

基于冠层光谱角算法的小麦氮素营养监测

肖春华¹, 吕银亮¹, 刁万英¹, 李少昆², 王克如², 陈 兵³, 王 琼³

(1. 石河子大学农学院, 绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832003;
2. 中国农业科学院作物研究所, 农业部作物生理生态重点实验室, 北京 100081;
3. 新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆 石河子 832000)

摘 要: 通过田间小区试验, 选择 3 个小麦品种, 在不同氮素水平下, 在测定小麦冠层反射光谱和叶片氮素含量基础上, 提出小麦冠层光谱角算法, 分析小麦冠层光谱角与氮素营养水平的定量关系。结果发现: 对选择的 3 个小麦品种, 光谱角均随氮素施用量增加而增大, 光谱角预测叶片氮素的最佳模型为 $y = 0.3999x^{0.3989}$, 其决定系数 R^2 为 0.6870, 其预测的 RE 、 $RMSE$ 和 R^2 分别为 1.63%、0.1609、0.7515。利用光谱角算法可以监测小麦冠层氮素营养的差异。

关键词: 小麦; 氮素营养监测; 高光谱; 光谱角
中图分类号: S512.101; S143.1 **文献标志码:** A

Monitoring nitrogen content of wheat on basis of
an algorithm on the spectral angle of canopy

XIAO Chun-hua¹, LU Yin-liang¹, DIAO Wan-ying¹, LI Shao-kun²,
WANG Ke-ru², CHEN Bing³, WANG Qiong³

(1. Agronomy College, Shihezi University, Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;
3. Institute of Cotton, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Nitrogen is an important factor for crop growth and environment. A search for real-time, rapid and accurate monitoring methods on nitrogen nutrition is a necessary approach for precise fertilization and efficiency enhancement. In this paper, three wheat varieties (Xinchun 6, Xinchun 17 and Xinchun 22) were selected to investigate the correlations between the canopy hyperspectral characteristics at four nitrogen levels and the leaves nitrogen content (LNC), and thereby an improved spectral angle (SA) could be utilized for prediction of LNC. The spectral angles of wheat canopy by different nitrogen treatments were higher with the nitrogen increased and the best spectral angle model for prediction of leaf nitrogen was $y = 0.3999x^{0.3989}$. The coefficient of determination R^2 was 0.6870, and the RE , $RMSE$ and R^2 were 1.63%, 0.1609, and 0.7515, respectively. Spectral angle was feasible for monitoring differences in leaves nitrogen content, providing a theoretical basis for precise fertilization in agriculture.

Keywords: wheat; nitrogen content; spectral angle

氮素快速无损测试诊断技术已成为现代精准农业研究的一个方向, 近年来, 国内外对利用高光谱技术进行氮素营养诊断进行了研究。用小麦的反射光谱指导变量施肥来纠正小麦当季氮缺乏的研究表明, 利用反射光谱指导变量施肥提高了总氮利用率, 减少了因过度施肥对环境造成的污染^[1]。由吸收特征光谱(590 ~ 756 nm, 1 096 ~ 1 295 nm, 1 295 ~ 1 642 nm)确定的特征深度与面积能够很好地对叶片全氮含量进行反演^[2]。在对夏玉米的叶片光谱特征进行研究时提出, 在近红外波段处的反射率, 随氮

收稿日期: 2014-09-01
基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH27B04); 国家自然科学基金项目(31071371, 31460326, 31360302)资助, 石河子大学高层次人才项目(RCZX201217)
作者简介: 肖春华(1971—), 女, 河南上蔡人, 教授, 博士, 主要从事作物高产信息提取与监测的研究。E-mail: xiaochunhuaxj@163.com。
通信作者: 王克如(1968—), 男, 安徽蚌埠人, 副研究员, 博士, 研究方向为作物高产信息提取与监测。E-mail: wangkr01@163.com。

肥用量的增加而提高,而在可见光波段处正好相反,并且随着氮肥用量的增加反射率逐渐降低,这一现象在绿光波段表现尤为突出^[3]。在研究冬小麦冠层光谱反射率与叶片氮含量之间的关系时发现,820 ~ 1 100 nm 波段的光谱反射率与叶片氮含量达到了极显著正相关;而 1 150 ~ 1 300 nm 波段的光谱反射率与叶片氮含量达到了显著相关^[4]。由于氮素含量与反射光谱之间的高相关性,如何利用作物冠层反射光谱进行氮素营养的快速、无损监测成为氮素精准施用的重要问题。

光谱角是针对高光谱遥感信息定量分析的一种地物分类方法。其原理是通过计算波谱样本矢量与未知波谱向量之间的角度来进行类别分析。通过分析不同蚀变矿物的光谱角特征,认为利用光谱角可以识别蚀变异常的矿物^[5]。对比光谱谱线平行与传统的光谱角制图进行矿床信息的提取,得出光谱角制图在实际应用中效果更优^[6]。对光谱角制图分类法进行改进,提出一种无需阈值的地类确定方法,减少了人工参与,提高了判别精度和处理效率^[7]。对光谱相似性度量方法进行研究,提出改进的光谱角-核光谱角余弦,并对深圳红树林高光谱图像的仿真,可以提高分类精度^[8]。

本文利用氮素敏感波段,采用光谱角分析技术对膜下滴灌小麦进行冠层氮素营养的反射光谱无损快速监测研究,旨在为农业氮素精准施用提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 小区试验设计

试验于 2009—2010 年在石河子大学农学院实验站(44°20'N,86°3'E)进行,前茬作物是小麦,0 ~ 20 cm 土层有机质含量为 11.6 g·kg⁻¹,碱解氮 42.6 mg·kg⁻¹,有效磷 26.5 mg·kg⁻¹,速效钾 139.4 mg·kg⁻¹。

选择生育期接近的 3 个品种作为试验材料:新春 17 号(株型紧凑)、新春 6 号(株型直立)、新春 22 号(株型紧凑)。每个品种重复 3 次,随机排列。

设 4 个氮肥处理:0 kg·hm⁻²纯氮,105 kg·hm⁻²纯氮,225 kg·hm⁻²纯氮,495 kg·hm⁻²纯氮,分别以 N₀、N₁、N₂、N₃ 表示。供试氮肥为尿素,氮肥分 4 次施用,苗期至分蘖肥 15.63%,分蘖到抽穗肥 45%,抽穗到灌浆 18.75%,灌浆到成熟 20.62%。小麦 3 月 20 日播种,基本苗 36 ~ 40 万株·667m⁻²,行距 20 cm,磷肥以基肥施入,施肥量 P₂O₅ 9 kg·667m⁻²。全

生育期灌水 280 m³·667m⁻²,灌水方式同大田。7 月 15 日收获。

1.2 测试项目

在小麦苗期 ~ 分蘖期、拔节期、孕穗期 ~ 抽穗期、开花期、灌浆期测定小麦冠层光谱,同步相同位置拍摄数码照片,然后采集植株样品,样方面积 50 cm × 50 cm。采样后按器官分离,四分法取部分样品置于 105℃烘箱中杀青 30 min,以 70℃恒温烘干至恒重,粉碎后用瑞士 B-339 凯氏定氮仪测定叶片氮素含量。

1.3 冠层光谱测定

1.3.1 样点选择 光谱测定选择小区中长势均匀一致,代表性强的样点,测定时保证环境开阔,无干扰物,测试人员穿深色衣服,以减少对光谱的影响。

1.3.2 冠层光谱反射率测定 使用美国产 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪,选择晴朗、无风或风速很小的天气进行测定,时间为 10:00—14:00,距离冠层顶部 50 cm,传感器垂直小麦冠层,视场角 25°测定。各处理测定前后,进行参考板校正。

1.3.3 光谱角计算 光谱角是利用空间向量的“夹角”来定义已知向量和分类向量的相似性,两者之间的角度越小,向量的相似性越大。将不施氮肥处理的冠层反射率作为参比标准,不同施氮量处理冠层反射光谱与不施氮肥的光谱角计算公式为:

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n x(vis, nir) N_i Y(vis, nir) N_0}{\left(\sum_{i=1}^n (x(vis, nir) N_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n (y(vis, nir) N_0)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

$y(R_{(400 \sim 750)}, R_{(800 \sim 1150)})_{N_0}$:不施氮肥处理冠层可见光与近红外波段光谱反射率

$y(R_{(400 \sim 750)}, R_{(800 \sim 1150)})_{N_i}$:其他氮素处理冠层可见光与近红外波段光谱反射率

1.4 数据分析

高光谱数据用仪器自带软件 ASD ViewSpecPro 初步处理,去除特殊光谱数据,转换光谱数据格式。用 Excel 2000 和 Spss 10.0 进行相关统计分析,包括农学参数显著性检验、农学参数与光谱特征值的相关分析、光谱模型建立和监测等。

2 结果与分析

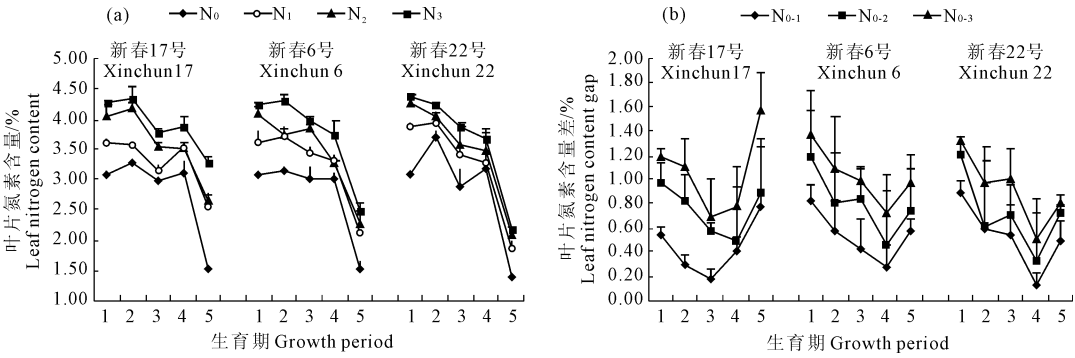
2.1 小麦叶片氮素含量和氮素差值的变化

叶片氮素含量是表征作物叶片氮素的主要指标。图 1(a)表明,所有供试小麦品种随着生育时期推进,叶片氮素含量都因施氮水平的不同而表现出

一定的差异,基本上是随着施氮量的增加而呈增加趋势,随着生育期的推进,叶片氮素含量呈先增加,在拔节期达到最大,后又降低,在乳熟期叶片含氮量最低。总体来看,不同生育时期的叶片氮含量变化范围为 1.37%~4.39%,单个时期内叶片氮含量的浓度差异为 0.13%~1.57%。

图 1(b)表明,在整个生育期不施氮素处理与其

他氮素处理之差随着生育期的推进,表现为先降低再增加的趋势,并且 $N_{0-3} > N_{0-2} > N_{0-1}$ 。不同品种之间表现为新春 17 号 > 新春 22 号 > 新春 6 号,不同品种降到最低时期不同,新春 17 号在孕穗期降到最低,而新春 22 号和新春 6 号均在开花期降到最低,这是由于品种之间氮素吸收利用不同。



注:1,分蘖期; 2,拔节期; 3,孕穗期; 4,开花期; 5,乳熟期。下同。
Note: 1,Tillering stage; 2,Jointing stage; 3,Boot stage; 4,Anthesis; 5,Milk ripe stage. The same below.

图 1 不同施氮水平和不同品种小麦叶片氮素含量(a)和氮素差(b)的变化

Fig.1 Leaf nitrogen concentrations (a) and leaf nitrogen concentration gaps (b) of different wheat cultivars at different stages under different N levels

2.2 小麦生育期光谱角变化

图 2 为生育期内传统光谱角和改进光谱角变化规律。总体来说,传统光谱角与改进的光谱角趋势表现一致,即先降低,在开花期达到最低,随后迅速增加,并表现出 $N_{0-3} > N_{0-2} > N_{0-1}$ 。图 2(a)表明随着生育期的推进,且 N_{0-3} 、 N_{0-2} 与 N_{0-1} 在花期之前

差异显著,而在生育后期 N_{0-3} 和 N_{0-2} 之间没有显著差异,但是新春 22 号在生育后期, N_{0-3} 和 N_{0-2} 与 N_{0-1} 之间差异显著。图 2(b)表明改进光谱角的变化,其变化趋势与传统的变化基本一致,在开花期光谱角降到最低,但在开花前和生育后期各处理之间差异显著,而品种之间无显著差异。

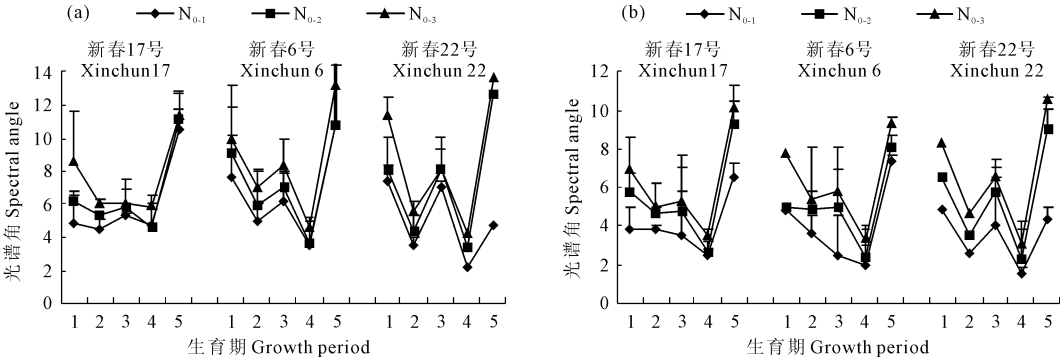


图 2 不同氮素水平和不同品种的传统光谱角(a)和改进的光谱角(b)的变化

Fig.2 Spectral angles of different wheat cultivars at different stages under different N levels

2.3 光谱角与小麦叶片氮素差的关系

由表 1 可以看出,在各个生育时期内,光谱角与叶片氮素含量差之间相关性较好,并且在拔节期和孕穗期相关性最好,而在不同品种之间,新春 17 号和新春 22 号叶片氮素含量差与光谱角之间相关系

数比新春 6 号高,说明该两品种对氮素反应比较敏感。拔节期与孕穗期是小麦的关键生育时期,这两个生育时期光谱角与叶片氮素含量差相关性最好,可以很好地监测小麦营养状况,进而指导农业生产。

表 1 不同时期光谱角与小麦叶片氮素含量差相关分析 (n = 9)

Table 1 Correlation coefficients between spectral angles and leaf nitrogen concentration gaps at different stages in wheat

生育期 Growth stage	新春 17 Xinchun 17	新春 6 号 Xinchun 6	新春 22 号 Xinchun 22
分蘖期 Tillering stage	0.9393 **	0.7944 **	0.7956 **
拔节期 Jointing stage	0.8505 **	0.8660 **	0.8806 **
孕穗期 Boot stage	0.8619 **	0.9000 **	0.9018 **
开花期 Anthesis	0.8660 **	0.7495 **	0.7716 **
乳熟期 Milk ripe stage	0.7672 **	0.8344 **	0.8887 **

注: * 和 ** 显著性分别为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。
Note: * and **, significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.4 小麦叶片氮素含量差的光谱角估测

由于光谱角与小麦叶片氮素含量差呈极显著相关,用光谱角与叶片氮素含量建立回归模型(图 3)。光谱角与叶片氮素含量差表现出很好的幂函数关系,建立的模型拟合效果较好。模型的决定系数 (R^2) 为 0.6870,说明光谱角对叶片氮素含量的估测能反应小麦冠层叶片氮素营养状况。

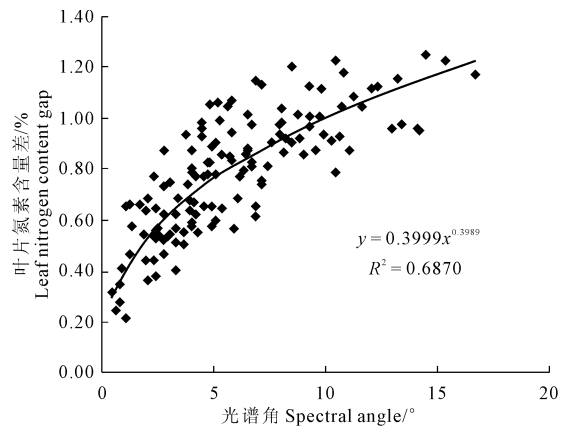


图 3 小麦叶片氮素含量与光谱角的定量关系 (n = 147)
Fig.3 Quantitative relationships between leaf nitrogen concentrations and spectral angles in wheat

为了检验所建立的统计模型是否能预测叶片氮素含量差,需要对模型的可靠性进行检验。利用剩余数据(2009 年)对上述模拟方程进行检验,采用均方根误差 (RMSE)、估计标准误差 (RE) 和决定系数 (R^2) 三个指标进行检验。实测叶片氮素差与光谱角模型监测叶片氮素差拟合线性模型决定系数为 0.7515(图 4),光谱角模型拟合效果的 RMSE 为 0.1609,且两参数相对误差分别为 1.63%、0.17%,比较接近理论值。结果表明,光谱角建立的模型可以较为准确地估算叶片氮素含量差。

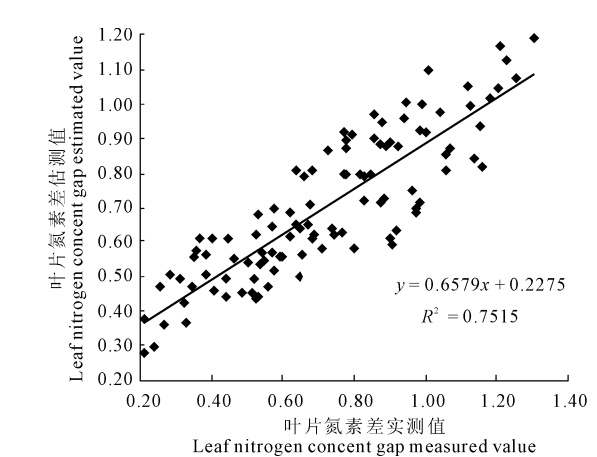


图 4 小麦叶片氮素含量差实测值与预测值的相关性 (n = 90)
Fig.4 Correlations between estimated and measured leaf nitrogen concentration gaps in wheat

3 讨论与结论

氮素是影响作物生长的重要营养因素,对氮素营养的实时、快速、准确监测是准确施肥、提高氮素利用率的途径,高光谱由于其高的分辨率,使其可以监测氮素含量^[10-19],以往的研究主要集中在利用光谱反射率或者植被指数进行叶片或者冠层氮素含量监测,不能反映冠层氮素含量差异。光谱角是衡量不同光谱向量之间差异程度的计算方法,本文根据前人研究得出的监测氮素敏感的光谱波段,以不施氮肥处理为对照,利用光谱角算法监测不同氮素水平与对照的差异,并分析光谱角与氮素之间的定量关系,为生产中监测氮素营养差异并进行氮肥推荐奠定基础。

通过研究发现,光谱角在生育期的变化规律是,随着生育期的推进,光谱角先降低,在开花期达到了最低,并且各个氮素处理之间无差异,随后,光谱角迅速增加。光谱角随氮素施用量增加而增大。叶片氮素检测模型为 $y = 0.3999x^{0.3989}$,其决定系数 R^2 为 0.6870,其预测的 RE、RMSE 和 R^2 分别为 1.63%、0.1609、0.7515。说明利用光谱角与叶片氮素之间的定量关系,可以为小麦氮素营养诊断提供新的方法。

参 考 文 献:

[1] Stone M L, Solie J B, Raun W R. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat[J]. Transaction of the ASAE, 1996, 39(5): 1623-1631.
[2] 张 霞,刘良云,赵春江,等.利用高光谱遥感图像估算小麦含氮量[J].遥感学报,2003,7(3): 176-182.

[20] Ness P J, Woolhouse H W. RNA synthesis in Phaseolus chloroplasts. 1. Ribonucleic acid synthesis and senescing leaves[J]. J Exp Bot, 1980, 31(1): 223-233.

[21] Ducic T, Polle A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants[J]. Braz. J. Plant Physiol, 2005, 17(1): 103-112.

[22] Shimon Rachmilevitch, Asaph B. Cousins, Arnold J. Bloom. Nitrate assimilation in plant shoots depends on photorespiration[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(31): 11506-11510.

[23] Li Q, Chen LS, Jiang HX, et al. Effects of manganese-excess on CO₂ assimilation, ribulose - 1, 5 - bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic electron transport of leaves, and antioxidant systems of leaves and roots in Citrus grandis seedlings [J]. BMC Plant Biol, 2010, 10: 42.

[24] Sidsel B S, Pai P, Kristian H L, et al. Latent manganese deficiency in barley can be diagnosed and remediated on the basis of chlorophyll a fluorescence measurements [J]. Plant Soil, 2013, 372 (4): 417-429.

[25] 金喜军, 龚振平, 马春梅, 等. 大豆植株苗期至结荚初期对肥料氮的吸收与分配[J]. 核农学报, 2012, 26(5): 0809-0814.

[26] Gangwar S, Singh VP. Indole acetic acid differently changes growth and nitrogen metabolism in Pisum sativum L. seedlings under chromium(VI) phytotoxicity: Implication of oxidative stress[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(2): 321-328.

[27] Gataldo D A, Harsoon M, Schrader L E. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue[J]. Commun Soil Sci and Plant Anal, 1975, 6(1): 47-49.

[28] 王金陵. 大豆[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1982.

[29] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London, UK: Academic Press, Inc, 1986.

[30] Gadimov A G, Safaraliev P M. Changes in nitrogen status of soybean under influence of symbiotically fixed and bound nitrogen[J]. Tr J of Agriculture and Forestry, 1999, 23: 389-392.

[31] Wilkinson JQ, Crawford NM. Identification and characterization of a chlorate - resistant mutant of Arabidopsis thaliana with mutations in both nitrate reductase structural genes NIA1 and NIA2[J]. Mol Gen Genet, 1993, 239(1 - 2): 289-297.

[32] 王 芳, 刘 鹏, 朱靖文. 镁对大豆根系活力叶绿素含量和膜透性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 235-239.

[33] 唐巧玉, 吴永尧, 周大寨, 等. 硒对大豆根系活力的影响[J]. 河南农业科学, 2005, 7: 42-44.

[34] Adriano T, Mastrodomenico and Larry C. Purcell. Soybean nitrogen fixation and nitrogen remobilization during reproductive development [J]. Crop Sci, 2012, 52(3): 1281-1289.

(上接第 97 页)

[3] 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.

[4] 王纪华, 黄文江, 赵春江, 等. 利用光谱反射率估算叶片生化组分和籽粒品质指标研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(4): 277-284.

[5] 丛利民, 李国志, 王登科, 等. 光谱角技术在多光谱遥感蚀变异常提取工作中的应用[J]. 化工矿地质, 2009, 31(4): 242-246.

[6] 姚佛军, 杨建民, 张玉君, 等. 光谱角制图法与谱线平行分类法若干问题的探讨——以 ETM 数据为例[J]. 遥感应用, 2009, 1: 20-22.

[7] 樊彦国, 李翔宇, 张 磊, 等. 基于多波段分析的无阈值自动光谱角制图分类法[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 38-41.

[8] 湛德荣, 孙 波, 陶 鹏, 等. 基于核光谱角余弦的高光谱图像空间邻域聚类方法[J]. 电子学报, 2008, 10: 1992-1995.

[9] 陈 亮, 刘代志, 黄世奇. 基于光谱角匹配预测的高光谱图像无损压缩[J]. 地球物理报, 2007, 50(6): 1894-1898.

[10] 王纪华, 王之杰, 黄文江, 等. 冬小麦冠层氮素的垂直分布及光谱响应[J]. 遥感学报, 2004, 8(4): 309-316.

[11] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[12] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 73-80.

[13] Chubachi N R, Asanoh Oikawa T. The diagnosis of nitrogen of rice plants using chlorophyll meter[J]. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1986, 57: 109-193.

[14] Campbell R J, Mobley K N, Marini R P. Growing conditions alter the relationship between SPAD2501 values and apple leaf chlorophyll [J]. Horticulture Science, 1990, 25: 330-331.

[15] 牛 铮, 陈永华, 隋洪智, 等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 125-129.

[16] 刁万英, 李少昆, 王克如, 等. 基于高光谱的膜下滴灌小麦氮素营养评价研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1362-1366.

[17] Xiu - liang Jin, Wan - ying Diao, Chun - hua Xiao, et al. Estimation of wheat agronomic parameters using newspectral indices [J]. PLOS ONE, 2013, 8(8): 72736.

[18] 梁 亮, 杨敏华, 张连蓬, 等. 小麦叶面积指数的高光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1658-1662.

[19] 冯 伟, 朱 艳, 姚 霞, 等. 基于高光谱遥感的小麦叶干重和叶面积指数监测[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 34-44.