

# 遥感技术在精确施肥管理中的应用进展

薛利红<sup>1</sup>, 杨林章<sup>1</sup>, 李刚华<sup>2</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 南京农业大学农学院, 南京 210095)

**摘要:** 该文介绍了精确施肥的概念及其理论技术体系, 重点阐述了遥感技术在作物和土壤信息采集中的应用进展及当前几种基于遥感技术的氮肥推荐算法, 探讨了今后精确施肥发展的研究方向, 并结合中国国情对我国发展精确施肥作了有益的探索。

**关键词:** 遥感; 作物; 土壤; 氮素; 精确施肥

**中图分类号:** S127

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2004)05-0022-05

## 0 引言

肥料是作物的粮食, 尤其是氮肥, 不仅可以提高作物产量, 还能改善作物产品品质。因此, 近年肥料施用量不断增加, 中国的肥料投入从1980年到2000年的20年间增加了183.1%。过多的施用肥料不仅造成地下水 and 地表水的污染, 还增加了农业产品中有毒物质的残留, 并对农业可持续发展带来很大的危害。随着环境问题日益受到重视, 如何在保证作物高产优质的同时防止或尽量减少作物生产带来的环境污染是各国政府、农学家及生产者所必须解决的问题。为此, 发达国家于20世纪80年代中期提出了精确农作(precision farming)的概念。而精确施肥管理是精确农作的重要内容之一, 不仅能保证作物产量和品质, 而且能提高肥料利用效率, 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。国内外学者在此方面已进行了不少的探索研究, 但迄今为止, 精确施肥的概念还比较模糊, 理论技术体系还不甚完善。为此, 本文简单概括了精确施肥的概念及其包含的技术理论体系, 并重点阐述了其关键技术——遥感技术在精确施肥管理中的研究进展及今后精确施肥的研究发展方向, 并结合中国国情对中国发展精确施肥做了有意义的探索。

## 1 精确施肥的概念及其理论技术体系

### 1.1 精确施肥的概念

精确施肥的前身是定位养分管理(site specific nutrient management, SSNM)。所谓定位, 就是强调田间不同地点之间的差异性, 克服肥料使用的不合理性。SSNM就是在田间不同地点根据土壤等条件的差异实行有区别的管理。最早SSNM指的是按土区别氮肥管理系统(Soil-specific nitrogen management), 只是针对不同的土壤条件实行区别管理, 随着农业科学技术进步, 逐渐向系统工程研究方面发展, 不仅针对土壤, 还包

括作物、水文、微气候等条件的时空变化, 在作业管理中实行“按需投入”的原则, 变均匀投入为变量投入, 优化作业操作。因此, 精确施肥亦即变量施肥, 就是因土、因作物、因时全面平衡施肥; 以不同空间单元的产量数据与其他多层数据(土壤理化性质、病虫害害、气候等)的综合分析为依据, 以作物生长模型、作物营养专家系统为支持, 以高产、优质、环保为目的, 优化组合了信息技术(RS、GIS、GPS)、生物技术、机械技术和化工技术的变量处方施肥理论和技术。

### 1.2 精确施肥的理论技术体系

精确施肥的目的就是要识别并量化田间存在的差异, 理解这些差异可能造成的影响及造成这些差异的原因, 并对这些差异进行适时管理, 从而增加盈利, 减少环境污染。因此精确施肥的技术理论体系主要包括以下4个方面<sup>[1]</sup>:

1) 土壤数据和作物营养实时数据的采集。这是精确施肥实施的关键, 是确定基肥、追肥施用量的基础。传统的数据收集方法主要是通过田间破坏性取样——实验室化学分析来获取, 不仅耗费大量的人力物力财力, 且时效性较差。遥感技术的发展, 为土壤数据和作物营养实时数据的采集提供了一个非破坏性、快捷实用的新途径。

2) 差分全球定位系统(DGPS)。全球定位系统为精确施肥提供了基本条件。无论是田间作物和土壤信息的实时采集, 还是肥料的精确施放, 都以农田空间定位为基础。

3) 决策分析系统。决策分析系统是精确施肥的核心, 直接影响精确施肥的技术实践成果。决策分析系统包括地理信息系统(GIS)和模型专家系统二部分。GIS用于描述农田空间属性的差异性; 作物生长模型和作物营养专家系统用于描述作物的生长过程及养分需求, 并根据不同的施肥策略判断施肥量的多少。目前的施肥策略大致可以分为两类, 一是前摄策略(Proactive strategies), 即在生长季之前就已制定好了施肥处方图。整块田被划分为若干个较小的管理亚区, 针对这些单独的管理亚区实施前摄氮肥管理策略。然后根据每个管理亚区的前季作物产量数据或播前土壤网格取样分析结果, 在生长季之前就生成氮肥变量处方图, 具体施肥时间和次

收稿日期: 2004-02-09 修订日期: 2004-04-20

基金项目: 国家十五重大科技专项资助项目(2002AA601012); 中科院知识创新工程资助项目(KZCX2-413)

作者简介: 薛利红(1977-), 女, 河南修武人, 博士, 主要从事农业信息技术方面的研究。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008

通讯作者: 杨林章, 南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008。E-mail: lzyang@issas.ac.cn

数和常规施肥相同。二是反应策略(Reactive strategies),即在生长季内实时生成施肥处方图。其主要是根据生长季内作物的实际氮素水平或土壤信息来调整施氮量。常常采用植株或冠层反射光谱或叶绿素仪(SPAD)读数或土壤传感器信息来指示氮素是否缺乏。施肥处方图是根据作物的氮胁迫程度而生成。

4) 控制施肥。控制施肥是精确施肥的最终实现,需要通过一定的工程装备技术来实现。根据施肥策略的不同而有两种形式,一是处方信息控制施肥。根据决策分析后的电子地图提供的处方施肥信息,对田块中肥料的撒施量进行定位调控。二是实时控制施肥。根据监测土壤的实时传感器信息,或根据实时监测的作物光谱信息或叶片 SPAD 值分析调节施氮量。

## 2 遥感技术在精确施肥中的应用进展

### 2.1 在作物营养诊断中的研究进展

各种植物胁迫如缺氮、干旱等都会使作物叶片的光反射特性发生改变,通过检测植物冠层光学反射特性可以了解作物的营养状况,影响叶片中对光吸收和光反射的主要物质是叶绿素、蛋白质、水分和含碳化合物,其中影响最大的是叶绿素含量。遥感技术就是通过检测作物冠层的光反射和吸收性质来检测作物营养状况,特别是氮素营养状况。研究表明叶片 SPAD 值和叶片叶绿素/氮含量显著线性相关,它可以用叶绿素计(SPAD)快速、非破坏性地测定田间作物的氮素营养状况并指导施肥。但叶片 SPAD 值除了受氮素营养状况影响外,还受作物生长阶段、叶位、测量部位、测量时间以及测量时的光照等影响<sup>[2]</sup>。Zebarth 等的研究表明叶片 SPAD 值在探测哪些田块不需要追肥(当叶片 SPAD 值超过某一临界值时)时比较有用<sup>[3]</sup>。

除了叶绿素仪外,在国内外广泛应用的是田间便携式光谱仪,包括宽波段光谱仪(带宽为 50~100 nm)如早期的 RS-II 型 4 波段野外光谱仪(波段同 TM)、短波段光谱仪(带宽 10 nm 左右)如美国 Crop scan 公司生产的 MSR-8 型和 MSR-16 型光谱仪、高光谱仪(带宽 2 nm 左右)如 FieldSpec 系列便携式光谱仪、LI-1800、GER 1500 等等。这些光谱仪可以方便地检测作物的冠层反射光谱,被广泛地用来监测作物的长势、氮素营养状况,并取得了很大的进展。这些研究大多采用经验性的统计模型方法来获取作物的氮素营养指标与光谱反射率或其衍生量的定量关系,从而推断作物的氮素营养状况。如直接利用原始的光谱反射率,通过逐步多元回归技术或部分最小平方回归技术(PLS)获取统计模型<sup>[4,5]</sup>;或通过数学方法对不同波长的光谱反射率进行线性或非线性组合,从而构造出具有一定指示意义的光谱植被指数如归一化植被指数、比值植被指数等等<sup>[6,7]</sup>;或是从光谱曲线形状入手,通过微分计算获取红边、绿峰等各种参数,再和作物氮素营养指标进行回归拟合等<sup>[8-10]</sup>。其中宽波段和多波段光谱仪的监测表明,近红外波段(800 nm 左右)、红光波段(680 nm 左右)和绿光

波段(560 nm 左右)之间组合生成的植被指数被证明可以可靠地用来监测作物(水稻、玉米、小麦、棉花、高粱、甜菜等)体内氮素状况<sup>[6,7,11-15]</sup>。高光谱遥感中除了这些指数外,红边参数法、带宽归一化分析法等也认为是反演植物氮素状况的一个有效方法<sup>[8-10,16,17]</sup>。

此外,随着遥感技术的进一步发展,航空成像光谱仪(AIS)、航空可见光/近红外成像光谱仪(AVIRIS)、小型机载成像光谱仪(CASD)等高分辨率的航空图像和卫星图像也逐渐用来大面积监测作物的氮素营养状况<sup>[18-20]</sup>。作物冠层反射和土壤背景辐射在红外胶片上为不同的辐射显影,照片经计算机处理后,每个像素的色度变化都可以表示出作物反射光线的情况,而作物反射光线特性的变化正是作物营养变化,特别是氮营养状况发生变化的结果。这样分析作物冠层照片就可以准确的分析作物的氮营养状况。

除了氮素营养诊断外,遥感技术在其他营养元素(磷素、钾素及某些微量元素)诊断方面也有了一些研究。Milton 等发现缺磷的大豆在绿光波段和黄波段反射率较高,但并不出现红移现象<sup>[21]</sup>。Osborne 等在玉米上研究表明,用近红外波段和蓝波段能探测玉米的早期磷缺乏<sup>[22]</sup>。随着钾营养水平的提高,叶片在可见光波段光谱反射率降低,而在近红外波段光谱反射却有所提高<sup>[23]</sup>。马超飞等对微量元素在植物光谱中的响应机理进行了研究<sup>[24]</sup>。植物 Fe、S、Mg 和 Mn 的缺乏降低了叶绿素含量,降低了叶片对太阳辐射能的吸收,增加了叶片入射光的反射率与透射率。营养元素的缺乏都会导致短波段的“红边位移”现象,如玉米缺 Fe、Mg、Mn,大麦、小麦缺 Fe 和 S,“红边位移”都大于 17 nm,大麦、小麦缺 Mn 时“红移”只有 3~4 nm,但红边位移大小未见与叶片 Fe、S、Mg 和 Mn 含量有相关性<sup>[25]</sup>。要准确及时地探测到作物磷钾及微量元素的缺乏,有待于进一步研究。

### 2.2 在土壤肥力诊断中的进展

土壤在作物生长期间大多数被覆盖,只有在播种前和生长前期裸露比例较高。因此,关于用遥感技术来直接探测田间土壤肥力的研究相对较少,大部分是围绕风干碾碎土样的光谱特性与土壤参数之间的关系开展研究的。研究表明,对裸土反射率影响最大的两个因子是土壤有机质(有机碳)和土壤水分。有机质含量或水分含量高的土壤拥有较低的反射率<sup>[26]</sup>。此外,土壤质地粒子大小等都会影响光谱特性,因此,由风干碾碎土样光谱特征得出的结果不能直接用来实时评价田间土壤特性。为了获取能直接实时评价田间土壤特性的光谱仪,李民赞等开展了一系列研究,发现土壤特性可以用田间原始状态土壤的光谱特性来进行检测,其中可见光波段的一阶微分光谱与土壤水分、有机质含量、电导率及 pH 值是线性相关,而与土壤硝态氮含量则呈多元指数模型关系<sup>[27,28]</sup>。Chen 等研制了一套用遥感彩色图像上得出的反射率来预测土壤有机碳的算法,实测值与预测值的相关性高达 0.98<sup>[29]</sup>。假定氮矿化量及可提供给作物的土

壤有效氮和土壤有机质成比例的话,那么就可以通过遥感数据估测土壤有机质,从而获取变量施肥处方图。但又有研究表明,土壤有机质水平较低时( $< 1.5\%$ ),其它土壤因素掩盖了土壤有机质对土壤反射率的影响<sup>[30,31]</sup>。此外,土壤有机质水平一定时,土壤的有效氮可能因土壤水分、pH 值、溶解态有机碳量的不同而不同。因此,要获取可适用于多种土壤类型和土壤湿度的通用预测方程还有待于进一步研究。

### 2.3 精确施肥算法

用遥感技术来指导施肥,可以节约用肥量( $32\sim 57\text{ kg N/hm}^2$ ),提高利用率,减少对环境造成的污染并增加农民收益<sup>[32,33]</sup>。以前大多数研究都是基于实际作物的光谱植被指数或叶片 SPAD 值与充足施肥区的比值来判断是否需要施肥(临界值为 0.95)<sup>[34]</sup>,但施肥量的确定还需进一步建立模型算法进行计算。目前比较成熟的变量施肥算法主要有以下几种:

1) 美国俄克拉荷马州立大学 Lukina 等的氮肥优化算法<sup>[35]</sup>(N fertilization optimization algorithm, NFOA),主要根据田间作物的归一化植被指数(NDVI)来预测潜在产量和当时作物的氮吸收,根据产量与籽粒氮含量的相关关系预测最终的籽粒氮吸收量,从而根据籽粒氮吸收量与植株氮吸收的差值来预测施氮量。美国俄克拉荷马州立大学与 N Tech 公司合作,于 2002 年推出了商标为“Greenseeker”的光传感实时变量施肥机。这种施肥机采用无损测试技术,通过光传感器实时获取小麦冠层反射光谱的面状信息,并相应计算出每平方米的潜在产量、施氮量,可由变量施肥装置直接在田间实施。

2) 英国国家土壤资源所的 Wood 等人在英国小麦高产栽培经验的基础上,用冠层大小(绿色面积指数 GAI 或群体密度 P)来指示变量施肥<sup>[36,37]</sup>。若当前作物冠层大小(GAI)大于标准值,则施肥量低于标准用量;若当前作物冠层大小(GAI)小于标准值,则施肥量高于标准用量。其中增减肥料的用量等于单位 GAI 需要的氮量与 GAI 增减值的乘积。

3) 密苏里州立大学的 Scarf 及其同事建立的基于航空照片的玉米追肥决策算法<sup>[38]</sup>。该算法主要是根据未施肥区玉米的绿色值与充足施肥区玉米绿色值的比值来计算的。两者颜色差异越大,追肥也越多。随后的大田试验研究证明该算法和实际的最佳氮用量十分吻合<sup>[39]</sup>。但是该算法必须在以下条件都满足时才适用:播前不施肥,必须从照片上除去土壤像素,必须用相对于充足施肥区的绿色比值。因此,在实际上推广应用还受到一定的限制。

### 3 今后的研究方向与目标

由于作物、土壤和环境等各方面的影响,使田间作物生长存在着很大的差异,因此对养分的需求也不尽一致。精确施肥则充分考虑了田间存在的差异,实行按需投入,减少了盲目施肥带来的各种不利影响。遥感技术

作为精确施肥体系中获取田间数据的重要信息源,具有信息丰富、信息周期短、实时性和动态性强等优势,是了解田间差异并采取相应措施的最好工具之一。综观前人研究结果,以下几个方面还需进行深入研究:

1) 资源的时间、空间异质分布及量化。众多研究结果表明,田间作物的长势、土壤特性(肥力、水分含量、有机质含量、质地)等存在着较大的时空变异<sup>[40,41]</sup>,因此如何了解这些时空差异的分布并量化这些差异,是精确施肥体系的基础。这就要求充分发挥遥感的优点,结合其它先进的技术(如 GPS、GIS 等),快速准确地探测出田间信息的时空变异。

2) 数据分析处理和解释技术等。如何对遥感获取的大量田间信息进行分析处理,从而提取出最终有用的东西,是遥感技术成功地应用于精确施肥的关键。特别是卫星、航空遥感图像的解译、大气校准等方法,有待于进一步提高完善。

3) 能直接检测农作物和土壤状况的遥感技术。尽管目前这方面的研究已经不少,但是由于所用遥感数据来源的不统一以及作物生长的时空差异等一系列原因,造成研究结果不尽一致,甚至有相悖的结果产生。因此,要切实加强环境胁迫作用下的遥感机理和遥感标志研究,遥感与 GIS 的集成对作物胁迫作用的诊断理论以及作物生长环境和收获产量实际分布的空间差异性机理和环境胁迫作用与产量形成的遥感定量关系等方面的研究,从而建立一整套可用于不同遥感数据来源、不同作物、不同环境条件下的农作物和土壤遥感诊断技术。

4) 开发可获取田间(农作物和土壤)实时信息的传感设备。实时、便捷、可靠的作物和土壤营养传感器是进行科学的作物肥料管理所必需的,也是精确施肥的关键设备之一。南京土壤所等在这方面已经做了一些研究工作,已研制出了可根据土壤湿度调节控制灌溉的开关式土壤水分传感器。

5) 关于遥感技术探测氮缺乏的研究已经比较成熟,但要真正用于指导实践,还需一个成熟可靠的氮肥决策算法及相应的施肥管理系统。尽管目前已经有了一些基于遥感技术的氮肥用量算法,但这些算法具有一定的地区性,在其他地区的表现还有待于进一步验证和完善。因此,通用的氮肥决策算法的研究将是近几年精确施肥研究的热点和重点。

6) 开发一种性能可靠、经济实用的田间实时施肥机器。精确施肥研究的最终目的就是实时评价田间差异并采取措施,从而提高肥料利用率,减少对环境的污染,实现农业的可持续发展。这就需要一个集传感器、遥感诊断模型、作物肥料管理专家系统或决策支持系统、GPS、变量投入装置于一体的田间实时施肥机。因此要求农学、土壤学、遥感学、光学、机械等不同学科领域的专家协同合作,群策群力。可喜的是美国已率先推出了商标为“Greenseeker”的光传感实时变量施肥机,可适用于小麦、玉米、棉花等旱地作物,但其必须要求有一至

少为 300 英尺长的充足施肥条区为对照, 因此具有一定的局限性。

#### 4 对中国发展精确施肥的思考

中国的化肥投入突出问题是结构不合理(氮肥比例偏高), 肥料利用率低, 不仅使生产成本偏高, 而且是环境污染特别是水体富营养化的直接原因之一。众所周知的太湖、滇池的富营养化, 其中来自肥料面源污染负荷占很大一部分比重。随着人们环境意识的加强和农产品由数量型向质量型的转变, 精确施肥将是提高土壤环境质量, 减少水和土壤污染, 提高作物产量和质量的有效途径。

精确农业是为适应集约化、规模化程度高的作物生产系统可持续发展而提出的, 其边际效应与经营规模成正相关, 据报道, 以小麦施肥为例, 适用于精确农作技术实践的经济可行的最小面积约为  $85.6 \text{ hm}^2$ 。而我国农田经营规模小, 农业机械化水平低, 实施广域的精确施肥技术实践尚需较长的发展过程。随着农村市场化和产业结构的调整, 在垦区农场和大面积作物生产平原区建立“精确施肥”技术示范工程, 或联合一些高效益企业来带动“精确施肥”的发展是结合中国国情发展精确施肥的有效途径。目前可根据具体情况, 适当推广以叶绿素计或叶色卡等为指导的半精确施肥法, 或根据土壤基本地力(往年的产量水平)划分管理区进行针对施肥的较粗放氮肥管理方法。

#### [参 考 文 献]

- [1] 北京农业信息技术研究中心 精确施肥[ED/OL]. <http://www.digital-agri.org.cn/jingzhunshifai.htm>.
- [2] Shaobing Peng, Garcia F V, Laza R C, et al. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimation of rice leaf nitrogen concentration[J]. *Agron J*, 1993, 85: 987- 990.
- [3] Zebarth B J, Younie M, Paul J W, et al. Evaluation of leaf chlorophyll index for making fertilizer nitrogen recommendations for silage corn in a high fertility environment. *Commun J*. *Soil Sci Plant Anal*, 2002, 33 (5&6): 665- 684.
- [4] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. *Remote Sens Environ*, 1989, 30: 271- 278.
- [5] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. *Remote Sens Environ*, 2003, 86: 542- 553.
- [6] Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis[J]. *Crop Sci*, 1995, 35: 1400- 1405.
- [7] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测[J]. *中国农业科学*, 2003, 36 (7): 807 - 812.
- [8] Filella I. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. *Int J Remote Sens*, 1994, 15 (7): 1459- 1470.
- [9] 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35 (8): 980- 987.
- [10] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 王人潮. 水稻微分光谱和植被指数的作用探讨[J]. *农业工程学报*, 2003, 19 (1): 145- 150.
- [11] Tracy M, Blackmer, James S S, Gary Ev, et al. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies[J]. *Agron J*, 1996, 88: 1- 5.
- [12] Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. *Agron J*, 2004, 96: 135- 142.
- [13] Bronson K F, Chua T T, Booker J D, et al. In-season nitrogen status in irrigated cotton: II. Leaf nitrogen and biomass[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67: 1439- 1448.
- [14] Franz W, Michael B, Mahmoud K, et al. The crop as indicator for sidedress nitrogen demand in sugar beet production-limitations and perspectives[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2002, 165, 93- 99.
- [15] Jensen A, Lorenzen B, Spelling-Ostergaard H, et al. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of barley grown at different N levels[J]. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 1809- 1820.
- [16] Kokaly R F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration[J]. *Remote Sens Environ*, 2001 (75): 153- 161.
- [17] Curran P J, Dungan J L, Peterson D L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry, testing the Kokaly and Clark methodologies[J]. *Remote Sens Environ*, 2001, 76: 349- 359.
- [18] Serrano I, Penuelas J, Ustin S L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals[J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 81: 355- 364.
- [19] Boegh E, Soegaard H, Broge N, et al. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthesis efficiency in agriculture[J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 81: 179- 193.
- [20] Wesman C A, Aber J D, Peterson D L, et al. Remote sensing of canopy chemistry and nitrogen cycling in temperate forest ecosystem[J]. *Nature*, 1988, 335, 154- 156.
- [21] Milton N M, Eiswerth B A, Ager C M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. *Remote Sens Environ*, 1991, 36: 121- 127.
- [22] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, et al. Specific wavelengths of spectral radiance measurements for detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn[J]. *Agron J*, 2002, 94: 1215- 1221.
- [23] 王柯, 沈掌泉, Abou-Ismaïl, 等. 不同钾素营养水平的水稻冠层和叶片光谱特征研究初报[J]. *科技通报*, 1997, 13 (4): 211- 214.
- [24] 马超飞, 马建文, 韩秀珍. 微量元素在植物光谱中的响应

- 机理研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(5): 334- 339
- [25] Masoni, A lessandro, Laura E, et al Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese[J]. Agron J, 1996, 88: 937- 943
- [26] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al Reflectance technique for predicting soil organic matter[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 1282- 1285
- [27] Li Minzan Evaluating soil parameters with visible spectroscopy[J]. Transaction of the CSAE (农业工程学报), 2003, 19(5): 36- 41
- [28] Li Minzan, Sasao A, Shibusawa S, et al Soil parameters estimation with NIR spectroscopy[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(3): 111- 120
- [29] Chen F, Kissel D E, West L T, et al Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 746- 753
- [30] Baumgardner M F, Kristof S, Johannsen C J, et al Effects of organic matter on the multispectral properties of soils[J]. Proc Indiana Acad Sci, 1970, 7: 413- 422
- [31] 黄应丰, 刘腾辉 土壤光谱反射特性与土壤属性的关系——以南方主要土壤为例[J]. 土壤通报, 1989, 20(4): 158- 160
- [32] Stone M L, Solie J B, Ann W R, et al Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat[J]. Transactions of the ASA E, 1996, 39: 1623- 1631
- [33] Han S F, He Yong Remote sensing of crop nitrogen needs and variable-rate nitrogen application technology [J]. Transactions of the CSAE (农业工程学报), 2002, 18(5): 28- 33
- [34] Denuit J P, Olivier M, Goffaux M J, et al Management of N fertilization of winter wheat and potato crops using the chlorophyll meter for crop N status assessment[J]. Agronomie, 2002, 22: 847- 853
- [35] Lukina E V, Freeman K W, Wynn K J, et al Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake[J]. J Plant Nutr, 2001, 24(6): 885- 898
- [36] Wood G A, Welsh J P, Godwin R J, et al Real-time measures of canopy size as a basis for spatially varying nitrogen applications to winter wheat sown at different seed rates[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(4): 513 - 531
- [37] Welsh J P, Wood G A, Godwin R J, et al Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, part II: wheat[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(4): 495- 511
- [38] Scharf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress N need [J]. Agron J, 2002, 94: 397- 404
- [39] Scharf P C, Schmidt J P, Kitchen N R, et al Remote sensing for nitrogen management[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 57(6): 518- 523
- [40] 胡克林, 李保国, 林启美, 等 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33- 38
- [41] 张淑娟, 何勇, 方慧 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39 - 44

## Application progress of remote sensing in precision fertilization management

Xue Lihong<sup>1</sup>, Yang Linzhang<sup>1</sup>, Li Ganghua<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008, China;

2 Agronomy College, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** The conception of precision fertilization and its theory system were first introduced in this paper, and then emphasis was put on the research progress of crop and soil information collecting and several nitrogen recommendation algorithms based on the remote sensing technology. The challenge and future development trends of precision fertilization were also discussed and the perspective of precision fertilization in China was further explored.

**Key words:** remote sensing; crop; soil; nitrogen; precision fertilization