

光谱技术在农业领域的应用与展望

张瑞美^{1, 2}, 彭世彰¹, 徐俊增^{1, 2}

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学现代农业工程系, 江苏 南京 210098)

摘要: 光谱技术以其简便、快速、精度高和无损测定等优越性, 成为获取农田生物环境信息的重要手段, 在精确农业发展中发挥着重要作用。从土壤光谱特性、植物光谱特性和冠层光谱特性角度, 综合分析了光谱技术在土壤性质测定、作物水分监测、营养诊断、产量估测、籽粒品质检测以及病虫害和农药残留监测等方面的应用现状, 探讨了应用中存在的光谱分辨率不高、模型不完善、应用体系不完整、应用尺度不统一等问题, 并对其应用前景进行了展望。

关键词: 土壤光谱特性; 植物光谱特性; 冠层光谱特性; 农业; 应用前景

中图分类号: O433, S36 **文献标识码:** A

Application and Prospect of Spectroscopy Technique for Agriculture

ZHANG Rui-mei^{1,2}, PENG Shi-zhang¹, XU Jun-zeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China;

2. Department of Agriculture Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China)

Abstract: Spectroscopy technique, for its advantages of convenience, celerity, high precision and non-destroy measure, plays an important role in precision agriculture, and has become an important instrument to obtain farmland environmental information. From the angles of soil spectroscopy characteristics, foliage spectroscopy characteristics and canopy spectroscopy characteristics, the application of spectroscopy technique are summarized, such as soil quality measuring, diagnosis of crop water and nutrition, estimating the yield, seed quality inspecting, insect pests and pesticide remnant inspecting and so on. The problems, such as low spectroscopy differentiate rate, incomplete models, half-baked system and skimble-scamble applied yardstick, are analyzed in the paper, and also the applied prospect is discussed.

Key words: Soil spectroscopy characteristics; Foliage spectroscopy characteristics; Canopy spectroscopy characteristics; Agriculture; Applied prospect

0 引言

自然界的物体对外界电磁辐射发生一定的吸收和反射, 把发出或吸收后的光按波长大小排列下来就形成了光谱。每种元素的原子接受辐射只能发射特定波长的光谱线, 利用原子的特征谱线来鉴别物质和确定物质组成即光谱分析。光谱分析

是一种活体无损测试技术, 可以获得“面状”信息, 大大降低了分析成本。太阳光是地物接受最为普遍的电磁辐射, 利用地物接受太阳辐射产生的独特光谱特征, 监测植株长势、诊断水肥状况、判别逆境灾害和估算产量, 对提高作物管理水平与水肥利用效率、减少环境污染和指导节水农业生产具有重要意义。随着技术发展, 光谱分辨率和仪器信噪比越来越高, 近红外光

谱仪器从滤光片、光栅色散发展到傅立叶变换, 高光谱遥感器光谱分辨率达数纳米, 微波遥感开始起步, 光谱获取的数据质量越来越高, 成为精确农业遥感监测的主要信息来源, 在现代农业中起着日益重要的作用。

1 土壤光谱特性应用

土壤反射光谱特性是土壤基本特性之一, 与土壤物理性质有着密切关系。研究不同土壤的反射光谱特性监测土壤状况, 是土壤遥感的一项基础工作, 具有重要意义。

1.1 土壤水分监测

Bowers 等发现土壤湿度增加引起反射率降低, 为利用光谱监测土壤水分奠定了理论基础, 之后学者对可见光与近红外光谱做了大量研究。但土壤类型、太阳高度、大气条件和地表状况等引起的误差, 对其实际应用干扰太大, 人们则更多地关注于红外波段的应用研究^[1]。Price 等^[2]首次引入地表综合参数和表观热惯量, 利用热红外辐射温差计算热惯量估算土壤水分; 李星敏等^[3]建立了真实热惯量、表观热惯量与土壤水分的关系模型。随着理论日臻成熟, 植被覆盖度较低时热惯量法监测土壤水分已得到认可, 而云层覆盖较厚时, 可见光、近红外及热红外监测土壤水分效果都不好, 微波遥感则以较强的穿透力表现出其全天候、高精度的优越性。把微波资料全天候的特性和可见光、红外波光谱特征结合起来, 将是监测土壤水分的一个新领域。

1.2 土壤有机质测定及肥力分析

土壤物质含量与光谱特征的研究开始于 20 世纪 70 年代, 各种土壤反射光谱曲线在红外波段分异较大, 特别是近红外反射光谱 NIRS(Near Infrared Reflectance Spectroscopy) 因其快速简便、无损和同时分析多种组分的“巨人”优越性被广泛应用。Ben-Dor 等^[4]用 NIRS 估算了粘土含量、表面积、阳离子交换量、湿度、有机质以及碳酸盐 6 种土壤重要属性; 彭玉魁等^[5]找到最佳脉冲点组合, 对黄土高原土壤有机质和总氮量进行评价, 填补了国内空白。研究发现, 土壤颗粒大小、矿物质和粘粒等都会影响土壤对光谱的吸收强度和模式, 宋晓宇等^[6]分析了土壤有机质在光谱中的响应, 建立数学模型模拟土壤有机质含量, 实现了养分对作物长势的控制。光谱技术, 特别是近红外反射光谱对土壤总碳、总氮量及有机质含量的预测都已成功验证, 其他养分、土壤属性及微生物的预测尚缺乏不同类型土壤的系统研究。目前尚没有适于各种土壤类型的稳定定标库, 应加强土壤物理化学特征对光谱影响的机理研究, 结合化学计量学, 建立科学的土壤定标库, 以适应不同类型仪器间的同质传递。未来一段时间, 土壤肥力评估将以遥感为主。

2 植物光谱特性应用

植物本身是不规则的自然灰体, 对太阳辐射通过反射、穿透及吸收等产生特定的光谱。其光谱特性是植物生长过程与环境因子相互作用的综合结果, 由生物物理和形态特征决定, 与植物的生长条件和健康状况密切相关, 某些胁迫因子可能导致光谱特性的改变。运用此原理, 可以分析与判别植物光谱特

征, 监测作物长势、诊断水肥状况、估算产量和检测品质等, 评估作物生长与环境的交互作用, 提高作物管理水平, 实现定时定位、处方农作。

2.1 作物水分监测

水分缺乏是影响植物原初生产力最普遍的因子之一, 定量快速地获取植物水分状况, 对农田灌溉和精确农业发展具有重要意义。通常用来解释植物水分状况的指标有相对含水量、水势等, 测定复杂, 不适于大田研究; 依据光谱特性监测水分状况, 以其非破坏性和快捷成为农业生产的研究热点^[7, 8]。叶片含水量下降时, 光谱反射率在可见光和近红外波段有所增加, 在中红外波段叶片的一阶导数反射光谱与叶片含水量高度相关。一些学者提出植被在 0.97 和 1.9 μm 附近的光谱反射率吸收峰反映着植物的水分状况^[9]。王纪华等^[10]则认为 1.45 μm 处特征吸收峰是反映叶片水分含量的最佳波段, 并进一步定量分析, 建立了叶片水分与 1.45 μm 附近水的反射率特征吸收峰深度和面积回归模型; 但 1.45 μm 处光谱特征吸收峰受大气层水干扰较大、测定困难, 可以用受干扰较小的 1.65~1.85 μm 波段间接反映小麦水分状态, 尤其在小麦生长中后期干物质比重增大、体内含水减少时应用效果更好, 可以作为航空或卫星遥感探测指标, 应用前景广阔^[11]。

2.2 作物营养诊断

作物营养状况诊断, 主要借助化学分析或依据叶面缺乏症状。前者手续繁琐、破坏植株, 后者仅凭经验目视观察, 缺乏简便快速、科学有效、适宜大面积推广的诊断方法用作田间指导。20 世纪 60 年代, 学者开始研究植物体内营养元素和生化物质含量与植物反射光谱的关系。所有营养元素中, 氮素对作物生长和产量影响最大, 且与光谱特征相关关系良好, 大田内可以测定光谱特性诊断作物营养状况^[12]。周启发等^[13]研究了水稻不同氮素水平的傅立叶转换红外光谱差异, 证明了该方法诊断氮素的可行性。随施氮量增加, 可见光光谱反射率降低, 而近红外至中红外反射率升高, 学者研究含氮量与光谱反射率或其衍生量的关系, 建立了模型估算田间作物氮素含量。张喜杰等^[14]将高光谱遥感引入温室, 建立了黄瓜光谱反射率与含氮量间的数学模型。与氮相比, 光谱技术诊断作物磷钾的应用研究还较少。据报道, 可见光波段磷的光谱特征与氮素变化相反, 近红外波段趋势相似; 低氮低磷水平, 钾与氮胁迫的变化一致, 高氮高磷水平相反。马超飞等^[15]研究了微量元素的植物光谱响应, 指出 Co 含量与 0.56 μm 附近反射率显著负相关; Mn、B、Mo 和 Zn 分别与中心波长为 0.4、1.16、0.47、0.88、2.19、2.34, 其中 1.62 μm 和 2.34 μm 的光谱反射峰位置相关较好。

叶绿素和叶面积指数分别表征了作物的生产能力和群体长势, 反映了作物生长发育动态, 也是反映物质生产和光谱关系的重要枢纽, 利用光谱数据可以对叶片叶绿素含量和作物群体长势进行预测。日本 MINOLTA 公司研制开发了 SPAD 叶绿素计诊断氮素, 取得一定效果, 但实际应用中受作物品种和环境条件影响大, 需结合室内测定分析, 并建立标准曲线校正。Zhao 等^[16]指出植物反射特征与叶绿素和氮含量成正比, 王秀珍等^[17]研究了红边参数推算叶绿素含量和叶面积指数的简便

可行性。沈掌泉等^[18]利用氮素胁迫下植物体内营养运移的原理,将上下部叶片光谱特性比值作为诊断氮素营养的指标。用光谱特性诊断作物营养状况,已经从定性走向了定量,涵盖了N、P、K及其他微量元素与生化物质含量,证实了温室、大田和盆栽等不同生长环境下的可行性,但测定时要注意不同环境、时间、部位及先后次序等均会对反射率产生影响。

2.3 作物产量估测

利用可见光及近红外波段数据定量地计算卫星植被指数并分析时空变化,建立农学参数与植被指数的定量关系,可以实现作物产量预报。随着高空间、高分辨率遥感的应用,光谱在作物长势监测和估产中表现出强大优势^[19]。作物遥感估产,首先要进行遥感估产区划,许红卫等^[20]以稻作制度为主导因子分区指标,将地理信息系统空间邻接分析与图论树算法相结合进行了估产区划研究。实际上,植被指数不仅受地表状况的影响,还与大气状况有密切关系,大气辐射校正一直是困扰高精度定量遥感的难题。黄敬峰等^[21]研究了大气状况对AVHRR通道的影响,并将NOAA/AVHRR通道1和通道2的大气校正简化为加法因子天空反照率和乘法因子透过率的计算。抽穗期光谱反映了营养生长的好坏,灌浆期光谱反映茎、叶营养成分向穗部的转移状况,蜡熟期光谱则反映了青秆黄熟、贪青徒长与早衰状况。黄敬峰等^[22]首次提出遥感估产最佳时相分为种植面积估算和产量预报两部分,指出孕穗期到抽穗期是建立水稻遥感估产模型的最佳时期,并建立了遥感估产比值模型和回归模型。近红外波段的光谱反射率越高,与可见光及短波红外波段的光谱反射率差异越大,作物产量也越高。刘良云等^[23]利用近红外波段890 nm反射峰、980 nm与1 200 nm弱水汽吸收谷和短波红外1 650 nm、2 200 nm反射峰,设计归一化差值光谱指数(NDVI),改善了冬小麦估产精度。抽穗期—灌浆期—蜡熟期多时期复合估产模式更符合水稻产量形成机理,效果优于单时期估产模式^[24]。

2.4 籽粒品质检测

作物籽粒品质的影响因素众多,指标测定一般用生化方法,费时费力、且不能在收获前预测。光谱技术特别是近红外反射光谱技术在籽粒品质检测,尤其是含量较高的蛋白质和直链淀粉含量测定中^[25],得到了较好的应用。王纪华等^[26]基于开花期叶片含氮量与籽粒品质指标的关系,建立了小麦籽粒蛋白质含量等品质指标的回归预测方程;肖昕等^[27]分析籽粒的直链淀粉含量和蛋白质含量指标,根据定标集样品化学分析数据和吸收光谱建立了定标模型;魏良明等^[28]采用偏最小二乘回归法,建立了测定玉米混合籽粒样品蛋白质、淀粉含量的校正模型。舒尧尧^[29]等研究了不同光谱预处理和回归统计方法对建立回归方程的影响,得出最佳效果。有研究指出,在光栅单色仪测量光路中增设截止滤光片部分能够消除各种成分光谱间的相互干扰,提高测量分辨率。唐延林等^[30]研究了稻米品质与原始高光谱反射率及其一阶导数光谱的相关性,认为利用导数光谱估测效果优于原始光谱。光谱对含量较少的氨基酸的应用有人做了尝试^[31],油料作物的脂肪测定也有应用,唐绍清^[32]等则对光谱技术测定稻米脂肪开始尝试,建立精米中脂肪含量数学模型。

2.5 病虫害及农药残留监测

植物遭受病虫害侵染后,外部形态和生理效应发生变化,研究和利用受害植物光谱特性的变异信息,为大规模监测植物病虫害提供了依据。美国利用红外遥感成功探测到玉米枯萎病、山核桃丛枝病和松材线虫的发生和发展;FAO沙漠蝗虫防治委员会通过植被色调变化监测和预报蝗虫。吴曙雯等^[33]研究稻叶瘟对水稻光谱特性的影响,发现绿光区、红光区和近红外区的水稻冠层光谱反射率随病情程度的加重分别呈现下降、上升和下降的趋势;何国金等^[34]分析叶绿素含量与麦蚜虫间的动态关系,提出基于地面光谱测试的麦蚜虫情预报、虫害监测的方法。目前农药残留检测主要有气、液相色谱,质谱,以及气、液相色谱—质谱联用等方法,前处理过程繁琐,难以现场快速检测。光谱技术则易处理,分析速度快,且对环境无污染,可以同时农药残留多组分测定,应用潜力大。李文秀等^[35]对高残留农药中红外衰减全反射光谱数据进行研究,通过农药在水中的吸收建立模型模拟其在蔬菜体内的吸收,为实现对蔬菜农药残留进行快速检测提供了一条新途径。

3 冠层光谱特性应用

冠层光谱特性是植物与土壤光谱特性的综合,随冠层发育土壤光谱作用下降,而植物衰老时,土壤背景作用又逐渐增大。田永超等^[36, 37]建立了不同水氮条件下作物叶水势和含水率与冠层反射光谱的定量化关系,指出 $R(610, 560)/ND(810, 610)$ 和 $R810/R460$ 分别是预测小麦、水稻水分状况的最佳光谱植被指数。与叶片光谱特性一样,氮素营养对冠层光谱特性影响的研究最为系统深入。孙莉等^[38]开展了高光谱红边参数与叶片全氮量的研究,建立了红边积分面积与叶片全氮量的数学模型。薛利红等^[39, 40]指出小麦叶片含氮量同光谱指数的关系要优于叶片氮积累量,对水稻则叶片氮积累量效果更佳。研究认为,水稻叶片氮素含量与绿光、黄光波段反射率相关性最大、短波近红外光相关性最小^[41],对冬小麦则是红光、近红外波段最为敏感^[42]。

通过某生育期光谱特征直接预测作物产量和籽粒品质还存在局限性,但利用冠层反射光谱特征反演作物叶片氮素状况,可间接对产量和籽粒品质监测预报。薛利红等^[43]建立了水稻的光谱植被指数—累积叶面积氮指数—产量估测模型;唐延林等^[44]指出高光谱差值植被指数 $R990-R440$ 和 $R1200-R440$ 的估产效果最佳,最高精度达95%。田永超等^[45]综合预测出小麦叶片氮含量、积累量和籽粒蛋白质含量、积累量;黄文江等^[46]运用开花期的光谱结构不敏感植被指数反演叶片类胡萝卜素与叶绿素a的比值,反演叶片全氮和籽粒品质指标。

遥感获取的冠层反射光谱信息中上层叶片的光谱贡献率较大,中下层叶片信息量不足,王纪华等^[47]考察了田间条件下冬小麦主要生育阶段冠层氮素、叶绿素的垂直分布及其光谱响应,并指出利用近红外大多数波段的冠层反射光谱反演中下层叶片的叶绿素含量可能获得较高的精度,而对氮素的反演需要从可见光波段或短波红外波段中筛选。植冠并非光滑平面体,冠层光谱的测定有甚多影响因子必须考虑,增加分析及判读的困难,然而其应用的效率确也极高,进一步研究、建立更多的资

料、积累丰富的经验,将来一定能成为广域的生态及逆境判别的极佳利器。

4 应用中存在的问题

光谱技术发展很快,已经构成地面、空中、太空三个立体层面,能够快速、准确、及时地提供动态数据,成为农田生物环境信息获取的重要手段,但是具体应用中还存在着一些问题。

4.1 光谱分辨率不高

现有数据光谱分辨率多在 100 nm 左右,很难区别生长期相同、外形相差不大、品质相近的混作作物,应大力发展高光谱技术。高光谱技术光谱分辨率已达数纳米,空间分辨率仅几米,可与地面实测值相比拟,对应图像任一像元反演的地物光谱,减弱土壤对作物光谱的影响,很好地描述作物的“红边”特性(红边位置、红边斜率、“红移”、“蓝移”),区分作物叶片生化成分、含量及其变化。

4.2 光谱模型不够完善

农业遥感图像数据的精确解译和应用是建立在光谱反演基础上的,水分监测、营养诊断及产量估测与籽粒品质检测等各方面都已建立了大量模型,但是模型不够完善、精度不高。建立一个优良的模型,需要丰富的样品资源、较好的专业知识和实验条件以及丰富的建模经验和足够的时间,工作复杂繁琐,技术要求高。现行模型则一般是在少量数据基础上的线性和非线性拟合,不具有可靠性和普及性,与实际情况并不完全一致,难以用于知道生产,存在一定的局限性。如何发展更好的光谱反演模型,统一模型尺度,解决不同模型的转移问题,还有待进一步研究。

4.3 缺乏系统的体系

光谱技术已成为现代农业的重要组成部分,既可以在农田土地资源调查、作物状况诊断、农作物估产与监测、自然灾害监测等方面获得广泛应用,还可以在集约化农业和精准农业中发挥巨大作用。而光谱在精准农业中的应用,除了要有足够数据的保障外,关键是要建立完整的应用体系,开展相关理论的研究,促进光谱技术在理论和应用上的发展和完善,提高精确农业的实用性。

4.4 影响因子甚多,应用尺度不统一

作物植冠并非光滑平面体,其光谱受众多影响因子的干扰,叶面积、叶片分布等为主要决定因素,叶龄、老化现象及叶片组织的差异也是重要影响因素,太阳角度及仪器观测角度也造成反射与穿透的复杂化,此外植冠下土壤水分、有机质含量及残叶的覆盖等也增加了测定、分析与判别的困难,需要积累丰富经验,建立大量的资料库,才能广域推广应用。不同类型、不同波段的光谱特征和反映的地物信息都不一样,需要因项制宜地选择仪器与技术进行测定和分析。如冠层光谱是一种综合信息,在营养诊断中适宜于监测氮素等决定长势的主要因子,虽然中量及微量营养元素对叶面积、生物量以及叶片叶绿素等生理生化性质和冠层光谱特征的影响与大量元素具有相似性,但影响程度将会差异较大,迄今为止关于中量或微量元素的研究也较少。

5 前景展望

光谱技术从信息获取技术和处理分析到应用模型研究,都取得了重大进展。随着进一步发展,前景将更为广阔;通过高空间、高光谱分辨率的航空航天遥感,进行动态监测,及时获取作物长势、水肥状况和病虫害“征兆图”,与农业专家系统结合做出诊断与决策,真正实现定时定位、精准操作。光谱技术的不断发展和成熟,人们对其技术特点和仪器有了更深的了解和认识,将更多地应用于作物品质分析、品质育种以及生物学研究中。近红外光谱分析和高光谱遥感结合,在卫星或飞机上搭载近红外光谱遥感器从宏观尺度监测土壤许多成分及性质,进行土壤肥力普查,提供迅速准确的土壤肥力信息,为合理配置国家土地及肥料资源提供科学指导。利用植被光谱数据,进行生态系统光能利用率、水分利用率、生物量、生产力和生物多样性以及与气候变化的关系的研究,从而认识气候变化对不同生态系统的影响,进一步研究全球变化的响应和发展趋势。

光谱技术以其特有的优势在区域和全球尺度上对水分监测、营养诊断、植物长势、农业估产、品质检测和生态环境的监测等领域得到了广泛应用。高光谱、微波遥感和多角度遥感的发展使得植被指数、叶面积指数、光合有效辐射等因子的估算以及植被生物化学参数分析、植被生物量和作物估产、病虫害的监测精度得到了提高,推进了量化进程。随着光谱技术和配套技术的改良和发展,除了一般实验室通用的光谱仪外,各种能满足不同需要的专用光谱测定仪和应用软件层出不穷。在应用光谱技术时,除对技术特点全面了解外,还需要应用者在特定领域内有丰富的专业知识相配合,揭示植被光谱中内在的隐含特征,提高各种参数的估算精度,这样才能挖掘最大潜力,将光谱分析技术的优点发挥到极致,最大限度地服务于现代农业。

参考文献:

- [1] 刘志明,张柏,晏明,等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576—582.
- [2] Price J C. On the analysis of thermal infrared dimagery: The limited utility of apparent thermal inertia[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, (18): 59—73.
- [3] 李星敏,刘安麟,张树誉,等. 热惯量法在干旱遥感监测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, (1): 54—59.
- [4] Ben-Dor E, Banin A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59: 364—372.
- [5] 彭玉魁,张建新,何绪生,等. 土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 553—559.
- [6] 宋晓宇,王纪华,薛绪掌,等. 利用航空成像光谱数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 45—49.
- [7] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. Remote Sen Environ, 2001, 77: 22—33.
- [8] Tian Q J, Tong Q X, Guo X W. Spectroscopic determination of wheat water status using 1650~1850nm spectral absorption fea-

- tures[J]. *Int J Remote Sens*, 2001, 22(12): 2329—2338.
- [9] Raymond F K, Roger N C. Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression [J]. *Remote Sens*, 1999, 67: 267—287.
- [10] 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.
- [11] 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*, 2000, 15(4): 68—72.
- [12] Cheng Qian, Huang Jingfeng, Wang Renchao, et al. Analyses of the correlation between rice LAI and simulated MODIS vegetation indices, rededge position[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(5): 36—41.
- [13] Zhou Qifa, Shen Zhangquan, Wang Renchao. Fourier Transform Infrared Spectral Difference of Leaf Tips in Rice Related to Nitrogen Fertilizer Rates[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(5): 547—550.
- [14] 张喜杰,李民赞,张彦娥,等. 基于自然光照反射光谱的温室黄瓜叶片含氮量预测[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6): 11—14.
- [15] 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.
- [16] Zhao Duli, Reddy K, Kakani, et al. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum [J]. *Europ J Agronomy*, 2005, (22): 391—403.
- [17] 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(农业与生命科学版)*, 2001, 27(3): 301—306.
- [18] 沈掌泉,王珂,朱君艳. 叶绿素计诊断不同水稻品种氮素营养水平的研究初报[J]. *科技通报*, 2002, 18(3): 174—176.
- [19] Takahashi W, Nguyen C V, Kawaguchi S. Statistic models for prediction of dry weight and nitrogen accumulation based on visible and near-infrared hyper-spectrreflectance of rice canopies [J]. *Plant Prod Sci*, 2000, (4): 377—386.
- [20] 许红卫,王人潮. 浙江省水稻遥感估产区划研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2000, 26(4): 417—422.
- [21] 黄敬峰,王人潮,杨忠恩. 水稻遥感估产中 AVHRR 通道 1 和通道 2 的大气影响校正[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5): 130—134.
- [22] 黄敬峰,王人潮,蒋亨显,等. 基于 GIS 的浙江省水稻遥感估产最佳时相选择[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 290—294.
- [23] 刘良云,王纪华,黄文江,等. 利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 172—175.
- [24] 唐延林,黄敬峰,王人潮,等. 水稻遥感估产模拟模式比较[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 166—171.
- [25] Champagne E T, Bett—Garber K L, Grimm C C, et al. Near-infrared reflectance analysis for prediction of cooked rice texture [J]. *Cereal Chem*, 2001, 78(3): 358—362.
- [26] 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]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 276—284.
- [27] 肖昕,陈奕,罗文永,等. 单粒活体稻谷种子直链淀粉含量的近红外透射光谱分析[J]. *中国水稻科学*, 2003, 17(3): 287—290.
- [28] 魏良明,严衍禄,戴景瑞. 近红外反射光谱测定玉米完整籽粒蛋白质和淀粉含量的研究[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(5): 630—633.
- [29] 舒庆尧,吴殿星,夏英武,等. 稻米表观直链淀粉含量近红外光谱测定技术校正设置的优化[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 1999, 25(4): 343—346.
- [30] 唐延林,黄敬峰,王人潮. 利用高光谱法估测稻穗稻谷的粗蛋白质和粗淀粉含量[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1282—1287.
- [31] Wu J G, Shi C H, Zhang X M, et al. Estimating the amino acid composition in milled rice by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Field Crop Res*, 2002, 75(1): 1—7.
- [32] 唐绍清,石春海,焦桂爱,等. 利用近红外反射光谱技术测定稻米中脂肪含量的研究初报[J]. *中国水稻科学*, 2004, 18(6): 563—566.
- [33] 吴曙雯,王人潮,陈晓斌,等. 稻叶瘟对水稻光谱特性的影响研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2002, 20(1): 73—84.
- [34] 何国金,胡德永,金小华,等. 北京麦蚜虫害的光谱测量与分析[J]. *遥感技术与应用*, 2002, 17(3): 119—124.
- [35] 李文秀,徐可欣,汪 隰. 蔬菜农药残留检测的红外光谱法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(10): 1202—1204.
- [36] 田永超,曹卫星,姜 东,等. 不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与叶片水势关系的研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 178—183.
- [37] 田永超,朱 艳,曹卫星,等. 小麦冠层反射光谱与植株水分状况的关系[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2072—2076.
- [38] 孙 莉,陈 曦,包安明,等. 用高光谱数据诊断水分胁迫下棉花冠层叶片氮素状况的研究[J]. *棉花学报*, 2004, 16(5): 291—295.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 张金恒,王珂,王人潮,等. 水稻叶片反射光谱诊断氮素营养敏感波段的研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, 30(3): 340—346.
- [42] 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.
- [43] 薛利红,曹卫星,罗卫红. 基于冠层反射光谱的水稻产量预测模型[J]. *遥感学报*, 2005, 9(1): 100—105.
- [44] 唐延林,王纪华,黄敬峰,等. 利用水稻成熟期冠层高光谱数据进行估产研究[J]. *作物学报*, 2004, 30(8): 739—744.
- [45] 田永超,朱 艳,曹卫星,等. 利用冠层反射光谱和叶片 SPAD 值预测小麦籽粒蛋白质和淀粉的积累[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(6): 808—813.
- [46] 黄文江,王纪华,刘良云,等. 小麦品质指标与冠层光谱特征的相关性的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 203—207.
- [47] 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.