

利用多角度光谱数据探测冬小麦氮素含量垂直分布方法研究

杨绍源^{1, 2, 3}, 黄文江^{1*}, 梁 栋^{2, 3}, 黄林生^{2, 3}, 杨贵军⁴, 张东彦^{2, 3}, 蔡淑红⁵

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094
2. 安徽大学, 计算机智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039
3. 安徽大学电子信息工程学院, 安徽 合肥 230039
4. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097
5. 河北省农业技术推广总站, 河北 石家庄 050000

摘 要 作物氮素具有随植株高度层垂直分布的特性, 快速、无损探测作物氮素垂直分布状况, 对于指导合理施肥、提高肥料利用率和减少环境污染具有重要意义。本文提出了利用偏最小二乘(partial least square, PLS)算法, 运用多角度光谱数据估计冬小麦氮素含量垂直分布的方法。分别选用前向和后向不同观测角度组合形成的光谱数据组建植被指数, 建立不同高度层的叶片氮素含量探测模型, 其中选用 $\pm 50^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 的组合, 建立了冬小麦上层叶位叶片氮密度反演模型; 选用 $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 40^\circ$ 的组合, 建立了中层叶位叶片氮密度反演模型; 选用 $\pm 20^\circ$ 和 $\pm 30^\circ$ 的组合, 建立了下层叶位叶片氮密度反演模型。针对氮素反演容易受到作物背景(土壤、作物残渣)影响的问题, 引入 R_{700}/R_{670} 比值, 改进七种常见的植被指数, 利用改进了的植被指数建立了冬小麦上层、中层、下层叶片氮密度垂直分布模型。建模实验结果改进了叶片氮密度上层、中层、下层垂直分布估算结果, 验证实验选取建模实验中表现最好的三个植被指数进行进一步研究, 结果表明改进后的绿光归一化植被指数(green normalized difference vegetation index, GNDVI)在反演上层、中层、下层叶片氮密度时效果最好, 达到了极显著的水平, 可用于植被氮素含量的垂直分布探测。

关键词 冬小麦; 氮密度; 冠层光谱; 多角度; 垂直分布; 偏最小二乘

中图分类号: S127 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)07-1956-05

引 言

氮素能够反映作物的营养状况, 氮素的动态监测在指导合理施肥、提高肥料利用率和减少环境污染方面具有重要意义^[1, 2]。冬小麦氮素信息的田间实时快速获取, 能够保证冬小麦产量和品质, 有着巨大的经济和生态效益潜力。传统的凯氏定氮法等获取作物氮素信息的方法费时费力, 近年来, 能够大面积、快速无损获取作物氮素信息的遥感技术备受关注。

冬小麦氮素遥感监测技术在国内外都有着非常好的研究基础。Bausch等^[3]、Ranjan等^[4]、Herrmann等^[5]研究植被指数与作物氮素含量的相关关系, 以期反演作物氮素含量。还有一些学者在已有植被指数的基础上进行改进, 例如

Daughtry等提出了改进的叶绿素吸收比指数(modified chlorophyll absorption ratio index, MCARD), 用来减少叶面积指数和土壤背景在反演作物氮素含量时的影响^[6]。由于作物氮素具有随植株高度层垂直分布的特性^[7], 以往的研究由于冠层光谱是由垂直向下方向观测得到的原因, 一般针对上层叶位叶片建立氮素含量反演模型, 而对中、下层叶位叶片考虑不多^[8, 9]。多角度数据的使用为这一问题提供了解决办法。Huang等利用多角度数据反演冬小麦叶绿素垂直分布效果显著^[10]。但利用多角度数据反演氮素含量, 还面临着作物背景(土壤反射、作物残渣)影响的问题, 特别是对中、下层叶位叶片氮素含量反演精度影响较大。

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, 能够在自变量多且自相关严重的情况下进行回归建模, 研究表明, PLS算法在分析连续光谱方面效果突

收稿日期: 2014-04-14, 修订日期: 2014-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271412, 41201354), 中国科学院百人计划项目和河北省省财政河北省科学院院管项目(2014055507)资助

作者简介: 杨绍源, 1988年生, 安徽大学电子信息工程学院和中国科学院遥感与数字地球研究所硕士研究生

e-mail: ysytoday@sina.com * 通讯联系人 e-mail: huangwenjiang@gmail.com

出^[11]。PLS 算法广泛应用于农业遥感,在氮素、叶绿素反演,小麦病害预测等方面已有大量研究。本工作探讨了利用 PLS 算法,运用多角度数据探测冬小麦氮素含量垂直分布的方法,并降低作物背景(土壤反射、作物残渣)在反演氮素时的影响。

1 实验部分

1.1 建模设计

实验区位于北京市昌平区,气候类型为典型的暖温带半湿润大陆季风气候,平均年降水量和温度分别为 507.7 mm 和 13 ℃。建模试验选取了实验区内小汤山精确农业示范基地 2007 年不同株型(紧凑型、中间型、披散型)共 8 个品种的冬小麦光谱数据和理化参数。验证试验选取了 2004 年数据,与建模试验相比仅年份不同。实验区冬小麦均正常肥水管理。

1.2 数据采集

1.2.1 冠层光谱测量

选择在实验区 2004 年和 2007 年间冬小麦孕育期(4 月 28 日左右)、开花期(5 月 11 日左右)和灌浆初期(5 月 19 日左右)测量冠层光谱反射率。测量仪器使用 ASD FieldSpec Pro FR 型地物光谱仪,采样间隔为 1.4 nm(350~1 000 nm)和 2 nm(1 000~2 500 nm)。测量时选定晴朗、尽量无风或风力很小的天气。在北京时间 10:30-14:00 之间太阳直射条件下进行测量操作。仪器摆放要求为距离地面 1.3 m 且视角为 25°。采样点重复测量 20 次,测定前后立即进行参考板校正,取 20 次反射率平均值作为研究区域冬小麦冠层光谱反射率。

1.2.2 冠层多角度反射光谱测量

冬小麦多角度光谱反射率的测量仪器与冠层光谱反射率的测量仪器相同,并在相同的采样点就地测量,根据 Huang 等的方法^[10],使用一个旋转的支架固定光谱仪,获取主平面以及垂直主平面不同天顶角(-60°~60°,间隔 10°)条件下的多角度光谱反射率数据。支架示意图如图 1 所示。光谱仪探头可沿着轨道运动,改变观测角度。轨道可绕着旋转轴旋转,当观测天顶角与太阳同侧时为正(后向),与太阳异侧为负(前向)。

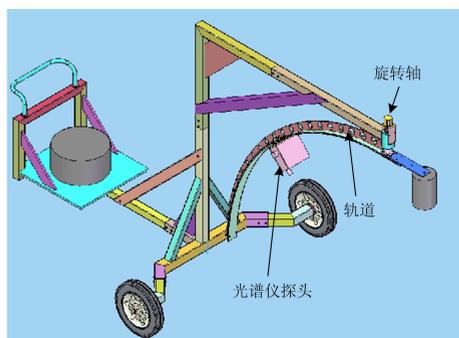


Fig. 1 *In situ* bidirectional spectral reflectance measurement using observation platform

1.2.3 叶片氮素垂直分布采样方法和叶片氮密度

根据光谱采样点的冬小麦株高将冠层平均分为上层、中

层和下层,每层分别为该时期植株高度的 1/3,图 2 为冬小麦分层示意图。每层所有叶片在光谱采样结束后从上至下依次剪下,用黑色塑料袋收集并存放在冷却器中运回实验室。使用 105°高温干燥 10 min,然后调整温度到 65°干燥 5 h,以获得叶片干重。叶片氮浓度的测量采用传统的凯氏定氮法。叶片氮密度(FND)计算公式如下

$$FND = N\% \times SLW \times LAI \times 100$$

其中,N%代表叶片氮浓度,SLW 代表比叶重,LAI 代表叶面积指数。

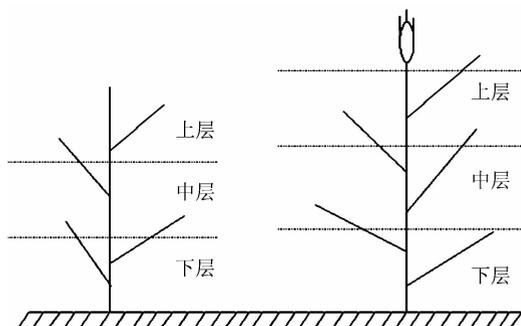


Fig. 2 Sketch map of winter wheat different layers in the canopy at elongation (left) and anthesis (right) stages

2 结果与讨论

2.1 植被指数选择

表 1 给出了所采用的植被指数。Kim 等建立了叶绿素吸收比指数(chlorophyll absorption ratio index, CARI),引入 R_{700}/R_{670} 比值来减少土壤和作物残渣反射率的影响。Daughtry 等在其基础上改进,仍然保留了 R_{700}/R_{670} ,得到 MCARI,用来测量冠层叶绿素和氮素^[6]。700 nm 是叶绿素吸收波段,可以用来区分绿色植物和非绿色植物。基于上面的分析,对表 1 中的部分植被指数进行改进,在原植被指数的基础上引入 R_{700}/R_{670} ,用来降低反演氮素含量时作物背景的影响。植被指数改进方法举例说明如下。

$$NDVI = NDVI \times (R_{700}/R_{670}); \quad NRI = NRI \times (R_{700}/R_{670})$$

实验田间通过地物光谱仪获取的光谱原始数据,不可避免的会受到水分吸收波段噪音影响,信噪比差,因此在计算植被指数之前,需要对原始光谱数据进行预处理来消除噪音影响。所采用的预处理方法是移动窗口中位数平滑。波段设置为 350~1 750 和 1 950~2 450 nm。

2.2 不同观测天顶角条件下的小麦特征

传统的冠层光谱测量方法是垂直向下测量冠层,对作物中、下层叶位叶片的影响考虑较少。使用多角度数据时,随着观测天顶角的不同,作物中、下层叶位叶片对冠层光谱的影响也不同^[16]。工作中通过探讨前向和后向不同观测角度组合形成的光谱数据组建植被指数,建立不同高度层的叶片氮素含量探测模型,用以提高对作物中、下层叶位叶片氮素含量遥感反演精度。

Huang 等研究表明,不同的观测天顶角包含不同高度层的作物信息^[10]。表 2 给出了叶氮密度与 NRI 在不同观测天顶角条件下的相关系数。样本数据选自 2007 年,个数为 20

个。从结果可以看出,上层叶氮密度与 NRI 在 50°和 60°时相关性比其他角度好,中层叶氮密度与 NRI 在 30°和 40°时相关性比其他角度好,下层叶氮密度与 NRI 在 20°和 30°时相

关性比其他角度好。这个结果与 Huang 等的研究吻合。以上研究为选用不同角度建立上、中、下三层反演模型提供了依据。

Table 1 Vegetation indices appeared in this study

植被指数	全称	计算公式	参考文献
NDVI	Normalized difference vegetation index	$(R_{890} - R_{670}) / (R_{890} + R_{670})$	Rouse et al. (1974)
NRI	Nitrogen reflectance index	$(R_{570} - R_{670}) / (R_{570} + R_{670})$	Bausch et al. (1995) ^[3]
NRI	Nitrogen reflectance index	$(R_{1510} - R_{660}) / (R_{1510} + R_{660})$	Herrmann et al. (2010) ^[5]
GNDVI	Green normalized difference vegetation index	$(R_{750} - R_{550}) / (R_{750} + R_{550})$	Gitelson et al. (1996) ^[12]
PRI	Photochemical reflectance index	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	Penuelas et al. (1995) ^[13]
SIPI	Structure insensitive pigment index	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	Peiuelas et al. (1995) ^[14]
NPCI	Normalized pigment chlorophyll index	$(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	Peiuelas et al. (1994) ^[15]

Table 2 Coefficient of determination (R^2) between foliage nitrogen density of each layer and NRI at each view angle ($n=20$)

分层	20°	30°	40°	50°	60°
上层	0.571 3	0.572 6	0.573 2	0.600 1	0.634 4
中层	0.447 9	0.522 3	0.559 6	0.479 7	0.407 8
下层	0.373 1	0.403 1	0.327 0	0.293 7	0.239 1

Table 3 Coefficient of determination (R^2) between measured foliage nitrogen density of each layer and estimated foliage nitrogen density of each layer. Data of year 2007 were used ($n=20$)

植被指数	上层	中层	下层
NDVI	0.828 5	0.712 8	0.700 9
NRI(570, 670 nm)	0.756 6	0.712 1	0.694 2
NRI(1 510, 660 nm)	0.698 2	0.654 0	0.621 4
GNDVI	0.839 2	0.732 0	0.731 9
PRI	0.590 4	0.547 4	0.450 9
SIPI	0.802 5	0.700 3	0.686 6
NPCI	0.353 0	0.3023	0.233 8

2.3 PLS 算法建立叶氮密度预测模型

据上述分析,选用观测天顶角为 ±50°和 ±60°的组合、±30°和 ±40°的组合、±20°和 ±30°的组合分别来建立上层、中层和下层叶位叶片氮密度反演模型,模型自变量是植被指

数,因变量是叶氮密度。建模试验样本数据选自小汤山精确农业示范基地 2007 年生化组分数据和多角度光谱数据,样本个数为 20 个。结果(表 3)可以看出,不同植被指数之间反演效果存在差异,NDVI, GNDVI, SIPI 在每一层的反演效果都很好,在受到土壤和作物残渣影响较为严重的中层和下层,各个植被指数反演结果都有不同程度的提高。

2.4 模型验证试验

验证试验选择建模试验中表现最好的 3 个植被指数(NDVI, GNDVI, SIPI),选用小汤山精确农业示范基地 2004 年生化组分数据和多角度光谱数据,样本个数为 14 个。结果(表 4)可以看出, GNDVI 在每一层的反演结果都非常好,对应的相关系数(R^2)最大,均方根误差(RMSE)最小,中层和下层的反演结果较其余两个指数有明显提升。这表明改进后的 GNDVI 反演氮素含量垂直分布的准确度和精确度

Table 4 Coefficient of determination (R^2) and RMSE between measured foliage nitrogen density of each layer and estimated foliage nitrogen density of each layer. Data of year 2004 were used ($n=14$)

植被指数	上层		中层		下层	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
GNDVI	0.722 0	0.179 9	0.712 4	0.181 9	0.688 4	0.168 8
NDVI	0.709 3	0.182 8	0.668 8	0.184 6	0.596 5	0.172 7
SIPI	0.686 3	0.189 7	0.656 9	0.185 2	0.541 0	0.173 4

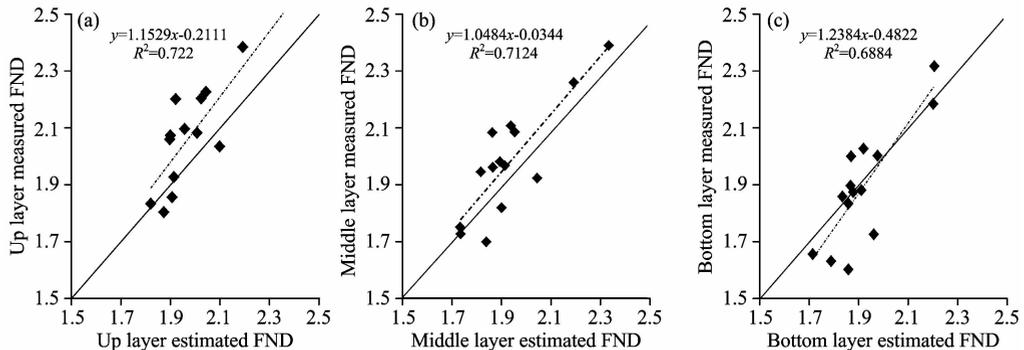


Fig. 3 Best validate models of up layer(a); The best validate models of middle layer (b); The best validate models of bottom layer(c)

是所选择植被指数中最好的。图3给出了GNDVI反演不同层次的叶氮密度实测值与预测值的关系图。由图3可以看出,预测结果靠近1:1线,回归方程表现较好。改进后的GNDVI可用来反演氮素含量垂直分布。

3 结 论

利用多角度光谱数据探测冬小麦氮素含量垂直分布的方法。以北京地区冬小麦为例,研究了叶氮密度与不同观测天顶角条件下NRI的相关性,并结合前人的研究,选用观测天顶角为 $\pm 50^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 的组合, $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 40^\circ$ 的组合来以及 $\pm 20^\circ$ 和 $\pm 30^\circ$ 的组合,分别建立了上层、中层、下层氮素含量垂直分布模型。为了降低作物背景在反演氮素时的影响,引入 R_{700}/R_{670} 比值,改进植被指数。建模试验表明,改进后的植

被指数,在反演受到作物背景影响严重的中层和下层氮素时效果提高明显。验证试验选取建模试验中表现较好3个植被指数(NDVI, GNDVI, SIPI),结果表明,改进后的GNDVI在反演上层、中层、下层氮密度时均达到了极显著的水平,可用于植被氮素含量垂直分布探测。

利用多角度光谱数据遥感反演作物生化组分垂直分布,具有快速、无损的优点,并能满足生产上对作物氮素状态的监测需求,对指导田间适时适量施肥,保证作物产量和品质具有重要意义。本研究结果差异性缺乏研究,仅仅在单一生态环境和单一物种条件下开展,其他生态环境和不同类型品种是否适用还需要继续探索。同时研究也没有考虑叶面积指数等因素对氮素遥感反演的影响。因此,结论需要在不同条件下进一步验证。

References

- [1] Johnson L F. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(3): 314.
- [2] Eitel J U H, Vierling L A, Long D S, et al. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(10): 1338.
- [3] Bausch W C, Duke H R, Iremonger C J. Precision Agriculture, 1996(precisionagricu3): 23.
- [4] Ranjan R, Chopra U K, Sahoo R N, et al. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(20): 6342.
- [5] Herrmann I, Karnieli A, Bonfil D J, et al. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(19): 5127.
- [6] Daughtry C, Walthall C, Kim M, et al. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229.
- [7] Eitel J U H, Long D S, Gessler P E, et al. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(18): 4183.
- [8] Connor D J, Sadras V O, Hall A J. Oecologia, 1995, 101(3): 274.
- [9] Serrano L, Filella I, Penuelas J. Crop Science, 2000, 40(3): 723.
- [10] Huang W, Wang Z, Huang L, et al. Precision agriculture, 2011, 12(2): 165.
- [11] WANG Hui-wen(王惠文). Partial Least Squares Regression Method and 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.
- [12] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289.
- [13] Penuelas J, Filella I, Gamon J A. New Phytologist, 1995, 131(3): 291.
- [14] Penuelas J, Baret F, Filella I. Photosynthetica, 1995, 31(2): 221.
- [15] Penuelas J, Gamon J, Fredeen A, et al. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 135.
- [16] ZHAO Chun-jiang, HUANG Wen-jiang, WANG Ji-hua, et al(赵春江, 黄文江, 王纪华). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报), 2006, 22(6): 104.

Estimating Winter Wheat Nitrogen Vertical Distribution Based on Bidirectional Canopy Reflected Spectrum

YANG Shao-yuan^{1, 2, 3}, HUANG Wen-jiang^{1*}, LIANG Dong^{2, 3}, HUANG Lin-sheng^{2, 3}, YANG Gui-jun⁴, ZHANG Dong-yan^{2, 3}, CAI Shu-hong⁵

1. Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
2. Key Laboratory of Intelligent Computer & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China
3. School of Electronic and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China
4. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
5. Hebei Agricultural Technique Extension Station, Shijiazhuang 050000, China

Abstract The vertical distribution of crop nitrogen is increased with plant height, timely and non-damaging measurement of crop nitrogen vertical distribution is critical for the crop production and quality, improving fertilizer utilization and reducing environmental impact. The objective of this study was to discuss the method of estimating winter wheat nitrogen vertical distribution by exploring bidirectional reflectance distribution function (BRDF) data using partial least square (PLS) algorithm. The canopy reflectance at nadir, $\pm 50^\circ$ and $\pm 60^\circ$; at nadir, $\pm 30^\circ$ and $\pm 40^\circ$; and at nadir, $\pm 20^\circ$ and $\pm 30^\circ$ were selected to estimate foliage nitrogen density (FND) at upper layer, middle layer and bottom layer, respectively. Three PLS analysis models with FND as the dependent variable and vegetation indices at corresponding angles as the explicative variables were established. The impact of soil reflectance and the canopy non-photosynthetic materials was minimized by seven kinds of modifying vegetation indices with the ratio R_{700}/R_{670} . The estimated accuracy is significant raised at upper layer, middle layer and bottom layer in modeling experiment. Independent model verification selected the best three vegetation indices for further research. The research result showed that the modified Green normalized difference vegetation index (GNDVI) shows better performance than other vegetation indices at each layer, which means modified GNDVI could be used in estimating winter wheat nitrogen vertical distribution

Keywords Winter wheat; Nitrogen density; Canopy reflected spectrum; Bidirectional reflectance; Vertical distribution; Partial least-square (PLS)

(Received Apr. 14, 2014; accepted Jul. 20, 2014)

* Corresponding author