通过分析土壤氮素类型与冠层光谱的相关性,波段650~690 nm、720~1350 nm与土壤氮素含量具有重要的相关关系,本研究证实光谱参数SAVI(1040,680)、RVI(1040,680)分别与土壤硝态氮、碱解氮含量具有重要的关系,分别构建了基于SAVI(1040,680)的土壤硝态氮光谱监测模型和基于RVI(1040,680)的土壤碱解氮光谱监测模型,实现了可利用冬小麦实测冠层光谱同步实现麦田土壤氮素状况的间接诊断。

参 考 文 献

- 何勇,赵春江,吴迪,等.作物-环境信息的快速获取技术与传感仪器[J].中国科学:信息科学,2010,40(增刊):1-20.
HE Yong, ZHAO Chunjiang, WU Di, et al. Fast detection technique and sensor instruments for crop-environment information; a review[J]. Science China Information Sciences, 2010, 40(Supp.): 1-20. (in Chinese)
- 胡玉福,邓良基,肖海华,等.邳海盆地土壤氮素空间变异特征与影响因素研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(4):132-140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150420&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.020.
HU Yufu, DENG Liangji, XIAO Haihua, et al. Spatial variability of soil nitrogen and its influential factors in Qionghai Basin [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 132-140. (in Chinese)
- 魏昌龙,赵玉国,李德成,等.基于相似光谱匹配预测土壤有机质和阳离子交换量[J].农业工程学报,2014,30(1):81-88.
WEI Changlong, ZHAO Yuguo, LI Decheng, et al. Prediction of soil organic matter and cation exchange capacity based on spectral similarity measuring[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 81-88. (in Chinese)
- MARTIN M P, OITON T G, LACARCE E, et al. Evaluation of modeling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale[J]. Geoderma, 2014, 223-225: 97-107.
- WANG Chao, FENG Meichen, YANG Wude, et al. Extraction of sensitive bands for monitoring the winter wheat (*Triticum aestivum*) growth status and yields based on the spectral reflectance[J]. PLoS ONE, 2017, 12(1): e0167679.
- 赵燕东,皮婷婷.北京地区粘壤土全氮含量的光谱预测模型[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):144-149. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160321&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.021.
ZHAO Yandong, PI Tingting. Spectral prediction model of soil total nitrogen content of clay loam soil in Beijing [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 144-149. (in Chinese)
- CAMBOU A, CARDINAEL R, KOUAKOUA E, et al. Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field[J]. Geoderma, 2016, 261(2): 151-159.
- NAWAR S, BUDDENBAUM H, HILL J, et al. Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 510-522.
- ARAÚJO S R, SÖDERSTRÖM M, ERIKSSON J, et al. Determining soil properties in Amazonian Dark Earths by reflectance spectroscopy[J]. Geoderma, 2015, 237-238: 308-317.
- 陈漫,施印炎,汪小昆,等.基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):26-32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150505&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.005.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 26-32. (in Chinese)
- 王小平,郭锐,张凯,等.黄土高原不同种植密度下春小麦冠层和叶片高光谱反射特征[J].生态学杂志,2008,27(7):1109-1114.
WANG Xiaoping, GUO Ni, ZHANG Kai, et al. Canopy and leaf hyperspectral reflectance of spring wheat under different planting densities in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1109-1114. (in Chinese)
- 姚付启,蔡焕杰,王海江,等.基于平稳小波变换的冬小麦覆盖度高光谱监测[J/OL].农业机械学报,2012,43(3):173-180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120332&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:

10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 03. 032.
YAO Fuqi, CAI Huanjie, WANG Haijiang, et al. Monitoring winter wheat percentage vegetation cover based on stationary wavelet transformation derived from hyperspectral reflectance [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3):173 - 180. (in Chinese)
- 13 FEMANDEZ S, VIDAL D, SIMON E, et al. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv, Astral under water and nitrogen stress [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(9):1867 - 1884.
- 14 王纪华, 王之杰, 黄文江, 等. 冬小麦当层氮素的垂直分布及光谱响应[J]. 遥感学报, 2004, 8(4):309 - 316.
WANG Jihua, WANG Zhijie, HUANG Wenjiang, et al. The vertical distribution characteristic and spectral response of canopy nitrogen in different layer of winter wheat[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(4):309 - 316. (in Chinese)
- 15 王树文, 赵珊, 张长利, 等. 基于成像光谱技术的寒地玉米苗期冠层氮含量预测模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 149 - 154.
WANG Shuwen, ZHAO Shan, ZHANG Changli, et al. Forecasting model for nitrogen content of maize canopy during seedling stage in cold region based on imaging spectral technique [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 149 - 154. (in Chinese)
- 16 叶晓青, 邹勇, 余志虹, 等. 烤烟冠层光谱参数与氮素垂直分布相关性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 219 - 225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130538&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.038.
YE Xiaqing, ZOU Yong, YU Zhihong, et al. Correlation between nitrogen vertical distribution and spectral characteristics of flue-cured tobacco [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 219 - 225. (in Chinese)
- 17 CHRIST L, DAVID R S, MICHAEL S C, et al. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics [J]. Precision Agriculture, 2003, 4(4):359 - 384.
- 18 DIKER K, BAUSCH W C. Radiometric field measurements of maize for estimating soil and plant nitrogen [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(4):411 - 420.
- 19 潘文超, 李少昆, 王克如, 等. 基于棉花冠层光谱的土壤氮素监测研究[J]. 棉花学报, 2010, 22(1):70 - 76.
PAN Wenchao, LI Shaokun, WANG Keru, et al. Monitoring soil nitrogen and plant nitrogen based on hyperspectral of cotton canopy [J]. Cotton Science, 2010, 22(1):70 - 76. (in Chinese)
- 20 薛利红, 卢萍, 杨林章, 等. 利用水稻冠层光谱特征诊断土壤氮素营养状况[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4):675 - 681.
XUE Lihong, LU Ping, YANG Linzhang, et al. Estimation of soil nitrogen status with canopy reflectance spectra in rice [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4):675 - 681. (in Chinese)
- 21 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 115 - 121.
- 22 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 191 - 203.
- 23 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 309 - 311.
- 24 JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor [J]. Ecology, 1969, 50(4): 663 - 666.
- 25 PEARSON R L, MILLER L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie [C]//Remote Sensing of Environment VIII, 1972, 45(2):7 - 12.
- 26 ROUSE J W, HASS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts [J]. Nasa Special Publication, 1974, 351:309.
- 27 TUCKER C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127 - 150.
- 28 HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3):295 - 309.
- 29 RICHARDSON A J, WIEGAND C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1978, 43(12):1541 - 1552.
- 30 李生秀, 付会芳, 肖俊璋, 等. 几种测氮方法在反映旱地土壤供氮能力方面的效果[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(2): 72 - 81.
LI Shengxiu, FU Huifang, XIAO Junzhang, et al. The effectiveness of several methods determining soil available or potentially available N in reflecting dryland soil N supply-capacities [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1992, 10(2): 72 - 81. (in Chinese)
- 31 SHARABIAN V R, NONGUCHI N, ISHI K. Significant wavelengths for prediction of winter wheat growth status and grain yield using multivariate analysis [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(1): 14 - 21.
- 32 MITCHELL J J, GLENN N F, SANKEY T T, et al. Spectroscopic detection of nitrogen concentrations in sagebrush [J]. Remote Sensing Letters, 2012, 3(4): 285 - 294.