

陈魏涛, 曹宏鑫, 张保军, 等. 氮素营养诊断技术及其在油菜上的应用研究进展[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 953-960.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.038

氮素营养诊断技术及其在油菜上的应用研究进展

陈魏涛^{1,2}, 曹宏鑫², 张保军¹, 张文宇², 张伟欣², 冯春焕^{2,3}, 刘芳亮¹, 宋楚威^{2,3}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所/数字农业工程技术研究中心, 江苏 南京 210014; 3. 南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 根据油菜氮素营养诊断的发展脉络, 从外观诊断、化学诊断、无损诊断技术 3 方面综述了氮素营养诊断技术若干方法及其在油菜上的应用, 对各种方法的应用原理、优缺点、国内外发展现状进行了阐述, 重点论述了氮素无损诊断技术的发展状况及其在油菜生产上的应用前景。

关键词: 油菜; 氮素养分; 诊断技术

中图分类号: S565.4.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)04-0953-08

Research progresses in nitrogen diagnosis technology and its application in rapeseed

CHEN Wei-tao^{1,2}, CAO Hong-xin², ZHANG Bao-jun¹, ZHANG Wen-yu², ZHANG Wei-xin²,
FENG Chun-huan^{2,3}, LIU Fang-liang¹, SONG Chu-wei^{2,3}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Based on the development of nitrogen diagnosis technology in rapeseed, some methods of nitrogen diagnosis technology and its application in rapeseed were reviewed in three aspects of appearance diagnosis, chemical diagnosis, and nondestructive measurement (monitoring). The principles, advantages and disadvantages, and domestic and international development situation of each method were analyzed. The developments of non-destructive measurements and their application prospect in rapeseed were discussed emphatically.

Key words: rapessed; nitrogen nutrition; diagnosis technology; research progress

中国是世界上最大的油菜生产国和菜籽油消费

国, 种植面积和产量均占世界的 1/3 左右。油菜是需氮量大的作物, 氮素对油菜的生长发育尤为重要, 植株体内全氮含量约为干质量的 0.3%~5.0%^[1], 对油菜的生长发育、产量品质形成有显著影响。氮素不仅参与叶绿素组成, 同时也是油菜体内蛋白质、核酸、辅酶等重要物质的组成元素^[2-3]。在生产过程中, 油菜缺氮时地上和地下器官生长都会受到抑制, 造成植株矮小, 果实和种子小而不充实, 产量和品质下降; 相反增施氮肥可以提高作物产量和品质, 但施用氮肥过多时会造成植株贪青生长, 对作物品

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171455、31201127、31471415); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(14)2114]; 江苏省农业科学院基本科研业务专项[ZX(15)2008;4001]

作者简介: 陈魏涛(1987-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向为作物生理生态与信息农业。(E-mail) 1303079141@qq.com

通讯作者: 曹宏鑫, (E-mail) caohongxin@hotmail.com; 张保军, (E-mail) zhbjun2566@163.com

质也会造成不良影响。为了追求高产,氮肥的施用量逐年增加,而氮肥利用率在逐渐下降,氮肥的不科学施用导致很多氮素不被植物直接利用,常以淋失、反硝化脱氮及氮素挥发等方式损失^[4-5],损失的氮素大部分进入地下水和地表水,使地下水和地表水中硝态氮含量不断增加,造成一系列生态问题,威胁人类健康^[6-7]。因此,对油菜生长过程中氮素养分状况进行诊断并据此指导施肥管理,对提高氮肥利用率,促进作物生长,提高作物产量,改善品质,减少环境污染,具有重要经济及生态意义。

由于诊断结果的精确性取决于所采用的诊断方法,因此,诊断方法选择特别重要。传统氮素诊断方法研究始于 19 世纪,直到上世纪 50 年代,氮素诊断在症状诊断和化学诊断方面取得较大发展,并奠定了一定理论和方法基础^[8]。在随后 60 多年发展中,氮素诊断在应用范围、对象、内容、方法等方面均取得突出进步,特别是近年来无损诊断技术,因其快速、无损、精确的优点,越来越成为人们的研究热点,有些诊断技术成果已应用于小麦、玉米、水稻及棉花生产中。

本文旨在根据前人研究结果,从油菜氮素养分诊断的传统方法,油菜氮素养分的现代无损测定诊断技术以及氮素营养诊断技术在油菜上应用三个方面进行归纳、分类与总结,并重点介绍基于光谱的油菜氮素养分无损快速诊断技术的研究进展,以更好地指导油菜施肥管理。

1 油菜氮素养分诊断的传统方法

1.1 油菜植株外观诊断

1.1.1 症状诊断 症状诊断是指根据植株表现出的某种特定症状,从而确定其可能缺乏某种元素。症状诊断在很多营养元素的诊断上已得到广泛应用。当油菜植株缺氮时,植株体内蛋白质的合成受到阻碍,各种酶的合成受到了影响,光合作用变弱,植株分支减少,叶片变小,单株角果数、每果粒数和粒质量下降,花和果实稀少,植株提前成熟,严重影响品质和产量,抗旱、抗害能力下降^[9];氮素过多造成植株徒长,田间阴蔽、茎秆的木质化程度低、茎秆细软,节间长,易倒伏,贪青晚熟,易遭受病虫害。症状诊断方法在油菜植株缺少 1 种营养元素时较易判断,当植株出现 2 种或 2 种以上营养元素缺乏症状时会产生混淆,可能造成误诊,而且当植株出现营养

元素缺乏症状时,表明这种营养元素缺乏已经很严重,再采取补救措施可能已滞后^[10-11]。因此,症状诊断存在一定延时性,在实际应用中具有局限性,在生产中指导意义并不大。

1.1.2 植株长势诊断 20 世纪 60 年代,依据作物长势诊断植株不同生育时期生长发育状况的方法在中国受到广泛重视,这种方法是在总结农民丰产经验的基础上发展起来的,后来经杨邦杰等^[12]发展,促进了作物长势理论进一步完善,即根据植株长势长相可诊断作物不同生育时期的氮素养分丰缺状况^[13]。油菜缺氮时新叶生长缓慢,植株生长柔而弱,株型松散,角果数少而小,开花时间短^[14],该方法能在一定程度上判断植株氮素养分状况,但由于中国油菜产业经过 3 次革命性飞跃^[15],油菜品种不断更新换代,其植株长势也在不断变化,造成该诊断方法在生产上应用有一定局限性。

1.1.3 植株叶色诊断 很多大田作物在缺氮时,植株叶色会表现出肉眼可见的症状,中国农民在这面积累了丰富经验。300 多年前的《沈氏农书》上就有通过水稻叶色诊断追施孕穗肥的记载。上世纪 50 年代陈永康总结了水稻群体叶色“三黄三黑”变化,提出“肥田黄透再施,瘦田见黄即施,一般田不黄不施”水稻施肥管理措施^[7]。油菜缺氮时叶色变淡呈黄绿色,茎下部叶缘发红,出现淡红色叶脉,严重时叶缘呈枯焦状,部分扩大而使叶片脱落^[9,14]。由于叶色诊断方法缺乏叶色深浅对比标准,在生产中难以推广应用。直至上世纪 70、80 年代,日本和中国的农业研究人员,先后研制出叶色票和叶色卡^[16-17],建立了叶色等级评定标准,据此判断植株氮素丰缺状况。叶色诊断总体上是氮素养分诊断中简单、快捷的方法。但是不能准确分析到叶片颜色变化是由于氮素变化引起的还是由其他因素引起的^[18]。叶色诊断还受品种、植株密度以及土壤营养状况、人为主观判断等因素影响,制约了其在生产上的应用。由于叶色诊断不能对植株氮素营养状况定量化,在大田施肥管理中不能实现施肥精量化。

1.2 油菜氮素养分化学诊断

作物体内氮素养分状况是土壤氮素养分供应、作物对氮素养分需求和作物对氮素养分吸收能力的综合反映。利用化学分析手段,测定不同植株器官含氮量,找到不同植株器官氮素营养临界含氮量^[19]。通过与临界含氮量相比较判断植株器官含

氮量丰缺程度。根据判定结果,制定相应施肥决策,这种方法已在美、德、英、法等成功应用^[20]。根据氮素在植株体内存在的状态,植株化学诊断主要有植株全氮诊断、硝酸盐快速诊断、土壤诊断等。

1.2.1 植株全氮诊断 在作物化学诊断分析中,植株全氮诊断的研究最早,研究得最充分。经过科研人员多年研究,大多数作物不同生育期和不同部位器官临界氮含量已基本清楚。植株全氮含量能很好地反映作物氮素营养状况^[21],在一定范围内,作物产量与植株全氮含量呈现正相关^[22],是一个很好的诊断指标。植物全氮诊断方法主要有凯氏定氮法、靛蓝比色法、半微量凯氏法、氢氟酸修正凯氏法、高锰酸钾-还原性铁修正凯氏法。前2种方法相比较,靛蓝比色法比凯氏消煮法快捷,但所测结果差异并不显著^[23]。由于植株全氮分析操作繁琐,工作量大,只能在实验室进行,在推广应用中有一定难度。

1.2.2 植株硝酸盐快速诊断 硝态氮是以储备状态存于植物体内的非代谢物质,是进入植株体内的主要氮形式,当植株轻微缺氮时,硝态氮库先于全氮库发生明显变化。当作物氮素供过于求时,硝态氮比全氮有较大幅度增加。在植物组织中硝态氮含量的相对变化远大于全氮,能更灵敏和简便地反映作物对氮素的需求,因此,可用硝态氮代替全氮作为估计植株氮素营养状况的诊断指标,在作物生长早期可较准确地确定氮素供应状况并对作物生产进行施肥管理指导^[24]。目前,此法已经应用于棉花^[25]、冬小麦^[26]、玉米^[27]等,硝酸盐快速诊断主要有二苯胺法和反射仪法。李银水等^[28]通过反射仪法测定油菜植株硝酸盐含量,认为植株硝酸盐含量与油菜产量之间的关系表现为在一定范围内产量随硝酸盐含量的增加而增加,植株硝酸盐含量能在一定程度上体现油菜氮素营养状况。刘代平等^[29]研究结果表明在施氮与不施氮时,不同油菜品种茎叶硝酸盐累积量与油菜氮效率密切相关。韩德昌等^[30]也报道了油菜硝酸盐累积量有随施氮量增加而增加的趋势。朱飞飞等^[31]研究结果表明在供氮量充足条件下,油菜苗期叶柄硝态氮含量在一定程度上能反应收获期产量与生物量的变化。吕世华等^[32]研究了二苯胺法和反射仪法在油菜氮营养快速诊断中的应用,并提出油菜氮营养诊断最佳部位为叶柄基部组织,苗期和苔期均是油菜氮营养诊断的最佳时期。二苯胺法和反射仪法均可以快速、准确地诊断油菜

氮素营养状况,但二苯胺法适用于含氮水平较低植株,反射仪法费用较高,其应用受到一定限制。

1.2.3 土壤化学诊断 土壤诊断是通过测定土壤氮素含量,分析其丰缺程度,间接反映油菜的氮素营养状况。目前比较常用的方法是 Nmin(土壤无机氮测试)方法,在施底肥前取土样(采样深度依作物可吸收的深度而定(如 0~30 cm、0~60 cm、0~90 cm),分析土壤无机氮(硝态氮+铵态氮)含量^[20],根据作物需氮量=目标产量需氮量-初始土壤含氮量(Nmin 方法测得),确定施氮量^[33]。考虑到作物生长期氮的矿化作用,Dobermann 等^[33]和 Cissé 等^[34]对 Nmin 方法进行改进,建立了“KNS”系统。中国在 80 年代对 Nmin 方法在小麦、玉米氮肥推荐上进行过一些研究,认为小麦测量 0~80 cm 土层无机氮含量,玉米测量 0~100 cm 土层无机氮含量可以取得很好效果^[20,35],土壤无机氮不足部分,应追施氮肥补充。陈新平等^[36]近年来基于大量田间试验,建立了利用土壤无机氮测试技术进行冬小麦氮肥推荐的方法。连楚楚等^[37]通过分析油菜地高、中、低肥区当季吸收氮占土壤总有效氮的百分比以及对氮素化肥的依存率,提出了促进油菜大面积平衡增产关键措施。姜丽娜等^[38]通过分析浙江省油菜多点试验数据,建立了氮肥效应、经济施氮量与土壤有机质、土壤全氮之间的函数模型,完善了浙江省油菜测土施氮指标体系,为油菜高产和高效生产提供营养保障。目前,在油菜生产过程中,根据土壤氮素供应情况,确定氮肥施用,实现了产量提高与氮肥节约,但由于土壤氮素测定过程中,操作费时,测定繁琐,需时较长,不便于大范围推广。

2 油菜氮素养分的现代无损测定诊断技术

无损测定技术(Non-destructive measurement)是指在不破坏植物组织结构的基础上,利用各种手段对作物生长、营养状况进行监测。这种方法可迅速、准确地监测田间作物氮素营养状况,并能及时提供追肥所需信息。目前,主要通过叶绿素仪分析、数字图像以及光谱氮素诊断等现代无损诊断技术对作物生长过程中的氮素营养进行诊断。

2.1 叶绿素仪分析技术

叶片含氮量和叶绿素含量密切相关且变化趋势相似,因此,可通过测定叶绿素含量监测植物氮素状

况。日本 MINOLTA 公司于 20 世纪 80 年代利用对叶绿素较敏感波段 550 nm 和 675 nm 附近的反射率比值,设计和制造了叶绿素仪 (Chlorophyllmeter)^[39-40],进行田间作物氮素诊断及施肥推荐,目前较常用的叶绿素仪型号为 SPAD-502。大量研究结果表明,许多作物的叶绿素仪读数 and 植株全氮含量或叶片全氮含量之间有很好的相关性^[41-42]。裘正军等^[43]研究结果表明施氮量不同油菜在不同生育时期叶片的 SPAD 值变化规律不同,SPAD 值与施肥量之间存在较高相关性,并推荐在蕾苔期与开花期的过度期进行田间油菜长势监测和氮肥管理。朱哲燕等^[44]对油菜叶片叶绿素与氮含量关系进行了分析,建立了油菜叶片 SPAD 值和氮含量之间关系的数学模型,并对模型进行检验分析,其精确度达到显著水平。周晓冬等^[45]研究甘蓝型油菜开花期叶片 SPAD 值,叶绿素含量与氮素含量相互关系后认为,油菜开花期 SPAD 值与叶绿素含量及含氮量之间呈显著或极显著线性正相关,并建立相应数学模型,说明可用 SPAD 值间接表示作物叶绿素含量和氮含量。李银水^[28]通过对油菜三种氮素营养诊断方法的适宜性比较,发现叶片 SPAD 值可很好地反映油菜苗期氮素营养状况,叶片 SPAD 值与油菜产量和氮肥用量间相关性较好,可以作为油菜氮素营养快速诊断方法。叶绿素仪体积小,质量轻,测定方法简单,但由于其测得的作物氮含量是从测试样本的有限点得到的,对于整块田间而言,氮含量测定结果只能作为粗略估算。为了精确估测作物氮素营养水平,还需建立校正曲线或改进计算方法,并与实验室植物营养分析技术相配合,确定氮素营养诊断的临界叶色值,但这样就失去了叶绿素仪快速、简便和不损伤植株的特点,运用叶绿素仪诊断作物氮素营养就失去了其原来的优势,但在特定条件下依然可用于油菜氮素营养快速诊断,如室内盆栽试验。

2.2 数字图像诊断技术

油菜在不同营养状况下表现不同的茎叶颜色和形态,是表征作物长势的重要信息,植株对绿光波段的反射特性随植株含氮量变化而变化,叶片对红光和蓝光吸收最多,对绿光吸收最少,用数码相机或扫描仪采集叶片数字图像可反映叶片对可见光的吸收和反射情况。综合运用数字图像处理、模式识别、景物分析和图像理解等技术对获取

的作物叶片数字图像分析处理,从图像中获取与作物氮营养相关的有效特征信息,这些特征信息能反映人眼难以识别的颜色差异,使利用作物叶色进行氮营养诊断成为可能。张元等^[46]利用多光谱视觉技术获取油菜叶片图像颜色特征并预测叶片氮含量,结果表明用 G/R-G/B 建立的回归模型能较准确地预测油菜叶片氮含量。张晓东等^[47]利用不同生育时期油菜氮素的图像特征,建立了基于多光谱组合图像特征的油菜氮素预测模型,实现了对不同生育时期油菜氮素的定量估算。冯雷等^[48]用 CCD 多光谱成像技术提取油菜叶面图像特征信息,建立了图像灰度和反射率关系的经验线性标定模型,分析得到的油菜植被指数与叶绿素仪数值有很好的相关性,进而估测油菜作物氮素营养。袁道军等^[49]在大田条件下利用数码相机构建计算机视觉系统,对油菜叶片图像进行获取、分割,通过逐步回归分析,建立油菜全氮含量最优回归模型,达到极显著水平。张筱蕾等^[50]利用高光谱成像技术获取油菜生育期叶片高光谱图像数据,建立叶片光谱特征与叶片氮含量的定量关系模型,通过模型预测每个像素点对应的氮含量预测值,绘制出油菜在 3 个不同生长期的叶片氮素分布图,通过比较同一叶片或不同叶片氮素水平的差异性快速确定油菜营养状况,优化施肥管理措施。因此,计算机数字图像处理技术可获取一些人类视觉上无法获取的信息,可避免传统方法由于人识别差异及视觉疲劳带来的影响,在节约劳动力、降低人的主观性判断方面有很大潜力,可代替外观诊断。

2.3 光谱氮素诊断技术

当作物缺氮时会引起叶片颜色、厚度以及形态结构等发生一系列变化,随之引起光谱的吸收、反射和透射特性变化^[51],通过植物光谱反射特性变化实时监测和快速诊断植物的氮素营养状况成为可能^[52]。20 世纪 70 年代以来,国内外相关科学家就植物氮素光谱诊断进行了大量研究,首先寻找了氮素敏感波段及其反射率在不同氮素水平下的表现。研究结果表明许多植物在缺氮时无论是叶片还是植物冠层水平的可见光波段反射率都有所增加^[53-55],对氮素含量变化最敏感的波段在 530~560 nm 区域^[56-57]。张晓东等^[58]研究结果表明油菜在 390~430 nm、540~570 nm 区间有较明显反射峰,反射率

与氮含量呈负相关,在 700 nm 附近红边位置,光谱反射率与植株全氮含量有较高的相关性。王渊等^[59]研究认为油菜叶片和冠层光谱在不同氮素水平下有不同反射率特征,这种差别在可见光和近红外波段最为明显,呈现不同反射峰(550 nm)和吸收谷(1 000 nm)。王福民等^[52]研究 4 个品种在不同供氮水平下油菜冠层光谱变化规律,在近红外处随着供氮水平的提高,光谱反射率明显升高,而在可见光波段处,随供氮水平提高,反射率反而降低。张雪红等^[60]研究了油菜冠层反射光谱对不同施氮水平的响应特征表现,认为随着施氮水平提高,在可见光区域反射率增大,而在近红外区域则呈相反变化趋势。通过光谱测定及其变量的运算分析,可区分不同氮素营养水平。

明确了植株的氮素敏感波段后,许多研究人员通过光谱反射率或其衍生关系,建立估算作物氮素含量模型。Shibuyama 等^[56]研究结果表明,R620 和 R760 的线性组合以及 R400、R620 和 R880 的线性组合与单位土地面积水稻叶片氮含量均有较好回归关系。Thomas 等^[53]认为利用 550 nm 和 660 nm 这 2 个波段建立的线性组合能定量估算甜椒氮素含量,精度达 90%。Fernandez 等^[54]也报道用红(660 nm)和绿(545 nm)2 波段的线性组合可预估小麦氮含量,不受氮肥处理的影响。Tarpley 等^[61]分析了棉花叶片氮含量与 190 个光谱比值指数的关系,并根据预测精确度和准确度进行聚类分析,结果表明,用红边位置与短波近红外波段比值预测的精确度较高。中国学者在植物含氮量与光谱反射率或其演生量关系方面也做了很多研究。薛利红等^[62]研究结果表明,与冬小麦叶片含氮量关系最佳的指数为红波段(660 nm)和蓝波段(460 nm)的组合,与叶片氮积累量关系最佳的光谱指数为中红外波段(1 220 nm)与红光波段(660 nm)的组合。刘宏斌等^[63]进一步利用红光波段和近红外波段植被指数(RVI)反映冬小麦氮营养水平。朱艳等^[64]发现 RVI(870,660)和 RVI(810,660)是水稻和小麦叶片氮积累量相关性均较好的共性光谱参数。李立平等^[65]认为 NDVI 和 Red/NIR 可预测小麦地上部氮素积累量。王磊等^[66]研究结果表明宽波段光谱比值指数($R_{\text{NIR/Red}}$)、与归一化植被指数 $[R_{(\text{NIR-Red})}/(\text{NIR+Red})]$ 与不同叶片氮素含量的相关关系随生育期有明显的变化规律。王渊等^[59]认为油菜反射光谱 5 波段(401

nm、451 nm、549 nm、1 321 nm 和 2 245 nm)的一阶微分是预测油菜氮含量的理想指标,用短波红外光波段能较好预测氮含量。这些研究结果表明植物含氮量与光谱反射率或其演生指数存在定量关系,可以利用光谱对植株进行氮素诊断。

随着遥感技术迅速发展,高光谱遥感以其超多波段(几十、上百个)、光谱分辨高(3~20 nm)等特点,可探测植被的精细光谱信息(特别是植被各种生化组分的吸收光谱信息),反演各组分含量,监测植被生长状况。张雪红等^[60]研究结果表明油菜高光谱一阶导数随施氮水平的提高,向长波方向移动“双峰”现象则愈显著,不同供氮水平下红边面积与红边幅值几乎在所有的生育期呈现出随着供氮水平提高而增大的趋势。牛铮等^[67]的研究结果也表明,用 2 120 nm 和 1 120 nm 处反射率一阶导数的线性回归方程可预测鲜叶氮含量,实测值和预测值相关程度在 80% 以上。

通过植株含氮量和光谱反射率或其演生指数的关系建立模型可用来估算作物氮含量,对作物田间施肥管理进行指导,提高氮肥利用率。这方面已有大量研究,有些成果已经成功应用于生产。20 世纪 90 年代,美国俄克拉荷马州大学开发的一种地面主动遥感高光谱仪器——GreenSeeker 光谱仪,能通过观测 NDVI 数据分析作物长势,进行氮素实时诊断,提供最优施肥方案。该仪器已成功应用于研究氮素利用率和精准农业,并取得良好效果^[68]。陈青春等^[69]利用水稻拔节期 DVI 指数估测植株氮积累量,并构建了追氮调控模型,对穗肥施用量作了较精确估算,与传统农户经验氮肥施用方法比较,基于反射光谱的水稻氮肥追施调控技术可通过预测植株氮积累量和土壤供氮量对氮肥追施量作推荐。王磊等^[66]选择 $R_{\text{NIR/Red}}$ 与叶片氮含量建立估测模型,经过回归分析和验证, $R_{\text{NIR/Red}}$ 与叶片氮含量建立的对数模型和指数模型分别在生育前期和生育后期具有较高可靠性和稳定性,可进行玉米不同生育时期的氮素营养诊断。王渊等^[59]研究结果表明基于冠层光谱建立的氮素含量逐步回归模型较基于叶片光谱的有更高相关性,最终确定的油菜氮素含量光谱反射率估算模型拟合结果通过了极显著检验,可应用该模型估算油菜氮素含量和氮素营养的监测诊断。虽然目前国内利用光谱技术在作物生长与营养信息监测方面的研究越来越多,但由于受到光谱分辨率、模

型精度、光谱仪器价格昂贵等限制,真正形成产品大范围地应用到田间生产实践上的还很少,但光谱营养元素诊断有很好的应用前景。

3 氮素营养诊断技术在油菜上应用展望

综上所述,对油菜氮素营养诊断方法的比较分析结果表明,外观诊断方便快捷,但误诊可能性大且受个体视觉差异的影响,经验性强,确诊困难,其滞后性可导致油菜产量受损;化学诊断结果精确,可作为施肥指导,但需进行破坏性取样,实验室操作复杂,对试验人员操作要求较高,需耗费大量人力、物力,且时效性差,不利于推广应用;无损诊断在不破坏植物组织结构的基础上,对作物氮素养分和生长状况进行监测,这种方法可迅速、准确诊断田间作物氮营养状况,及时提供追肥所需信息,具有很好发展前景。由于受到光谱分辨率、模型精度、作物种类、植物光谱监测所需仪器价格等限制,无损诊断技术真正大范围地应用到油菜生产实践上的还很少。伴随中国农业信息化和现代化进程的推进,信息技术水平不断提高,氮素无损诊断技术正由定性或半定量向精确定量方向发展,由实验室手工操作向智能化测试方向发展,由对植株个体单元监测向群体面源监测发展,进而达到指导合理施氮和氮素调控,避免盲目施肥,提高氮肥利用效率的目标。目前,由于航空卫星或飞机上搭载近红外光谱遥感器的光谱分辨率较低,导致高空遥感监测模型预测精度较低,无法实现对大面积作物营养状况进行精确诊断,因此需要将空间遥感信息和精确度相对较高的地面光谱监测模型相结合,建立精确度较高的预报作物长势及氮素营养状况遥感监测模型。将地空遥感数据信息有机融合,有助于建立基于多源信息实时监测作物氮素营养状况平台,指导大尺度作物高效氮素管理和精确施肥。可以预见,未来作物营养无损诊断技术将综合运用信息管理、自动监测、动态模拟、虚拟现实、知识工程、精确控制、网络通讯等现代信息技术,实现作物营养诊断数字化和自动化,最终实现作物营养诊断的信息化和现代化。

总之,上述几种氮素养分诊断技术在油菜生产上均有应用,但其广度和深度还需要进一步拓展。利用科学的诊断技术建立油菜营养诊断指标数据库及系统的养分检测体系,对指导油菜科学施肥和促

进油菜生产有重要意义。

参考文献:

- [1] 孙 羲,郭鹏程,陶勤南.植物营养与肥料[M].北京:农业出版社,1991.
- [2] 郭 婷,崔国贤,丁莎莎,等.氮素营养诊断技术及其在麻类上的应用研究进展[J].中国麻业科学,2011(33):313-318.
- [3] 张建平,张永清.氮、锌、锰肥施对油菜产量影响研究[J].北方园艺,2001(1):15-17.
- [4] 孙昌禹,贾永国,王淑芬.氮肥施用对生态系统的影响及措施的研究[J].河北农业科学,2009(13):60-63.
- [5] 傅积平.土壤培肥与农业环境生态研究[M].北京:科学出版社,1992.
- [6] 蒋永忠,吴金桂,姜德仁,等.氮素化肥对农业生态环境的污染及其控制措施[J].江苏农业科学,1998(6):48-50.
- [7] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000(32):188-193.
- [8] 冯 伟,王永华,谢迎新,等.作物氮素诊断技术的研究综述[J].中国农学通报,2008,24(11):179-185.
- [9] 杨兴国.油菜缺乏氮、磷、钾营养的主要症状及合理施肥技术[J].咸宁学院学报,2011,31(6):76-77.
- [10] 刘芷宇.植物营养诊断的回顾与展望[J].土壤,1990,22(4):173-176.
- [11] 吕方军,李秋双.作物营养元素缺乏症状及诊断[J].现代农村科技,2009(19):23-23.
- [12] 杨邦杰,裴志远.农作物长势的定义与遥感监测[J].农业工程学报,1999,15(3):214-218.
- [13] 王绍中.河南小麦栽培学[M].北京:中国农业科学技术出版社,2010.
- [14] 胡军林.主要农作物缺氮症状及防治措施[J].农技服务,2008(1):44.
- [15] 王汉中.我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J].中国油料作物学报,2010,32(2):300-302.
- [16] PENG S, GARCÍA F V, LAZA R C, et al. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration[J]. Agronomy Journal, 1993, 85: 987-990.
- [17] 陶勤南,方 萍.水稻氮素营养的叶色诊断研究[J].土壤,1990,22(4):190-193.
- [18] 冯 锋,张福锁,杨新泉.植物营养研究-进展与展望[M].北京:中国农业大学出版社,2000:197-206.
- [19] 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[J].石河子大学学报:自然科学版,2003,7(1):80-83.
- [20] 陈新平,李志宏,王兴仁,等.土壤、植株快速测试推荐施肥技术体系的建立与应用[J].土壤肥料,1999(2):6-10.
- [21] KELLING K A, MATOCHA J E, WESTERMAN R L. Plant analysis as an aid in fertilizing forage crops[J]. Soil Testing & Plant Analysis, 1990,3:603-643.
- [22] LEIGHT R A, JOHNSON A E. Nitrogen concentration in field

- grown spring barely; an experiment of the usefulness of expecting concentration on the basis of tissue water [J]. *Journal of Agricultural Science*, 1985, 105: 397-406.
- [23] 戴建军,王洪亮,程 岩.测定植物样品全氮含量的两种方法比较[J].*东北农业大学学报*,2000,31(1):36-38.
- [24] PAPASTYLIANOU I, PUCKRIDGE D W. Stem nitrate nitrogen and yield of wheat in a permanent rotation experiment[J]. *Crop and Pasture Science*, 1983, 34(6): 599-606.
- [25] TABOR J A, WARRICK A W, PENNINGTON D A, et al. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(3): 602-607.
- [26] ROTH G W, FOX R H, MARSHALL H G. Plant tissue tests for predicting nitrogen fertilizer requirements of winter wheat[J]. *Agronomy Journal*, 1989, 81(3):502-507.
- [27] 李志宏,王兴仁,张福锁.我国北方地区几种主要作物氮营养诊断及追肥推荐研究Ⅳ.冬小麦—夏玉米轮作制度下氮素诊断及追肥推荐的研究[J].*植物营养与肥料学报*,1997,3(4):357-362.
- [28] 李银水,余常兵,廖 星,等.三种氮素营养快速诊断方法在油菜上的适宜性分析[J].*中国油料作物学报*,2012,34(5):508-513.
- [29] 刘代平,宋海星,刘 强,等.不同施氮水平下油菜地上部生理特性研究[J].*湖南农业大学学报:自然科学版*,2008,34(1):100-104.
- [30] 韩德昌,陈 妍,关连珠,等.氮肥种类及用量对油菜硝酸盐累积的影响[J].*中国农学通报*,2005,21(5):292-294.
- [31] 朱飞飞,王朝辉,李生秀.不同油菜品种苗期叶柄硝态氮含量与产量及品质的关系[J].*干旱地区农业研究*,2010(28):80-84.
- [32] 吕世华,刘学军.油菜氮营养快速诊断技术的研究[J].*西南农业学报*,2001,14(4):5-9.
- [33] DOBERMANN A, KRAUSS A, ISHERWOOD K, et al. Nutrient use efficiency-measurement and management [M]. Brussels, Belgium:IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [34] Cissé L, KRAUSS A, ISHERWOOD K, et al. Balanced fertilization for sustainable use of plant nutrients [M]. Brussels, Belgium: IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, 2007.
- [35] 邵则瑶.作物根层(0~100 cm)土壤剖面残留无机态氮研究报告之二 Nmin 含量与小麦产量的关系[J].*北京农业大学学报*,1989,15(3):285-291.
- [36] 陈新平,周金池,王兴仁,等.应用土壤无机氮测试进行冬小麦氮肥推荐的研究[J].*中国土壤与肥料*,1997(5):19-21.
- [37] 连楚楚,沈润平,王海辉,等.油菜优化测土施肥中土壤供氮量的研究[J].*江西农业大学学报*,1994,16(1):20-24.
- [38] 姜丽娜,王 强,单英杰,等.用土壤全氮与有机质建立油菜测土施氮指标体系的研究[J].*植物营养与肥料学报*,2012,18(1):203-209.
- [39] THOMAS J R, GAUSMAN H W, THOMAS J R, et al. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentrations for eight crops [J]. *Agronomy Journal*, 1977, 69(5): 799-802.
- [40] 薛利红,罗卫红,曹卫星,等.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.
- [41] WOOD C W, REEVES D W, DUFFIELD R R, et al. Field chlorophyll measurements for evaluation of corn nitrogen status [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, 15(4):487-500.
- [42] SCHEPERS J S, FRANCIS D D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(4):1233-1239.
- [43] 裴正军,宋海燕,何 勇,等.应用 SPAD 和光谱技术研究油菜生长期间的氮素变化规律[J].*农业工程学报*,2007,23(7):150-154.
- [44] 朱哲燕,鲍一丹,黄 敏,等.油菜叶绿素与氮含量关系的试验研究[J].*浙江大学学报:农业与生命科学版*,2006,32:152-154.
- [45] 周晓冬,常义军,吴洪生,等.甘蓝型油菜开花期 SPAD 值、叶绿素含量与氮素含量叶位分布特点及其相互关系[J].*土壤*,2011(43):148-151.
- [46] 张 元,毛罕平,张晓东,等.基于多光谱视觉的油菜叶片氮素营养检测方法研究[J].*农机化研究*,2009(31):83-85.
- [47] 张晓东,毛罕平,左志宇,等.油菜氮素的多光谱图像估算模型研究[J].*中国农业科学*,2011,44(16):3323-3332.
- [48] 冯 雷,方 慧,周伟军,等.基于多光谱视觉传感技术的油菜氮含量诊断方法研究[J].*光谱学与光谱分析*,2006,26(9):1749-1752.
- [49] 袁道军,刘安国,原保忠,等.基于计算机视觉技术的油菜冠层营养信息监测[J].*农业工程学报*,2009,25(12):174-179.
- [50] 张筱蕾,刘 飞,聂鹏程,等.高光谱成像技术的油菜叶片氮含量及分布快速检测[J].*光谱学与光谱分析*,2014,34(9):46.
- [51] BLACKMER T M, SCHEPERS J S, VARVEL G E, et al. Analysis of aerial photography for nitrogen stress within corn fields [J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88(5):729-733.
- [52] 王福民,王 渊,黄敬峰.不同氮素水平油菜冠层反射光谱特征研究[J].*遥感技术与应用*,2004(19):80-84.
- [53] THOMAS J R, OERTHER G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements [J]. *Agronomy Journal*, 1972, 64(1):11-13.
- [54] FERNANDEZ S, VIDAL D, SOLL-SUGRANES E S L. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(9):1867-1884.
- [55] BLACKMER T M, SCHEPERS J S, VARVEL G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves [J]. *Agronomy Journal*, 1994, 86(6):934-938.
- [56] SHIBUYAMA M, AKIYAMA T. A Spectroradiometer for field use: VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1986, 55(4): 439-445.
- [57] WANG K, SHEN Z, WANG R. Effects of nitrogen nutrition on the

- spectral reflectance characteristics of rice leaf and canopy [J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1998, 24: 93-97.
- [58] 张晓东, 毛罕平, 周莹, 等. 油菜氮素的高光谱特征补偿和组合模型研究[J]. 安徽农业科学, 2011(39): 19705-19706.
- [59] 王渊, 黄敬峰, 王福民, 等. 油菜叶片和冠层水平氮素含量的高光谱反射率估算模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(2): 273-277.
- [60] 张雪红, 刘绍民, 何蓓蓓. 不同氮素水平下油菜高光谱特征分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 245-249.
- [61] TARPLEY L, REDDY K R, SASSENATHCOLE G F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration [J]. Crop Science, 2000, 40(6): 1814-1819.
- [62] 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[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 172-177.
- [63] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 光谱技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1743-1748.
- [64] 朱艳, 姚霞, 田永超, 等. 稻麦叶片氮积累量与冠层反射光谱的定量关系[J]. 植物生态学报, 2006, 30(10): 983-990.
- [65] 李立平, 张佳宝, 邢维芹, 等. 手持式植物冠层光谱测定仪在黄淮海平原地区冬小麦氮肥精准管理中应用的初步研究[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 85-92.
- [66] 王磊, 白由路, 卢艳丽, 等. 基于光谱分析的玉米氮素营养诊断[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 333-340.
- [67] 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): 125-130.
- [68] 农业部. 中国农业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业统计出版社, 1997.
- [69] 陈青春, 田永超, 姚霞, 等. 基于冠层反射光谱的水稻追氮调控效应研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4149-4157.

(责任编辑: 张震林)