

运用 PLS 算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布

王纪华¹, 黄文江¹, 劳彩莲², 张录达², 罗长兵³,
王 韬², 刘良云¹, 宋晓宇¹, 马智宏¹

1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097

2. 中国农业大学, 北京 100094

3. 北京世农绿方高新技术发展中心, 北京 100094

摘 要 文章提出了利用遥感光谱数据反演小麦冠层氮素垂直分布的化学计量学方法, 运用偏最小二乘法(PLS), 穷尽测定的小麦田间冠层可见光和近红外光谱不同波长处的冠层光谱反射率及其组合与小麦不同层次的叶绿素、叶片全氮含量之间的关系。通过 2001~2002 年的建模和 2003~2004 年的验证试验, 求得了用 PLS 算法对叶片全氮上层、中层、下层垂直分布估算结果的相关性。表明 PLS 算法能够用于反演作物冠层生物化学参数的垂直分布。运用 PLS 的小麦氮素垂直分布的估算方法, 较以往单一冠层估算方法精度明显提高, 对于生产上迫切需求对作物中、下层叶片氮素状况的监测来指导适时和适量施肥具有指导意义。

关键词 冬小麦; 偏最小二乘法; 可见近红外谱区; 冠层反射光谱; 氮素垂直分布

中图分类号: O657.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0593(2007)07-1319-04

引 言

作物大量施用化肥对农田生态环境的影响越来越受到人们的重视, 作物养分状况的动态监测对于正确评价作物生长环境与受胁状况、诊断作物营养状况具有重要意义, 因而作物养分田间快速诊断技术以及施肥技术体系的建立成为农业领域研究的热点。禾谷类作物叶片具有一定的叶位空间垂直结构(倒一叶、倒二叶、倒三叶、倒四叶、倒五叶等), 传统的检测作物营养状况的方法步骤多为田间取样、室内分析, 所选样点易受主观因素影响, 且不能实现大面积的连续监测, 因而难以实现精确的管理。近年来随着定量遥感技术的进步, 使无破坏、大面积、快速获取农田养分信息成为可能。国内外学者开展了高光谱分析技术监测植株营养水平的研究, 如通过统计学方法提取植株含氮量与光谱反射率或其衍生量的关系、以及估算模型的建立等, 用于指导调优栽培^[1-5]。

由于氮素具有易运转的特性^[6,7], 当氮素缺乏时, 冠层顶叶片总是利用从下部基和叶中转移来的氮素^[8,9], 但以往研究大都针对上层叶位叶片建立相关遥感反演模型, 忽略了对中、下层叶片的监测。氮素垂直梯度在很多作物上普遍存在^[10-14], 在缺肥初期即轻度氮素胁迫时, 下层叶片因缺氮而

引起早衰。在持续缺肥即中度胁迫时, 中、下层叶片均明显衰老, 田间条件下肉眼可见中、下层叶片由深绿变浅绿或变黄, 但此时上层叶片变化程度较轻, 不易察觉。探讨生化组分尤其是氮素随冠层高度的垂直分布及其反演方法的意义, 在于能够及早发现中下层的缺氮症状, 可以及早实施追肥管理。王纪华等^[15]和 Wang 等^[16]建立了基于垂直冠层、光谱匹配的遥感反演中下层叶素和氮素的方法。

偏最小二乘(PLS)回归分析方法是一种新型的多元统计数据分析方法。它集多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析的基本功能为“一体”, 可以有效地克服一般最小二乘回归分析方法无法解决的难题。研究表明: 对谷物、烟草等的近红外光谱分析中, PLS 方法的预测结果都优于一般的线性模型, 且对连续光谱分析有明显的优势^[17,18]。

本文探讨了运用偏最小二乘法由冠层光谱反演小麦氮素垂直分布的方法。

1 实验材料、仪器、软件与测试方法

1.1 建模试验: 冬小麦不同品种不同施肥处理试验

试验于 2001~2002 年在国家精准农业示范区内开展, 示范区位于北京市昌平区小汤山镇, 地处北纬 40°10', 东经 116°26'。选用冬小麦品种为高蛋白含量的“中优 9507”和一

收稿日期: 2006-03-16, 修订日期: 2006-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571118, 40471093), 国家“973”项目(2005CB121103)和北京市自然科学基金项目(4052014)资助

作者简介: 王纪华, 1958 年生, 国家农业信息化工程技术研究中心研究员 e-mail: wangjh@nercita.org.cn

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

般蛋白含量的“京冬 8”。设计了四种梯度施肥处理。

1.2 验证试验: 不同株型冬小麦生化组分垂直分布反演验证试验

试验于 2003~2004 年在国家精准农业示范区内开展。选取不同株型(紧凑、中间、披散)冬小麦品种各 4 个, 合计 12 个品种, 正常肥水管理。不同株型品种的行距相同。播种密度和基本苗相近。

1.3 研究项目与测定方法

(1) 小麦冠层反射光谱: 小麦冠层光谱测量使用的仪器为 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪, 该光谱仪的采样间隔为 1.4 nm(350~1 000 nm)和 2 nm(1 000~2 500 nm)。所有光谱测量是在天气晴朗、风速很小时进行的, 时间范围为 10:00~14:00。视场角 25°, 距地表 1.3 m 处垂直测定, 在视场范围内重复 20 次, 取平均值, 各处理测定前后, 进行参考板校正。

(2) 冠层垂直分层及取样: 根据冬小麦生育时期株高差异将冠层平均分为 3~4 层, 并自顶部向地表分别命名为第 1, 2, 3, 4 层, 其中拔节期分 3 层, 每层分别为该期植株高度的 1/3; 开花期和灌浆初期分 4 层, 每层分别为该期植株高度的 1/4, 取样时各层依次剪下, 每层所有叶片混合测定生化组分^[15]。

(3) 叶片全氮含量: 取各层叶, 烘干后粉碎混匀供试, 用

Buchi 公司产全自动 B 339 凯氏定氮仪测定。各处理、各层样本分别测定。

1.4 数据处理软件

数据处理软件是 863 项目“稻麦品质遥感监测与预报技术研究”的研究成果。遥感光谱分析系统 V1.0, 该系统具有较强的遥感光谱预处理功能以及多种提取遥感光谱信息的数学方法。

2 结果与分析

2.1 光谱分析和前处理方法

对于田间通过地物光谱仪获取的光谱原始数据, 存在水分吸收波段的一些噪音影响, 信噪比较差[见图 1(a)], 光谱预处理是指对光谱数据进行变换, 这些变换或以消除某种误差为目的, 或以数据标准为目的。本研究采用的前处理方法为 Boxcar 平滑。Boxcar 平滑是以光谱某一点为中心, 将周围的(2S+1)个点(包括待测光谱上该点本身, S 称为平滑半径)的值取平均后赋给光谱上的该点。参数 S 的值越大, 则平滑效果越好, 信噪比越高。本研究设定预处理时, 主成分数为 8, 设置波段 1(350~1 350 nm), 波段 2(1 550~1 750 nm)和波段 3(1 950~2 450 nm)。图 1(b)经过光谱预处理之后的光谱, 经过预处理以后能够提高光谱的信噪比。

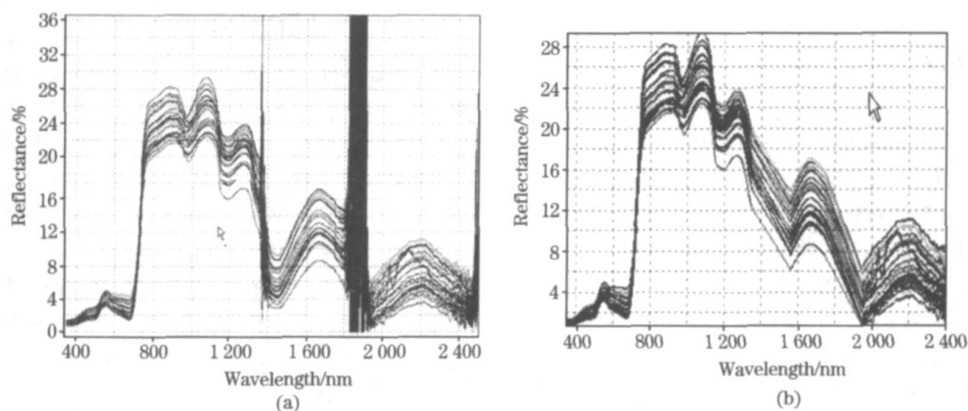


Fig 1 The *in situ* canopy spectrum before treatment(a) and after treatment(b)

2.2 基于 PLS 算法的作物生化组分垂直分布的光谱反演

(1) 建模试验, 分别对选取的 2 个品种, 四种氮肥处理的不同层次的叶片全氮和冠层光谱进行了同步测定。测定时期为 2002 年冬小麦拔节期、挑旗期和灌浆初期, 样本容量为 24。

(2) 验证试验, 同步测定了 12 个品种的冠层反射光谱和植株不同层次叶片全氮。测定时期为 2004 年冬小麦孕穗期、开花期和灌浆初期, 样本容量为 36。

表 1 为利用偏最小二乘法(PLS)进行不同层次叶片全氮估算效果的统计参数数值, 图 2 是利用 PLS 算法对不同层次叶片全氮含量测定值和预测值的关系图。由图 2 和表 1 可知, 利用 PLS 算法对不同层次叶片全氮垂直分布的估算效果为: 模拟值和测定值之间的准确度和精确度的描述参数均表现为中层<上层<下层。相关系数建模试验表现为下层>中

层>上层, 验证试验表现为中层>下层>上层。PLS 算法对上层、中层、下层建模试验结果的相关系数均达到了极显著水平($r > 0.05$), 对中层和下层叶片全氮含量又有很好的估算能力。验证试验对叶片全氮不同层次垂直分布估算结果的相关性达到显著水平($r > 0.05$)。表明运用 PLS 算法进行小麦中、下层叶绿素和全氮含量等生化组分垂直分布的估算是可行的。

3 结论和讨论

本研究提出利用遥感数据反演作物养分垂直分布, 尤其是作物中、下层信息的偏最小二乘算法。具体做法为穷尽测定作物冠层可见光和近红外, 波长间隔为 1 nm 的不同波长处的冠层光谱反射率, 后将其与作物不同层次的叶绿素、叶

片全氮含量之间进行建模, 通过建模试验和验证试验, 表明 的垂直分布。
运用 PLS 算法能够较好的运用作物冠层光谱反演叶片全氮

Table 1 Precision of foliage nitrogen content by PLS method

建模试验					
叶片层次	平均绝对误差	平均相对误差/ %	标准偏差	相对标准偏差/ %	相关系数 r
上层	0.211	4.188	0.287	5.74	0.675* *
中层	0.193	4.454	0.243	5.421	0.708* *
下层	0.256	10.11	0.307	12.07	0.855* *
验证试验					
上层	0.385	7.163	0.476	8.979	0.308*
中层	0.247	5.627	0.332	7.263	0.500* *
下层	0.918	16.28	1.070	21.17	0.465*

* 显著水平; ** 极显著水平

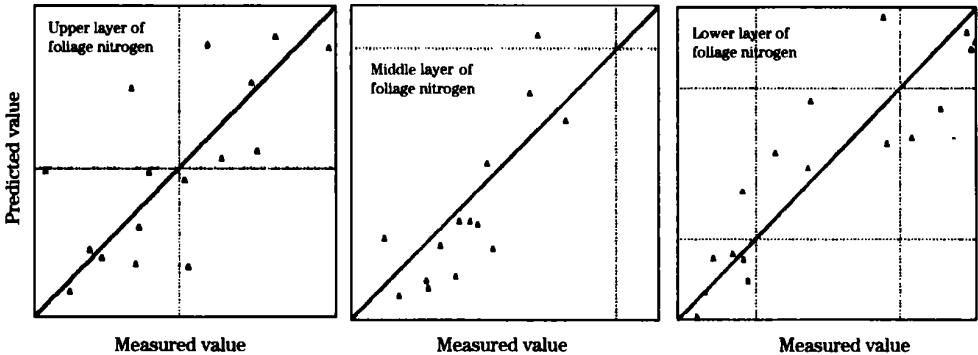


Fig 2 Relationship between simulated and measured foliage nitrogen vertical distribution

由于野外光谱易受外界环境、土壤等背景因素的影响, 一般测试精度较室内近红外光谱仪测试低, 赵丽丽等^[19]研究了近红外光谱仪预测精度随扫描条件的影响, 张录达^[20]研究了利用支持向量机来提高近红外光谱定量分析精度的方法。本文中利用野外地物光谱数据通过偏最小二乘算法实现作物叶绿素和氮素的光谱反演, 虽然反演结果的相关系数与标准差等较室内近红外光谱仪测试低, 但是利用野外地物光

谱仪得到的光谱数据, 可以适时、快速反映作物的营养状况。基于光谱信息的作物生化组分垂直分布的遥感反演, 对于生产上迫切需要对作物中、下层叶片氮素或叶绿素状况的监测来指导适时和适量施肥, 提高肥料利用效率, 避免化肥对环境、水源等的污染, 确保粮食和环境安全等都具有十分重要的意义。

参 考 文 献

[1] Shibayama M, Akiyama T. Japanese Journal of Crop Science, 1986, 55(4): 433.
[2] HUANG Weir jiang, WANG Ji hua, WANG Zhi jie, et al. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2409.
[3] ZHOU Qi fa, WANG Ji hua. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26(3): 607.
[4] WANG Tao, ZHANG Lu da, LAO Cai lian, et al(王 韬, 张录达, 劳彩莲, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1915.
[5] YANG Chur yan, LIU Qiang, NIU Zheng, et al(颜春燕, 刘 强, 牛 铮, 等). Science in China(中国科学 D 辑·地球科学), 2005, 35(9): 881.
[6] Charles Edwards D, Stutzel H, Ferraris R, et al. Annals of Botany, 1987, 60: 421.
[7] Anten N, Schieving F, Werger M. Oecologia, 1995, 101: 504.
[8] Vouillot M, Devienne F. Annals of Botany, 1999, 83: 569.
[9] Milroy S, Bange M, Sadras V. Annals of Botany, 2001, 87: 325.
[10] Wessman C, Aber J, Peterson D. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10: 1293.
[11] Shiraiwa T, Sinclair T. Crop Science, 1993, 33: 804.
[12] Lemaire G, Onillon B, Gosse G. Annals of Botany, 1991, 68: 483.
[13] Connor D J, Sadras V O, Hall A J. Oecologia, 1995, 101: 274.

- [14] Serrano L, Filella L, Penuelas J. *Crop Science*, 2000, 40: 723.
- [15] WANG Jīhua, WANG Zhījie, HUANG Wēnjiang, et al(王纪华, 王之杰, 黄文江, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2004, 8(3): 36.
- [16] WANG Zhījie, WANG Jīhua, LIU Liangyun, et al. *Field Crops Research*, 2004, 90(2-3): 311.
- [17] TANG Qīyi, FENG Míngguang(唐启义, 冯明光). *DPS Data Processing System for Practical Statistics(实用统计分析及其 DPS 数据处理系统)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2002. 35.
- [18] WANG Huīwén(王惠文). *Partial Least Square Regression Method and Its Application(偏最小二乘回归方法及其应用)*. Beijing: National Defence Industry Press(北京: 国防工业出版社), 1999. 45.
- [19] ZHAO Lǐli, ZHAO Lónglián, LI Jūnhuī, et al(赵丽丽, 赵龙莲, 李军会, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2004, 24(1): 41.
- [20] ZHANG Lǜdà, JIN Zēchén, SHEN Xiǎonán, et al(张录达, 金泽宸, 沈晓南, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(9): 1400.

Inversion of Winter Wheat Foliage Vertical Distribution Based on Canopy Reflected Spectrum by Partial Least Squares Regression Method

WANG Jīhua¹, HUANG Wēnjiang¹, LAO Cǎilián², ZHANG Lǜdà², LUO Chángbīng³, WANG Tao², LIU Liangyun¹, SONG Xiǎoyu¹, Mǎ Zhīhóng¹

1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. China Agricultural University, Beijing 100094, China

3. Research Center for Shinonglǔfāng, Beijing 100094, China

Abstract With the widespread application of remote sensing (RS) in agriculture, monitoring and prediction of crop nutrition condition attracts attention of many scientists. Foliar nitrogen content (N) is one of the most important nutrients for plant growth, and vertical leaf N gradient is an important indicator of crop nutrition situation. Investigations have been made on N vertical distribution to describe the growth status of winter wheat. Results indicate that from the canopy top to the ground surface, N shows an obvious gradient decreasing trend. The objective of this study was to discuss the inversion method of N vertical distribution with canopy reflected spectrum by the partial least squares regression (PLS) method. PLS was selected for the inversion of upper, middle and lower layers of N. To improve the accuracy of prediction, the N in the upper layer as well as in the middle and bottom layers should be taken into consideration when crop nutrition condition is appraised by RS data. The established models by the observed data in year 2001-2002 were validated by the data in year 2003-2004. The inversion precision and error were acceptable. It provided a theoretic basis for widely and non damaged variable rate nitrogen application of winter wheat by canopy reflected spectrum.

Keywords Winter wheat; Partial least squares regression (PLS); Visible and near infrared; Canopy reflected spectrum; Vertical gradients of nitrogen

(Received Mar. 16, 2006; accepted Jun. 26, 2006)