基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术*

田永超 朱 艳 姚 霞 刘小军 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,南京 210095)

摘 要 氮素是作物生长发育和产量品质形成所必需的营养元素。快速、无损、准确地监测作物氮素状况,对于诊断作物生长特征、提高氮肥运筹水平和利用效率、降低过量施氮带来的农田环境污染,深入开展精确农业和数字农业的研究与应用具有重要意义。本文围绕作物氮素特征光谱产生的机制、反射光谱对氮素营养的响应及光谱指数的生理意义等解析了作物氮素营养光谱无损监测的技术机理,阐明了作物氮素监测的光谱学和生理生态学基础,进而概述了国内外有关作物反射光谱获取及叶片、冠层和空间水平上氮素营养光谱监测的研究进展。针对作物氮素营养监测亟待解决的问题和作物生产需求,提出今后进一步研究的领域应重点围绕氮素生化组分的监测方法、氮素监测模型的普适性、氮素监测仪的开发、地空遥感信息的融合、遥感与其他技术的集成等方面。

关键词 作物;氮素营养;光谱遥感;无损监测
中图分类号 S143.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2007)09-1454-10

Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information. TIAN Yong-chao, ZHU Yan, YAO Xia, LIU Xiao-jun, CAO Wei-xing (*Hi-tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(9): 1454-1463.

Abstract: Nitrogen is one of the necessary nutrient elements for crop growth and yield formation, and the non-destructive, rapid and accurate monitoring of crop nitrogen nutrition is of significance in estimating crop growth parameters, enhancing nitrogen management and use efficiency, reducing farmland contamination from excessive use of fertilizer nitrogen, and promoting the research and application of precision farming and digital agriculture. In this paper, the mechanisms of non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition were interpreted with spectral and eco-physiological bases through clarifying the theoretical basis of the generation of crop nitrogen-specific spectra, responses of reflectance spectra to nitrogen nutrition, and physiological signification of spectral index. The research progress on the acquisition of reflectance spectra and the spectral-based monitoring of nitrogen nutrition in leaf, canopy and spatial levels were reviewed comprehensively, with the possible research directions recommended to address the urgent issues facing crop nitrogen monitoring and management in modern crop production, which included monitoring methods of nitrogen components, wide applicability of nitrogen estimation model, development of nitrogen monitoring apparatus, coupling of air-borne and ground-based spectral information, and integration of remote sensing and other key techniques.

Key words: crop; nitrogen nutrition; spectral remote sensing; non-destructive monitoring.

1 引 言

氮素营养是影响作物生长的最主要的限制因子之一,作物体内的含氮量约占干物质量的1%~5%,而作物每个产量因子的形成及其优劣都受其临界期的氮素供应所制约,同时作物产品的营养及经

* 国家863计划(2006AA10Z202-1)国家自然科学基金(30400278、30571092和30671215)、江苏省自然科学基金(BK2005212)、江苏省高技术项目(BG2006340)和南京农业大学青年科技创新基金(KJ06035)。
** 通讯作者 E-mail:caow@njau.edu.cn
收稿日期:2006-11-14 接受日期:2007-05-10

济品质均受到氮肥用量和运筹方式的调控(杨建昌等,1996)。另一方面,随着作物产量水平的提高,生产上的氮肥用量也持续上升,过量施氮不仅提高了生产成本,还明显降低了氮素利用率(刘立军,2003;江立庚等,2004),而且直接和间接地导致了一系列不良的环境反应(崔玉亭等,2000)。因此,氮肥的科学运筹和精确调控,不仅有助于确保作物产量和品质目标,而且还能提高氮肥利用效率、降低生产成本、减少地下水污染,从而产生巨大的社会、经济和生态效益。而利用快速、无损、准确的方法来估测作物氮素状况的是科学合理的氮肥运筹与动态调控的前提,也是精准农业研究的关键技术之一。

作物氮素诊断的传统方法基于常规室内化学定量分析及'看苗施肥"、叶色卡等定性和半定量的方法。前者以作物植株(或叶片)含氮量、叶鞘淀粉含量、茎基部硝态氮、功能叶片或叶鞘氨基氮含量以及叶片 C/N 等来判断作物是否缺氮(孙羲,1981;邹长明等,2001)。这样的方法虽然比较直观可靠,但因其破坏性的大量采样,导致费时费工、分析成本高而难以得到及时和普遍的应用。后者虽较直观快捷,但缺乏定量化诊断指标,不利于精确估算氮肥用量。近年来,基于地物光谱特性的多光谱及高光谱遥感技术获得了迅猛发展,使得实时、快速、精确、大范围、无损获取作物生长状况及植株生化组分成为可能,从而为作物氮素营养的无损监测提供了新的技术手段和方法。这是因为,作物氮素亏缺会引起叶片颜色、厚度以及形态结构等发生一系列变化,导致光谱吸收、反射和透射特性的变化,从而为基于光谱反射特征对作物氮素状况进行实时监测和快速诊断提供了理论基础。至今,广大学者围绕作物氮素营养监测的农学和光谱学机理开展了大量研究,获得了许多可喜的成果,但也面临一些亟待解决的科学问题。

本文从国内外关于作物氮素营养光谱监测的研究动态出发,结合自身研究工作实践,围绕其中的核心技术与方法、研究进展、热点问题等进行扼要评述和分析,以期为基于光谱的作物氮素无损监测研究与应用提供借鉴和参考。

2 作物氮素营养无损监测的技术原理

2.1 作物氮素特征光谱产生的机制

作物氮素营养光谱无损监测(non-destructive monitoring)是基于作物叶片或其他器官组织体内的不同氮化合物形态对不同光谱波段的特征性吸收、反射或透射规律,利用遥感传感器,在接触而不损伤作物组织结构或远离作物体的同时,获取作物的特征光谱信息,并分析处理这些信息,进而判断氮素营养匮缺程度,达到定量反演作物氮素营养状况的技术。作物氮素营养的光谱监测原理是指作物组织中的各种蛋白氮、氨基酸、叶绿体及其它氮素形态组分分子结构中的化学键在一定辐射水平(不同频率或波长)光能的照射下发生振动响应,从而引起对某些波长的光产生吸收和反射差异,形成了不同的反射、吸收和透射光谱。这些波段光谱反射率的变化对特定氮素组分量的多少异常敏感,称为氮素波段或敏感光谱。作物体内主要氮素形态所响应的波段范围集中在可见光和红外光区域,前者是电子跃迁光谱,后者是分子振动光谱,这些不同能量的光照射到不同氮素营养状况的作物上时,就产生了特征化的氮素反射和吸收光谱。作物氮素营养光谱监测的实现便是基于作物氮素组分敏感的反射光谱或吸收光谱与该组分含量或浓度的定量关系。

2.2 作物反射光谱对氮素营养的响应

在作物氮素营养无损监测中,氮素的反射特征光谱应用最为广泛。作物反射光谱曲线的显著特征是,在可见光 400~700 nm 波段,具有中等大小的反射率值,绿光 550 nm 附近是叶绿素的强反射峰,530~560 nm 波段与叶绿素和氮素密切相关,反射率相对较低;而在 600~700 nm 的红光波段区域,也因叶绿素和氮素的强烈吸收,在 650~680 nm 附近的反射率较低;在 680~760 nm 波段,反射曲线陡而接近于直线,其斜率(称为红边)与叶绿素的含量密切相关;在 1 496、2 054、2 172 和 2 352 nm 等红外波段,反射率也被认为与氮状况密切相关(牛铮等,2000;薛利红等,2003)。作物在不同氮素营养条件下或处于不同的生长发育阶段,以上特征反射光谱值均有所变化。作物氮素营养的无损监测技术就是利用这些特征光谱与氮素营养形态的响应规律,建立起作物氮素状况(氮浓度或密度)与相应的光谱反射率或其演生指数的定量估测模型,从而达到利用光谱特性无损、定量反演作物氮素状况的目的。目前,无论是基于叶片水平的个体级氮素无损监测,还是基于作物冠层水平的田块级或区域尺度的大面积作物氮素无损监测,均是基于反射光谱对组织氮素响应的原理,并为各国科学家在研究和应用工作中广泛采用。

2.3 作物光谱指数的生理意义

应用较广泛的植被指数大多由红光波段和近红外波段经线性或非线性组合而成，往往指示植物的某种状况。因为绿色植物体中叶绿素强烈吸收红光，而近红外光被植物强烈反射，这2个不同区域光组成的植被指数能较好地反应植物的覆盖度、叶面积指数、光合作用强弱（如叶绿素含量、APAR、NPP等）。总的看来，根据功能不同，光谱植被指数可分为3种类型。第1类是直接构造用于指示植物某种特定的生物变量的植被指数，以比值指数为主要特征。如比值植被指数（RVI）用于叶绿素、归一化植被指数（NDVI）用于覆盖度、绿色归一化植被指数（GNDVI）用于植物生物量（Gitelson *et al.*，1996），光合反射指数（PRI）、结构独立色素指数（SIPI）、植物衰老反射指数（PSRI）、微分比值指数等用于植物色素含量估测、光合效率评价和叶片衰老等（Gamon *et al.*，1997；Merzlyak *et al.*，1999；Penuelas *et al.*，1999；Zarco-Tejada *et al.*，2001）。第2类是为了减少目标地物（如植被）受背景（土壤、岩石、落叶落枝等）的干扰而构建的一类植被指数，以直角或混合指数为主要特征。如垂直植被指数（PVI）、差值植被指数（DVI），混合指数（SAVI）等。第3类为前面二类的综合表达，便于消除干扰背景影响，突出目标信息，从而更准确的反映植物生物变量。如以转换叶绿素吸收反射指数（TCARI）、修正叶绿素吸收反射指数（MCARI）和优化土壤调节植被指数（OSAVI）为基础构成的TCARI/OSAVI、MCARI/OSAVI等植被指数被认为可以缩小土壤背景和冠层叶面积的影响（Haboudane *et al.*，2002）。目前，光谱植被指数以其特有的生物学机理和便捷的获取方法成为了遥感监测作物生长状况的有效途径和定量指标。

3 作物氮素营养无损监测

3.1 作物反射光谱的获取

在遥感监测作物生长状况的研究与实践中，作物反射光谱是最为广泛应用的光谱类型，因而作物反射光谱的获取方法和技术是作物生长监测成功与否的重要环节。作物反射光谱的获取主要包括作物粉末、活体叶片和作物冠层等3个层次的反射光谱获取，不同层次反射光谱的获取有不同的设备、手段及应用目的。目前最常用的测量作物粉末的仪器为近红外光谱分析仪，它的波段范围一般为1 000～2 500 nm，采用漫反射扫描测定原理，主要用于获取作物体不同生化组分化学键的特征反射图谱，并通过偏最小二乘法等统计分析方法建立定量回归模型，以进行其他大量样品生化组分的快速定量测定（Ehsani *et al.*，1999）。而叶片层次的反射光谱多由地物光谱仪的光纤探头耦合光学漫反射附件（如积分球等）来测量，这样能尽可能完整的探测和接受叶片的反射光谱信息，然后提取叶片生化组分的特征光谱参数和含量（浓度），构建定量反演模型，实现叶片生化组分的无损监测。前2个层次的反射光谱多在实验室控制光源条件下进行，结果稳定可靠。作物冠层反射光谱的获取同样可由地物光谱仪在田间条件下实时获取。与此同时，随着航天航空技术的发展，许多航空机载成像光谱仪（如AIS、CASI、AVIRIS、OMIS等）和星载成像光谱仪（如MODIS、HYPERION等）的成功应用，使得大尺度作物冠层反射光谱的获取得以实现（Peterson *et al.*，1988；Wessman *et al.*，1989；Gitelson *et al.*，1996；蒲瑞良和宫鹏，1997；牛铮等，2000；Boegh *et al.*，2002；Serrano *et al.*，2002；杨敏华等，2002；Sripada *et al.*，2005）。但冠层反射光谱的获取易受太阳光条件的限制，利用地物光谱仪进行光谱测量，一般选择在晴朗无云或少云的天气进行，测量时间为10:00—14:00（太阳高度角>45°），以减少方向反射的影响。同时，每次采集目标光谱前后都应进行漫反射参考板校正，以消除辐射差异影响。同样，高光谱分辨率卫星过境时间也一般在当地时间10:00—11:00。航空航天大尺度作物遥感监测已成为现在和未来作物氮素营养信息获取的重要方向。

3.2 作物叶片氮素状况监测

作物叶片的氮素状况直接影响作物的生长及产量品质形成，快速、无损、实时的监测作物叶片特别是功能叶片的氮素状况对于作物生长监测与管理调控具有重要作用。实现作物叶片无损光谱监测的关键首先是确定叶片中各种氮素营养成分的敏感波段。为此，国内外学者围绕干叶和鲜叶的光谱特征开展了大量研究。由于鲜叶中水分是最主要的生化组分，水分的一些强吸收中心（如970、1 400、1 900 nm等）及其向两侧延展的吸收翼会掩盖其它生化组分包括氮素在这些区域的吸收特征（杨敏华等，2002），从而不利于研究叶片中含氮化合物与光谱的响应规律。因此，最初很多学者以干叶粉末作为研究对象，利用红外光谱仪（NIR Spectrometer）探测其光谱吸收或反射特征，同时通过对叶片的光谱和

对应氮素状况数据进行一些简单回归分析,采用的光谱参数形式包括反射率(R)、1/R、log(1/R)、导数光谱(K_R)等,借用决定系数(R^2)进行评价分析,提出了一些氮素敏感波段如548、648、680、1 496、2 054、2 172和2 352 nm等,并建立了一些回归模型(Kokaly & Clark,1999;Curran *et al.*,2001;Kokaly,2001)。但这些方法获得的氮素敏感波段并不稳定,得出的回归预测模型也缺乏广适性和机理性(施润和等,2005)。为了克服这些缺点,Kokaly和Clark(1999,2001)从氮素营养定量遥感反演的物理机制出发,提出了高光谱波形特征分析原理与技术(如连续统去除法和波深归一化方法),用以剔出背景因素对氮素——光谱响应规律的影响,并用7个不同地点、不同植物磨碎干叶的反射率,通过以上方法构建了较一致的、适用于多物种、精度较高的氮素含量预测方程。而Curran等(2001)通过研究进一步验证了Kokaly和Clark方法的优越性。

尽管对作物干叶或粉末的氮素组分反演取得了较好的效果,然而,鲜叶的氮素营养监测对于作物生产管理和调控显得更为重要。但鲜叶易受叶片水分、表面结构、内部结构和氮素组分分布状况的影响(Yoder & Pettigrew-Crosby,1995),这使得干叶的氮素遥感反演结果难以直接外推于鲜叶。因此,开展针对鲜活叶片氮素状况的光谱无损监测研究成为必然。基本方法是通过红外光谱仪或高光谱辐射仪获取黑板背景上鲜叶的反射光谱曲线(Grossman *et al.*,1996),采用多元逐步回归方法选择氮素敏感波段,通过决定系数(R^2)和给定置信水平下的F测验进行评价,以确立入选波段和波段组合,进而建立回归模型。其中涉及到的光谱参数包括反射率(R)、1/R、log(1/R)、[log(1/R)]′、导数光谱(K_R)以及众多的光谱植被指数(VI)等(Card *et al.*,1988;牛铮等,2000)。研究发现,作物叶片在缺氮时可见光波段反射率受影响最大,均有所增加(Thomas & Gausman,1977;Walburg *et al.*,1982),对叶片氮营养较敏感的波段集中分布在绿光波段530~560 nm区域(Blackmer *et al.*,1994),但这个区域波段易受叶绿体吸收特征的影响。部分学者研究了小麦(*Triticum aestivium*)不同叶层叶片光谱与氮素状况的关系,发现中下层叶片与近红外波段关系密切(王纪华等,2004;Wang *et al.*,2005)。而通过光谱变量运算如比值、归一化,可以监测不同的氮素状况(Munden *et al.*,1994;Blackmer *et al.*,1996)。如Tarpley等(2000)和Read等(2002)分析了棉花(*Gossypium hirsutum*)叶片氮浓度与多个光谱比值指数的关系,并根据预测的精度和准确度进行聚类分析,发现用红边位置与近红外波段的比值预测的精确度和准确度比较高。Fridgen和Varco(2004)也发现红边位置可用于估测棉花叶片的氮素状况。Lamb等(2002)发现当黑麦草(*Lolium perenne*)的叶片氮含量在2%~5%时,可被红边幅高(R_{780}-R_{670})精确估测。国内张金恒(2006)发现红光吸收区的连续统去除光谱可诊断水稻(*Oryza sativa*)氮素状况。另有人认为,植物氮素的敏感波段可能位于短波红外如2 132 nm等,而导数光谱[log(1/R)]′能消除背景因素的影响,可用于监测作物鲜叶的氮素状况(Yoder & Pettigrew-Crosby,1995)。我国学者牛铮等(2000)的研究结果也显示,用1 120和2 120 nm处反射率一阶导数的线性回归模型可以预测鲜叶氮含量,实测值和预测值的相关程度在80%以上,这是因为2 100 nm左右为蛋白质的吸收波段,而叶片中的氮素大多以蛋白氮的形态存在,所以2 100 nm左右也是氮素的一个敏感波段。由此可见,鲜叶氮素敏感波段主要由不同氮素组分如叶绿素、蛋白质等决定,其建模方法主要是通过经验性的统计分析方法。而目前在作物叶片氮素监测方面,往往笼统的分析全氮与光谱的关系,因而不同学者提出的氮素敏感波段出现多样性特征,监测模型的普适性也待提高。

根据作物叶片光谱无损监测原理和模型,可以研制开发作物叶片氮素营养监测的仪器。其中典型代表是日本研发的SPAD-502型叶绿素计。它是一种接触式、非破坏性主动式遥感监测仪器,能发射650和940 nm 2个波段的光信号,650 nm波段的红光是叶绿体的特征吸收波长,940 nm波段的红外光为参考波段,主要起消除叶片内部结构等对测量结果的影响。SPAD-502的光源来自于自身的2个发光二级管,而接收到经叶片吸收衰减后透射出的光能量,进而通过光电转换、放大和微处理器转换后,直接显示叶绿素或氮素状况的相对值,从而达到无损快速监测叶片氮素状况的目的。虽然通过SPAD-502进行作物叶片氮素诊断及指导施肥,取得了较好的效果,但在实际应用中易受作物品种、生育期、叶位、环境等因素的影响。因此,要基于SPAD-502来精确估测植株氮素营养水平,还需建立校正曲线或改进计算方法(Peng *et al.*,1993)。可见,SPAD-

502的应用研究仍需深入开展,同时更需设计和开发其它准确度高、广适性强、经济实用的氮素营养无损监测仪器。

3.3 作物冠层氮素状况监测

相对作物叶片的氮素营养无损监测研究而言,作物冠层氮素状况的无损监测研究更能满足田块和区域尺度的规模化作物氮素营养信息获取和作物生产调控应用的需求。作物冠层反射光谱受土壤背景、传感器姿态和信噪比、大气吸收、冠层结构等因素的影响,通常导致作物冠层氮素状况监测的敏感波段与特征光谱参数的提取和预测模型的建立更为复杂。至今的研究工作主要集中在冠层叶片或冠层植株水平的氮含量(浓度)和积累量(单位面积上质量,即密度)监测上。

研究发现,冠层叶片氮素敏感波段也集中在绿光波段(550 ± 20) nm(Walburg *et al.*,1982;Shibayama & Akiyama,1986;Blackmer *et al.*,1996)。Thomas 和 Oerther(1972)利用绿(550 nm)和红(670 nm)2个波段定量估算了甜椒冠层叶片的氮含量。Fernandez 等(1994)也发现用红(660 nm)和绿(545 nm)2波段的线性组合可以预估小麦的氮含量,不受氮肥处理的影响。Yoder 和 Pettigrew-Crosby(1995)通过比较槭树单叶和冠层叶片氮浓度及叶绿素浓度与光谱特征的关系,发现同时适用于叶片和冠层的氮素敏感波段主要集中在绿光和远红光波段区域,而红外波段只有2 132 nm这一波段,此波段为逐步回归入选波段。这表明绿光波段和远红光波段是同时适用于叶片和冠层2个水平的氮素营养监测波段。同时,红光至远红光中的红边参数也被证明对叶片氮素有较好的预测作用,并用作建模光谱参数。如孙莉等(2005)发现红边积分面积与棉花冠层叶片全氮含量相关显著。Jongschaap 和 Booij(2004)发现红边位置(λ_{rep})可用于预测马铃薯冠层叶片氮含量(以叶片面积和重量为基础),但必须以氮消光系数来修正(K_N 取0.7最佳)。Xue 等(2004)发现绿光波段(560 nm)为水稻群体叶片氮素敏感波段,它与冠层叶片含氮量呈两段线性函数关系,以孕穗期为分界点,孕穗前显著正相关,孕穗后显著负相关,不受施氮水平及生育时期的影响。比值植被指数 R(810,560)与叶片含氮量也呈两段线性函数关系,但未发现包含有560 nm的光谱参数可以建立适用于水稻全生育期的监测模型。红边位置 λ_{rep} 和归一化植被指数 NDVI (1220,710)可反演不同蛋白质类型小麦品种冠层叶片氮浓度,不受品种、生育期的影响(李映雪等,2006a),而 NDVI (1220,710)也可用于粳稻拔节后叶片氮浓度监测。

作物群体光谱特征与氮(或叶绿素)密度的相关性要优于其与氮(或叶绿素)浓度的相关(Pinar,1996;吴长山等,2000),因此利用群体或冠层尺度的遥感数据进行作物氮密度的监测可能会更成功。国内外学者发现微分光谱可较好的监测水稻、玉米等作物的叶绿素密度(刘伟东等,2000;吴长山等,2000;王秀珍等,2002)。Shibayama 和 Akiyama (1986)在水稻上的研究发现氮密度与 R_{620} 和 R_{760} 的线性组合以及与 R_{400}、R_{620} 和 R_{880} 的线性组合均有较好的回归关系,不受品种类型的影响。Jongschaap 和 Booij(2004)也发现,红边位置(λrep)可用于预测马铃薯冠层叶片氮密度,且不需氮消光系数(K_N)的修正。李映雪等(2006b)研究发现,高光谱比值指数 RVI[Average(760,810,870,950,1100),660],即760、810、870、950 和 1 100 nm 等5个波段反射率的平均值与660 nm波段反射率的比值与叶片氮密度高度线性相关,且二者的关系不受品种、生育期的影响,以高光谱参数 RVI[Average(760,810,870,950,1100),660]与小麦叶片氮密度可建立适用于整个小麦生长季节的监测模型。对水稻的研究也发现,叶片氮密度与比值植被指数 R(810,560)及归一化植被指数 NDVI(1100,560)在整个生育期内都呈极显著线性正相关,而且不受施氮水平及品种的影响,模拟值与实测值的相关程度在90%以上,从而克服了水稻氮浓度监测模型不能适用于封行前的缺点(Xue *et al.*,2004)。

冠层叶片氮素状况的监测研究相对集中和深入,作物植株氮素状况的光谱无损监测却往往被忽视。但研究作物植株氮素状况与冠层特征光谱的关系有助于理解光谱学与生物物理学机理。Stone 等(1996)提出了基于红光671 nm和近红外光780 nm 2个波段反射率组合而成的植株-氮-光谱指数(plant-N-spectral-index)来估算小麦植株的全氮浓度。Read 等(2002)发现蓝紫光(410 ± 5) nm与红光(700 ± 10) nm的比值能较好的预测棉花植株氮状况。Osborne 等(2002)研究发现,玉米植株氮浓度能被红光和绿光区的光谱反射率估测。作者所在课题组的研究显示,与叶片相比较,小麦植株氮素状况指标与冠层多光谱和高光谱反射率的相关性均较低,这可能是因为小麦冠层各器官(叶、茎、鞘、穗)

的氮浓度对整个植株氮浓度的贡献率与各器官对冠层反射光谱的贡献率不一致,而小麦冠层反射光谱受叶片特性影响较大。并且在不同品质类型小麦品种之间,植株氮浓度和氮密度的敏感光谱指数存在差异,这说明对不同氮素状况的农学表达可能有不同的敏感光谱植被指数。比值植被指数 RVI(1220,660)和差值植被指数 DVI(1500,680)可以对中、高蛋白质类型小麦品种的植株氮浓度和氮密度进行定量反演,但对氮密度的反演精度较低,而 780 ~ 850 nm 冠层高光谱反射率的一阶导数值与植株氮浓度和氮密度都具有较好的相关关系。这些研究表明,作物植株的氮素敏感波段同叶片的基本一致,主要集中在绿光、红光和远红光(或近红外)波段。但植株氮素状况的特征光谱参数和精确监测模型还需进一步深入研究。

基于作物冠层叶片光谱监测与诊断原理,美国 NTech 公式研发了 GreenSeeker 系列光谱仪,其中 GreenSeeker Hand Held Unit 型光谱仪是一种非接触、主动式无损监测仪。它采用红光(657nm)和红外光(772 nm)2 个波段的光源。其红光波段 657 nm 与 SPAD-502 的红光波段 650 nm 相似,红外光为参考波段。GreenSeeker Hand Held Unit 自身装载这 2 个波长的光源,不需自然光作为光源,仪器发射出的光经过叶片吸收并反射回来为接收器接收,从而利用反射光谱特征来监测氮素或叶绿素状况。另外,该仪器能在动态移动过程中记录田间不同区域的作物光谱信息,从而实现了作物冠层氮素状况的大面积适时无损动态监测。基于类似的工作原理,国内一些单位也在研制便携式作物冠层光谱监测仪器,以为作物氮素指标监测与生长诊断提供可靠、廉价的硬件支撑。

3.4 作物氮素状况的空间遥感监测

空间遥感技术的迅猛发展,特别是高光谱分辨率成像光谱仪的发射和应用,以及高光谱图像解译和处理技术的发展,使得从空间尺度监测作物氮素状况成为可能。目前应用较多的是航空机载高光谱成像光谱仪,而星载高光谱传感器较少,且还未见在作物氮素监测中的应用报道。有关航空平台遥感监测叶片氮含量的研究已经取得了可喜进展。部分学者运用航空成像光谱仪(AIS)对森林冠层中氮含量等生化组分进行了监测(Wessman *et al.*,1989;Sripada *et al.*,2005)。浦瑞良和宫鹏(1997)运用多元统计和光谱导数技术成功评价了小型机载成像光谱仪(CASI)数据用于估计森林冠层全氮浓度等生化组分的潜力和效率,其中用于估测全氮浓度的波段为绿光 566 nm 和远红光 764、780 nm 波段。Boegh 等(2002)利用航空成像仪(CASI)对包含冬小麦、冬大麦等 8 种作物的冠层植株氮浓度(重量浓度)的研究发现,绿光和远红光波段均与植株氮浓度呈极显著线性相关,红边位置(REIP)与植株氮浓度呈显著线性相关。CASI 的第 4 波段(绿光)可用于作物氮浓度的航空遥感作图,未发现有光谱植被指数与植株氮浓度相关,但 NDVI 与植株氮含量有密切关系。Serrano 等(2002)利用 AVIRIS 数据,通过多元逐步回归和光谱植被指数方法,监测了地中海地区灌木植株冠层的氮浓度,利用多元逐步回归方法入选的波段有蓝光 480 nm 和近红外 1 609 和 1 748 nm 等波段,并提出了归一化氮指数(NDNI = [log($1/R_{1510}$) − log($1/R_{1680}$)]/[log($1/R_{1510}$) + log($1/R_{1680}$)])用于估测灌木植株的氮素状况。Sripada 等(2005)利用航空彩色近红外(CIR)图像数据研究了玉米后期氮肥需求,发现处理田块与高施肥量对照田块的绿色差值植被指数的比值(RGDVI)可以决定玉米后期最适追氮量。国内杨敏华等(2002)发现由模块化航空成像仪(OMIS)图像得到的高斯红边宽度与小麦冠层叶片氮浓度有显著的线性关系。由此可见,利用航片进行作物氮素监测的应用实例较多,但存在费用昂贵,监测区域小等缺点,而航天卫星图像受光谱和空间分辨率限制,在作物氮素监测方面的应用报道甚少,还有赖于多通道高光谱分辨率卫星传感器的发射利用和高光谱图像处理技术的突破发展。

4 作物氮素营养无损监测技术的发展方向

4.1 氮素生化组分的监测方法

以往的作物氮素监测多笼统地进行全氮或叶绿素的研究,但作物体内氮素存在的形式多种多样,包括各种蛋白氮、氨基酸、叶绿体及其他含氮化合物。如核酮糖二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)占叶片氮含量的 30% ~50%,是叶绿体中含量最多的蛋白质(Grossman *et al.*,1996),因而经常导致氮素与叶绿素的敏感波段的混淆、光谱与叶绿素的关系代替其与氮素状况的关系等偏差。随着高光谱遥感技术的蓬勃发展,精细定量研究作物氮素组分光谱特征得以实现。因此,在进行作物氮素监测时,有必要区分不同氮素组分形态,可分为蛋白氮、氨基酸、硝态氮、

色素蛋白以及与氮素代谢相关的碳/氮比等几类,分别确定它们的敏感波段,真正体现不同氮素组分化学键或官能团与特征波段光能的响应互作关系。许多学者已在鲜叶、干叶粉末这2个层次研究了氮素组分特别是叶绿素和蛋白质的敏感波段及其反演模型,但还缺乏在活体叶片和冠层水平对其它氮素组分光谱特征进行深入分析。因此,今后对作物氮素生化组分的特征光谱提取和建模方法研究尤显突出。

4.2 氮素监测模型的普适性

对于作物的氮素监测,国内外大量研究表明,在鲜叶提取液、粉末建立普适性的监测模型是可能的,这在可见和近红外光谱定量分析(VI-NIR)中已成功应用。但在鲜叶和冠层水平,因为受叶片和冠层结构、水分、背景等多种因素的影响,筛选的波段很可能不是直接的氮组分化学键的响应波段,而是不同氮素营养引起的叶片(冠层)结构变化,或者是利用不同的统计方法进行分析时所获得的误选波段,这些波段和在此基础上建立的反演模型往往不稳定,难以用于建模样本以外的情况。因此,作物氮素监测的一个重要内容就是在鲜叶和冠层叶片水平上提取敏感特征光谱,并在定量建模方法与技术上寻找突破。围绕氮素敏感波段,尽量压缩或消除其他组分(如水分、叶片表面和内部结构、冠层结构及背景)光谱对氮素光谱的影响,这样所得敏感波段和监测诊断模型将具有较好的通用性和广适性。如许多研究在光谱学处理方法上进行了探索,认为比值植被指数(RVI)、调节土壤植被指数(SAVI),不同植被指数的结合(颜春燕等,2005),或微分光谱、波谱带深归一化、连续统去除法和波深归一化等波形分析处理方法可消除土壤背景的影响(Huete,1988;Demetriades-shah *et al.*,1990;张良培等1997;Kokaly & Clark,1999),从而提高氮素状况监测的效果。另外,要加强作物氮素监测的建模方法研究,目前应用较广泛的方法有多元回归法及光谱的波长位置分析等方法,这些方法研究较多,应用广泛,但机理性弱,模型稳定性差;而包含化学组分(特别是氮素组分)含量的叶片散射和吸收辐射模型的方法,涉及叶片结构、辐射在叶片内的传输等复杂问题,机理性强,但准确性低。因此有必要结合辐射传输的机理和化学组分特性,综合利用各种建模方法和手段,以利于建立机理性强而又方便可靠的光谱监测预测模型。此外,在氮素组分监测建模中,还要分别充分考虑氮素组分的农学表示方法,如含量(浓度)、积累量(密度)等,确定各自的敏感光谱植被指数,这将更有利于提高作物氮素监测的机理性和准确性,同时满足作物生长诊断和调控的需求。

4.3 作物氮素监测仪的开发

便携式、智能化作物氮素营养监测与诊断仪系列产品的研发是目前作物氮素管理由定性向定量发展的迫切需求。快捷、实时、准确的作物氮素营养监测与诊断仪器是作物氮肥科学管理及运筹调控的必要手段,也是目前数字农作研究和应用的关键设备之一。传统的氮肥施用主要是凭经验或叶色的粗略估计来确定用量,结果往往导致过量或欠缺施肥,而有了智能化作物氮素营养监测与诊断仪就可以做到作物氮素状况的精确诊断和氮肥用量的按需投入。目前,国内外部分学者已初步研发了一些相关硬件设备(王秀等,2004;赵春江等,2004),但仍不能满足作物生产实践的应用需求。今后,作物氮素营养监测与诊断仪应在以下几个方面继续加强研究和开发。首先,从硬件角度看,传感器应从被动式向主动式转变,以克服自然光的限制,扩大使用时间范围;同时应实现叶片水平向冠层水平转变、定点测量向移动测量转变、点测量向面测量并能成像作图转变。另外,从软件角度看,应研究集传感器、光谱监测模型、管理决策模型于一体的智能化、数字化作物氮素营养监测与诊断仪。这些产品不仅能实时监测作物植株的氮素营养状况,而且还能判断作物生长好坏,同时还可根据产量目标,进行氮肥的实时动态调控,推荐精确施氮方案。

4.4 地空遥感信息的融合

利用光谱遥感技术进行作物氮素营养状况的监测研究一般可在3个水平上进行,即室内或室外叶片水平(分粉末、干鲜叶等)、地面群体冠层水平和机(星)载航空(天)传感器区域尺度水平。以往的研究主要围绕某一个层面展开,而缺乏2个或多个层面的结合研究。基于不同水平层次的作物监测研究各有其特点和作用。叶片水平的监测研究具有显著的机理性特点,如在控制光辐射条件下对干叶粉末样的研究,可消除光辐射变化、水分、叶片结构等因素的影响,最能反映作物生化组分与特征光谱的机理关系。基于地面遥感平台的群体冠层水平研究,受环境(如大气效应等)影响较小,且随着多波段、高光谱分辨率地物高光谱仪的应用,使得作物冠层氮素营养的监测更加深入。而基于航空航天平台

的作物监测研究经常受大气干扰、传感器本身的性能(如空间、光谱分辨率等)的限制、飞行参数等因素的影响,同时图像解译和特征信息提取过程复杂,因此基于航空航天平台的作物氮素监测还不深入。以往室内外叶片层次和地面遥感监测作物氮素营养的研究结果,一般难以应用到大尺度下的作物生产系统。而近来随着机(星)载中(高)分辨率成像光谱仪的开发和应用,高空大尺度范围的作物氮素营养监测成为可能。但由于不同尺度水平上影响光谱特征的因素不同,因此,有必要加强不同平台和水平上监测理论与技术的交叉融合,实现优势互补。特别是在氮素敏感波段的选用、建模方法的研究方面,做到多平台、多信息源的有机融合,地空遥感信息的相互对接和集成,从而有助于作物氮素营养监测理论和技术取得新的突破。

4.5 遥感与其他技术的集成

遥感(RS)作为一项高新技术,与地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS)已成功结合并在很多领域得到应用,但作物生长参数的遥感监测技术与作物系统模型的集成研究和应用还有待进一步加强。光谱遥感技术具有快速、准确、适时和大范围获取农学参数的特点,它与具有模拟预测或管理决策功能的农业模型相结合,可以实现各种不同的复合功能。首先,遥感监测技术可与具有动态预测性的作物生长模拟模型相结合。区域多点的遥感监测参数可作为生长模型的输入变量,从而解决区域尺度生长模型输入参数获取难的问题;同时,遥感监测数据与生长模型的模拟结果可以相互检验和校正,如果遥感监测模型准确可靠,则有利于进行生长模型的修正完善。反之,如果生长模型的模拟结果准确可靠,则有利于加强遥感监测模型的过程性和机理性解析。其次,遥感监测技术可与作物管理知识模型(或专家系统)相结合。利用遥感监测的实时状态信息和管理知识模型(或专家系统)的适宜生长曲线(或专家曲线),可在作物管理过程中实现区域多点的苗情监测和诊断,再通过动态管理模型便可实现肥料运筹的精确调控,从而更好地实现全程作物生产管理的信息化和精确化。

5 结 语

基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术无论是在光谱学还是在生物物理学方面都具有很强的理论基础,它是现阶段作物氮素营养精确诊断和动态调控所迫切需要解决的关键技术,也是数字农业和现代农业的重要研究前沿。围绕这些理论基础和作物生产应用需求,国内外开展了广泛深入的研究工作,取得了喜人的进展和成果。但还存在许多亟待解决或加强的技术领域,在氮素营养监测手段、建模方法创新、软硬件产品开发及与其它技术结合方面尤显突出。因此,有必要围绕作物氮素营养指标的实时监测技术进行深入系统的研究探索,尽快建立基于地面和空间立体遥感平台的作物氮素营养综合监测系统与产品,大力推进作物生长监测与诊断、农作管理与调控、生产力预测预报的精确化和数字化。

参考文献

崔玉亭,程 序,韩纯儒,等. 2000. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究. 生态学报,**20**(4):659-662.

江立庚,曹卫星,甘秀芹,等. 2004. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响. 中国农业科学,**37**(4):490-496.

李映雪,朱 艳,田永超,等. 2006a. 小麦叶片氮含量与冠层反射光谱指数的定量关系. 作物学报,**32**(3):358-362.

李映雪,朱 艳,田永超,等. 2006b. 小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系. 作物学报,**32**(2):203-209.

刘立军,桑大志,刘翠莲,等. 2003. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学,**36**(12):1456-1461.

刘伟东,项月琴,郑兰芬,等. 2000. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析. 遥感学报,**4**(4):279-283.

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

蒲瑞良,宫 鹏. 1997. 森林生物化学与 CASI 高光谱分辨率遥感数据的相关分析. 遥感学报,**1**(2):115-123.

施润和,牛 铮,庄大方. 2005. 叶片生化组分浓度对单叶光谱影响研究——以 2100 nm 吸收特征的碳氮比反演为例. 遥感学报,**9**(1):1-7.

孙 莉,陈 曦,包安明,等. 2005. 在水分胁迫下棉花冠层叶片全氮含量的高光谱遥感估算模型研究. 遥感技术与应用,**20**(3):315-320.

孙 羲. 1981. 水稻氮素营养及其诊断. 浙江农业大学学报,**7**(2):41-50.

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

王 秀,赵春江,周汉昌,等. 2004. 冬小麦生长便携式 NDVI 测量仪的研制与试验. 农业工程学报,**20**(4):95-98.

王秀珍,黄敬峰,李云梅,等. 2002. 高光谱数据与水稻农学参数之间的相关分析. 浙江大学学报(农业与生命科学版),**28**(3):283-288.

吴长山，项月琴，郑兰芬，等. 2000. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究. 遥感学报，4(3)：228-232.

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

颜春燕，牛 铮，王纪华，等. 2005. 光谱指数用于叶绿素含量提取的评价及一种改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型. 遥感学报，9(6)：742-750.

杨建昌，王志琴，朱庆森. 1996. 不同土壤水分下氮素营养对水稻产量的影响及其机理研究. 中国农业科学，29(4)：58-66.

杨敏华，刘良云，刘团结，等. 2002. 小麦冠层理化参量的高光谱遥感反演试验研究. 测绘学报，31(4)：316-321.

张金恒. 2006. 基于连续统去除法的水稻氮素营养光谱诊断. 植物生态学报，30(1)：78-82.

张良培，郑兰芬，童庆禧. 1997. 利用高光谱数据对生物变量进行估计. 遥感学报，1(2)：110-113.

赵春江，刘良云，周汉昌，等. 2004. 归一化差异植被指数仪的研制与应用. 光学技术，30(3)：324-329.

邹长明，秦道珠，高菊生，等. 2001. 水稻氮肥施用技术. Ⅱ. 看苗施用氮肥的叶片诊断指标. 湖南农业大学学报(自然科学版)，27(1)：29-31.

Blackmer TM, James SS, Gary E. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected short-wave radiation from irrigated corn canopies. *Agronomy Journal*, **88**: 1-5.

Blackmer TM, Schepers JS, Varvel GE. 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*, **86**: 934-938.

Boegh E, Soegaard H, Broge N, *et al*. 2002. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, **81**: 179-193.

Card DH, Peterson DL, Matson PA. 1988. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, **26**: 123-247.

Curran PJ, Dungan JL, Peterson DL. 2001. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sensing of Environment*, **76**: 349-359.

Demetriades-shah TH, Steven MD, Clark JA. 1990. High resolution derivative spectral in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, **33**: 55-64.

Ehsani MR, Upadhyaya SK, Slaughter D, *et al*. 1999. A NIR technique for rapid determination of soil mineral nitrogen. *Precision Agriculture*, **1**: 217-234.

Fernandez S, Vidal D, Simon E, *et al*. 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. astral under water and nitrogen stress. *International Journal of Remote Sensing*, **15**(9): 1867-1884.

Fridgen JL, Varco JJ. 2004. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. *Agronomy Journal*, **96**(1): 63-69.

Gamon JA, Serrano L, Surfus JS. 1997. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, **112**: 492-501.

Gitelson AA, Kaufman YJ, Merzlyak MN. 1996. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **58**: 289-298.

Grossman YL, Ustin SL, Jacquemoud S. 1996. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, **56**: 182-193.

Haboudane D, Miller JR, Tremblay N, *et al*. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, **81**: 416-426.

Huete AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25**: 295-309.

Jongschaap REE, Booij R. 2004. Spectral measurements at different spatial scales in potato: Relating leaf, plant and canopy nitrogen status. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **5**: 205-218.

Kokaly RF, Clark RN. 1999. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote Sensing of Environment*, **67**: 267-287.

Kokaly RF. 2001. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration. *Remote Sensing of Environment*, **75**: 153-161.

Lamb DW, Steyn-Ross M, Schaare P, *et al*. 2002. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: Theoretical modeling and experimental observations. *International Journal of Remote Sensing*, **23**(18): 3619-3648.

Merzlyak MN, Gitelson AA, Chivkunova OB, *et al*. 1999. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, **106**: 135-141.

Munden R, Curran PJ, Catt JA. 1994. The Relationship between the red edge and chlorophyll concentration in the broadbalk winter wheat experiment at rothamsted. *International Journal of Remote Sensing*, **15**: 705-709.

Osborne SL, Schepers JS, Francis DD, *et al*. 2002. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy Journal*, **94**(6): 1215-1221.

Peng SB, Garcia FV, Laza RC. 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimation of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*, **85**: 987-990.

Penuelas J, Baret F, Fillella I. 1999. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, **31**: 221-230.

Peterson DL, Aber JD, Matson PA, *et al*. 1988. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical content. *Remote*

Sensing of Environment, **24**: 85-108.

Pinar A. 1996. Grass chlorophyll and the reflectance red edge. *International Journal of Remote Sensing*, **17**(2): 351-357.

Read JJ, Tarpley L, Mckinion JM, *et al*. 2002. Narrow-waveband reflectance ratios for remote estimation of nitrogen status in cotton. *Journal of Environmental Quality*, **31**(5): 1442-1452.

Serrano L, Penuelas J, Ustin SL. 2002. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation for AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sensing of Environment*, **81**: 355-364.

Shibayama M, Akiyama T. 1986. A spectroradiometer for field use. Ⅶ. radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies. *Japanese Journal of Crop Science*, **55**(4): 439-445.

Sripada RP, Heiniger RW, White JG, *et al*. 2005. Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, **97**: 1443-1451.

Stone ML, Solie JB, Raun WR, *et al*. 1996. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Transaction of the ASAE*, **39**(5): 1623-1631.

Tarpley L, Reddy KR, Gretchen FSC. 2000. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Science*, **40**: 1814-1819.

Thomas JR, Gausman HW. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. *Agronomy Journal*, **69**: 799-802.

Thomas JR, Oerther GF. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. *Agronomy Journal*, **64**: 11-13.

Walburg G, Bauer M, Daughtry CST. 1982. Effect of nitrogen nutrition on growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies. *Agronomy Journal*, **74**: 677-683.

Wang ZJ, Wang JH, Liu LY, *et al*. 2005. Estimation of nitrogen status in middle and bottom layers of winter wheat canopy by using ground-measured canopy reflectance. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **36**(17/18): 2289-2302.

Wessman CA, Aber JD, Peterson DL. 1989. An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry. *International Journal of Remote Sensing*, **10**: 1293-1316.

Xue LH, Cao WX, Luo WH, *et al*. 2004. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agronomy Journal*, **96**(1): 135-142.

Yoder BJ, Pettigrew-Crosby RE. 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations form reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, **53**: 199-211.

Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Noland TL, *et al*. 2001. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**(7): 1491-1507.

作者简介 田永超，男，1975 年生，讲师，博士研究生。主要从事作物生长监测研究，发表论文 20 余篇。E-mail：yctian@njau.edu.cn

责任编辑 李凤芹