

赵小敏,孙小香,王芳东,等.水稻高光谱遥感监测研究综述[J].江西农业大学学报,2019,41(1):1-12.



# 水稻高光谱遥感监测研究综述

赵小敏,孙小香\*,王芳东,谢文,郭熙

(江西农业大学 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室/南方粮油作物协同创新中心,江西 南昌 330045)

**摘要:**高光谱遥感技术凭借其可以快速、实时、准确、无损地获取水稻生长信息的优势,已经成为监测水稻生长状况的重要手段。本研究综述了高光谱遥感技术在水稻长势监测(包括叶绿素含量、叶面积指数和地上生物量)、产量估算、养分诊断(包括氮素、磷素和钾素)、数据处理与反演方法等领域的国内外研究进展,并针对目前的研究进行了展望,以期水稻的精准管理提供参考。

**关键词:**水稻;高光谱遥感;生长监测

**中图分类号:**S127;S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2019)01-0001-12

## A Summary of the Researches on Hyperspectral Remote Sensing Monitoring of Rice

ZHAO Xiao-min, SUN Xiao-xiang\*, WANG Fang-dong, XIE Xen, GUO Xi

(Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University / Southern Regional Collaborative Innovation Center For Grain And Oil Crops, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** Hyperspectral remote sensing technology has become an important means for monitoring rice growth status because of its advantages of rapid, real-time, accurate and non-destructive access to rice growth information. This research summarizes the progress in the research on hyperspectral remote sensing techniques for rice growth monitoring (including chlorophyll content, leaf area index, and aboveground biomass), yield estimation, nutrient diagnosis (including nitrogen, phosphorus, and potassium), data processing and inversion methods at home and abroad. And the prospect of remote sensing of rice is provided, so as to provide a reference for the precise management of rice.

**Keywords:** rice; hyperspectral remote sensing; growth monitoring

在全球数字化和信息化的大背景下,美国、加拿大、日本等发达国家农业已经进入了“精准农业”时代。作物信息的获取是精准农业实施的前提和基础,传统的信息提取方法不仅会对植被造成不可修复的破坏,而且时效差。为了满足实时、快速、准确、无损地获取作物长势信息的需求,高光谱遥感作为一种新技术,凭借其光谱信息量大、光谱分辨率高、波段连续性强的优点,在农业领域获得了快速的发展,

收稿日期:2018-05-22 修回日期:2018-06-20

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41361049)、国家重点研发计划项目(2017YFD0301603)和江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(41361049), National Key R&D Program of China(2017YFD0301603) and GanPo“555”Talent Research Funds of Jiangxi Province(201295)

**作者简介:**赵小敏(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业遥感与土地资源管理研究,zhaoxm889@126.com; \* 同等贡献作者。

高光谱遥感技术在“精细农业”中正发挥着重要的作用。

近年来,高光谱遥感技术在水稻生长监测方面开展了大量的研究,并取得了重要的结论。了解国内外水稻高光谱遥感监测的研究进展,对促进我国高光谱遥感在水稻生产中的应用有重要意义。前人针对水稻高光谱遥感监测的综述研究较少,为此,本文主要针对高光谱在水稻长势监测、产量估算、养分监测以及光谱数据处理和反演方法领域的研究进行综述,分析了高光谱遥感技术在水稻生长信息监测的不足及今后的研究重点。

## 1 水稻长势高光谱监测和估产

### 1.1 水稻叶绿素含量高光谱监测研究

叶绿素是水稻含有的一种重要的生化参数,与氮素、蛋白质等其他生化参数有密切的关系<sup>[1-2]</sup>,当水稻受外界胁迫后,叶绿素含量会降低,间接反映植被受外界影响后的生理状态<sup>[3]</sup>;另外叶绿素也是植被进行光合作用的主要色素,其含量直接影响水稻对光能的利用率,因此,对水稻叶绿素含量的监测具有重要意义。传统的叶绿素含量测定方法是在野外进行破坏性取样,带回实验室利用无水乙醇和丙酮浸提,然后利用分光光度计测定吸光度,虽然结果准确,但是对水稻造成了不可修复的损害,并且耗时、费力、时效性差、测量的范围受到限制,难以满足精准农业实时、准确、大面积地获取作物生长信息的需求。在可见光波段范围内,植物反射光谱主要受色素的含量的影响,因此利用反射光谱对色素进行估算是可行的<sup>[4]</sup>。

一些实例证明处于叶绿素吸收带的光谱反射率对叶片和冠层叶绿素反应敏感。1983年,Horler等<sup>[5]</sup>开始研究红边参数与叶片叶绿素浓度的相关性,结果认为红边参数对于评估植被叶绿素状态和叶面积指数非常有价值。红边位置与叶绿素浓度密切相关,Bonham-Carter等<sup>[6]</sup>定义了以660~750 nm波段一阶微分光谱最大值对应的位置为红边位置,并研究了其与叶绿素等色素之间的定量关系。Curran等<sup>[7]</sup>在1989年提出了叶绿素浓度(CHL)与红边位置(REP)间的关系方程: $CHL = -32.13 + 0.05REP$ 。金震宇等<sup>[8]</sup>提出水稻叶片叶绿素的敏感波段为450~686 nm和750~770 nm。微分技术可以提高光谱数据与叶绿素密度的相关性<sup>[9]</sup>,吴长山等<sup>[10]</sup>分析了水稻群体光谱反射率及其导数光谱与叶绿素密度的关系,指出762 nm波段的导数光谱与叶绿素密度密切相关。唐延林等<sup>[11]</sup>测定了不同品种不同供氮条件下的水稻冠层高光谱反射率和对应的叶绿素和类胡萝卜素含量,分析出由微分光谱所得的红边位置、红边斜率和植被指数与冠层叶绿素、类胡萝卜素含量显著相关。由于叶片和冠层的光谱反射率受土壤、大气等多种因素的影响,叶绿素和光谱反射率并非完全线性关系,为了提高叶绿素估算精度,一些学者开始利用多个窄波段构建光谱指数用于反演叶绿素。唐延林等<sup>[12]</sup>针对比值植被指数对水稻叶和穗叶绿素含量进行了估测,筛选出植被指数VI1(R990/R553)、VI2(R1200/R553)、VI3(R750/R553)、VI4(R670/R440)和VI5(R553/R670)与叶绿素存在极显著相关性。杨杰等<sup>[13]</sup>计算了350~2500 nm范围内任意两波段组合而成的比值植被指数和归一化植被指数,研究发现与水稻叶片叶绿素含量相关性最高的指数分别是SR(724,709)和ND(780,709),另外引入445 nm波段反射率对光谱指数进行修正,发现修正后的光谱指数普适性更好。王福民等<sup>[14-15]</sup>采用同样的方法构建所有可能的简单比值色素指数及归一化比值色素指数,指出最佳比值指数主要是红边区域波段,最佳归一化主要是短波红外与可见光波段组合,结果与杨杰等<sup>[13]</sup>的结论相同。高光谱技术监测水稻叶片的机理已经比较明确,模型精度也较高。

### 1.2 水稻叶面积指数高光谱监测研究

叶面积指数(LAI)通常定义为单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数,是描述植被冠层结构的一个重要参数,控制着植被的光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等<sup>[16]</sup>。地面直接测量植被的LAI(比叶重法),精度相对较高,但是破坏性和工作量都很大,且仅限于小尺度,在大尺度上只有遥感技术才可以实现,因此,国内外均比较重视基于光谱遥感对叶面积指数的研究。

微分光谱被证实可以提高LAI估算精度。浦瑞良等<sup>[17]</sup>研究了美国西部黄松叶面积指数与高光谱分辨率数据进行相关性分析,提出对光谱数据进行一阶微分处理后能大大改善对未郁闭的黄松LAI的估计精度,主要是因为微分技术具有减少有土壤背景引起的低频噪音的能力,另外研究发现二阶微分光谱的估算效果较差,因此没有必要进行二阶微分变换。刘伟东等<sup>[18]</sup>分析了高光谱反射率与水稻叶面积指数

的相关性,发现微分技术处理后相关性明显增强,与浦瑞良的结论一致。另外构造植被指数是反演 LAI 的重要方法。王秀珍等<sup>[18]</sup>提出高光谱变量中与 LAI 关系最佳的是蓝边内一阶微分的总和与红边内一阶微分的总和的比值植被指数和归一化差植被指数。薛利红等<sup>[19]</sup>分析了几种常见的植被指数与水稻 LAI 的相关关系,得出 LAI 与比值植被指数(RVI)、再归一化植被指数(RDVI)和 R810/R560 显著幂相关,与归一化植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、差值植被指数(DVI)、土壤调整植被指数(SAVI)和转换型土壤调整指数(TSAVI)显著指数相关,比值 R810/R560 的预测力最佳。刘占宇等<sup>[20]</sup>提出了一个包含可见光蓝、绿、红和近红外谱段的调节型归一化植被指数 ANDVI。辛月明等<sup>[21]</sup>测定了水稻不同生育期的高光谱数据和叶面积指数,建立了基于光谱指数的叶面积指数反演模型,其中,在水稻分蘖-抽穗期以修改型土壤调整植被指数 MSAVI[758,805]对 LAI 的估算效果最好,在抽穗-成熟期,也以修改型土壤调整植被指数 MSAVI[758,817]对 LAI 的模拟效果最好,强调了分生育阶段建模的必要性。上述研究表明,叶面积指数为植被群体指标,敏感波段主要位于近红外波段,基于敏感波段构建植被指数可以较好的估测水稻叶面积指数。

### 1.3 水稻地上部生物量高光谱监测研究

作物地上生物量是单位土地面积作物地上部分的重量,分为鲜生物量和干生物量,后者是经过烘干去除水分之后的重量。地上生物量是反映作物生长状况的重要指标,与叶面积指数和产量有密切关系。传统的生物量测量方法是随机从野外采集代表性的样品进行烘干称量,不仅费时费力且破坏性强,测量范围也受到限制,难以满足精准农业大面积监测的需求。随着遥感技术,尤其是高光谱技术的发展,给快速、无损、准确、大尺度地估测作物生物量带来了契机。

由于生物量与叶面积指数相关密切,所以许多学者将生物量和叶面积指数的遥感监测结合起来讨论,并认为适合叶面积指数估算的光谱参数同样适合生物量的估算。Thenkabail 等<sup>[22]</sup>研究表明生物量与红光波段(620~700 nm)的光谱反射率呈负相关,与近红外波段(740~1 100 nm)的光谱反射率呈正相关。Casanova 等<sup>[23]</sup>利用水稻光谱反射率计算了比值植被指数、归一化植被指数、垂直植被指数、权重差值植被指数与水稻地面生物量和叶面积指数的相关性,其中垂直植被指数、权重差值植被指数表现更好。Takahashi 等<sup>[24]</sup>指出可以利用 400~1 100 nm 范围内的冠层光谱反射率直接建立水稻干物质重的监测模型,偏最小二乘回归在建模中表现最好。唐延林等<sup>[25]</sup>研究表明地上生物量与比值植被指数和归一化植被指数均达显著相关,并利用红边参数对水稻地上生物量进行了估算<sup>[26]</sup>。王秀珍等<sup>[27]</sup>提出蓝边内一阶微分的总和(SDb)与红边内一阶微分的总和(SDr)组合而成的比值植被指数可以用于估算水稻地上鲜生物量。由于可见光-近红外高光谱遥感的应用受天气的影响,于是张远等<sup>[28]</sup>尝试利用微波冠层散射模型来估算水稻生物量,提出较长波段雷达遥感数据在浓密植被的生物量估算中应用潜力更大。

### 1.4 水稻产量高光谱监测研究

美国最早将遥感技术应用于作物估产,于 20 世纪 70 年代开展了 LACIE 大面积估产项目。我国是从 20 世纪 80 年代中期开始的,由国家气象局牵头开展了利用卫星遥感采集地物光谱数据对北方小麦估产项目,自此之后,遥感技术在作物估产领域的应用在我国得到了迅速的发展<sup>[29]</sup>。田国良等<sup>[30]</sup>指出可以根据水稻的光谱特征了解其生长状况与施肥、含水率、生物量及产量的关系,从而掌握水稻的生长发育过程并进行产量估算。1986 年,由中国农业工程研究设计院遥感室主持科研攻关项目——遥感光谱法水稻产量预测预报通过了国家鉴定,对浙江省 4 个不同水稻种植类型县和北京市东风农场 2~3 年的水稻产量进行了预测,精度较高,这是我国首次在较大面积范围内运用遥感光谱分析与产量预报相结合,预测效果比常规测产方法更优<sup>[31]</sup>。Yang 等<sup>[32]</sup>指出在水稻分蘖和出穗阶段时,可以通过构建比值植被指数并分析其与水稻干物质的关系来间接估产,但在水稻灌浆和成熟阶段,反射率与总生物量之间相关性较弱,所以比值植被指数无法准确地预测水稻的冠层生物量。王延颐等<sup>[33]</sup>最早将高光谱遥感技术应用在水稻生产管理上,构建了基于不同生育期的光谱植被指数对南方稻区的水稻进行了估产。黄敬峰等<sup>[34]</sup>利用 GIS 技术提取出来了浙江省水稻种植面积,并提出孕穗期到抽穗期是建立水稻遥感估产模型的最佳时期<sup>[35]</sup>。唐延林等<sup>[36]</sup>通过设置不同水稻品种不同氮肥处理的大田小区试验,测定了水稻抽穗后的光谱反射率,利用相关性分析方法分析光谱植被指数、红边参数与理论产量和实际产量的相关关系,筛选出差值植被指数  $R_{990}-R_{440}$  和  $R_{1200}-R_{440}$  可用于估产,最高精度可达 95%。薛利红等<sup>[37]</sup>分析了水稻籽粒产量与植

被指数的相关关系,并提出利用基于单一生育期或某个生育阶段构建的光谱植被指数直接估产精度较低,并发现叶面积氮指数的变化趋势很好地反映了产量的形成过程,以此建立的水稻光谱植被指数-累积叶面积氮指数-产量估测模型精度较高。谢晓金等<sup>[38]</sup>针对高温胁迫下的水稻进行高光谱估产研究,提出抽穗期和灌浆期是水稻估产的关键时期,差值植被指数  $DVI[810, A(450, 560, 680)]$ 、垂直植被指数  $PVI(810, 680)$ 、红边幅值  $D\lambda_{red}$  和红边峰值面积可以同时预测水稻的理论产量和实际产量,而差值植被指数  $DVI(810, 450)$  和  $DVI(810, 560)$ 、垂直植被指数  $PVI(810, 680)$  和  $D\lambda_{red}$  可以同时预测成熟水稻的穗数、每穗粒数和千粒质量。蒋琴素等<sup>[39]</sup>指出水稻穗光谱指数比叶片光谱指数更适合于水稻产量预测。所以,通过构建有效的植被指数,可以准确的利用高光谱技术进行水稻估产。

## 2 水稻养分高光谱诊断

### 2.1 水稻氮素高光谱研究

氮是水稻体内多种重要有机化合物的组分,例如氨基酸、蛋白质、核酸、叶绿素和酶等都含有氮素。缺氮直接影响水稻氨基酸、蛋白质、叶绿素等的生物合成,使其光合作用能力降低,从而导致产量与品质的降低。而由于氮的挥发及硝酸盐的淋洗、径流作用,施氮过多不仅造成氮肥利用率过低<sup>[40]</sup>而且容易加剧酸雨的形成、温室气体的排放<sup>[41]</sup>以及地下水、地表水污染<sup>[42]</sup>,因此,对氮肥的精准管理是提高产量及减少环境污染的重要措施。受氮肥胁迫后生长状态受到影响,作物叶片和群体的反射光谱会发生变化,所以利用遥感技术无损检测作物氮素含量一直是作物生长遥感监测研究领域的重点<sup>[43]</sup>。

在水稻氮素营养光谱研究中,王人潮等<sup>[44]</sup>研究表明,诊断水稻叶片氮素营养的冠层敏感光谱波段为 530~560 nm、630~660 nm 和 760~900 nm。张金恒等<sup>[45]</sup>研究发现与水稻叶片氮素含量相关性最大的波段为绿光(525~605 nm)和黄光(605~655 nm)。以上研究提出水稻氮素敏感波段大部分集中在可见光和近红外波段,大多数认为绿光和红光附近较好。由于环境和背景条件的不同,氮素的敏感波段经常发生偏移,所以仅通过单个波段的光谱反射率值很难实现氮素的定量反演<sup>[46]</sup>,因此,部分学者开始通过构建多个波段组合的光谱指数来反演氮素含量,发现相对于单波段参数效果更好。薛利红等<sup>[47]</sup>发现与叶片含氮量关系最佳的指数为红波段(660 nm)和蓝波段(460 nm)的比值和归一化差值组合,与叶片氮积累量关系最优的光谱指数是中红外波段(1 220 nm)与红波段(660 nm)的组合。田永超等<sup>[48]</sup>确定了绿光 560 nm 和红光 705 nm 波段附近与近红外波段组合而成的比值指数可以较好地监测水稻叶层全氮含量,并提出一种新型蓝光氮指数  $R_{434}/(R_{496}+R_{401})$ ,相比两波段最佳指数  $SR(533, 565)$  可以显著提高对氮的预测精度<sup>[49]</sup>。Chu 等<sup>[50]</sup>对比了多种植被指数对水稻氮素的估算能力,提出  $SR(R_{553}, R_{537})$  稳定性最好。原始光谱经微分技术处理后可以有效地消除背景光谱的干扰,普遍认为导数光谱及导数参数与氮素关系密切。谭昌伟等<sup>[51]</sup>得出以一阶微分光谱反射率为自变量构建的氮素预测模型精度优于以原始光谱反射率为自变量构建的预测模型,并且以红边面积和蓝边面积构造归一化光谱指数  $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$  对水稻氮素进行估测。田永超等<sup>[52]</sup>提出一阶导数光谱在红边区域出现“三峰”现象,经典的红边位置对水稻氮素浓度变化不敏感,因此基于不同方法计算了红边位置,发现倒高斯模型、线性内插法、线性外推法、拉格朗日算法及改进型线性外推法构造的红边位置都可以对氮素进行定量监测,其中改进型线性外推法效果最好。由于氮素含量与色素有关,所以如何规避色素的干扰构建植被指数是提高氮素反演的重要方向。

### 2.2 水稻磷素高光谱研究

与氮素一样,磷素是水稻生长发育的必需营养元素之一,是许多重要化合物的组分。我国南方水稻土缺磷情况十分严重,在很大程度上影响了水稻的产量,因此实时监测水稻磷素营养,合理施用磷肥是提高产量的关键。当前,水稻磷素含量测定主要是在实验室采用钒钼黄比色法进行化学测定,费时费力,而且难以进行大面积的监测。水稻磷素的丰缺会影响叶片叶色、结构和水分状况,从而影响水稻的光谱信息,因此高光谱技术有望发展成为水稻磷素诊断的新方法和新技术。

目前,作物磷素营养的光谱特性研究较少,针对水稻的就更少。主要原因是植物缺磷时,体内碳水化合物代谢受阻,有糖分积累易产生花青素,另外植物缺磷时,体内叶绿素浓度有可能提高,因为植

物在磷素营养胁迫的状态下叶片细胞伸长受到抑制,且受影响程度超过其叶绿素,因此植物单位面积的叶绿素含量较高,叶片颜色较正常植物深。缺磷的植物光谱反射率受花青素和叶绿素含量的双重影响,因此,影响缺磷植物光谱反射率曲线的变化因素较为复杂<sup>[53]</sup>,并且光谱分析只有在作物严重缺磷时才能用于磷营养诊断。最早对作物磷素营养光谱特征进行研究的是以玉米为研究对象,1974年 Alabbas 等<sup>[54]</sup>对比分析了正常和六种营养缺乏型(N、P、K、Ca、Mg、S)玉米叶片的光谱特征,发现缺P的玉米叶片在830 nm、940 nm、1 100 nm波段附近的光谱反射率较高。程一松等<sup>[55]</sup>研究了磷素养分胁迫条件下玉米的光谱特征,提出在可见光波段,玉米叶片光谱反射率随磷肥施用量的增加而增加,与氮素变化趋势相反,而在近红外波段则与氮素变化趋势相似,即叶片光谱反射率随施磷量的增加而提高,即在全波段范围内,叶片光谱反射率随施磷量的增加而提高,其红边位置相对于氮素光谱特征更靠近可见光波段,而在近红外区域光谱特征曲线的差异不如氮素胁迫明显,这主要是因为作物轻度缺磷时叶绿素浓度较高。Osborne 等<sup>[56]</sup>报道在玉米早期缺磷较为严重时,可用蓝光波段(440~445 nm)和近红外波段(730~930 nm)反射率诊断植物体内的磷含量,而在玉米晚期且土壤磷浓度较高时不适合磷含量的诊断。王磊等<sup>[53]</sup>提出春玉米大喇叭口期是磷素营养诊断的关键期,而350~730 nm和1 420~1 800 nm是磷素营养诊断的敏感波段。林芬芳等<sup>[57]</sup>针对水稻拔节期进行了磷营养光谱特性研究,应用互信息值确定了水稻叶片磷含量的光谱敏感波段为551,536,630,656,1 040 nm,并以敏感波段为自变量构建了BP人工神经网络模型和多元线性回归模型效果较好,但结论和方法还有待进一步系统分析和验证。

综上所述,水稻磷素营养的光谱特性研究较少,所得结果也不统一,需要进一步验证。由于磷素光谱反射率受多种因素的影响,不同磷营养水平下控制其叶片和冠层光谱反射率变化的内在生理生化机理、农学参数和光谱参数的关系、以及作物磷素营养诊断的敏感波段和最佳时期都有待于进一步深入研究。

### 2.3 水稻钾素高光谱研究

同氮素和磷素一样,钾是水稻的三大必需营养元素之一,在水稻体内的含量仅次于氮,对水稻的产量和品质起着十分重要的作用。钾的丰缺与植物生长状况密切相关,其结果必然会影响到其水稻叶片与群体的可见-近红外波段的光谱信息。近年来,随着光谱技术在农业领域的广泛应用,利用光谱遥感进行水稻营养成分分析的研究越来越多,但这些研究工作主要是集中在氮素的分析,针对钾素的研究为数不多。Alabbas 等<sup>[54]</sup>对比分析了缺钾与正常的玉米叶片光谱特征差异,发现缺钾与缺氮相似,在近红外波段反射率(830,940,1 100 nm)会下降。程一松等<sup>[55]</sup>研究玉米钾的光谱特征时指出,在低氮低磷水平下,钾素胁迫与氮素胁迫的光谱曲线变化基本一致,即在可见光波段叶片反射率随施钾量的增加而提高,近红外波段随施钾量的增加而降低,在高氮高磷水平下正好相反。乔欣等<sup>[58]</sup>分析了波长660 nm和1 450 nm处的吸收深度与大豆钾素水平的相关性,并建立了非线性回归模型,相关系数为0.721 5,精度有待提高。易时来等<sup>[58]</sup>以叶片二阶微分反射光谱建立了钾含量偏最小二乘回归预测模型,并提出477~515 nm、541~588 nm、632~669 nm、701~718 nm和754~794 nm波段的二阶微分光谱与锦橙叶片钾含量密切相关。黄双萍等<sup>[60]</sup>分析了不同物候期钾素的敏感特征波段,发现其存在漂移现象,并以敏感波段构建了多元线性回归、支持矢量回归和偏最小二乘法钾素预测模型,对比发现支持矢量回归法建立的模型预测性能良好。王珂等<sup>[61]</sup>分别研究了不同钾素营养水平的水稻冠层和叶片反射光谱特征,发现缺钾水稻的冠层光谱反射特征与缺氮冠层反射光谱特征十分相似,敏感波段也大致相同,所以给利用冠层光谱分析水稻缺钾诊断带来困难,而叶片尺度下缺钾和缺氮时的反射光谱特征有所差异,在可见光波段基本相似,但在近红外波段却不同,缺钾时水稻叶片的反射率比正常叶片高,而缺氮时反射率比正常叶片低,说明可以利用近红外波段的叶片光谱区别水稻缺钾与缺氮。

总之,作物钾的光谱特性研究较少,结果也有较大争议。同磷一样,影响其光谱特征的内在生理因素没有完全研究清楚,钾素营养诊断的敏感波段和最佳生长期也不清楚,构建的敏感指数也较少,所以基于植物钾素光谱研究有待进一步的深入。

### 3 水稻高光谱遥感的数据处理与反演方法

#### 3.1 数据处理研究

水稻冠层光谱信息是水稻、背景和大气混合的信息,如何从混合的信息中筛选出与水稻相关的有用信息是提高反演精度的关键。为了消除背景、大气的影响和提高光谱之间的差异性,在获取原始高光谱数据之后,通常会对数据进行各种变换处理,常规的变换形式有微分变换、倒数变换、对数变换、平滑、标准正态变量变换、傅里叶变换等,随着计算机技术的不断改进,出现了一些新的数据处理技术如:主成分分析、去包络线、小波分析等。

其中,微分变换是最常用的光谱变换手段,它能有效地消除土壤背景、大气散射、凋落物等低频光谱成分带来的影响,并且可以突出不同吸收特征之间的差异,增强目标光谱信息<sup>[62]</sup>。刘伟东等<sup>[9]</sup>通过相关性分析发现,水稻叶面积指数与群体一阶微分光谱相关密切。李永梅等<sup>[63]</sup>也提出水稻一阶微分光谱在可见光波段与叶片氮素含量呈显著相关。另外应用一阶微分技术可以确定植被的“红边”参数、构建导数指数,Filella等<sup>[64]</sup>、Mauser等<sup>[65]</sup>得出,光谱导数指数对水稻叶面积指数(LAI)和叶绿素浓度(GLCD)十分敏感。王秀珍等<sup>[66]</sup>构建的蓝边内一阶微分的总和与红边内一阶微分的总和的比值和归一化差植被指数与水稻叶面积指数构建的线性模型反演精度较高。

另外,主成分分析法是一种将原来多个可能存在相关性的因子转化为少数几个互不相关综合指标的数据降维方法,获得的综合指标即为主成分,他们包含了原始数据的所有信息,即可以达到减少指标量和删除重复信息的目的,从而能够较好地解决高光谱数据量大,信息冗余,数据处理比较复杂的问题<sup>[67]</sup>,缺点就是主成分的实际意义很难解释。杨燕等<sup>[68]</sup>对700~750 nm区间内的水稻反射光谱进行主成分分析,并利用第2主成分与LAI建立反演模型。张浩等<sup>[69]</sup>先用主成分分析对原始光谱进行特征波段提取,再采用非线性模型对水稻叶片氮素及籽粒蛋白质含量进行拟合。包络线去除是一种非线性变换方法,由于光谱曲线差异较小,为了有效地突出光谱曲线吸收和反射特征,采用包络线去除的方法并将光谱值归一到一致的光谱背景上,可以将光谱差异放大,有利于光谱曲线之间的进行区分和比较<sup>[70]</sup>,该方法常用于分类。王奕涵等<sup>[71]</sup>基于去包络线处理的水稻高光谱数据提取波段深度指数,并建立偏最小二乘氮素反演模型,效果较好。最近几年,小波分析开始被应用到光谱数据分析领域,其是函数在空间和时间上进行局部分解的一种数学变换,以傅里叶变换为背景,但比傅里叶变换具有更强的特征提取功能。方美红等<sup>[72]</sup>将小波分析应用于水稻叶片氮含量的反演,主要采用Danbecies小波系的Dbs函数对水稻原始反射光谱和导数光谱进行8层小波分解,选择不同尺度和位置的小波系数作为输入参数建立反演模型,结果显示小波分析在提取反射光谱弱信息反演作物生化成分方面有良好的应用前景。

#### 3.2 反演方法研究

目前,国内外常用的高光谱反演技术主要分为两大类:第一类是线性模型,如一元线性回归、多元线性回归、逐步回归等;第二类是非线性模型,如人工神经网络(ANN)、偏最小二乘回归(PLSR)、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)等。

线性模型快速简单,应用的较广泛。田永超等<sup>[73]</sup>、周冬琴等<sup>[74]</sup>用线性回归技术建立了基于植被指数的水稻叶片全氮含量反演模型。陈君颖等<sup>[75]</sup>采用相关性分析提取出多个与水稻叶片叶绿素含量相关性密切的光谱参数,并将多个参数作为输入变量建立了多元回归方程。然而,水稻养分含量、长势参数及产量受内在品种和外在环境等多种因素的影响,与光谱反射率之间的关系是非线性而非线性,所以采用线性模型建模在一定程度上限制了预测精度。因此,为了进一步提高估算精度,需要采用较复杂的非线性模型进行建模。随着计算机技术的发展,非线性模型最近几年也应用的非常广泛。张浩等<sup>[69]</sup>分别采用多元线性回归(MLR)、人工神经网络(ANN)和偏最小二乘回归(PLSR)进行建模,验证结果显示PLSR模型预测效果最好。姚霞等<sup>[76]</sup>运用逐步多元回归法、主成分回归法、偏最小二乘法和BP神经网络法,建立了水稻叶片中叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b和类胡萝卜素的近红外预测模型。吕杰等<sup>[77]</sup>首先对水稻光谱进行均一化平滑处理及小波变换降噪,然后采用支持向量机建立了水稻镉含量高光谱预测模型。另外随机森林算法建立的水稻冠层氮素含量高光谱反演模型可解释、所需样本少、不会过拟合、精度高且具有普适性<sup>[78]</sup>。

## 4 结论与展望

综上所述,国内外科研工作者对基于高光谱遥感技术在作物生长监测方面的应用做了大量研究,已经投入了大量的精力、时间和财力,也已经确定了高光谱遥感技术在农业领域的重要作用和重要地位,农业定量遥感正在向着无损伤、高空间分辨率和高时间分辨率的作物长势、养分精确诊断等方向发展。近年来,高光谱遥感技术发展很快,在农业领域的应用已经取得了一些重要的成果,但是走向成熟还存在一些问题和不足,需进一步的探索。(1)由于作物种类的复杂性和外界环境的多变性,不同学者建立的模型普适性较差,需要针对某一作物进行系统研究。在针对水稻生理生态参数进行监测时,还需要考虑水稻不同生育期的差异性,筛选出通用性好的光谱变量,并建立水稻模型数据库。(2)水稻冠层光谱信息是作物、背景和环境的混合信息,如何从混合的信息中筛选出与作物相关的有用信息是提高反演精度的关键。因此,在今后研究的前期数据处理中,应该借鉴多种光谱处理技术来提高光谱的信噪比。(3)氮素浓度反演技术虽然较为成熟,但是仍有很多待解决的问题:氮素浓度与植被其他性状出现共变的可能性;从植被和背景的混合光谱信息中提取植被氮素特征信息;氮素浓度反演方法的改进等。与氮素相比,磷钾营养光谱特征的研究较少,不同作物间检测效果相差较大,植被不同磷钾营养状况下的光谱变化机理和规律没有揭示清楚,以及磷钾营养诊断的最佳光谱波段和最佳时期也还没有研究清楚,有待进一步深入探究。(4)目前的水稻高光谱监测模型多为静态的统计模型,默认的影响因素也只是光谱变量,但是在实际生产中影响水稻长势的因素很多,单因素的统计模型精度偏低且难以揭示水稻生长发育、产量形成及其与气候土壤环境的互作机理,缺乏普适性与动态性,因此将光谱遥感信息与作物生长机理模型相耦合,以利于构建普适性强且方便可靠的光谱监测模型,从而进一步提高模型的反演能力与精度,是解决光谱监测问题的有效途径和农业定量遥感研究的重要方向之一。(5)目前国内常用的光谱仪大多是依赖国外进口,价格昂贵,结构复杂,操作繁琐,且不利于田间生产使用。因此,自主研发价格便宜、结构简单和易于田间操作的光谱仪也是光谱研究的一个重要方向。(6)高光谱遥感技术根据光谱仪所处高度可分为近地遥感技术、机载遥感技术和卫星遥感技术。由于探测高度不同,获取的数据形式及特点也存在很大的差异。近地遥感技术获取的数据主要为非成像形式,精度高能准确反映作物信息但是检测范围小;卫星遥感技术属于成像光谱,检测范围大但精度最低;机载遥感技术也属于成像光谱,机动强度、估测精度和监测范围介于上述两者之间。不同尺度遥感技术存在各自优势,基于多尺度遥感技术作物监测的研究相对缺乏,为了提高监测精度、稳定性和实用性,应结合作物特点进行数据融合,集合各技术优势,最终实现“星-空-地”一体化同步实时监测。发射高分辨率的高光谱卫星是促进遥感技术发展的前提,因此高分五号的成功发射将给高光谱遥感技术带来新的发展机遇。

### 参考文献:

- [1] Clifton K E, Bradbury J W, Vehrencamp S L. The fine-scale mapping of grassland protein densities[J]. Grass & Forage Science, 1994, 49(1): 1-8.
- [2] Collins W. Remote sensing of crop type and maturity[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1978, 44(1): 43-55.
- [3] 马文勇, 王训明. 基于高光谱分析的草地叶绿素含量估算研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(1): 25-34.  
Ma W Y, Wang X M. Progress on grassland chlorophyll content estimation by hyperspectral analysis[J]. Progress in Geography, 2016, 35(1): 25-34.
- [4] 谭林, 何秉宇, 刘卫国, 等. 基于优化SVR高光谱指数的独尾草叶绿素含量估算[J]. 生态学杂志, 2017, 36(2): 555-562.  
Tan L, He B Y, Liu W G, et al. Estimation of chlorophyll content of *Eremurus chinensis* based on optimization support vector regression machine[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(2): 555-562.
- [5] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273-288.
- [6] Bonham-Carter G F. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted gaussian model to vegetation reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2): 273-288.

- tance data[J].Computers & Geosciences, 1988, 14(3): 339-356.
- [7] Curran P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3): 271-278.
- [8] 金震宇, 田庆久, 惠凤鸣, 等. 水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(3): 134-137.  
Jin Z Y, Tian Q J, Hui F M, et al. Study of the relationship between rice chlorophyll concentration and rice reflectance[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(3): 134-137.
- [9] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. 遥感学报, 2000, 21(4): 279-283.  
Liu W D, Xiang Y Q, Zheng L F, et al. Relationships between rice LAI, CHL and hyperspectral data[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 21(4): 279-283.
- [10] 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228-232.  
Wang C S, Xiang Y Q, Zheng L F, et al. Estimating chlorophyll density of crop canopies by using hyperspectral data[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(3): 228-232.
- [11] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 等. 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.  
Tang Y L, Wang X Z, Huang J F, et al. Action of derivative spectra and vegetation indices for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 145-150.
- [12] 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 等. 水稻成熟过程中高光谱与叶绿素、类胡萝卜素的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 167-173.  
Tang Y L, Wang J H, Huang J F, et al. Variation law of hyperspectral data and chlorophyll and carotenoid for rice in mature process[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 167-173.
- [13] 杨杰, 田永超, 姚霞, 等. 水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6561-6571.  
Yang J, Tian Y C, Yao X, et al. Hyperspectral estimation model for chlorophyll concentration in top leaves of rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6561-6571.
- [14] 王福民, 黄敬峰, 王秀珍. 水稻叶片叶绿素、类胡萝卜素含量估算的归一化色素指数研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1064-1068.  
Wang F M, Huang J F, Wang X Z. Normalized difference ratio pigment index for estimating chlorophyll and carotenoid contents of in leaves of rice[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(4): 1064-1068.
- [15] 王福民, 黄敬峰, 刘占宇, 等. 水稻色素含量估算的最优比值色素指数研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, 35(3): 321-328.  
Wang F M, Huang J F, Liu Z Y, et al. Optimal simple ratio pigment index for estimating pigment contents of rice[J]. Journal of Zhejiang University( Agric & Life Sci), 2009, 35(3): 321-328.
- [16] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 153-162.
- [17] 浦瑞良, 宫鹏, 约翰 R 米勒. 美国西部黄松叶面积指数与高光谱分辨率 CASI 数据的相关分析[J]. 遥感学报, 1993(2): 112-125.  
Pu R L, Gong P, Jhon R Miller. Correlation leaf area index of ponderosa pine with hyperspectral CASI data[J]. Journal of Remote Sensing, 1993(2): 112-125.
- [18] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 81-88.  
Wang X Z, Huang J F, Li Y M, et al. The study on hyperspectral remote sensing estimation models about LAI of rice[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 81-88.
- [19] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 47-52.  
Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 47-52.
- [20] 刘占宇, 黄敬峰, 王福民, 等. 估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3350-3356.  
Liu Z Y, Huang J F, Wang F M, et al. Adjusted-normalized difference vegetation index for estimating leaf area index of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3350-3356.

- [21] 辛明月,殷红,陈龙,等.不同生育期水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J].中国农业气象,2015,36(6):762-768.  
Xin M Y, Yin H, Chen L, et al. Estimation of rice canopy LAI with different growth stages based on hyperspectral remote sensing data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(6): 762-768.
- [22] Thenkabail P S, Smith R B, Pauw E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(2): 158-182.
- [23] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI[J]. Field Crops Research, 1998, 55(1/2): 83-92.
- [24] Takahashi W, Cong V N, Kawaguchi S, et al. Statistical models for prediction of dry weight and nitrogen accumulation based on visible and near-infrared hyperspectral reflectance of rice canopies[J]. Plant Production Science, 2000, 3(4): 377-386.
- [25] 唐延林,王秀珍,王珂.利用光谱法测定水稻生物物理参数及其与光谱变量的相关性研究[J].山地农业生物学报,2002,21(5):327-331.  
Tang Y L, Wang X Z, Wang K. Study on the correlation between biophysical parameter and spectral variable[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2002, 21(5): 327-331.
- [26] 唐延林,王秀珍,王福民,等.农作物LAI和生物量的高光谱法测定[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(11):100-104.  
Tang Y L, Wang X Z, Wang F M, et al. Study on the determination of LAI and biomass of crop by hyperspectral[J]. Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For (Nat Sci Ed), 2004, 32(11): 100-104.
- [27] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等.水稻地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型研究[J].作物学报,2003,29(6):815-821.  
Wang X Z, Huang J F, Li Y M, et al. Study on hyperspectral remote sensing estimation models for the ground fresh biomass of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(6): 815-821.
- [28] 张远,张中浩,苏世亮,等.基于微波冠层散射模型的水稻生物量遥感估算[J].农业工程学报,2011,27(9):100-105.  
Zhang Y, Zhang Z H, Su S L, et al. Remote sensing estimation of paddy rice biomass based on microwave canopy scattering model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 100-105.
- [29] 洪雪.基于水稻高光谱遥感数据的植被指数产量模型研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.  
Hong X. Rice yield model research based on vegetation index of hyperspectral remote sensing data[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [30] 田国良,郭世忠.水稻的光谱反射特性[J].资源科学,1982,4(2):73-82.  
Tian G L, Guo S Z. Spectral reflection characteristics of rice[J]. Resources Science, 1982, 4(2): 73-82.
- [31] 兆平.水稻产量测报有新法[J].农业工程技术:温室园艺,1986(3):42.  
Zhao P. A new method for measuring rice yield[J]. Agricultural Engineering Technology: Greenhouse Horticulture, 1986(3): 42.
- [32] Yang Y K, Miller L D. Correlations of rice grain yields to radiometric estimates of canopy biomass as a function of growth stage[J]. 대한원격탐사학회지, 1985, 1(1): 63-87.
- [33] 王延颐.南方稻区遥感水稻长势监测与估产研究[J].遥感技术与应用,1991,6(3):1-6.  
Wang Y Y. Using remote sensing technology for rice growth monitoring and yield estimating in south rice region of China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1991, 6(3): 1-6.
- [34] 黄敬峰,杨忠恩,王人潮,等.基于GIS的水稻遥感估产模型研究[J].遥感技术与应用,2002,17(3):125-128.  
Huang J F, Yang Z E, Wang R C, et al. The rice production forecasting models using NOAA /AVHRR Data based on GIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(3): 125-128.
- [35] 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.  
Huang J F, Wang R C, Jiang H X, et al. Selection of optimum periods for rice estimation using remote sensing data based on GIS[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 290-294.
- [36] 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):780-785.  
Tang Y L, Wang J H, Huang J F, et al. Yield estimation by hyperspectral data of rice canopies in mature stages[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(8): 780-785.

- [37] 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.  
Xue L H, Cao W X, Luo W H. Rice yield forecasting model with canopy reflectance spectra [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(1): 100-105.
- [38] 谢晓金,李映雪,李秉柏,等.高温胁迫下水稻产量的高光谱估测研究[J].中国水稻科学,2010,24(2):196-202.  
Xie X J, Li Y X, Li B B, et al. Estimation of rice yield under high temperature stress by hyper-spectral remote sensing [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2010, 24(2): 196-202.
- [39] 蒋琴素,成琪璐,徐礼根,等.基于穗光谱指数的水稻产量预测[J].浙江农业学报,2018,30(2):187-193.  
Jiang Q S, Cheng Q L, Xu L G, et al. Rice yield prediction with panicle spectral indices [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(2): 187-193.
- [40] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041.
- [41] 郭腾飞,梁国庆,周卫,等.施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):337-345.  
Guo T F, Liang G Q, Zhou W, et al. Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 337-345.
- [42] 谢芳,韩晓日,杨劲峰,等.不同施氮处理对水稻氮素吸收及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2010(4):24-26.  
Xie F, Han X R, Yang J F, et al. Study on effect of various free-plowing and throwing super-rice seedling fertilization technique [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(4): 24-26.
- [43] Mistele B, Schmidhalter U. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 29(4): 184-190.
- [44] 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].浙江大学学报(农业与生命科学版),1993(s1):9-16.  
Wang R C, Chen M Z, Jiang H X. Study on the agricultural mechanism of rice yield estimation by remote sensing I. the spectral characteristics of rice and the selection of sensitive bands for different nitrogen levels [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 1993(s1): 9-16.
- [45] 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.  
Zhan J H, Wang K, Wang R C, et al. Sensitive band ranges of leaf spectral reflectance in diagnosis of rice nitrogen nutrition [J]. Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci), 2004, 30(3): 340-346.
- [46] 秦占飞.西北地区水稻长势遥感监测研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.  
Qing Z F. Study on rice condition monitoring with remote sensing in northwest region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [47] 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.  
Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 172-177.
- [48] 田永超,杨杰,姚霞,等.利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J].作物学报,2010,36(9):1529-1537.  
Tian Y C, Yang B, Yao X, et al. Monitoring canopy leaf nitrogen concentration based on leaf hyperspectral indices in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1529-1537.
- [49] 田永超,杨杰,姚霞,等.估测水稻叶层氮浓度的新型蓝光氮指数[J].应用生态学报,2010,21(4):966-972.  
Tian Y C, Yang J, Yao X, et al. A newly developed blue nitrogen index for estimating canopy leaf nitrogen concentration of rice [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 966-972.
- [50] Chu X, Guo Y J, He J Y, et al. Comparison of different hyperspectral vegetation indices for estimating canopy leaf nitrogen accumulation in rice [J]. Plant & Soil, 2013, 376(1/2): 193-209.
- [51] 谭昌伟,周清波,齐腊,等.水稻氮素营养高光谱遥感诊断模型[J].应用生态学报,2008,19(6):1261-1268.  
Tan C W, Zhou Q B, Qi L, et al. Hyperspectral remote sensing diagnosis models of rice plant nitrogen nutritional status [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1261-1268.

- [52] 田永超,杨杰,姚霞,等.水稻高光谱红边位置与叶层氮浓度的关系[J].作物学报,2009,35(9):1681-1690.  
Tian Y C, Yang J, Yao X, et al. Quantitative relationship between hyper-spectral red edge position and canopy leaf nitrogen concentration in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1681-1690.
- [53] 王磊,白由路.基于光谱理论的作物营养诊断研究进展[J].植物营养与肥料学报,2006,12(6):902-912.  
Wang L, Bai Y L. Research advance on plant nutrition diagnosis based on spectral theory[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(6): 902-912.
- [54] Alabbas A H, Barr R, Hall J D, et al. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves 1[J]. Agronomy Journal, 1974, 37(9): 3693-3700.
- [55] 程一松,胡春胜,王成,等.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, et al. Physiological response and spectral characteristics of summer corn under nutrient stress condition[J]. Resources Science, 2001, 23(6): 54-58.
- [56] Osborne S L, Schepers J S, Francis D D, et al. Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(6)(6): 1215-1221.
- [57] 林芬芳,丁晓东,付志鹏,等.基于互信息理论的水稻磷素营养高光谱诊断[J].光谱学与光谱分析,2009,29(9):2467-2470.  
Li Y F, Ding X D, Fu Z P, et al. Application of mutual information to variable selection in diagnosis of phosphorus nutrition in rice[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(9): 2467-2470.
- [58] 乔欣,马旭,张小超,等.大豆叶绿素和钾素信息的冠层光谱响应[J].农业机械学报,2008,39(4):108-111.  
Qiao X, Ma X, Zhang X C, et al. Response of coronary spectrum on chlorophyll and k information of soy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 108-111.
- [59] 易时来,邓烈,何绍兰,等.锦橙叶片钾含量光谱监测模型研究[J].中国农业科学,2010,43(4):780-786.  
Yi S L, Deng L, He S L, et al. A spectrum based models for monitoring leaf potassium content of *Citrus sinensis* (L) cv. Jincheng Orange[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(4): 780-786.
- [60] 黄双萍,岳学军,洪添胜,等.不同物候期柑橘叶片钾素水平预测建模[J].江苏大学学报(自然科学版),2013,34(5):529-535.  
Huang S P, Yue X J, Hong T S, et al. Potassium content prediction model of citrus leaves in different phenological period[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2013, 34(5): 529-535.
- [61] 王珂,沈掌泉.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(4):211-214.  
Wang K, Sheng Z Q. Preliminary study on canopy and leaf reflectance characteristics of rice with various potassium levels[J]. Bulletin of Science and Technology, 1997(4): 211-214.
- [62] 巴家亮.基于高光谱数据的农作物冠层LAI和F<sub>s</sub>(APAR)估算研究[D].武汉:华中农业大学,2013.  
Ba J L. Study on estimating LAI and F<sub>s</sub>(APAR) from hyperspectral data in crop canopy[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [63] 李永梅,张立根,张学俭.水稻叶片高光谱响应特征及氮素估算[J].江苏农业科学,2017,45(23):210-213.  
Li Y M, Zhang L G, Zhang X J. Hyperspectral response characteristics of rice leaves and estimation of nitrogen[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(23): 210-213.
- [64] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7): 1459-1470.
- [65] Mauser W, Bach H. Imaging spectroscopy in hydrology and agriculture-determination of model parameters [C]// Imaging Spectrometry: a tool for environmental observations. Springer Netherlands, 1994: 261-283.
- [66] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等.水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J].遥感学报,2004,8(1):81-88.  
Wang X Z, Huang J F, Li Y M, et al. The study on hyperspectral remote sensing estimation models about LAI of Rice [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 81-88.
- [67] 张正杨,马新明,贾方方,等.烟草叶面积指数的高光谱估算模型[J].生态学报,2012,32(1):168-175.  
Zhang Z Y, Ma X M, Jia F F, et al. Hyperspectral estimating models of tobacco leaf area index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 168-175.

- [68] 杨燕,田庆久.高光谱反演水稻叶面积指数的主成分分析法[J].国土资源遥感,2007,19(3):47-50.  
Yang Y, Tian Q J. Principal component analysis of hyperspectral inversion rice leaf area index [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 19(3): 47-50.
- [69] 张浩,胡昊,陈义,等.水稻叶片氮素及籽粒蛋白质含量的高光谱估测模型[J].核农学报,2012,26(1):135-140.  
Zhang H, Hu H, Chen Y, et al. Estimating nitrogen of rice leaf and protein of rice seed based on hyperspectral data [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(1): 135-140.
- [70] 王霄鹏.黄河三角洲湿地典型植被高光谱遥感研究[D].大连:大连海事大学,2014.  
Wang X P. Study on the yellow river delta wetland typical vegetation using hyperspectral remote sensing [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [71] 王奕涵,石铁柱,刘会增,等.水稻叶片氮含量反演偏最小二乘模型设计[J].遥感信息,2015(6):42-47.  
Wang Y H, Shi T Z, Liu H Z, et al. Partial least square regression model for retrieving paddy rice nitrogen content with band depth analysis and genetic algorithm [J]. Remote Sensing Information, 2015(6): 42-47.
- [72] 方美红,刘湘南.小波分析用于水稻叶片氮含量高光谱反演[J].应用科学学报,2010,28(4):387-393.  
Fang M H, Liu X N. Estimation of nitrogen content in rice leaves with hyperspectral reflectance measurements using wavelet analysis [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 28(4): 387-393.
- [73] 田永超,杨杰,姚霞,等.利用叶片高光谱指数预测水稻群体叶层全氮含量[J].作物学报,2010,36(9):1529-1537.  
Tian Y C, Yang J, Yao X, et al. Monitoring canopy leaf nitrogen concentration based on leaf hyperspectral indices in rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1529-1537.
- [74] 周冬琴,朱艳,杨杰,等.基于冠层高光谱参数的水稻叶片碳氮比监测[J].农业工程学报,2009,25(3):135-141.  
Zhou D Q, Zhu Y, Yang J, et al. C/N content ratio of rice leaf monitoring based on canopy hyperspectral parameters [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 135-141.
- [75] 陈君颖,田庆久,施润和.水稻叶片叶绿素含量的光谱反演研究[J].遥感信息,2005(6):12-16.  
Chen J Y, Tian Q J, Shi R H. Study on simulation of rice leaf's chlorophyll concentration via the spectrum [J]. Remote Sensing Information, 2005(6): 12-16.
- [76] 姚霞,田永超,倪军,等.水稻叶片色素含量近红外光谱估测模型研究[J].分析化学,2012,40(4):589-595.  
Yao X, Tian Y C, Ni J, et al. Estimation of leaf pigment concentration in rice by near infrared reflectance spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2012, 40(4): 589-595.
- [77] 吕杰,刘湘南.利用支持向量机构建水稻镉含量高光谱预测模型[J].应用科学学报,2012,30(1):105-110.  
Lv J, Liu X N. Hyperspectral remote sensing estimation model for Cd concentration in rice using support vector machines [J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(1): 105-110.
- [78] 李旭青,刘湘南,刘美玲,等.水稻冠层氮素含量光谱反演的随机森林算法及区域应用[J].遥感学报,2014,18(4):923-945.  
Li X Q, Liu X N, Liu M L, et al. Random forest algorithm and regional applications of spectral inversion model for estimating canopy nitrogen concentration in rice [J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(4): 923-945.