

文章编号: 1007-4619 (2003)01-0073-08

# 作物水分和氮素光谱诊断研究进展

薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 田永超

(南京农业大学 农业部作物生长调控重点开放实验室, 江苏, 南京 210095)

**摘要:** 水肥是影响作物生长的最主要限制因子之一。及时准确监测或诊断出作物水肥状况, 对提高作物水肥管理水平和水肥利用效率、减少过度施肥带来的环境污染和指导节水农业生产具有重要意义。为此, 首先简单介绍了植物光谱特性的生理生态基础以及光谱诊断原理, 然后对国内外作物水分和氮素状况光谱诊断的研究进展、目前作物水分和氮素状况光谱诊断方面的研究重点以及存在的困难进行了评述, 并提出了今后的研究方向和发展前景。

**关键词:** 水分; 氮素; 地面遥感; 光谱诊断

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A

## 1 引言

在农作物生产中, 水肥是影响作物生长的最主要的限制因子之一。肥料中氮素是作物生长和产量品质形成所必须的重要元素, 因此, 氮肥管理是以高产优质为目标的作物生产中最为重要的管理措施之一。由于氮在土壤中的淋洗作用, 施氮过多, 容易造成地下水的污染。随着环境问题日益受到关注, 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、农学家及生产者所面临的必须解决的问题。针对上述问题, 发达国家于20世纪80年代中期提出了精确农业(农作)的概念。精确氮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, 而且能提高氮肥利用效率、减少地下水污染, 从而产生巨大的经济和生态效益。

水分是植物的主要组成成分。水分亏缺直接影响植物的生理生化过程和形态结构, 从而影响植物生长和产量与品质。因此, 作物水分管理也是作物生产中最为重要的措施之一。同时, 水资源的日益短缺要求农业生产更有效地利用有限的水资源去获取较高的产量和较好的产品质量。因此, 及时准确监测或诊断出作物水分状况, 对提高作物水肥管理水平和水分利用效率及指导节水农业生产具有重要

意义。

作物缺水缺肥会引起叶片颜色、厚度、水分含量以及形态结构等发生一系列变化, 从而引起光谱反射特性的变化。基于物体光谱反射特征识别物体的遥感技术使作物水分和氮素实时监测和快速诊断成为可能。与传统的作物水分和氮素营养快速诊断手段相比, 遥感的信息获取量更大且更为快速和省时省力, 是精确农作中进行变量施肥和灌溉不可或缺的基础技术。因此, 近20年来, 利用遥感进行作物水分和氮素实时监测和快速诊断一直是遥感在农业中应用的研究热点。本文拟对近年来国内外关于水氮光谱诊断研究的进展进行综述。

## 2 植物光谱诊断原理及其生理生态基础

每一种物质对不同波长的电磁波的吸收和反射都不同, 物质的这种对不同波段光谱的响应特性叫光谱特性。植物光谱诊断便是基于植物的光谱特性来进行的。植物叶片组分的光谱诊断原理是植物中这些化学组分分子结构中的化学键在一定辐射水平的照射下发生振动, 引起某些波长的光谱发射和吸收产生差异, 从而产生了不同的光谱反射率, 且该波长处光谱反射率的变化对该化学组分的多少非常敏感(故称敏感光谱)。植物化学组分光谱诊断的实现便是以植物化学组分敏感光谱的反射率与该组分含

收稿日期: 2001-09-20; 修订日期: 2002-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 G2000077907 项目资助。

作者简介: 薛利红(1977—), 女, 南京农业大学农学院农学系在读博士, 从事农业生长遥感监测方面的研究。

量或浓度的相关关系为基础的。实验室内用于植物叶片化学组分快速测定的红外线扫描仪就是基于这种关系进行植物叶片化学组分(包括氮素)诊断。红外线扫描技术在 20 世纪 80 年代就已经成熟并广泛用于工业中大量样品(如牧草品质检测)的化学组分快速测定。农业遥感应用中作物水分和氮素遥感诊断就是利用了红外线扫描技术的工作原理,即找出对作物水分和氮素含量敏感的光谱并建立相应的光谱反射率或其演生指数与作物含水量或含氮量(含氮浓度)的相关关系。无论是用于大面积作物苗情监测的高空遥感还是具体田块苗情监测的地面遥感均是基于这种关系进行的。红外线扫描技术中使用的光谱反射率与植物叶片化学组分(包括含氮量)的相关关系一直是植物叶片化学组分遥感诊断的参考依据,但不能直接用于新鲜叶片化学组分遥感诊断。因为实验室内用的红外线扫描技术的测量对象是经脱水且磨碎后的植物叶片,不存在新鲜叶片那样有水分及叶片物理、化学及外部形态结构对光谱的干扰。

研究发现,植物的反射光谱曲线的显著特征是,在 490—600nm 波段,具有中等的反射率值,550nm 附近是叶绿素的强反射峰;在 600—700nm 波段,因叶绿素对这部分光的强烈吸收,多数植物在 680 或 670nm 处的反射率最低;在 700—750nm 波段,曲线陡而接近于直线,其斜率与叶绿素的含量有关;1360—1470nm 波段和 1830—2080nm 波段是水和二氧化碳的强吸收带。各种遥感传感器的光谱通道正是根据植物的这一反射光谱特征来设计的。不同的植物以及同一种植物在不同的生长发育阶段,其反射光谱曲线形态和特征也不同,病虫害、灌溉、施肥等条件的不同也会引起植物反射光谱特性的变化,因此,利用光谱的这一特征和遥感数据进行作物的长势监测成为可能。

### 3 植物氮素的敏感光谱及其诊断

作物氮素是对作物生长、产量和品质影响最为显著的营养元素。植物在可见光波段的反射率主要受叶绿素的影响<sup>[1]</sup>。而叶绿素含量和植株的氮素含量密切相关(尤其是当植株缺氮时),故常用叶绿素含量间接地指示植物的氮素含量。研究发现 550nm、675nm 附近的反射率对叶绿素含量比较敏感<sup>[1,2]</sup>。但单一波段的反射率易受生物量、背景等的影响<sup>[3]</sup>,用两波段的比值可以提高叶绿素光谱诊

断的精度<sup>[4]</sup>。日本已根据此原理研制出了叶绿素计(SPAD)来进行田间的作物氮素诊断及指导施肥<sup>[5]</sup>,并在某些作物的诊断中取得了较好的效果。但其在实际应用中往往受作物的品种、生育期、生长环境等的影响<sup>[6,7]</sup>,精度不高,要精确地估测氮素营养水平,还需建立校正曲线或改进计算方法<sup>[8]</sup>,且仍需实验室分析配合,因此,这种方法不再是一个快速、非破坏性的方法。

为了探索植物叶片氮素遥感诊断的可能性,20 世纪 70 年代以来有关科学家就进行了大量的基础研究,寻找氮素的敏感波段及其反射率在不同氮素水平下的表现。研究发现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<sup>[9-13]</sup>,对氮含量变化最敏感的波段在 530—560nm 区域<sup>[4,5,9,12,15,16]</sup>,通过光谱测定及其变量的运算如 IR/red 比值,可以区分不同氮素营养水平<sup>[3,10,11,14-17]</sup>。明确了植物的氮素敏感波段后,许多学者便通过各种统计方法来寻求含氮量与光谱反射率或其演生量的关系,并建立模型来估算作物的氮素含量。Shibayama<sup>[4]</sup>等在水稻上的研究发现,单位土地面积上的叶片氮含量与  $R_{620}$  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,预测值和实测值线性相关,且不受品种类型的影响。Thomas<sup>[18]</sup>等利用 550nm 和 670nm 这两个波段定量估算甜椒的氮素含量,精度达 90%。Fernandez<sup>[19]</sup>等发现用红(660nm)和绿(545nm)两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。Lee Tarpley 等<sup>[20]</sup>分析了棉花叶片氮浓度与 190 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,结果表明,用红边位置与短波近红外波段的比值预测的精确度和准确度都比较高。我们对水稻的研究也发现,叶片氮积累量(单位土地面积上的叶片氮素总量)与 810nm 和 560nm 两波段的比值在整个生育期内都呈极显著线性正相关,而且不受施氮水平以及品种的影响,模拟值与实测值的相关程度在 90% 以上(资料待发表)。

由于胁迫状态下植物体内发生的大多数生理变化只引起某些特定窄波段的反射光谱发生变化<sup>[21]</sup>,用传统的多波段反射光谱所计算出来的植被指数因其分辨率低而预测植物化学组分含量效果较差。随着遥感技术的迅速发展,高光谱遥感以其超多波段(几十、上百个)、光谱分辨高(3—20nm)等特点,使其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

被的生长状况<sup>[22-25]</sup>。Peterson 等运用航空成像光谱仪(AIS)对森林冠层中氮和木质素含量进行监测并对森林生产力和营养成分转化进行了预测<sup>[23]</sup>。浦瑞良和宫鹏使用多元统计和光谱导数技术评价小型机载成像光谱仪(CAS1)数据用于估计冠层生化浓度(总叶绿素、全氮和全磷)的潜力和效率<sup>[24]</sup>。Kokaly 和 Clark 的研究发现 2054 和 2172nm 这两个波段与氮含量高度相关<sup>[27,28]</sup>。Johnson<sup>[29]</sup>用逐步多元回归方法也发现在整个可见光至红外波段范围内,树叶叶片反射率的一阶导数与叶片全氮间的相关性在 2160nm 波段处最好,用光谱分析方法估测鲜叶含氮量其精度大于 85%。牛铮<sup>[30]</sup>的研究也表明,用 2120 和 1120nm 处反射率一阶导数的线性回归方程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。2100nm 左右为蛋白质的吸收波段,而叶片中的氮素大多以蛋白质的形态存在,这就说明 2100nm 左右也是氮素的一个敏感波段。

植物冠层光谱反射特征受到植株叶片水分含量、冠层几何结构、土壤覆盖度、大气对光谱的吸收等因素的影响。由于不同时空条件下这些影响因子不同,所建立的植物氮素光谱诊断模型不能用于建模以外的时空条件,这大大限制了利用遥感进行作物氮素诊断的可靠性和普适性<sup>[31]</sup>。为了建立通用的氮素诊断模型,Kokaly 和 Clark<sup>[27]</sup>用 7 个不同地点、不同植物的研磨碎的干叶的反射率,通过光谱吸收特性的连续移除法、带深标准化分析和多元逐步线性回归方法获得了比较一致的、适用于多种物种、精度较高的氮素以及其他化学组分含量的预测方程,但外推到鲜叶和整个植被冠层时预测精度显著降低。究其原因在于植被冠层反射光谱还受土壤背景、传感器信噪比、大气吸收、冠层结构以及叶片水分含量等的影响,其中叶片水分含量对光谱的影响是最主要的,其覆盖了氮本身对光谱的影响。因此,消除其他因子尤其是水分的干扰,将是建立通用的且精准确度都比较高的氮素诊断模型的关键。

已有的研究大多是围绕含氮量与光谱反射率关系的理论基础研究,真正用于指导生产的却很少。1996 年,Stone<sup>[32]</sup>等尝试用小麦的反射光谱指导变量施肥来纠正小麦当季的氮缺乏,结果表明,不论是定量施肥还是变量施肥都显著提高了产量,定量施肥和变量施肥之间的籽粒产量没有显著区别,但变量施肥每公顷节省了 32—57kg 氮,明显地提高了总氮利用效率,减少了因过度施肥对环境造成的污染。这进一步表明,氮素光谱诊断模型的研究不仅必要,

而且在生产中有着广阔的应用前景。

## 4 植物水分的敏感光谱波段及其诊断

水分是作物生长发育的主要限制因子之一。干旱不仅影响作物的产量,也影响作物籽粒的品质,严重时还会造成颗粒无收。因此,在实际生产中要求及时准确地判断作物水分亏缺的程度,适时适量地灌水。由于不同土壤条件及栽培方式下作物对深层水的利用差别较大,采用土壤含水率作为灌溉的参考指标已难以满足作物栽培实践的需要。自 1963 年 Tanner<sup>[33]</sup>提出以冠层温度指示植物水分亏缺以来,冠层温度法成为诊断作物水分状况的一个重要手段。30 多年来,有关科学家相继提出了参考温度法<sup>[34]</sup>、胁迫积温法(Stress Degree Day, SDD)<sup>[35]</sup>、作物缺水指标法(Crop Water Stress Index, CWSI)<sup>[36]</sup>以及水分亏缺指数法(Water Deficit Index, WDI)<sup>[37]</sup>等,并在田间以及区域尺度上展开了大量的应用研究<sup>[38]</sup>。但这类方法仍受到环境状况的强烈影响,还不足以说明作物水分状况在时间和空间上随环境的巨大变化<sup>[39]</sup>。

基于水分对红外波段的吸收特性,遥感上多采用红外通道进行作物水分状况监测。为了明确水分的敏感光谱,早在 1971 年,Thomas<sup>[40]</sup>就用完全饱和的叶片在室温下逐渐干燥的方法来获取不同含水量下的反射光谱,并研究了叶片含水量与光谱反射率之间的关系,结果表明叶片的光谱反射率随叶片含水量的下降而增加,1450nm 和 1930nm 波段的反射率与叶片的相对含水量显著相关。冠层反射光谱由于受冠层几何结构和土壤背景反射光谱的综合影响,与叶片反射光谱有些不同。Holben 等发现干旱时大豆的冠层光谱反射率在近红外波段有所降低,提出 760—900nm 波段为探测水分胁迫的最佳波段<sup>[41]</sup>。Jackson 在棉花上的研究<sup>[42]</sup>和 Moran<sup>[43]</sup>等在紫花苜蓿上的研究也发现干旱时近红外波段冠层反射率的降低。

由于植物体内水分的微弱变化就会对叶片以及冠层光谱反射率产生较大的影响,传统的宽波段遥感数据(如 MSS 和 TM 或多波段辐射仪测得的数据)难以体现光谱的精细变化,因此越来越多的学者借助于高光谱遥感对植物的水分状况进行诊断。Danson-Fm 等发现水分吸收波段处(1360—1470nm 和 1830—2080nm)的叶片反射率一阶导数与叶片含水量高度相关,而且不受叶片结构的影响<sup>[44]</sup>。后人的

研究结构也证实 1450nm、1940nm、2500nm 附近为水分的敏感光谱波段<sup>[45-47]</sup>。但 Inoue 等却认为近红外水分吸收波段存在着强烈的大气吸收,不适合在高空遥感中用于评估叶片和植株的水分状况,而 950—970nm 处的水分弱吸收谷,其反射率随含水量的变化无论在植株还是冠层水平都比较明显,从而提出了用 950—970nm 处的反射率来预估叶片的相对含水量<sup>[48]</sup>。Penuelas 的研究也证明了近红外反射率是植株中度干旱时水分状况的较好指示器<sup>[49]</sup>。以上研究结果都表明,无论是多光谱遥感还是高光谱遥感,水分的敏感光谱波段主要有 970、1450、1940 和 2500nm 左右。但由于近红外波段(1450nm)存在着强烈的大气吸收,因此不适于高空遥感诊断。我们在水稻上的研究表明:无论是近红外还是中红外波段的冠层光谱反射率与叶片含水量和水势等高度相关(资料待发表),说明在地面遥感中,无论是中红外波段还是近红外波段都能较好地反映植物的水分状况。

明确了水分的敏感光谱后,许多学者对用光谱反射率诊断植株水分状况的可行性进行了分析。Shibayama 等<sup>[50]</sup>的研究表明,用 1190—1320nm 和 1600nm 波段反射率的一阶导数可以预测双季稻冠层水分是否缺乏。Penuelas 等发现用水分指数  $WI$  ( $WI = R_{970}/R_{900}$ ) 或者近红外波段一阶导数的最小值或其所在的波长能清楚地指示水分状况的变化<sup>[49]</sup>。Penuelas 和 Inoue 随后的研究还表明,  $WI$  ( $WI = R_{900}/R_{970}$ ) 与  $NDVI$  ( $NDVI = (R_{900} - R_{680}) / (R_{900} + R_{680})$ ) 的比值  $WI/NDVI$  不仅可以用来预测叶片的水分含量,还可以用来预测植株或冠层的含水量,且显著提高了预测的精度<sup>[51,52]</sup>。Ceccato 等<sup>[53]</sup>综合考虑了叶片内部结构、叶片水分含量以及干物质等的影响,发现 1600nm 和 820nm 反射率的比值与  $EWT$  (Equivalent Water Thickness) 高度相关,并从物理学基础上给予了解释。我国学者王纪华、赵春江、田庆久等应用地物光谱反射特征吸收峰的归一化定量描述技术对小麦进行了研究,发现小麦叶片相对水分含量与光谱反射率在 1450nm 附近水的特征吸收峰深度和面积呈现良好的线性正相关关系,通过光谱反射率可以诊断小麦缺水状况<sup>[46,47,54]</sup>。这些研究结果均表明:用光谱反射率对植株水分状况进行诊断是可行的。

叶片失水时,叶片在 1300—2500nm 的反射率增加,然而 400—1300nm 波段的反射率也增加<sup>[55-57]</sup>,这种现象不仅与叶片中水分和其他物质(色素)的辐

射特性有关,还与叶片的内部结构有关。为了进一步研究水分含量对水分弱吸收波段(400—1300nm)的影响,Carter<sup>[43]</sup>用 Thomas 的方法系统地研究了 6 种不同种类植物叶片在不同的水分含量下对叶片光谱反射特性的影响,发现水分含量对 1300—2500nm 波段反射率的影响是由水分含量对辐射的直接吸收造成的(初级影响),对 400—1300nm 波段反射率的影响则是由水分含量变化造成的叶片内部结构的变化引起的(次级影响),但初级影响比次级影响显著得多。在轻微干旱时,水分的次级影响大于水分的初级影响;在重度干旱时则主要由水分的初级影响决定。因此,在建立作物水分监测和诊断模型时,必须考虑轻微干旱和中重度干旱时光谱反射率变化原因的不同,综合建模。此外,水分变化引起的细胞、组织和植株及冠层形态的变化以及叶龄、物种的不同等都会对植株光谱反射特征产生影响,这些因子对植物水分胁迫时反射光谱的影响研究报道较少,还有待于进一步研究。

## 5 水分和氮素光谱诊断中存在的问题

### 5.1 影响因子的消除

鲜活叶片中水分、细胞和亚细胞组织、叶表面蜡层等的存在,掩盖了由化学键振动引起的反射特性的微弱变化。因此,对鲜活叶片进行化学组分光谱诊断对比碾磨碎的干叶进行诊断难度大得多。此外,由于冠层结构如叶倾角和叶片密度、土壤背景、风速、短时间内水气压的变化、太阳高度角等对反射光谱的影响,使叶片水平上的诊断模型上升到冠层水平的诊断也有困难。因此,如何消除这些因素对光谱反射的影响,是建立通用植物光谱诊断模型的关键所在。大量的研究是通过光谱数据进行相对变换以及构造植被指数的方法来消除其他外界因子的干扰,如对光谱进行一阶差分变换即导数光谱<sup>[58,59]</sup>或用比值植被指数( $RVI$ )和调节土壤植被指数( $SAVI$ )<sup>[60]</sup>或对数据进行带深归一化的方法等<sup>[27]</sup>来消除低频背景光谱(土壤等)的影响;对光谱进行归一化变换可以消除光照条件差异的影响。这些数据处理能在一定程度上揭示光谱中内在的隐含特征并提高估计精度。但这些数据变换处理并不能完全消除干扰因子的影响,如 Yoder<sup>[61]</sup>的研究表明,导数光谱并不能完全消除叶面积的影响。关于这方面的研究还有待于进一步深入。

## 5.2 水氮的互作

不同的氮供应能够引起作物组织结构上发生不同的变化, 这些变化对植株的水分状况有重要影响。Penuelas 等开展了有效氮对植物组织结构的影响、以及组织结构的变化对与水分相关的参数 ( $WT$ ) 的影响的研究, 结果表明水分供应良好的 5 个氮肥处理中, 无氮处理的小麦的旱性特征最明显, 比叶重和叶片纤维素含量较高, 细胞壁透性较小,  $WT$ 、 $CWSI$ 、 $\Delta T$  (冠层与大气的温度差) 也最高<sup>[62]</sup>。Nielsen 和 Halvorson 的研究结果表明<sup>[63]</sup>, 轻度干旱时 ( $CWSI < 0.38$ ), 增施氮肥可使根区相应地轻微加大, 促进了对水分的吸收, 从而减轻干旱程度; 而重度干旱时 ( $CWSI > 0.38$ ), 增施氮肥却加重了干旱程度, 这是因为由于根区加大引起的对水分吸收的增加不能补偿由于生物量和叶面积的增加而导致的蒸腾加剧。而水分状况又影响着植物对氮素的吸收利用。Fernandez 等<sup>[64]</sup>发现灌溉区的施肥小麦花后旗叶的叶绿素含量比不施肥的要高 3 倍, 而不灌溉的只高 1.5 倍。以上研究结果表明, 水分和氮素之间存在着显著的交互作用, 同一氮素水平下不同水分状况或同一水分水平下的不同氮素状况, 植物的光谱反射率差异极大。而目前的光谱诊断研究大多基于单一因子水平对光谱特性的影响, 得出的结果缺乏广适性, 因此综合考虑两者之间的互作及其对光谱的综合影响, 把其中一个因子的效应参数化, 将是以后水氮光谱诊断研究的重点。

## 6 今后研究方向与目标

利用地物光谱遥感估测叶片或植株冠层的水分和营养状况对农业生产有着重要的意义。它可以实时地监测作物的长势, 分析作物水分和养分状况, 科学地指导作物生产。尤其是在与 GIS 和 GPS 结合以后, 可以实现农业的精确管理, 不仅可以提高作物的产量和品质, 还可以节约资源, 降低成本, 减少对环境的污染。综观以往研究成果, 光谱诊断技术将在以下几个方面得到进一步的深入研究和应用。

(1) 加强光谱诊断技术应用的农学基础和遥感预测模型研究。干旱和营养缺乏等都会引起植物的生理和形态变化, 从而改变叶片的光学特性和冠层的反射特征。遥感的主要作用是实时监测。遥感资料反映出明显的植物水氮亏缺时, 在农学上采取补救措施可能已经嫌晚。因此, 建立基于遥感的水氮

预测模型对农业生产尤为重要。遥感预测模型可以使遥感的应用由单一进入综合、由静态描述进入动态监测和预测的阶段。虽然在作物产量遥感预测方面已开展了大量的研究。在作物水氮遥感预测方面的研究却很薄弱。其主要原因是缺乏有关的基础数据及手段。为此, 遥感学家与农学家有必要密切合作, 共同开展控制环境下不同水分和氮素水平对植物光学特性及其随生育期变化的影响的研究, 以及水氮互作, 特别是水分对植物氮素光谱诊断的影响等农学基础研究, 为光谱诊断和预测模型的建立提供可靠的基础数据, 为建立机理性强而又有可靠的光谱诊断和预测模型奠定基础。可喜的是, 中国已于“十五”期间开展了有关的重大基础研究(973 项目), 北京师范大学、中国科学院、中国农业大学、北京农林科学院、南京农业大学等高校和科研院所的有关科学家已经开始进行多学科交叉合作研究。

(2) 加强光谱诊断技术产品的开发研究。实时、便捷、可靠的作物水分和氮素诊断仪器是进行科学的作物水氮管理所必需的, 也是精确农作的关键设备之一。遥感的农业应用研究只有朝着这方面努力, 才能使遥感进一步更深更广地为农业生产服务。而光谱诊断技术产品的开发研究涉及到光学传感器、遥感和农学等不同学科。因此, 这些领域的科学家要共同合作, 研究开发集传感器、光谱诊断模型及作物水肥管理专家系统于一体的便携式作物水分和氮素光谱分析仪系列产品。该产品不仅要能实时监测植株的水氮含量, 而且能根据作物种类和产量目标, 提供相应的灌溉量和施肥量。

## 参考文献(References)

- [1] Thomas J R, Gausman H W. Leaf Reflectance vs. Leaf Chlorophyll and Carotenoid Concentration for Eight Crops [ J ]. *Agronomy Journal*, 1977, 69: 799—802.
- [2] Fellella I, Serrano L, Serra J *et al.* Evaluating Wheat Nitrogen Status with Canopy Reflectance Indices and Discriminant Analysis [ J ]. *Grass Science*, 1995, 35: 1400—1405
- [3] Munden R, Curran P J, Catt J A. The Relationship between the Red Edge and Chlorophyll Concentration in the Broadbalk Winter Wheat Experiment at Rothamsted [ J ]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 705—709.
- [4] Shibayama 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.
- [5] Chubachi N R, Asano 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.
- [6] Campbell R J, Mobley K N, Marini R P. Growing Conditions Alter the

- Relationship between SPAD-501 Values and Apple Leaf Chlorophyll [ J ] . *Horticulture Science*, 1990, **25**: 330—331.
- [ 7 ] Schepers J S, Francis D D, Vigil M, *et al.* Comparison of Corn Leaf Nitrogen Concentration and Chlorophyll Meter Readings [ J ] . *Communication of Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 2173—2187.
- [ 8 ] Shaobing Peng, Garcia-FV, Laza-RC, *et al.* Adjustment for Specific Leaf Weight Improves Chlorophyll Meter's Estimation of Rice Leaf Nitrogen Concentration [ J ] . *Agronomy Journal*, 1993, **85**: 987—990.
- [ 9 ] Al-Abbas, Barr R A H, Hall S D, *et al.* Spectra of Normal and Nutrient-deficient Maize Leaves [ J ] . *Agronomy Journal*, 1974, **66**: 16—20.
- [ 10 ] Hinzman L D, Bauer M E, Daughtry C S T. Effects of Nitrogen Fertilization on Growth and Reflectance Characteristics of Winter Wheat [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 1986, **19**: 47—61.
- [ 11 ] Walburg G, Bauer-Me, Daughtry-CST, *et al.* Effect of Nitrogen Nutrition on Growth, Yield and Reflectance Characteristics of Corn Canopies [ J ] . *Agronomy Journal*, 1982, **74**: 677—683.
- [ 12 ] Wang Ke, Shen Zhangquan, Wang Renchao. Effects of Nitrogen Nutrition on the Spectral Reflectance Characteristics of Rice Leaf and Canopy [ J ] . *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1998, **24**: 93—97.
- [ 13 ] Wang R C, Chen M Zh, Jiang H X. Study on the Agricultural Mechanism of Yield Estimation Using Remote Sensing. I. Spectral Characteristics of Rice with Different Nitrogen Level and Selection of Sensitive Waveband [ J ] . *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1993, **19**(sup): 7—14. [ 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估计的农学机理研究. I. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择 [ J ] . 浙江农业大学学报, 1993, **19**(增刊): 7—14.]
- [ 14 ] Zhou Q F, Wang R C. Relationship between Nitrogen Nutrition Level and Reflectance Characteristics of Rice [ J ] . *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1993, **19**(sup): 40—46. [ 周启发, 王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特征的关系 [ J ] . 浙江农业大学学报, 1993, **19**(增刊): 40—46.]
- [ 15 ] Tracy M Blackmer, James-SS, Gary-Ev, *et al.* Nitrogen Deficiency Detection Using Reflected Short-wave Radiation from Irrigated Corn Canopies [ J ] . *Agronomy Journal*, 1996, **88**: 1—5.
- [ 16 ] Tracy M Blackmer, James S. Schepers, Gary E. Varvel. Light Reflectance Compared with Other Nitrogen Stress Measurements in Corn Leaves [ J ] . *Agronomy Journal*, 1994, **86**: 934—938.
- [ 17 ] Ame Jensen, Bent Lorenzen. Radiometric Estimation of Biomass and Nitrogen Content of Barley Grown at Different Nitrogen Levels [ J ] . *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**(10): 1809—1820.
- [ 18 ] Thomas, J R, G F Oerther. Estimating Nitrogen Content of Sweet Pepper Leaves by Reflectance Measurements [ J ] . *Agronomy Journal*, 1972, **64**: 11—13.
- [ 19 ] Fernandez-S, Vidal-D, Simon-E, *et al.* Radiometric Characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under Water and Nitrogen Stress [ J ] . *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(9): 1867—1884.
- [ 20 ] Lee Tarpley, Raia K Reddy, Gretchen F Sassenrath-Cole. Reflectance Indices with Precision and Accuracy in Predicting Cotton Leaf Nitrogen Concentration [ J ] . *Crop Science*, 2000, **40**: 1814—1819.
- [ 21 ] Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A Narrow-waveband Spectral Index that Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 1992, **41**: 35—44.
- [ 22 ] Niu Z, Wang W, Wang C Y, *et al.* Application of New Type Remote Sensing Data in Crop Growth Monitor [ A ] . Xu Guanhua *et al.* *Remote Sensing in China* [ C ] . Beijing: Mapping Publishing Company, 1996. [ 牛铮, 王汶, 王长耀等. 新型遥感数据在作物生长监测中的应用 [ A ] . 徐冠华等. 遥感在中国. 北京: 测绘出版社, 1996.]
- [ 23 ] Johnson L F, Hlavaka C A, Peterson D L, *et al.* Multivariate Analysis of AVIRIS Data for Canopy Biochemical Estimation along the Oregon Transect [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 1994, **47**: 216—230.
- [ 24 ] Fang H L, Tian Q J. A Review of Hyper-spectral Remote Sensing in Vegetation Monitoring [ J ] . *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, **13**(1): 62—69. [ 方洪亮, 田庆久. 高光谱遥感在植被监测中的研究综述. 遥感技术与应用, 1998, **13**(1): 62—69.]
- [ 25 ] Peterson D. L., Aber J. D., Matson P. A., *et al.* Remote Sensing of Forest Canopy and Leaf Biochemical Contents. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **24**: 85—108.
- [ 26 ] Pu R L, Gong P. Relationships between Forest Biochemical Concentrations and CASI Data along the Oregon Transect [ J ] . *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(2): 115—123. [ 蒲瑞良, 宫鹏. 森林生物化学与 CASI 高光谱分辨率遥感数据的相关分析 [ J ] . 遥感学报, 1997, **1**(2): 115—123.]
- [ 27 ] Raymond F Kokaly, Roger N Clark. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 1999, **67**: 267—287.
- [ 28 ] Raymond F Kokaly. Investigating a Physical Basis for Spectroscopic Estimates of Leaf Nitrogen Concentration [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 2001(75): 153—161.
- [ 29 ] Johnson L F, Billow-CR. Spectrometric Estimation of Total Nitrogen Concentration in Douglas-fir foliage [ J ] . *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**: 489—500.
- [ 30 ] Niu Zh, Chen Y H, Sui H Zh *et al.* Mechanism Analysis of Leaf Biochemical Concentration by Using Remote Sensing [ J ] . *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(2): 125—129. [ 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.]
- [ 31 ] Grossman Y L, Ustin S L, Jacquemoud S *et al.* Critique of Stepwise Multiple Linear Regression for the Extraction of Leaf Reflectance Data [ J ] . *Remote Sensing of Environment*, 1996, **56**: 182—193.
- [ 32 ] Stone, M L, Solie J B, Raun W R, *et al.* Use of Spectral Radiance for Correcting In-season Fertilizer Nitrogen Deficiencies in Winter Wheat [ J ] . *Transaction of the ASAE*, 1996, **39**(5): 1623—1631.
- [ 33 ] Tanner C B. Plant Temperature [ J ] . *Agronomy Journal*, 1963, **50**: 210—211.
- [ 34 ] Zhang R H. New Pattern of Estimating Crop Water Deficit status Based on the infrared Radiation [ J ] . *Science in China (Series B)*, 1987, (7): 776—784. [ 张仁华. 以红外辐射为基础的估算作

- 物缺水状况的新模式. 中国科学. B 辑, 1987, (7): 776—784.]
- [35] Idso S B, Jackson R D, Reginato R J. Remote Sensing of Crop Yields [J]. *Science*, 1977, **196**: 19—25.
- [36] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J. Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator [J]. *Water Resource Research*, 1981, **17**: 1133—1138.
- [37] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al.* Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-air Temperature and Spectral Vegetation Index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **49**: 246—263.
- [38] Wu X B, Yan S H Y, Tian G L, *et al.* Using NOAA/AVHRR Data to Monitor Drought with GIS Technique [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, **2**(4): 280—284. [武晓波, 阎守崑, 田国良等. 在 GIS 支持下用 NOAA/AVHRR 数据进行旱情监测 [J]. 遥感学报, 1998, **2**(4): 280—284.]
- [39] Yuan G F, Tang D Y, Luo Y, Yu Q. Advances in Canopy-temperature-based Crop Water Stress Research [J]. *Advance in Earth Science*, 2000, **16**(1): 49—54. [袁国富, 唐登银, 罗毅, 于强. 基于冠层温度的作物缺水研究进展, 地球科学进展, 2000, **16**(1): 49—54.]
- [40] Thomas J R, Nansen L N, Oerther G F *et al.* Estimating Leaf Water Content by Reflectance Measurement [J]. *Agronomy Journal*, 1971, **63**: 845—847.
- [41] Holben B N, Schutt J B, Memurtrey J. Leaf Water Stress Detection Utilizing Thematic Mapper Bands 3, 4 and 5 in Soybean Plants [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, **4**: 289—297.
- [42] Jackson R D, Ezra C E. Spectral Response of Cotton to Suddenly Induced Water Stress [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, **6**: 177—185.
- [43] M Susan Moran, Paul J Pinter, Jr Brent E Clothier *et al.* Effect of Water Stress on the Canopy Architecture and Spectral Indices of Irrigated Alfalfa [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **29**: 251—261.
- [44] Danson F M, Steven M D, Malthus T J *et al.* High-spectral Resolution Data for Determining Leaf Water Concentration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 461—470.
- [45] Gregory A Carter. Primary and Secondary Effects of Water Content on the Spectral Reflectance of Leaves [J]. *American Journal of Botany*, 1991, **78**(7): 916—924.
- [46] Wang J H, Zhao C J, Guo X W *et al.* Study on the Water Status of the Wheat Leaves Diagnosed by the Spectral Reflectance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, **34**(1): 104—107. [王纪华, 赵春江, 郭晓维等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究 [J]. 中国农业科学, 2001, **34**(1): 104—107.]
- [47] Wang J H, Zhao C J, Guo X W, *et al.* Study on the Water Content of Wheat Leaves by the Remote Sensing [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, **15**(4): 68—72. [王纪华, 赵春江, 郭晓维等. 利用遥感方法诊断小麦叶片含水量的研究 [J]. 华北农学报, 2001, **15**(4): 68—72.]
- [48] Inoue, Y, Moringa S, Shibayama M. Non-destructive Estimation of Water Status of Intact Crop Leaves Based on Spectral Reflectance Measurements [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1993, **62**: 462—469.
- [49] Penuelas J, Filella I, Biel C, *et al.* The Reflectance at the 950–970nm Region as an Indicator of Plant Water Status [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**: 1887—1905.
- [50] Shibayama M, Takahashi W, Moringa S, *et al.* Canopy Water Deficit Detection in Paddy Rice Using a High-resolution Field Spectroradiometer [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **45**: 117—126.
- [51] Penuelas J, Inoue Y. Reflectance Indices Indicative of Changes in Water and Pigment Contents of Peanut and Wheat Leaves [J]. *Photosynthetica*, 1999, **36**(3): 355—360.
- [52] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R *et al.* Estimation of Plant Water Concentration by the Reflectance Water Index WI (R900/R970) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**: 2869—2872.
- [53] Pietro Ceccato, Stephane Flasse, Stefano Tarantola, *et al.* Detecting Vegetation Leaf Water Content Using Reflectance in the Optical Domain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, (77): 22—33.
- [54] Tian Q J, Gong P, Zhao C J, *et al.* The Feasibility Analysis of Diagnosing the Water Status of Wheat by Spectral Reflectance [J]. *Science Aviso*, 2000, **45**(24): 2645—2650. [田庆久, 宫鹏, 赵春江等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析 [J]. 科学通报, 2000, **45**(24): 2645—2650.]
- [55] Bowman W D. The Relationships between Leaf Water Status, Gas Exchange, and Spectral Reflectance in Cotton Leaves [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **30**: 249—255.
- [56] Hunt E R, Rock B N. Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-infrared Reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **30**: 43—54.
- [57] Cibulka W G, Zetka E F, Rickman D L. Response of Thematic Mapper Bands to Plant Water Stress [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 1869—1880.
- [58] Tanvir H Demetriades-shah, Michael D Steven, Jeremy A Clark. High Resolution Derivative Spectral in Remote Sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **33**: 55—64.
- [59] Zhang L P, Zheng L F, Tong Q X. Estimating Biological Variable Using High Spectral Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, **1**(2): 110—113. [张良培, 郑兰芬, 童庆禧. 利用高光谱数据对生物变量进行估计 [J]. 遥感学报, 1997, **1**(2): 110—113.]
- [60] Huete A R. A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **25**: 295—309.
- [61] Grossman Y L, Usin S L, Jacquemoud S, *et al.* Critique of Stepwise Multiple Linear Regression for the Extraction of Leaf Reflectance Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **56**: 182—193.
- [62] Penuelas, J, Filella I, Biel C, *et al.* Cell Wall Elasticity and Water Index in Wheat under Different Nitrogen Availability [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(2): 373—382.
- [63] Nielsen D C, Halvorson A D. Nitrogen Fertility Influence on Water Stress and Yield of Winter Wheat [J]. *Agronomy Journal*, 1991, (83): 1065—1070.
- [64] Fernandez-S, Vida F D, Simon-E, *et al.* Radiometric Characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under Water and Nitrogen Stress [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(9): 1867—1884.

## Research Progress on the Water and Nitrogen Detection Using Spectral Reflectance

XUE Li-hong, LUO Wei-hong, CAO Wei-xing, TIAN Yong-chao

(*Nanjing Agricultural University, MOA Key Lab of Crop Growth Regulation, Nanjing 210095*)

**Abstract:** Water and nutrient are the main limitation factors for crop production. On-site and precise detection of crop water and nutrient content is necessary for improving crop water and nutrient management, and the use efficiency of water and nutrients; reducing environmental pollution caused by over fertilization; and promoting water-saving agriculture production. In this paper, firstly, a brief introduction to the eco-physiological basis of plant spectral characters and the principles of spectra detection of plant water and nitrogen content were presented. An overview was then given on the developments of the detection of crop water and nitrogen status by remote sensing. Finally, the current research highlight, the existing difficulties, and the future development trends and the prospect of remote sensing of crop water and nitrogen status were discussed.

**Key words:** water; nitrogen; ground remote sensing; spectra detection