植物营养与肥料学报 2006,12(6):902-912
Plant Nutrition and Fertilizer Science

基于光谱理论的作物营养诊断研究进展

王 磊,白由路*
(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要:随着光谱技术的发展及其自身的优点,应用光谱技术在作物营养诊断和养分估测方面的研究也越来越多。本文概要地介绍了植物光谱诊断的原理和生理基础,总结了高光谱数据的提取和处理方法;着重评述了光谱技术在作物氮、磷、钾和其它营养元素的营养诊断和养分含量估测的国内外研究状况和进展。文章指出,氮素营养的光谱诊断研究较多,提取出一些敏感波段,建立了光谱指数,并初步得到验证;磷钾营养的光谱诊断研究相对较少,并且结论也不统一;其它营养元素的光谱诊断只是略有涉及,需要进一步研究。本文还就当前作物营养光谱诊断研究的重点以及光谱数据采集和建立养分预测模型中存在的问题进行了分析讨论,并提出了今后的研究方向和应用前景。

关键词:植物营养;高光谱技术;光谱诊断
中图分类号:S121;O657.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2006)06-0902-11

Research advance on plant nutrition diagnosis based on spectral theory

WANG Lei, BAI You-lu*
(*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China*)

Abstract: With the development of spectral technology and its inherent advantage, more and more researches were carried out to investigate the application of spectral technology on plant nutrition diagnosis and nutrients contents prediction. In the article, firstly, the principle and physiological basis for plant spectral diagnosis was briefly introduced. Then the methods of hyperspectral data extraction and analysis were summarized focusing on the crops nitrogen, phosphorus, potassium and other nutrients nutrition diagnosis and nutrients contents prediction. A big research progress has made in the research concerning N nutritional spectral diagnosis, in which sensitive wave bands were put forward and spectral indices were constructed and validated. However, the research concerning P and K nutritional spectral diagnosis was much less comprehensive and the result were inconsistent; other nutrients spectral diagnosis were touched upon in some sort and much research should be continued further. In addition, a detail analysis for the existing difficulties about spectrum data collection and nutrients prediction models was performed. Finally, the future advance trends and the prospect of application were brought up.

Key words: plant nutrition; hyperspectral technology; spectral diagnosis

随着现代科学技术的发展,特别是计算机技术、空间技术和信息技术的迅猛发展,人类社会已经步入信息时代,人们也越来越借助于现代高新技术来解决农业生产中的问题。人们利用全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)在空间尺度上挖掘田间信息的同时,遥感技术(RS)的发展,也日益深入到农业生产中。近30多年来,农业遥感在沿着单一波段→多光谱→高光谱方向发展的同时,遥感技术(RS)在作物长势监测与估产[1-2]、农情宏观预报、环境监测、灾害防治、农业资源调查等方面作出了重要贡献[3]。

在农作物生产中,尤其是在当今越来越显现其

收稿日期:2005-06-08　　**修改稿收到日期**:2005-10-08
基金项目:上海市科技兴农重点攻关项目[农科攻字(2001)第2-8号]资助。
作者简介:王磊(1978—),男,河南原阳人,博士研究生,主要从事植物营养光谱诊断研究。*通讯作者

优势的精准农业中，养分管理是农业生产中的重要环节之一。利用作物的光谱特性对其营养状况实时监测和快速诊断一直是精准农业中的研究热点[4]。植物叶片的光谱特征与叶片厚度、叶片表面特性、水分含量和叶绿素等色素含量有关[5]，同时也与植物营养状况密切相关[6-8]。早在 20 世纪 60、70 年代，美国农业部的研究人员先后测定和分析了干燥和捣碎的多种植物叶片光谱，获得了 400nm～2400nm 光谱范围内大约 42 处对应一定生物化学成分的吸收特征，它们可以帮助我们理解光谱吸收特征的生物学意义，为运用遥感手段估测叶片生化组成及含量提供了可能[9]。随着高光谱遥感技术的发展，高光谱技术以它的光谱分辨率高（3nm～10nm）、波段连续性强（在 400nm～2500nm 范围内有几百个波段）等优点和特点可以用来监测农作物长势和营养状况并反演农作物的理化特性。

17 种必需营养元素是作物形态建成、完成整个生育期所必需的，它们在作物新陈代谢中起着不可代替的作用。因此，作物养分的管理是以高产、优质、高效为目标的作物生产中最为重要的管理内容之一。本文就光谱技术在植物营养中针对大、中、微量营养元素的应用作一综述。

1　植物光谱诊断原理

地物漫反射光谱包含着反射物结构和组成的丰富信息，是农田生物环境信息获得的重要手段。农作物和自然界存在的各种物体一样，其体温总在绝对温度 0 K 以上，因此，它们就随时随地都在不断地发射各种波长的电磁波，并对外界照射来的人工和自然电磁辐射发生一定的吸收和反射[10]。每一种物体的内部结构和表面特性均不相同，因此对不同波长的电磁波的吸收和反射都不同。物体的这种对不同波段光谱的响应特性叫光谱特性。植物光谱诊断的基础便是植物的光谱特性[11]。植物叶子中生物化学成分含量的变化在光谱维方向上表现在其吸收波形的变化，植物光谱的导数实质上反映了植物内部物质（叶绿素及其它生物化学成分）的吸收波形变化，因而可通过植物的光谱特性监测植物的营养状况[12]。

植物缺乏营养元素不仅会严重影响其生长速度和产量，而且还能引起植株体内相关生化成分的变化，外观表现在叶片、叶色、形态、结构以及其他各种不同的缺素症状。宏观上，作物的长势、冠层结构、叶片颜色和厚度及微观上叶片色素、水分等某些理化组分的含量等发生不同的变化，都会引起某些波长处的光谱反射和吸收产生差异，从而产生了不同的光谱反射率；在非成像光谱上表现出反射率不同的波形曲线，在成像光谱上表现出图像亮度、饱和度等色阶的差别。然后利用光谱上产生显著差异的敏感光谱或关键波段建立估测模型，反演作物体内生化成分含量。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量或浓度的相关关系为基础的[11]。

2　植物高光谱遥感信息提取和处理方法

鉴于高光谱信息的海量资料，根据研究对象和内容的不同，所要求的精度不同，采用的方法也不同。不同的方法得到的光谱信息不同，所能说明的问题也不一样。下面将适用于植物光谱分析的方法归纳如下：1）光谱微分技术　研究表明，光谱微分处理可减弱土壤背景和大气等环境因素对目标光谱的影响，提高信噪比，达到增强光谱参数和生物化学成分的相关性[13-14]。2）多元统计分析技术　比如偏最小二乘回归，主成分分析，多元线性回归、多元逐步线性回归和聚类分析等数据分析技术。这些技术着眼于光谱反射绝对值或其变换形式（如波段反射率、对数变换以及各种植被指数）与不同生物物理、化学参数（如 LAI、植株全氮、叶绿素含量、蛋白质等）建立多元回归估计（预测）模型。其中偏最小二乘回归在实际应用中得到了较好的效果[15-19]。3）基于光谱位置（波长）变量的分析技术　它是一种比较间接的方法，考察光谱波长位置的变化量与生物物理、化学参数的关系，如“红边”效应。“红边”是反射光谱的一阶微分的最大值对应的光谱位置（波长），通常位于 680nm 至 750nm 之间。这种红边位置依据叶绿素含量、生物量、植物年龄、植物生长活力和物候的变化而变化，因而可以提取红边光学参数，进而估计生物化学参数。例如 Curran 等[20]用标准一阶导数法（FDS）、深度归一化吸收深度法（BNC）和吸收面积归一化的吸收深度法（BNA）3 种方法比较系统地研究了用光谱参数估测干叶片中的生化成分（叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、纤维素、木质素、氮、水、磷、蛋白质、氨基酸、糖、淀粉的积累量）含量；另外还有人利用红边斜率、红边振幅、近红外平台及近红外平台振幅等光谱参数研究与农学参数的相关性[21]。4）光谱匹配技术　此方法用于实测地物光谱对参考光谱的匹配或地物光谱与光谱数据库的比

较,以求算它们之间的相似性或差异性。Meer & Bakker[22]建立了交叉相关光谱匹配技术 考虑了目标光谱和参考光谱之间的相关系数、偏度和相关显著性,提高了光谱分析精度。5)小波变换技术 研究表明,小波变换在近红外光谱数据的预处理、数据压缩、小波系数的模型传递等方面得到很好的应用,是一项具有良好发展前景的近红外光谱分析技术[23]。6)混合光谱分解技术 这类模型包括分析光谱资料以确定在同一像元内不同成分(目标物)所占的比例或者识别在已知成分分析中外加的成分[24]。7)参数成图技术 它采用统计模型或概念性模型预测生物参量并成图,并分析这些生物物理、化学参量在空间上的分布。Curran 等[25]利用AVIRIS高光谱图像数据编制生物化学参数图,以估测叶绿素、N、木质素和纤维素含量。6)、7)两种方法用于研究成像光谱应用的较多。8)机理模型反演技术[26]。这里包括叶片光学特性模型 PROSPECT 和冠层模型 SAIL。PROSPECT 模型是一个基于"平板模型"的辐射传输模型,通过模拟叶片从400nm到2500nm的上行和下行辐射通量从而得到叶片的光学特性,叶片反射率和透过率。该模型考虑了三种生化组分,叶绿素、水分、干物质。其中干物质代表纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质、淀粉等。冠层辐射传输模型 SAIL 假设冠层均匀分布,描述了在这个均匀冠层中上行和下行的四个通量,其中参数包括叶片反射率、透过率、叶面积指数、平均叶倾角、土壤反射率以及水平能见度。这两种模型是基于生物物理机制,它能解释光与叶物质的作用机制,原理清楚,加之在模型的初始假设范围内,不受限于时间地点等因素。因此,近年来该方法是植被生化组分参数提取研究的又一个重要的方向。

3 作物氮磷钾的光谱诊断及其研究进展

3.1 作物氮的光谱诊断及其研究进展

氮素是作物生长发育周期中需要量最多的营养元素之一,也是对作物生长、产量和品质影响最为显著的营养元素之一。20世纪70年代以来,科学家们就进行了大量的基础研究,研究利用光谱诊断氮素的可能性,寻找氮素的关键波段(敏感波段)及其反射率在不同氮素水平下的表现,试图在氮素和光谱之间建立某种关系。

首先科学家们研究了不同氮营养条件下的作物原始光谱的表观响应。研究表明,受氮素胁迫的玉米(*Zea mays* L.)叶片在可见光区的光谱反射率比正常玉米的光谱反射率要强[27-28];在近红外(NIR)波段反射率比正常玉米的光谱反射率要弱[29]。Walburg 等[30]发现,受氮素胁迫的玉米与正常处理的玉米相比,其冠层光谱反射率在红光波段增加,而在近红外波段有所下降。Everitt 等[31]研究认为,野牛草(*Buchloe engelm* Poaceace)在不施氮的情况下,在可见光 500nm ~ 750nm 之间有最高的光谱反射率。在小麦(*Triticum aestivum*)上,Hinzman 等[32]研究表明,氮肥处理的小麦冠层反射率在可见光区下降,在近红外区上升,在中红外区下降。而我国学者程一松等[33]在研究夏玉米的叶片光谱特征时进一步指出,在光谱特征曲线上,氮素反映的最为显著。在近红外波段处的反射率,随氮肥用量的增加而提高,在可见光波段处正好相反,随着氮肥用量的增加,反射率降低,这一现象在绿光波段最为突出。缺氮会造成叶绿素含量的降低,从而使反射增加,表现在光谱特征曲线上就是反射峰的增高。由此可见,作物氮素的丰缺能显著影响其冠层或叶片的原始光谱反射率,当作物受氮肥胁迫时,其叶片和冠层的光谱反射率在可见光区域是呈增加趋势,而在近红外区域是呈下降趋势。因此,利用光谱反射率来估测作物氮素的营养状况是可行的。

为了进一步估测作物氮素含量,研究人员寻找与氮素相关性较高的波段或波段组合建立光谱指数或植被指数,并试图与植株或叶片氮含量建立数学关系。早在 1972 年 Thomas 等[34]利用 550nm 和 670nm 这两波段定量估算甜椒(*Capsicum annuum*)的氮素含量,精度达 95%;Jackson 等[35]分析了缺氮与正常处理的甘蔗(*Saccharum officinarum*)RNIR/RRED 比值达极显著差异($\alpha = 0.01$)。Shibayama 等[36]在不同品种间的水稻(*Oryza sativa*)试验上发现,单位土地面积上的叶片氮含量与 R620 和 R760 的线性组合以及与 R400、R620 和 R880 的线性组合均有较好的回归关系,且测量值与预测值有较好的线性关系,品种间无差异;Fernandez 等[37]发现 660nm 和 545nm 两波段的线形组合可以预估小麦的氮含量,且不受氮肥处理的影响。Blackmer 等[28,38]两次研究表明,550nm 和 710nm 波长处的反射率能更好的诊断玉米氮素含量,并且指出 $R_{550-600}/R_{800-900}$ 能敏感地反映出氮素胁迫。Stone 等[39]试验表明,用红光 671nm 和近红外 780nm 波长处的光谱辐射值可估计植物全氮含量;他们还认为冬小麦适时补足氮素计算出植物氮的光谱指数。Inoue 等[40]研究发

现，$(R_{1100}-R_{660})/(R_{1100}+R_{660})$与单位面积叶片氮累积量（$<3g/m^2$）有密切关系；而且$R_{550}$、$R_{830}$、$R_{1650}$和$R_{2200}$四个波段组合能有效地估计叶片氮累积量。Kokaly 和 Clark[41-42]研究发现，2054nm 和 2172nm 这两个波段与氮含量高度相关；宫鹏等[43]在利用高光谱数据分析巨杉（*Abies*）的全氮、磷、钾含量时得出，植被指数$(R_{760-850}-R_{350-400})$和$(R_{760-850}-R_{350-400})/(R_{760-850}+R_{350-400})$能预测 N、P、K 的含量，置信度达99%；在高光谱数据与 TN、TP、TK 单变量分析中，相关性最差的为 TN；而在多变量回归分析（主成分分析）中，回归性最好的为 TN。浙江农业大学的周启发等[44]的水稻光谱试验研究表明，水稻叶片和稻穗的光化学反射指数（PRI）随着施氮量的增加而上升；归一化色素总量/叶绿素比值指数（NPCI）随着施氮量的增加而下降；叶片 RNIR/RRED 值随着施氮量的增加而增加；而稻穗 RNIR/RRED 值在不同氮处理下基本不变。王纪华等[45]在研究冬小麦田间冠层光谱反射率与叶片含氮量间的关系时发现，820nm～1100nm 波段的光谱反射率与叶片含氮量极显著正相关；1150nm～1300nm 波段的光谱反射率与叶片含氮量显著相关。也有人用光谱参数（红边、黄边、蓝边等）来预测植物氮含量，但在精度上有所不一[43,46]。综上所述，研究者们在建立光谱指数或植被指数时，大都选择了红光、近红外或者绿光波段的光谱反射率与氮素建立关系。由此可见，氮素在这些波段的光谱响应较为显著。

然而，田间条件下影响作物光谱数据采集的因素是众多的，如光照条件，非目标物光的辐射，以及测量角度和其它环境因素。研究表明，导数光谱有利于限制低频背景光谱（通常是土壤、凋落物及地物光谱）对目标光谱的影响[47-50]。对数变换不仅趋向于增强可见光区的光谱差异，而且趋向于减少因光照条件变化引起的乘性因素影响。为了进一步消除和淡化上述这些因素的负作用，研究者们对原始光谱数据进行导数变换和对数变换，然后再与氮素做相关分析，并得到准确度和精确度更高的结果。Don H. Card 等[51]分别对 670nm、620nm、600nm 的光谱反射率作了负对数（log1/R），log1/R 的一阶导数、log1/R 的二阶导数的变换，并与针叶松（*Pinaceae*）叶片氮含量相关分析，结果预测值与实测值相关度分别达到 0.95、0.93、0.88。同样，Yoder 和 Pettigrew－Crosby[52]得出了短波红外波段区域 log1/R 的一阶导数值最能反映枫树（*Aceraceae*）叶片全氮含量的结果。可见，log1/R 和它的一阶导数能较好的估计植物叶片氮含量。牛铮[53]选择 2120nm 和 1120nm 处的叶片光谱反射率的一阶导数与鲜叶含氮量建立线性回归方程，预测值与实测值的相关度达 80%。宫鹏等[43]利用巨杉的高光谱数据与 NPK 含量相关分析得出，决定系数较好的光谱参数是“蓝边”和“黄边”的最大一阶导数。谭昌伟等[54]研究夏玉米光谱特征时指出 R653 的导数值与叶片全氮含量有较好的相关性。因此，寻求一种或多种的光谱数据处理方法来消除干扰因素的影响也是提高高光谱反演精度的重要任务之一。

研究人员也试图利用作物的光谱值来区分氮的不同营养水平，而这些光谱参数主要是用近红外和可见光波段的反射比。研究表明，$R_{760-900}/R_{630-690}$[30]和$R_{550-600}/R_{800-900}$[38]都可用来区分玉米氮的不同营养水平。我国学者王人潮、周启发等[6]从上世纪 80 年代中期就开始对水稻氮素营养水平与光谱特征的关系作了大量系统深入的研究。诊断水稻氮素营养水平的叶片光谱敏感波段为 760nm～900nm、630nm～660nm 和 530nm～560nm。通过光谱测定及其变量的运算，也可以分辨出不同的氮素营养水平。唐延林等[55]研究表明，孕穗期的红边位置和红边斜率与氮素水平都呈极显著地正相关。通过这些研究，我们可以利用这些波段的光谱反射率及其衍生量来判断作物的营养状况。

不仅在营养差别上作物有不同的光谱响应，而且不同的作物生育期，其光谱响应也是不同的。Ma 等[56]研究表明，用光谱反射率预测谷物产量，最好在玉米开花期前，并且此时光谱反射率可以指示氮的丰缺程度。赵春江等[21]用红边振幅和近红外平台振幅反映了冬小麦叶片全氮含量，结果表明，二者与叶片全氮含量在整个生育期内均呈正相关趋势，且相关程度随生育进展而不断增强。Osborne 等[57]研究用光谱诊断玉米氮磷营养时指出，植物体内氮含量的预测应在红光和绿光波段，但具体波段随生育期的不同而改变。另据唐延林等[55]在不同大麦（*Hordeum vulgare* L.）品种上试验表明，秀麦 3 号（大麦品种）在孕穗期的红边位置和红边斜率与氮素水平的相关系数分别为 0.884^{**}、0.918^{**}；浙农大 3 号（大麦品种）的红边位置和红边斜率与氮素水平的相关系数分别为 0.999^{**} 和 0.994^{**}。显然，大麦孕穗期的光谱参量——红边位置和红边斜率与氮素水平都呈极显著地正相关。薛利红等[58]研究水稻冠层光谱时发现，560nm 波段处光谱反射率与叶片氮含量呈负相关，并且相关性在整个生育期发生变化；

而560nm波段处光谱反射率与叶片氮累积量在整个生育期存在幂函数的关系；叶片氮累积量比叶片氮含量在遥感系统中更能指示植株冠层氮素状况；当叶片氮累积量较高时（$>9\ g/m^2$），单个波段光谱反射率不能监测植株冠层氮素状况。因此，比值指数（R810/R560）与叶片氮含量有较好的正相关，最好在拔节期；比值指数（R810/R560）与叶片氮累积量呈正相关关系，且不同生育期间和不同氮处理间无显著差异。我们的研究表明[59]，玉米氮素光谱营养诊断的敏感时期是拔节期和喇叭口期；拔节期和喇叭口期采用可见光波段的光谱反射率可靠性较高，而开花吐丝期采用近红外波段的光谱反射率可靠性较高（资料待发表）。由此推断，作物的不同生育时期，其光谱响应的敏感程度和敏感波段也是存在变异的。因此，我们应根据作物的生育期，选择相应的敏感波段，构建相关度高的光谱参数来诊断作物的营养状况。

20世纪70年代美国科学家Knipling就发现叶绿素控制着作物可见光波段的光谱反射率[60]。在Thomas和Gausman的研究结果中也表明叶绿素直接影响着植物在可见光波段的反射率[61]，其显著差别主要表现在550nm～600nm波段上[28-29]，这些显著差别跟叶片中叶绿素含量是紧密相关的[62]。而植物叶片中的叶绿素的含量和植株体内的氮素含量密切相关（尤其当植株缺氮时）[63-68]，因此，可用叶绿素的含量间接地指示植物的氮素含量。许多学者就针对叶绿素及其衍生参数与光谱反射率的关系作了大量的研究，试图间接寻找氮素与光谱间的关系。

在研究叶绿素和植被光谱关系当中，用的较多的是“红边”参数（红边位置、红边斜率、红边振幅）和近红外光谱参数（近红外反射峰值、近红外平台振幅）等。Horler等[69-71]研究了植被光谱与叶绿素浓度的关系，并提出了“红边”在反映植被叶绿素浓度中的作用。陈斌[72]利用反射光谱特性测定茶叶鲜叶的叶绿素含量时，取波长562nm和676nm处归一化值进行二元一次回归，相关系数达0.976，平均相对误差小于5%。王秀珍等[73]用红边参数来预测叶片的叶绿素含量，研究表明红边位置与上层叶片的叶绿素含量相关性最大，用它来定量上层叶片的叶绿素含量是可行的，其中与上层叶片中的叶绿素a相关性达极显著，说明可用红边参数去估计水稻冠层的叶绿素含量。赵春江等[21]通过对冬小麦不同生育时期红边参数变化规律的研究表明，叶片全氮含量与红边振幅及近红外平台振幅间在全生育期均呈现正相关趋势，且相关程度随生育进展而不断增强；叶绿素a+b总量与红边振幅间，在起身期至拔节期为负相关，在抽穗期至乳熟期为正相关。叶绿素a+b与近红外平台振幅间呈现正相关趋势，且相关程度随生育进展而不断增强；据此，红边振幅和近红外平台振幅两个指针可能用来监测小麦生育状况并指导肥水调控，其中用近红外平台振幅推算叶片全氮含量，用红边振幅推算叶绿素总量。程一松等[74]在提取了氮素胁迫下的冬小麦其中重要的近红外反射峰值、绿峰和红端位移特征，与冬小麦的叶绿素密度、叶绿素含量等生物物理参数进行相关分析，建立了线性光谱模拟模型。其中叶绿素含量与近红外反射峰值的拟合度（R^2）除乳熟期外，都在0.9以上；孕穗期反射峰值和绿峰差异最为显著，红端位移最大，同时根据上述模拟模型的分析，孕穗期的模拟模型也有显著的相关关系。综合分析，孕穗期是利用高光谱遥感进行作物长势和养分诊断研究的最佳时期。唐延林等[75]的研究表明，水稻叶面积指数（LAI）与比值植被指数（RVI）及归一化差值植被指数（NDVI）呈显著相关，不同氮素水平的水稻叶片的叶绿素、蛋白质及纤维素含量与LAI之间的R^2在抽穗期均达到0.75以上，其中叶绿素、纤维素含量与光谱变量的相关达显著水平；不同时期纤维素与光谱变量及LAI之间相关达显著水平，从而证明通过光谱法可以推算水稻叶片的叶绿素含量、蛋白质含量和纤维素含量。这些研究表明，用“红边”参数等光谱变量来反演作物叶绿素和其它生化组分是可行的，而这些生化组分是与作物氮素营养状况分不开的，从而可以简接评价作物氮素营养状况。

3.2 作物磷的光谱诊断及其研究进展

与氮相比，植物中磷营养与光谱特性的关系研究较少。据Al-Abbas等[27]和Milton等[77]研究，植物磷营养元素的多少对光谱特性有较大影响，但其影响不像氮营养水平那样一致。这是因为植物轻度缺磷时，叶绿素浓度有可能提高，但在严重缺磷时，叶片光谱分析才能用于水稻磷营养诊断。因为缺磷的植物叶片的细胞其伸长受影响的程度超过叶绿素所受的影响，因此其单位叶面积中叶绿素含量较高，较正常植株叶片呈暗绿色；又因为缺磷的植株，体内碳水化合物代谢受阻，有糖分积累，易形成花青素[76]。所以，缺磷的植株的叶片的光谱反射率受叶绿素和花青素这两个色素的影响较大，因而叶片光谱分析较为复杂。早在1974年Al-Abbas等[27]就做了缺磷玉米的光谱试验，结果发现缺P的玉米叶片

在 830nm、940nm、1100nm 处的光谱反射率较高。Milton 等[77]在大豆（*Glycine max*）的水培试验中发现，缺 P 植物在绿光和黄光区其光谱反射率有所增加，并不表现出红边位移特征。Sembiring 等[78]用 435nm 处的反射率和 695/405nm 比值这两个光谱变量作为判断狗牙根（*Cynodon dactylon* L. Pers.）吸收 P 的指标。Ponzoni 等[79]研究了缺磷桉树（*Eucalyptus*）苗期叶子光谱特征时发现，积分球的定向半球反射率与叶片含磷量呈正相关关系。程一松等[33]研究夏玉米磷的光谱特征时指出，在可见光波段范围内，其光谱特征与氮相反，光谱反射率随磷肥用量的增加而提高，约在 580nm～710 nm 波段内更为明显，在近红外波段则与氮素变化趋势相似，即光谱反射率也随磷肥用量的增加而提高，但其红边位置更靠近可见光波段，在近红外区域光谱特征曲线的区分不如氮素胁迫明显，这是因为作物轻度缺磷时，叶绿素浓度有可能提高。Ming Chen 等[15]用近红外光谱分析甘蔗（*Saccharum officinarum*）叶片中的磷含量，最大拟合度达 0.99，标准差与标准误之比为 32。说明近红外光谱能很好的预测甘蔗叶片磷含量。Osborne 等[57]用光谱诊断玉米氮磷营养时指出，在玉米生长早期，并且在缺磷较为严重时，用蓝光区（440nm～445nm）和近红外波段（730nm～930nm）可进行植物体内磷含量的诊断，而在晚期和土壤中磷浓度较高时，不适合磷的诊断。我们在 2003 年的玉米试验研究表明，植株全磷含量与叶片光谱反射率相关关系曲线在整个波段上十分活跃，呈“跳跃式”向长波方向前进。在 355nm 左右，相关系数达 0.66，在近红外 770nm～790nm 相关程度也较高，相关系数达 0.63[80]。这与 Osborne 的结果较为相似。

综上所述，植物磷营养的光谱诊断研究的还不是十分深入，其现在所得结果也不统一，而且也需要进一步验证。因为植物缺磷时，体内易产生花青素，同时叶绿素浓度有可能提高，其磷的光谱反射率受它们的双重影响，因此，影响其光谱特征曲线变化的因素较为复杂，其不同磷营养水平下控制其光谱反射率变化的内在的生理生化机理、农学参数和光谱参数的关系、以及作物磷营养诊断的最佳光谱波段和最佳时期都没有研究清楚，所以有待于进一步深入。

3.3　作物钾的光谱诊断及其研究进展

钾营养元素对植物光谱特性的影响介于氮营养与磷营养之间。植物钾状况与光谱特性的关系研究较少，结果也不太一致。钾虽对叶绿素的形成有影响[81]，但与氮相比，不起主导作用。但由于钾的营养状况与植物叶片的结构和水分状况关系密切，所以钾的营养状况必然会对近中红外的光谱信息产生影响，因此可从近中红外波段来寻找钾营养的光谱信息。Al-Abbas 等[27]在他们的玉米叶子光谱研究中指出，K 营养元素亏损导致近红外反射率（830nm，940nm，1100nm）下降。Jackson 等[35]分析了缺钾甘蔗比不缺钾处理的 R_{NIR}/R_{RED} 比值在 90% 置信水平有较大差异。王珂等[8]研究了不同钾营养水平的水稻冠层和叶片的光谱特性。结果表明，580nm～710nm 和 750nm～950nm 两个波段处的不同钾营养水平水稻冠层光谱反射率的差异均达显著水平，可把这两个波段作为检测水稻钾营养水平的冠层光谱敏感波段。在叶片水平上，在近红外波段区间（780nm～1300nm）钾营养水平越低，反射率越高，这与氮营养的影响正好相反，这可能是缺钾时叶片表皮细胞发生变化，叶面厚度增加，叶片栅栏、海绵组织的细胞收缩和局部破裂的结果。在 1450nm 波段处，随着钾营养水平的降低，吸收谷明显变浅，这可能是因为水稻缺钾后叶片含水量降低所致。在中红外波段（1650nm～1800 nm），钾营养水平越低，光谱反射率越高。Ponzoni 等[79]研究发现，缺钾桉树苗期叶子症状能容易地用可见光区光谱检测出来。程一松等[33]研究钾肥处理下的夏玉米的光谱特性指出，钾对其光谱特性的影响更有其特点，在低氮低磷水平下，它与氮素胁迫的变化基本一致，即可见光波段处随钾肥用量增加而反射率提高，近红外波段区域随钾肥用量增加而降低，但是在高氮高磷水平下却正好相反。另有研究表明，影响水稻叶片光谱特征的因素相对较少。缺钾水稻叶片的光谱特征与缺氮时的光谱特征相比，在可见光区基本相似，但在近红外区却不同，缺钾时水稻叶片的近红外反射率比正常叶片高，而缺氮时水稻的近红外反射率比正常叶片低。另外，钾的光谱曲线在 1450nm 处有一吸收谷，在 1650～1800nm 处有一反射平台这一特征。宫鹏等[43]在研究巨杉高光谱数据与全氮磷钾含量相关时，除了建立植被指数来预测钾外，在单变量分析中，全钾含量与光谱参数相关性最大。我们研究发现，玉米植株全钾含量与叶片光谱反射率的相关程度在可见光和近红外都变化不大，且均呈正相关关系，但在紫光波段 400nm 处相关性较强，相关系数达 0.71。因此可用紫光波段 400nm 处的光谱反射值来诊断植株体内钾含量[80]。

总的来讲,植物钾的营养状况与其光谱特性研究的还少,就目前的研究结果来看也是仁者见仁,智者见智。无论是在可见光波段还是在近、中红外波段,都没有完全揭示植物不同钾营养状况时的光谱变化机理和规律。与氮相比,植物钾营养的光谱特性还处于表观现象阶段,涉及其内在本质的研究还很少。同磷一样,影响其光谱特征曲线变化的内在生理因素没有完全研究清楚,其不同钾营养水平下控制其光谱反射率变化的内在的生理生化机理、农学参数和光谱参数的关系、以及作物钾营养诊断的最佳光谱波段和最佳时期都没有研究清楚,所以有待于进一步深入。

3.4 作物其它营养元素的光谱诊断及其研究进展

与大量营养元素一样,植物体内中、微量元素的生理功能同等重要。它们在植物新陈代谢中起着重要作用,缺一不可。植物营养元素状况的改变直接影响其光谱特征的变化[27,30,77],中、微量营养元素对植物光谱特征的影响与大量营养元素具有相似性,但影响程度差异较大[5]。中、微量营养元素在植物光谱中的响应;国内外学者对此也进行了不少的研究。

研究发现缺 Ca 的玉米叶子在近红外波段(830、940 和 1100nm)的光谱吸收较低而反射较高;缺 Mg 和 S 的玉米叶子在这些波段的光谱吸收较高而反射较低[27]。Clark 等[82]研究了近红外反射光谱与冰草(*Agropyron cristatum*)、牛毛草(*Festuca*)和三叶草(*Trifolium*)等草本植物体内 Na、K、P、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 以及 Ca/P、K/Mg 和 K/(Ca + Mg)的关系,结果表明,适宜用近红外光谱分析的元素有 K、P、Ca、Mg。Milton 等[77,83]在紫萼(*Hosta ventricosa*)和大豆(*Glycine max*)的光谱试验中发现,作物缺 Co、Ni、Zn、As 和 P 时,其 500nm ~650nm 的光谱反射率升高,而且红边位置向短波方向转移。Adams 等[84]发现大豆叶片 Mn 浓度下降,其光谱反射率上升;其红边位置也向短波方向转移。Masoni 等[85]研究玉米、小麦、大麦和向日葵(*Helianthus annuus*)叶片光谱发现,Fe、S、Mg 和 Mn 营养元素的缺乏,导致玉米、小麦、大麦和向日葵叶片光谱吸收下降,反射和透射升高,但其结果与 Al-Abbas 的研究相反。马超飞等[86]在研究林灌木叶片内微量元素与光谱特征关系中发现,微量元素在整个波长范围内均有响应;且 Co 的含量与 560nm 处光谱反射率存在强的负相关;Mn、B、Mo 和 Zn 与不同波段中心波长的反射峰值有较好的相关性。杨俐苹[87]在白菜(*Brassica oleracea*)苗期光谱试验中发现,体内养分含量相关性高的,在光谱维上同样也表现较高的相关;并且根据不同营养元素在光谱维方向上的相关曲线,可把营养元素分为三类:一类是 N、K、Ca、Cu、Fe,另一类是 P、Mg、Mn,第三类是 Zn。类似这样的试验很多,但大多只是表面的研究,不是很深入,并没有真正揭示营养元素的光谱响应机理。

4 结论与展望

综上所述,众多学者对作物大、中、微量元素的营养与其光谱特性做了大量的研究,并且利用不同的光谱提取和分析方法,从不同角度说明了作物营养与其光谱特性存在的密切相关关系。探明作物营养光谱特性的最终目的在于对作物进行适时监测和诊断,及时调整田间管理措施,提高肥料利用率,节约成本,最终保证作物的优质高产。在高光谱技术的支持下,经过大量的试验研究,在氮素营养方面,已经基本确定了敏感波段范围,但是在如何利用这些敏感波段或敏感波段组合建立回归关系或估测模型,或者在更高精度上估测植物氮含量,或给作物氮营养水平分级等问题上还是说法不一。而在磷、钾和其它中、微量营养元素方面,敏感波段和敏感时期的选择以及作物不同生育时期的光谱敏感波段还未探讨清楚,因此在这个问题基础上的其它深入研究仍是凤毛麟角。

通过不同营养元素的作物叶片或冠层光谱特征可知,在全光谱范围(350nm ~2500nm)内获取的光谱反射率实际上是植株体内代谢产物或其中间产物(纤维素、半纤维素、淀粉、糖类、蛋白质、氨基酸等),或叶绿素、水分,或细胞排列结构,细胞水化度以及植物叶片表面物理特性,冠层结构和裸露土壤、凋落物综合作用的光谱特征值。因此,营养元素的含量与不同波段间光谱值的相关性不是它们的直接关系,而是在该营养条件下,作物本身与环境之间所形成系统对光谱的响应值。因此,挖掘高光谱信息,寻求影响作物营养光谱形成的主导因素,探明其内在机理,乃是完善作物营养光谱理论的重要任务之一。另外,单因素下作物的光谱特性的差异性比较、作物营养光谱图库的建立也是作物营养光谱理论的重要内容之一。利用作物光谱模型反演体内生化成分的含量,根据作物体内参与品质形成的生化成分的合成和运移规律对品质进行诊断和预测等这些方面,还未见系统的报道。基于叶片或冠层垂直光谱反射率的研究较多,但不同观测角度的关于作物株高、生

物量、完全展开叶片数、叶龄指数等农学参数的光谱监测研究较少;养分间交互作用的作物光谱反应很少报道。作物营养光谱诊断精度的提高,需要从传感器、传输模型以及目标物的精确描述等多方面挖掘潜力。对于作物体内再利用程度高(N、P、K、Mg)的营养元素,当作物受到营养胁迫时,它们会向新生组织转移,形成不同叶位间垂直分布规律。因此,对作物进行分层光谱分析也是提高营养诊断精度的重要方法之一。这在王纪华[88]的报道中也有论述。

但是影响作物光谱数据采集的因素很多,除了光谱仪自身的信噪比外,在确定作物自身的物理化学参数的时候就存在许多困难;另外所建立的光谱模型受作物类型、品种、生育阶段、生长条件、冠层形态、观测和辐射几何角度、土壤背景和植物光谱特性以及测量环境等诸多因素的影响,以上某些结论在地域和年份间不能得到验证和应用,只能适用于特殊的条件。另外,在建立模型过程中,回归分析会出现过度拟合现象并且某些重要的波段可能被忽略。因此,研究一种正确和普遍的监测和预测作物营养状况的模型仍是一项艰巨的任务。

尽管诸如此类的不确定影响因素的存在,但鲜叶光谱分析能克服常规化学分析的弊端,它具有非破坏性、分析时间短、不需要化学药品、操作简单、自动化程度高等优点,因此,许多研究人员致力于鲜叶和冠层光谱特性与养分含量或化学组成相互关系的研究。寻求高准确度和精确度的光谱数据处理方法,充分挖掘高光谱信息,遴选作物不同生育期的敏感波段,构建多波段组合的光谱植被指数,提高作物生化成分的预测精度,这需要大量的试验去验证和修正。但如何解决上述这些制约因素,是摆在科研人员面前的一个实际问题,一方面要通过控制和减少测量时外界因素的干扰,努力提高光谱资料测量的精确度,减小数据噪声;另一方面选择合适的作物生物物理和生物化学参数很重要;再者研究建立适用于不同作物类型、不同生育期的量化模型,研制出相应的作物营养光谱诊断仪,实现快速、简便、非损伤地评价作物的长势和营养状况,是高光谱评价作物营养状况和品质的发展趋势。随着研究的深入,高光谱资料给我们提供更多连续的窄波段信息,我们可以从中选择和构造新的光谱测量值,建立新的植被指数,以提高估计生化成分浓度或含量的精度。因此基于植物营养的光谱理论有着广泛的研究和应用前景。

参考文献:

[1] 陈沈斌. 小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993.
Chen S B. Proceedings of the remote sensing symposium on estimating the yield for wheat, corn and rice[M]. Beijing: China Press of Technology, 1993.

[2] 李建龙,蒋平. 遥感技术在大面积天然草地估产和预报中的应用探讨[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(2):153-158.
Li J L, Jiang P. The Study on the remote sensing technology in estimating and forecasting grassland field applications[J]. J. of Wuhan Technical Univ. of Surveying and Mapping, 1998, 23(2): 153-158.

[3] 陆登槐. 农业遥感的应用效益及在我国的发展战略[J]. 农业工程学报,1998,14(3):64-70.
Lu D H. The application benefit and development strategy of agricultural remote sensing in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1998, 14(3): 64-70.

[4] 金继运,白由路. 精准农业与土壤养分管理[M]. 北京:中国大地出版社,2001. 10-15.
Jin J Y, Bai Y L. Precision and soil nutrients management[M]. Beijing: China Press of Land, 2001. 10-15.

[5] 王珂,沈掌泉,王人潮. 植物营养胁迫与光谱特性[J]. 国土资源遥感,1999,39(1):9-14.
Wang K, Shen Z Q, Wang R C. Vegetation nutrient condition and spectral characteristics[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 1999, 39(1): 9-14.

[6] 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.
Zhou Q F, Wang R C. Relationship between rice N nutrition levels and spectral feature[J]. J. of Zhejiang Agric. Univ., 1993, 19(Suppl.): 40-46.

[7] 王人潮,陈铭臻,蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究. 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.
Wang R C, Chen M Z, Jiang H X. Agronomic mechanism research on estimating the yield for rice I. Rice spectral characteristics and sensitive wave bands chosen under different nitrogen levels[J]. J. of Zhejiang Agric. Univ., 1993, 19(Suppl.): 7-14.

[8] 王珂,沈掌泉,Abou-Ismail O 等. 不同钾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.
Wang K, Shen Z Q, Abou Ismail O *et al*. Preliminary study on canopy and leaf reflectance characteristics of rice with various potassium levels[J]. Bulletin of Sci. and Techn., 1997, 13(4): 211-214.

[9] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000. 185-228.
Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and its applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 185-228.

[10] 张宏名. 农田作物光谱特征及其应用[J]. 光谱学与光谱分析,1994,14(5):25-30.
Zhang H M. The spectral characteristics of crops in field and their application[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 1994, 14(5): 25-30.

[11] 薛利红,罗卫红,曹卫星,田永超. 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.
Xue L H, Luo W H, Cao W X, Tian Y C. Research progress on the water and nitrogen detection using spectral reflectance[J]. J. of Remote Sensing, 2003, 7(1): 73-80.

[12] 申广荣,王人潮. 植被高光谱遥感的应用研究综述[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2001,19(4):315-321.
Shen G R, Wang R C. Review of the application of vegetation hyperspectral remote sensing[J]. J. of Shanghai Jiaotong Univ.(Agricu. Sci.), 2001, 19(4): 315-321.

[13] Philpot W D. The derivative ratio algorithm: Avoiding atmospheric effects in remote sensing[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(3): 350-357.

[14] Cloutis E A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques[J]. International J. of Remote Sensing, 1996, 17(12): 2215-2242.

[15] Chen M, Glaz B, Gilert R A *et al*. Near-infrared reflectance spectroscopy analysis of phosphorus in sugarcane leaves[J]. Agronomy J., 2002, 94: 1324-1331.

[16] Fridgen J L, Varco J J. Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability[J]. Agronomy J., 2004, 96: 63-69.

[17] Tobias R D. An introduction to partial least squares regression[M]. Carry, NC: SAS Institute, 2000.

[18] Garthwaite P H. An interpretation of partial least squares[J]. J. of American Statistical Association, 1994, 89: 122-127.

[19] Sudduth K A, Hummel J W. Evaluation of reflectance methods for soil organic matter sensing[J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineering, 1991, 34: 1900-1909.

[20] Curran P J, Dungan J L, Peterson D L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76: 349-359.

[21] 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.
Zhao C J, Huang W J, Wang J H *et al*. Studies on the red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(8): 980-987.

[22] Meer F van der, Bakker W. Cross correlogram spectral matching: Application to surface mineralogical mapping by using AVIRIS data from Cuprite, Nevada[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61: 371-382.

[23] 田高友,袁洪福,刘慧颖,陆婉珍. 小波变换在近红外光谱分析中的应用进展[J]. 光谱学与光谱分析,2003,23(6):1111-1114.
Tian G Y, Yuan H F, Liu H Y, Lu W Z. The application of wavelet transform in near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2003, 23(6): 1111-1114.

[24] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2000. 58-61.
Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and its applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 58-61.

[25] Curran P J, Kupiec J A, Smith G M. Remote sensing the biochemical composition of a slash pine canopy[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(2): 415-420.

[26] 颜春燕,刘强,牛铮,王长耀. 植被生化组分的遥感反演方法研究[J]. 遥感学报,2004,8(4):300-308.
Yan C Y, Liu Q, Niu Z, Wang C Y. Inversion of vegetation biochemicals by remote sensing[J]. J. of Remote Sensing, 2004, 8(4): 300-308.

[27] Al-Abbas A H, Barr R, Hall J D *et al*. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves[J]. Agronomy J., 1974, 66: 16-20.

[28] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves[J]. Agronomy J., 1994, 86: 934-938.

[29] McMurtrey J E, Chappelle E W, Kim M S *et al*. Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn with actively induced fluorescence and passive rReflectance measurements[J]. Remote Sensing of Enviorn., 1994, 47: 36-44.

[30] Walburg G, Bauer M E, Daughtry C S T, Housley T L. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies[J]. Agronomy J., 1982, 74: 677-683.

[31] Everitt J H, Richardson A J, Gausman H W. Leaf reflectance-nitrogen-chlorohpyll relations in buffelgrass[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1985, 51: 463-466.

[32] 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.

[33] 程一松,胡春胜,王成,于贵瑞. 养分胁迫下的夏玉米生理反应与光谱特征[J]. 资源科学,2001,23(6):54-58.
Cheng Y S, Hu C S, Wang C, Yu G R. Physiological response and spectral characteristics of summer corn under nutrient stress condition [J]. Resources Sci., 2001, 23(6): 54-58.

[34] Thomas J R, Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements[J]. Agronomy J., 1972, 64: 11-13.

[35] Jackson R D, Jones C A, Uehara G, Santo L T. Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness [J]. Remote Sensing of Environment. 1980, 11: 327-331.

[36] Shibayama M, Akiyama T. A spectroradiometer for field use VI. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopy[J]. Japanese J. of Crop Sci., 1986, 55(4): 433-438.

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

[38] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E, Waler-Schea E A. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies[J]. Agronomy J., 1996, 88: 1-5.

[39] Stone M L, Soile J B, Raun W R *et al*. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat [J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineering, 1996, 39: 1623-1631.

[40] Inoue Y, Moran M S, Horie T. Analysis of spectral measurements in paddy field for predicting rice growth and yield based on a simple crop

simulation model[J]. Plant Production Science, 1998, 1: 269-279.

[41] Kokaly R F, Clark R N. 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.

[42] Kokaly R F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75: 153-161.

[43] Gong P, Pu R, Heald C. Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia[J]. International J. of Remote Sensing, 2002, 23(9): 1827-1850.

[44] Zhou Q F, Wang J H. Leaf and spike reflectance spectra of rice with contrasting nitrogen supplemental levels[J]. International J. of Remote Sensing, 2003, 24(7): 1587-1593.

[45] 王纪华,黄文江,赵春江,等. 利用光谱反射率估算叶片生化组分和籽粒品质指标研究[J]. 遥感学报,2003,7(4):277-284.

Wang J H, Huang W J, Zhao C J *et al*. The inversion of leaf biochemical components and grain quality indicators of winter wheat with spectral reflectance[J]. J. of Remote Sensing, 2003, 7(4): 277-284.

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

[47] 浦瑞良,宫鹏,Miller J R. 应用CASI图像数据估计横跨美国俄勒冈州针叶林叶面积指数[J]. 南京林业大学学报,1993,17(1): 41-48.

Pu R L, Gong P, Miller J R. Estimation of coniferous forest leaf area index along the Oregon transect using CASI data[J]. J. of Nanjing Forestry Univ., 1993, 17(1): 41-48.

[48] ANCAL Inc. C-SPEC data acquisition and manipulation program: Users guide and operating instructions[S]. 1995, Version 1.5.

[49] 宫鹏,史培军,浦瑞良,郭华东. 对地观测技术与地球系统科学[M]. 北京:科学出版社,1996. 1-208.

Gong P, Shi P J, Pu R L, Guo H D. Earth observation technology and system science[M]. Beijing: Science Press, 1996. 1-208.

[50] 张良培,郑兰芬,童庆禧. 利用高光谱对生物变量进行估计[J]. 遥感学报,1997,1(2):111-114.

Zhang L P, Zheng L F, Tong Q X. The estimation of vegetation variables based on high resolution spectra[J]. J. of Remote Sensing, 1997, 1(2): 111-114.

[51] Don H C, David L P, Pamela A M. Prediction of leaf chemistry by the use of visible and near infrared reflectance spectroscopy[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 26: 123-147.

[52] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra(400—2500nm)at leaf and canopy scales[J]. Remote Sensing of Environment, 1995 (3): 199-211.

[53] 牛铮,陈永华,随洪智, 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.

Niu Z, Chen Y H, Sui H Z *et al*. Mechanism analysis of leaf biochemical concentration by high spectral remote sensing[J]. J. of Remote Sensing, 2000, 4(2): 125-130.

[54] 谭昌伟,王纪华,黄文江,等. 夏玉米叶片全氮、叶绿素及叶面积指数的光谱响应研究[J]. 西北植物学报,2004,24(6):1041-1046.

Tan C W, Wang J H, Huang W J *et al*. Study on spectral variation of LTN, CHL and LAI of summer maize[J]. Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinca, 2004, 24(6): 1041-1046.

[55] 唐延林,王人潮,张金恒,王珂. 高光谱与叶绿素计快速测定大麦氮素营养状况研究[J]. 麦类作物学报,2003,23(1):63-66.

Tang Y L, Wang R C, Zhang J H, Wang K. Study on determining nitrogenous levers of barley by hyperspectral and chlorophyll meter [J]. J. of Triticeae Crops, 2003, 23(1): 63-66.

[56] Ma B L, Morrison M J, Dwyer L M. Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize[J]. Agronomy, 1996, 88: 915-920.

[57] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, Schlemmer M R. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. Agronomy J., 2002, 94: 1215-1221.

[58] Xue L H, Cao W X, Luo W H *et al*. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. Agronomy J., 2004, 96: 135-142.

[59] 王磊,白由路. 不同氮处理春玉米叶片光谱反射率与叶片全氮和叶绿素含量的相关研究[J]. 中国农业科学,2005,38(11):2268-2276.

Wang L, Bai Y L. Correlation between corn leaf spectral reflectance and leaf total nitrogen and chlorophyll content under different nitrogen levels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(11): 2268-2276.

[60] Knipling E B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation [J]. Remote Sensing of Environment, 1970, 1: 155-159.

[61] Thomas J R, Gausman H W. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops[J]. Agronomy J., 1977, 69: 799-802.

[62] Hong S, Rim S, Lee J, Kim J. Remote sensing for estimating chlorophyll amount in rice canopies[A]. Int. Proc Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Singapore, 1997.

[63] Blackmer T M, Schepers J S, Varvel G E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves[J]. Agronomy J., 1994, 86: 934-938.

[64] 勾玲,闫洁,韩春丽,等. 氮肥对新疆棉花产量形成期叶片光合特性的调节效应[J]. 植物营养与肥料学报,2004, 10(5): 488-493.

Gou L, Yan J, Han C L *et al*. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high - yielding cotton in Xinjiang. Plant Nutrition and Fertilizer Science[J]. 2004, 10(5): 488-493.

[65] Schepers J S, Francis D D, Vigil M F. Comparisons of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1992, 23: 2173-2187.

[66] Yang W H, Peng S B, Huang J L *et al*. Using leaf color charts to es-

timate leaf nitrogen status of rice[J]. Agronomy J, 2003, 95: 212-217.

[67] Evans J R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat[J]. Plant Physiology, 1983, 72: 297-302.

[68] Blachmer T M. Schepers J S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1994, 25: 1791-1800.

[69] Horler D N H, Barber J P, Ferns D C *et al*. Approaches to detection of geochemical stress in vegetation[J]. Advanced Space Research, 1983, 3: 175-179.

[70] Horder D N H, Dockray M, Barber J P *et al*. Red edge measurements for remote sensing plant chlorophyll content[J]. Advanced Space Research, 1983, 3: 273-277.

[71] Horder D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International J. of Remote Sensing, 1983, 4: 273-288.

[72] 陈斌. 利用光谱反射特性测定茶鲜叶的叶绿素含量[J]. 江苏理工大学学报,1996,17(4):10-15.
Chen B. Determination of chlorophyll of tea leaves reflectance[J]. J. of Jiangsu Univ. of Sci. and Techn., 1996, 17(4): 10-15.

[73] 王秀珍,王人潮,李云梅,等. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究[J]. 浙江大学学报,2001,27(3):301-306.
Wang X Z, Wang R C, Li Y M *et al*. Study on red edge characteristics of rice spectral caused by nitrogen level[J]. J. of Zhejiang Univ., 2001, 27(3): 301-306.

[74] 程一松,胡春胜,郝二波,等. 氮素胁迫下的冬小麦高光谱特征提取与分析[J]. 资源科学,2003,25(1):86-93.
Cheng Y S, Hu C S, Hao E B *et al*. Analysis and extraction of hyperspectral information feature of winter wheat under N stress condition[J]. Resources Sci., 2003, 25(1): 86-93.

[75] 唐延林,王人潮,王秀珍,李云梅. 水稻叶面积指数和叶片生化的光谱法研究[J]. 华南农业大学学报,2003,24(1):3-7.
Tang Y L, Wang R C, Wang X Z, Li Y M. Study on the leaf area index and biochemical contents of rice blade by the spectral method [J]. J. of South China Agric. Univ., 2003, 24(1): 3-7.

[76] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京:中国农业大学出版社,1994. 35.
Lu J L. Plant nutrition (1st)[M]. Beijing: Chinese Agric. Univ. Press, 1994. 35.

[77] Milton N M, Eiswerth B A, Ager C M. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36: 121-127.

[78] Sembiring H, Raun W R, Johnson G V *et al*. Detection of nitrogen and phosphorus nutrient status in bermudagrass using spectral radiance [J]. J. Plant Nutrition, 1998, 21: 1189-1206.

[79] Ponzoni F J, de Goncalves J L M. Spectral features associated with nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies in Eucalyptus saligna seedling leaves[J]. International J. of Remote Sensing, 1999, 20(11): 2249-2264.

[80] 王磊,白由路,陈仲新,王兵. 低温胁迫下的夏玉米苗期高光谱特征[J]. 农业网络信息,2004 (4):27-33.
Wang L, Bai Y L, Chen Z X, Wang B. Hyperspectral characteristic of summer corn seedling under low temperature stress[J]. Agriculture Network Information, 2004 (4): 27-33.

[81] 赵平,林克惠,郑毅.氮钾营养对烟叶衰老过程中内源激素与叶绿素含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):379-384.
Zhao P, Lin K H, Zheng Y. Effect of N and K nutrition on chlorophyll content and endogenous hormones in the process of tobacco senescence[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 379-384.

[82] Clark D H, Mayland H F, Lamb R C. Mineral analysis of forages with near infrared reflectance spectroscopy[J]. Agronomy J., 1987, 79: 485-49.

[83] Milton N M, Ager C M, Eiswerth B A, Power M S. Arsenic and selenium induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30: 263-269.

[84] Adams M L, Norvell W A, Peverly J H, Philpot W D. Fluorescence and reflectance characteristics of manganese deficient soybean leaves: Effect of leaf age and choice of leaflet[J]. Plant and Soil, 1993, 155/156: 235-238.

[85] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M. Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese[J]. Agronomy J., 1996, 88:937-943.

[86] 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.
Ma C F, Ma J W, Han X Z. Mechanism analysis of leaf spectrum response resulted from micronutrients[J]. J. of Remote Sensing, 2001, 5(5): 334-339.

[87] 杨俐苹,白由路,王磊,陈仲新. 白菜苗期对不同硫处理的光谱反应[J]. 农业网络信息,2004 (4): 21-26.
Yang L P, Bai Y L, Wang L, Chen Z X. Study on spectrum responses of chinese cabbage seedling under different sulphur treatments [J]. Agriculture Network Information, 2004 (4): 21-26.

[88] 王纪华,王之杰,黄文江, 等. 冬小麦冠层氮素的垂直分布及光谱响应[J]. 遥感学报,2004,8(4):309-316.
Wang J H, Wang Z J, Huang W J *et al*. The vertical distribution characteristic and spectral response of canopy nitrogen in different layer of winter wheat[J]. J. of Remote Sensing, 2004, 8(4): 309-316.