稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系

朱 艳,李映雪,周冬琴,田永超,姚 霞,曹卫星*

(南京农业大学/江苏省信息农业高技术研究重点实验室,农业部作物生长调控重点开放实验室,江苏南京 210095)

摘要:作物氮素含量是评价作物长势、估测产量与品质的重要参考指标,叶片氮素含量的无损快速监测对于指导作物氮素营养的精确管理及生产力的预测预报具有重要意义。以 5 个小麦品种和 3 个水稻品种在不同施氮水平下的 3a 田间试验为基础,综合研究了稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱的定量关系。结果显示:(1)不同试验中拔节后稻麦叶片氮含量均随施氮水平呈上升趋势;(2)稻麦冠层光谱反射率在不同施氮水平下存在明显差异,在可见光区(460~710 mm)的反射率一般随施氮水平的增加逐渐降低,而在近红外波段(760~1100 nm)却随施氮水平的增加逐渐升高;(3)就单波段光谱而言,610、660 nm 和 680 nm 处的冠层反射率均与稻麦叶片氮含量具有较好的相关性;(4)在光谱指数中,归一化差值植被指数 NDVI(1220,610)与水稻和小麦叶片氮含量均具有较好的相关性,且相关性好于单波段反射率;(5)对于小麦和水稻,可以利用共同的波段和光谱指数来监测其叶片氮含量,采用统一的回归方程来描述其叶片氮含量随单波段反射率和冠层反射光谱参数的变化模式,但若采用单独的回归系数则可以提高稻麦叶片氮含量估测的准确性。

关键词:小麦;水稻;叶片氮含量;冠层反射率;光谱指数;定量关系 文章编号:1000-0933(2006)10-3463-07 中图分类号:Q143,Q945.3,S511.101 文献标识码:A

Quantitative relationship between leaf nitrogen concentration and canopy reflectance spectra in rice and wheat

ZHU Yan, LI Ying Xue, ZHOU Dong Qin, TIAN Yong Chao, YAO Xia, CAO Wei-Xing (*Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province/ Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Ministry of Agriculture*, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, *China*). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10):3463 ~ 3469.

Abstract:Nitrogen concentration in crop plants is a key index for assessing plant growth status and predicting grain yield and quality. Non-destructive monitoring and diagnosis of plant nitrogen status is of significant importance for precise nitrogen management and productivity forecasting for field crops.

The present study was conducted to determine the quantitative relationships of leaf nitrogen concentration to canopy reflectance spectra in both wheat and rice. Ground-based canopy spectral reflectance and nitrogen concentrations in leaves were measured with six field experiments consisting of five different rice varieties and three different wheat varieties and varied nitrogen fertilization levels across six growing seasons. All possible ratio vegetation indices (RVI), difference vegetation indices (DVI), and normalized difference vegetation indices (NDVI) of sixteen wavebands from the MSR16 radiometer were calculated. Analyses were made to determine the relationships of seasonal canopy spectral reflectance and all possible vegetation indices to leaf nitrogen concentrations in rice and wheat under different nitrogen treatments and variety types.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30400278,30571092);江苏省自然科学基金资助项目(BK2003079,BK2005212);高校博士点基金资助项目 (20030307017)

收稿日期:2005-07-20;修订日期:2005-11-28

*通讯作者 Corresponding author. E-mail : caow @njau. edu. cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30400278, No. 30571092); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2003079, No. BK2005212); Ph.D. Program Grant of China (No. 20030307017)

Received date : 2005-07-20 ; Accepted date : 2005-11-28

Biography: ZHU Yan, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in information ecology. E-mail: yanzhu @njau.edu.cn

作者简介:朱艳(1976~),女,江苏南通人,博士,副教授,主要从事信息生态学研究. E-mail:yanzhu @njau.edu.cn

The results showed, as expected, that nitrogen concentrations in wheat and rice leaves increased with increasing nitrogen fertilization rates. Canopy reflectance, however, was a more complicated relationship. In the near infrared portion of the spectrum $(760 \sim 1100 \text{ nm})$, canopy reflectance increased with increasing nitrogen supply, whereas in the visible region $(460 \sim 710 \text{ nm})$, canopy reflectance decreased with increasing nitrogen supply. For both rice and wheat, leaf nitrogen concentration was best evaluated at 610, 660 and 680 nm. Among all possible RVIs, DVIs, and NDVIs, the NDVI(1220, 610) was most highly correlated with leaf nitrogen concentrations in both rice and wheat. In addition, the correlation of NDVI(1220, 610) to leaf nitrogen concentration was found to be higher than that of individual wavebands at 610, 660 and 680 nm wavelengths and spectral parameters, and the integrated regression equation could be used to describe the dynamic change patterns of leaf nitrogen concentrations in rice and wheat with reflectance spectra parameters, although separate regression coefficients would slightly enhance the prediction accuracy.

Key words : wheat ; rice ; leaf nitrogen concentration ; canopy reflectance spectrum ; spectral parameter ; quantitative relationship

氮素是作物生长和产量品质形成所必须的重要元素,实时监测和评价作物植株的氮素状况,对于指导作物氮素营养的精确诊断和高效管理以及实现作物产量和品质生产力的预测预报具有十分重要的意义。同时, 由于氮循环是研究全球气候变化和营养元素迁移的关键过程,因而植物组织的氮素状况是全球气候变化研究 中广泛关注的重要因子,也是生态系统模型的驱动变量。传统的作物氮素监测方法一般依靠田间植株取样和 室内分析测试,虽然结果较为可靠,但在时间和空间尺度上都很难满足实时、快速、无损氮素诊断的要求^[1,2]。 近年来遥感技术的快速发展为作物氮素营养的无损实时监测提供了新的方法和手段,对于作物长势监测和营 养诊断等均呈现出良好的应用前景^[3-5],是当前信息生态学研究的重要课题^[6,7]。

早在 1972 年, Thomas 等就发现甜椒叶片含氮量与 550~675 nm 波段内叶片的反射系数高度相关,实际含量与所预测的含氮量误差小于 7%^[8],说明植物光谱分析有可能快速、简便、较精确、非破坏性地监测植物氮素营养。随后人们对作物氮素营养状况对冠层光谱特性的影响进行了大量的研究^[3,4,9~16]。Everitt 在杂草和花卉植物的研究中发现,500~750 nm 反射率与植物叶片氮含量具有很高的相关性,提出 550~600 nm 与 800~900 nm 反射率的比值可以用于监测植株氮素状况^[9]。王人潮、周启发等提出,诊断水稻氮素营养水平的叶片光谱敏感波段为 760~900、630~660 nm 和 530~560 nm^[10,11]。Stone^[12]提出用基于 671 nm 和 780 nm 两个波段反射率组合的植株-氮-光谱指数来估算小麦植株的全氮含量。薛利红等^[13]的初步研究表明,由 660 nm 和 460 nm 两波段反射率组成的冠层植被指数可以较好地反映小麦叶片氮含量。这些研究结果显示,叶片氮含量的适宜特征光谱随不同的作物、不同的试验条件而有所差异,有关作物氮素营养与光谱参数的规律性和定量化关系还有待进一步的研究。

本文利用不同年份、不同小麦和水稻品种、不同施氮水平的多年田间试验资料,综合分析冠层单波段反射 率和光谱参数与稻麦叶片氮含量的定量关系,明确稻麦叶片氮含量的特征光谱波段与光谱参数,进而确立稻 麦叶片氮含量与特征波段光谱反射率和光谱参数之间的定量关系,为建立稻麦植株氮素状况的无损监测技术 提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究的观测资料分别来自 3 个不同的小麦试验和 3 个不同的水稻试验,涉及不同年份、不同作物、不同 品种类型、不同施氮水平等试验因子。

试验 1:不同施氮水平 ×不同小麦品种。于 2001~2002 年在南京农业大学校内试验站的水泥池区进行。 前茬为玉米,土壤为黄棕壤,有机质 1.21%,全氮 0.13%,速效磷 23.3 mg kg⁻¹,速效钾 97.2 mg kg⁻¹。供试小 麦品种为徐州 26 和淮麦 18;设 4 个施氮水平,分别为 0、120、210 kg hm⁻²和 300 kg hm⁻²纯氮,基肥和拔节肥各 1/2。磷、钾肥施用量分别为 120 kg hm⁻² P_2O_5 、150 kg hm⁻² K₂O,用作基肥。小区面积为 4 m²,基本苗 1.5 ×10⁶ hm⁻²,行距 24.5 cm。两因素随机区组排列,重复 3 次。其他管理措施同高产大田栽培。从小麦拔节 至成熟共进行 8 次植株取样,时间(月-日)分别在 03-15、03-30、04-04、04-12、04-22、04-29 和 05-16 完成。

试验 2:不同施氮水平 ×单个小麦品种。于 2002 ~ 2003 年在南京农业大学江浦农场进行,前茬为水稻氮 肥试验田,土壤为重粘土,有机质 2.09%,全氮 0.12%,速效氮 95.55 mg kg⁻¹,速效磷 12.03 mg kg⁻¹,速效钾 103.5 mg kg⁻¹。前茬水稻试验设 5 个施氮水平,分别为 0、75、150、225 和 300 kg hm⁻²纯氮,常规水层灌溉和间 歇灌溉 2 个水分处理。两因素随机区组设计,重复 3 次。种植小麦时将原来的每个施氮小区平均分成 3 份, 每份面积 3.3 m ×3 m,分别施 0、150 和 300 kg hm⁻²纯氮,基追比 6 2 2,追肥时期分别为拔节和孕穗期;配施 135 kg hm⁻² P₂O₅ 和 210 kg hm⁻² K₂O,用作基肥。供试小麦品种为扬麦 10。基本苗为 1.5 ×10⁶ hm⁻²,行距 25 cm。其他管理措施同高产大田栽培。本试验植株取样时间(月-日)分别为 03-21、04-08、04-23、05-01、05-09、05-17 和 05-27。

试验 3:不同施氮水平 ×不同小麦品种。于 2003 ~ 2004 年在江苏省农业科学院试验站进行。前茬水稻 田,供试土壤为黄黏土,有机质 0.96%,全氮 0.10%,速效磷 40.29 mg kg⁻¹,速效钾 102.78 mg kg⁻¹。供试小麦 品种为宁麦 9 号、淮麦 20、徐州 26 和扬麦 10。设 5 个施氮水平,分别为 0、75、150、225 kg hm⁻²和 300 kg hm⁻²纯 氮,按基肥 60%,拔节和孕穗肥各 20%的比例施入;配施 P₂O₅ 150 kg hm⁻²和 K₂O 112.5 kg hm⁻²,全部作基肥。 小区面积 16 m²,基本苗 1.8 ×10⁶ hm⁻²,行距 25 cm。两因素随机区组排列,3 次重复。其他管理措施同高产大 田栽培。时间(月-日)分别于 04-08、04-20、04-28、05-04、05-11、05-17 和 05-24 对宁麦 9 号和淮麦 20 进行破坏性 取样,另外 2 个品种徐州 26 和扬麦 10 只在开花期(4/20)、灌浆中期(5/4)和成熟期(5/24)进行了植株取样。

试验 4:不同施氮水平 ×不同水稻灌溉。于 2002 年在南京农业大学江浦农场进行,供试水稻品种为武香 粳 9 号。土壤为重粘土,有机质 2.09 %,全氮 0.141 %,速效磷 12.03 mg kg⁻¹,速效钾 103.5 mg kg⁻¹。设 2 个水 分处理:常规水层灌溉和节水灌溉。5 个施氮水平:0,75,150,225 kg hm⁻²和 300 kg hm⁻²纯氮。两因素随机区 组设计,3 次重复,小区面积 30 m² (3 m ×10 m)。氮肥按基肥 50 %、蘖肥 10 %、促花肥 20 %、保花肥 20 %的比例 施入。其它管理同水稻高产栽培。本试验植株取样的时间(月-日)分别为 8/1,8/20,8/30,9/13 和 9/26。

试验 5:不同施氮水平 ×不同水稻灌溉。于 2003 年按试验 4 的实施方案重复进行,时间(月-日)分别于 09-05,09-12,09-22,09-26,10-08,10-15 进行植株取样。

试验 6:不同施氮水平 ×不同水稻品种。于 2004 年在江苏省农业科学院进行,土壤质地为黄棕壤土,有机 质 2.44%,全氮 0.17%,有效磷 14.03 mg kg⁻¹,有效钾 118.78 mg kg⁻¹。供试品种为日本晴和华粳 2 号,设 4 个 施氮水平:0,105,210,315 kg hm⁻²纯氮。小区面积为 28 m²(4 m ×4.5 m),随机区组设计,重复 3 次。氮肥按基 肥 60%、促花肥 20%、保花肥 20%的比例施入,配施 135 kg hm⁻² P₂O₅,210 kg hm⁻² K₂O,其它管理同水稻高产 栽培。分别于时间(月-日)08-19,08-27,09-02,09-11,09-23,09-30 和 10-12 进行植株取样。

1.2 观察测定

在各试验中,与破坏性取样同步,采用美国 Cropscan 公司生产的 MSR-16 型便携式光谱辐射仪测量不同处 理各小区的小麦、水稻冠层光谱反射率。仪器视场角为 31.1°,波段范围为 452 ~ 1650 nm,设 16 个波段,其中 可见光波段为 460、510、560、610、660、680 nm 和 710 nm;近红外为 760、810、870、950、1100、1220、1480、1500 nm 和 1650 nm。测量选择在晴朗无云或少云的天气进行,测量时间为 10:00 ~ 14:00。测量时探头垂直向下,距冠 层垂直高度 1 m。每小区重复测量 5 次,取平均值作为该小区的光谱测量值。

破坏性植株取样后,将叶片分离、烘干,称重粉碎,并采用凯氏定氮法测定叶片全氮含量。

1.3 数据分析

为了确定能反映稻麦叶片氮素状况的最佳波段和光谱指数,系统计算了从可见光波段到中红外波段共 16 个波段的所有比值、差值和归一化差值植被指数组合(表 1)。基本方法是,利用所有的水稻和小麦试验数 据,综合分析稻麦叶片氮含量及冠层反射光谱在不同试验处理下的变化规律和动态特征,并通过回归分析确 定相应的定量关系。其中,小麦和水稻试验资料的样本数分别为 381 和 222。

2 结果与分析

2.1 不同施氮水平下的稻麦叶片氮含量

叶片氮含量是表征作物叶片氮素状况的主要指标。本研究结果表明,所有供试小麦和水稻品种在各生育时期的叶片氮含量都因施氮水平的不同而表现出了差异,在低氮和中氮条件下随施氮量的增加呈现上升趋势,但在高氮水平的处理之间变化不明显。总体来看,小麦在最低至最高施氮水平范围内(0~300kg hm⁻²纯氮),不同品种在不同生育时期的叶片氮含量变化范围为0.52%~4.72%,单个时期内叶片氮含

表1 光谱参数计算方法

Table 1 Algorithm of different spectral parameters					
光谱参数	缩写	计算公式			
Spectral parameter	Abbreviation	Algorithm formula			
单波段反射率 Reflectance					
比值植被指数 Ratio vegetation index	RVI (1, 2)	1/ 2			
差值植被指数 Difference vegetation index	DVI (1,2)	1 2			
归一化差值植被指数 Normalized difference vegetation index	NDVI (1,2) ((1 - 2)/(1 + 2)			

量的浓度差异为 0.5%~1.5%;水稻在最低和最高施氮水平范围内(0~315 kg hm⁻²纯氮),不同品种在不同生 育时期的叶片氮含量变化范围为 1.16%~3.67%,单个时期内叶片氮含量的浓度差异为 0.13%~1.19%。 2.2 不同施氮水平下的冠层反射光谱

以试验 3 中淮麦 20 在不同施氮水平下的开花期冠层光谱反射率和试验 5 中武香粳 9 号在不同施氮水平 下的齐穗期冠层光谱反射率为例,来分别展示小麦和水稻冠层反射光谱对施氮水平的响应模式(图 1 和 2)。 结果表明,小麦和水稻冠层光谱反射率在不同施氮水平之间存在明显差异,可见光波段(460 ~ 710 nm)与近红 外长波段区域(1480 ~ 1650 nm)的光谱反射率随施氮水平的升高而降低,而近红外短波段范围(760 ~ 1220 nm) 内的光谱反射率则随着施氮水平的增加呈上升趋势,并且各氮肥处理之间的差异在近红外波段大于可见光 区。不同类型水稻和小麦品种在整个生育期的反射光谱都遵循这一基本规律。综观所有波段,水稻冠层反射 率随施氮水平变化的幅度均比小麦小,尤其是可见光和近红外长波段区域。在同一施氮水平下,水稻冠层反射 率也均小于小麦冠层反射率,这可能是由于水稻群体叶面积指数大于小麦的缘故。冠层反射光谱在不同施氮水 平,不同作物下的动态变化规律为分析和构建稻麦叶片氮含量与冠层反射光谱特征的定量关系奠定了基础。



图 1 试验 3 中不同施氮水平下淮麦 20 小麦品种在开花期的冠层光 谱反射率

Fig. 1 Canopy reflectance under different nitrogen rates in wheat of Huaimai 20 at anthesis in experiment 3



图 2 试验 5 中不同施氮水平下武香粳 9 号水稻品种在齐穗期的冠 层光谱反射率

Fig. 2 Canopy reflectance under different nitrogen rates in rice of Wuxiangjing 9 at full heading in experiment 5

2.3 稻麦叶片氮含量与冠层光谱反射率的关系

利用 3 个小麦试验共 381 组数据,分析了小麦叶片氮含量与单波段反射率之间的关系。结果表明,小麦叶片氮含量与可见光区各波段及近红外长波段区域的反射率均呈极显著负相关,与近红外短波段区域的反射率呈极显著正相关。表 2 中列出了与小麦叶片氮含量相关性较好的 5 个波段及回归方程。其中,610,660 nm 和 680 nm 有 680 nm 的决定系数差异不大(0.8486~0.8555),而 510 nm 和 710 nm 的决定系数较 610,660 nm 和 680 nm 有

明显降低。

利用 3 个水稻试验共 222 组数据,分析了水稻叶片氮含量与单波段反射率之间的关系。结果表明,除 460 nm 以外,水稻叶片氮含量与可见光区各波段的反射率均呈极显著负相关,与近红外短波段区域的反射率呈正 相关,但均没有达到极显著水平,只有 810 nm 处的反射率达到显著水平,与近红外长波段区域的反射率呈负 相关关系,其中 1500 nm 和 1650 nm 达到极显著水平,1480 nm 达到显著水平。表 2 列出了与水稻叶片氮含量 相关性最好的 5 个波段及回归方程。从表 2 可以看出,在水稻作物上,相关性最好的单波段反射率与叶片氮 含量的决定系数显著低于小麦作物,但与小麦作物类似的是,在相关性最好的 5 个波段中,610,660 nm 和 680 nm 在水稻作物上的决定系数差异也不大(0.5401~0.5673),而 560 nm 和 510 nm 的决定系数较 610,660 nm 和 680 nm 有明显降低,尤其是 510 nm。因此可以认为,610,660 nm 和 680 nm 是与水稻和小装叶片氮含量相关性 均较好的 3 个共性波段。

进一步利用 3 个水稻试验和 3 个小麦试验共 603 组数据,综合分析了稻麦组合的叶片氮含量与单波段反 射率之间的关系。结果表明,660,680 nm 和 610 nm 与稻麦组合的叶片氮含量相关性均较好(表 2)。所以,可 以采用 660,680 nm 和 610 nm 来表征冠层单波段反射率与稻麦叶片氮含量之间的定量关系。图 3 和 4 分别显 示了水稻、小麦及稻麦组合的叶片氮含量与 660 nm 和 610 nm 处的冠层单波段反射率之间的回归关系。图中 显示,稻麦组合在样本数为 603 的条件下,决定系数仍达到 0.73 以上,因此,可以利用统一的波段和方程来预 测水稻和小麦叶片氮含量。当然,在精度要求较高的情况下,最好采用不同的回归系数来估算不同作物的叶 片氮含量,尤其是水稻作物。

2.4 稻麦叶片氮含量与冠层光谱参数的关系

利用 3 个小麦试验共 381 组数据,分析了小麦叶 片氮含量与 16 个波段的所有差值、比值和归一化差 值植被指数之间的关系。结果表明,由可见光区域的 710 nm 与近红外短波段区域(760 ~ 1220 nm)组成的 归一化差值植被指数与水稻叶片氮含量的相关性均 较好,因此计算了近红外短波段区域各波段的平均值 与 710 nm 组成的归一化差值植被指数。表 3 中列出 了与小麦叶片氮含量相关性最好的 5 个参数及其回 归方程。与相关性最好的 5 个单波段相比,光谱参数 与小麦叶片氮含量的决定系数($R^2 > 0.87$)均明显好 于单波段($R^2 > 0.79$)。

利用 3 个水稻试验共 222 组数据,分析了水稻叶 片氮含量与 16 个波段的所有差值、比值和归一化差

表 2 稻麦叶片氮含量(y)与冠层光谱反射率(x)之间的定量关系 Table 2 Quantitative relationships of leaf nitrogen concentration to

canopy spectra			
作物类型	波长	回归方程	决定系数
Crop type	Wavelength (nm)	Regression equation	R^2
小麦 (<i>n</i> = 381) Wheat	660	$y = 6.7801 x^{-0.8903}$	0.8555
	610	$y = 5.8791e^{-0.2058x}$	0.8514
	680	$y = 6.8410 x^{-0.8834}$	0.8486
	510	$y = 9.8491 x^{-1.4336}$	0.8051
	710	$y = 9.8757e^{-0.1724x}$	0.7970
水稻(n=222) Rice	680	$y = 3.8311 x^{-0.4136}$	0.5673
	660	$y = 3.9312 x^{-0.4224}$	0.5587
	610	$y = 4.6427 x^{-0.4730}$	0.5401
	560	$y = -1.2218\ln(x) + 4.306$	0.4314
	510	$y = 3.3677e^{-0.0939x}$	0.2027
稻麦(n=603) Wheat &rice	660	$y = 5.8439 x^{-0.7697}$	0.7707
	680	$y = 5.7138 x^{-0.7522}$	0.7623
	610	$y = 8.6561 x^{-0.9289}$	0.7345

值植被指数之间的关系。结果表明,由可见光区域的 560,610,660 和 680 nm 与近红外区域的 1220nm 组成的 归一化差值植被指数与水稻叶片氮含量的相关性均较好,因此计算了 560,610,660 和 680 nm 的平均值与 1220 nm 组成的归一化差值植被指数。表 3 列出了与水稻叶片氮含量相关性最好的 5 个参数及其回归方程。与相 关性最好的 5 个单波段相比,光谱参数与水稻叶片氮含量的决定系数没有得到明显的提高。其中 NDVI (1220,610)是与小麦和水稻叶片氮含量相关性均较好的共性光谱参数。

进一步利用 3 个水稻试验和 3 个小麦试验共 603 组数据,综合分析了稻麦组合的叶片氮含量与 16 个波 段的所有差值、比值和归一化差值植被指数之间的关系。结果表明,NDVI (1220,610)与稻麦组合的叶片氮含 量的相关性最好(表 3)。所以,采用 NDVI(1220,610)来表征冠层光谱参数与稻麦叶片氮含量之间的定量关 系。图 5 显示了 NDVI(1220,610)与水稻、小麦和稻麦组合的叶片氮含量的幂函数和线性函数关系,虽然幂函 数的决定系数或估测精度在一般情况下要高于线性函数,但幂函数在高氮情况下容易出现近饱和的现象,从 而会降低对高氮反应的敏感性。同时,无论是幂函数还是线性函数关系,均因作物类型而有所变异,因而当精确性要求较高时,最好采用不同的回归系数来估算不同作物的叶片氮含量。另外,NDVI(1220,610)与叶片氮 含量的决定系数均高于单波段,这主要是因为 NDVI(1220,610)反映的是两个波段的信息,但单波段对便携式 光谱仪的研制可能更具参考价值。



图 3 稻麦叶片氮含量与 660nm 反射率的关系



3 结论

3.1 本文通过综合分析不同年份、不同施氮水平、不 同生育期的水稻和小麦田间试验数据,研究了稻麦叶 片氮含量的共同敏感波段和光谱参数。结果表明,就 单波段而言,610、660 nm 和 680 nm 处的冠层光谱反射 率均与稻麦叶片氮含量具有较高的相关性;在所有的 比值、差值和归一化差值植被指数中,NDVI (1220, 610)均与稻麦叶片氮含量具有较好的相关性。因此 对于小麦和水稻,可以利用统一的波段和光谱指数来 监测其叶片氮含量,这一结论是对已有单个作物氮素 营养光谱监测理论和技术的深化与发展。

3.2 与已有的氮素敏感波段或植被指数相比^[9~13], NDVI(1220,610)不完全限定在可见光范围,它综合了 近红外波段的信息;同时 NDVI(1220,610)的相关性高 于单波段反射率,因此用 NDVI(1220,610)监测稻麦叶 片氮含量应具有较好的稳定性。当然,对于便携式氮



图 4 稻麦叶片氮含量与 610nm 反射率的关系

Fig. 4 Relationship between canopy reflectance at 610nm and leaf nitrogen concentration in wheat and rice

表3 稻麦叶片氮含量(y)与冠层光谱参数(x)之间的定量关系

Table 3 Quantitative relationships of leaf nitrogen concentrations and

canopy spectral parameters in wheat and rice

作物类型	波长	回归方程	决定系数
Crop type	Wavelength (nm)	Regression equation	R^2
小麦(n=381) Wheat	NDVI [average (760, 810, 870, 950, 1100, 1220), 710]	$y = 11.793 x^{1.511}$	0. 8981
	NDVI (760,560)	$y = 5.0405 x^{1.8857}$	0.8905
	NDVI (1220,610)	$y = 4.6138 x^{1.5992}$	0.8891
	NDVI (810,560)	$y = 4.8232 x^{1.9238}$	0.8817
	NDVI (870,560)	$y = 4.9674 x^{2.0831}$	0.8708
水稻(n=222) Rice	NDVI [1220, average (560, 610,660,680)]	$y = 3.6969 x^{1.1564}$	0.5624
	RVI (1220,610)	$y = 1.1147 x^{0.4531}$	0. 5359
	NDVI (810,610)	$y = 3.4252 x^{1.2061}$	0.5237
	NDVI (870,610)	$y = 3.4520 x^{1.2955}$	0.5154
	NDVI (810,680)	$y = 0.6473e^{1.6439x}$	0.5096
稻麦 $(n = 603)$ Wheat & rice	NDVI (1220,610)	$y = 4.4577 x^{1.527}$	0. 8455

素光谱监测仪的研制,单波段反射率可能更具实用性和简便性。

3.3 定量分析显示,利用 NDVI(1220,610) 监测稻麦叶片氮含量时,虽然幂函数的决定系数均高于线性函数,但幂函数在高氮情况下容易出现近饱和现象,从而会降低对叶片高氮浓度的敏感性。因此采用 NDVI(1220,610) 的线性函数来监测稻麦叶片氮含量可能具有更广的适用范围,但在一般情况下(尤其是低氮和中氮),采用 NDVI(1220,610) 的幂函数监测稻麦叶片氮含量应该具有更高的准确性。

3.4 本研究还表明,在水稻和小麦氮素管理上,虽然可以基于冠层单波段反射率或植被指数,采用统一的回 归方程来监测水稻和小麦作物的叶片氮含量,但当精确性要求较高时,采用单独的回归系数可以提高水稻叶 片氦含量监测的准确性。

3.5 基于本研究得出的初步结论,今后拟进一步利用高光谱遥感技术来更为精细地确定稻麦叶片氮含量的 敏感波段和光谱参数,并建立准确度更高和适用性更强的作物氮素营养监测与诊断模型,促进作物氮素营养 无损监测与精确诊断技术的发展和应用。

References :

- [1] Roth GW, Fox R H. Plant tissue test for predicting nitrogen fertilizer requirement of winter wheat. Agronomy Journal , 1989, 81: 502 ~ 507.
- [2] Li J H, Dong Z X, Zhu J Z. Present application and outlook for method of nitrogen nutrition diagnosis. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2003, 7(1): 80 ~ 83.
- [3] Jensen A "Lorenzen B. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different nitrogen jevels. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10): 1809 ~ 1820.
- [4] Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. Crop Science, 1995, 35:1400 ~ 1405.
- [5] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(2): 158 ~ 182.
- [6] Zhang X S. Some significant disciplines in modern ecology. Chinese Bulletin of Botany, 1990, 7(4): 1~6.
- [7] Zhou C P, He H L, Yu G R. Approach to the theoretical framework of eco-informatics. Resources Science ,2002 ,24(1) : 77 ~ 81.
- [8] Thomas J R, Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. Agronomy Journal , 1972 , 64:11 ~ 13.
- [9] Everitt J H, Pettit R D, Alaniz M A. Remote sensing of broom snake weed (*Gutierrezia sarothrae*) and spiny aster (*Aster spinosus*). Weed Science, 1987, 35 (2): 295 ~ 302.
- [10] Wang R C, Chen M Z Jiang H X. Studies on agronomic mechanism of the rice yield estimation by remote sensing . The rice reflectance characteristics of different nitrogen levels and the selection of their sensitive bands. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1993, 19 (suppl.): 7 ~ 14.
- [11] Zhou Q F, Wang R C. A preliminary study on the relationship between the nitrogen levels and the spectral characteristics. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1993, 19 (suppl.): 40 ~ 46.
- [12] Stone ML, Soile J B, Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. Transactions of ASAE, 1996, 39:1623 ~ 1631.
- [13] Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(2): 172 ~ 177.
- [14] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll concentrations from reflectance spectra (400 ~ 2500 nm) at leaf and canopy scales. Remote Sensing of Environment, 1995, 53:199 ~ 211.
- [15] Lee T, Raja K, Reddy G. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. Crop Science, 2000, 40:1814 ~ 1819.
- [16] Raymond E EJ, Remmie B. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5: 205 ~ 218.

参考文献:

- [2] 李俊华,董志新,朱继正.氮素营养诊断方法的应用现状及展望.石河子大学学报(自然科学版),2003,7(1):80~83.
- [6] 张新时.现代生态学的几个热点.植物学通报,1990,7(4):1~6.
- [7] 周才平,何洪林,于贵瑞.生态信息科学的理论框架初探.资源科学,2002,24(1):77~81.
- [10] 王人潮,陈铭臻,蒋亨显.水稻遥感估产的农学机理研究 .不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择.浙江农业大学学报, 1993,19(增刊):7~14.
- [11] 周启发,王人潮.水稻氮素营养水平与光谱特征的关系.浙江农业大学学报,1993,19(增刊):40~46.
- [13] 薛利红,曹卫星,罗卫红,等.小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究.植物生态学报,2004,28(2):172~177.