

张小媛,林陈捷,朱明帮,等. 基于作物光谱的耕地质量评价研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):1-8.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.001

基于作物光谱的耕地质量评价研究进展

张小媛^{1,2}, 林陈捷^{1,2}, 朱明帮^{1,2,6}, 夏子清^{1,2,6}, 胡月明^{1,2,3,4,5,6}

(1. 华南农业大学资源环境学院,广东广州 510642; 2. 广东省土地利用与整治重点实验室,广东广州 510642;

3. 广东省土地信息工程技术研究中心,广东广州 510642; 4. 自然资源部建设用地再开发重点实验室,广东广州 510642;

5. 电子科技大学资源与环境学院,四川成都 610000; 6. 广州市华南自然资源科学技术研究院,广东广州 510642)

摘要:根据文献资料,归纳总结了遥感耕地质量评价、作物光谱在耕地质量评价的应用、耕地质量作物光谱响应 3 个方面的研究概况。总结得出,目前遥感耕地质量评价是基于遥感技术下的多层次内容,其中包括耕地质量评价的遥感指标提取、耕地作物信息提取、作物生物生化参数反演等方面;同时指出在现有的研究中,存在耕地质量与作物光谱的响应机制仍不明晰等问题。在今后研究中,有必要探索耕地质量与不同类型作物的内在关联与响应机制,为实现快速、准确的遥感耕地质量评价提供新的理论基础。

关键词:遥感;耕地质量;作物;光谱响应;评价;信息获取;研究进展

中图分类号:F323.211;S127 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)02-0001-07

耕地是土地资源中的精华,耕地质量直接关系到粮食安全、社会稳定和长远发展。及时掌握耕地实际状况,客观并利用先进技术方法评价复杂的耕地质量至关重要^[1-3]。现有耕地存在面积范围广、定点监测面积小、人为投入大、土壤污染反馈滞后等问题,而利用遥感手段可以大面积、快速、实时获取有效耕地信息,从而节省人力、物力,有效把握耕地变化动态^[4-6]。利用遥感技术快速监测评价区域耕地质量变化,是现行耕地质量评价方法的一大助力,对区域经济发展、农业生产、粮食安全、生态环境保护以及可持续发展具有重要意义^[7-9]。

目前通过遥感高光谱技术可以获取较多指标,如植被指数、植物净初级生产力(NPP)、光谱反射率等,而作物的光谱信息仅作为反演耕地质量相关指标的手段之一^[10-12]。已有的研究少有从作物光谱响应与耕地质量的角度直接研究两者的相关性。针对现有的问题,本文从遥感耕地质量评价、作物

光谱在耕地质量评价的应用、耕地质量作物光谱响应 3 个方面进行总结分析,以期展望耕地质量评价与作物光谱响应的研究思路。

1 基于遥感技术的耕地质量研究

1.1 基于遥感技术获取评价指标

20 世纪 60 年代以后,随着遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)技术、信息技术、最优化计算等技术的发展,国外土地生产力定量模拟模型的应用更加广泛;这一阶段,耕地质量评价已经开始步入半定量、基本量化时期^[13]。

遥感信息覆盖面积大、实时性和现势性强、速度快、周期性、准确可靠,因此遥感技术已成为进行土地利用研究的重要手段,通过遥感数据提取出耕地信息,获取评价指标,对更新土地利用图、准确确定耕地空间分布、分析耕地地力状况有较高的参考价值。

例如,在土壤重金属含量的研究中,Kooistra 等利用红外反射光谱和偏最小二乘回归法(PLSR)预测了土壤镉(Cd)、锌(Zn)含量^[14]。Kemper 等利用土壤反射光谱预测了西班牙 Aznalcollar 矿区土壤砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)、铁(Fe)元素的含量^[15]。李巨宝等利用偏最小二乘回归法模型,建立了农田土壤中铁、锌、硒(Se)含量与土壤反射光谱的对应关系,探讨了应用高光谱遥感技术定量监测土壤重金属含量的可行性^[16]。在耕地质量综合评价中,于

收稿日期:2021-05-07

基金项目:国家重点研发计划(编号:2020YFD1100203);广东省科技兴农-农业科技创新及推广项目(编号:2020KJ102-3);四川省科技计划(编号:2020YFG0033)。

作者简介:张小媛(1998—),女,广东汕尾人,硕士研究生,主要从事土地利用与地理信息系统相关研究。E-mail:young21202@163.com。

通信作者:胡月明,博士,教授,主要从事土地资源监测评价相关研究。E-mail:yueminghugis@163.com。

晓静对黑龙江省肇东市耕地质量进行了评价,从中分辨率成像光谱仪(MODIS)植被指数产品中提取出归一化植被指数(NDVI)作为评价因素,其余因子如坡度、土壤类型、耕层厚度、障碍层厚度、pH 值及有机质、全氮、有效磷、速效钾含量等指标均来自野外采样、专题图等非遥感数据^[17]。

在应用遥感技术进行耕地质量识别的指标可行性研究方面,杨建锋等以美国陆地卫星 Landsat-5 TM 的多光谱遥感影像为数据源,通过建立反演模型和实地验证,得出如下结论:土壤有机质含量、地形坡度、表层土壤质地、灌溉保证率和排水条件这 5 个指标可以通过遥感影像进行反演识别(其中灌溉保证率和排水条件的影像资料获取较难),而剖面构型、障碍层次和土壤 pH 值等 3 个指标通过遥感识别的准确度较低^[18]。

综合已有研究,目前能够用遥感获取的评价因子主要可以归纳为土壤有效养分、重金属含量、作物属性、气候因子、立地条件等,具体内容见表 1。

表 1 遥感评价因子

评价因子	内容
土壤有效养分等	有机质含量、氮磷钾肥+有机质循环(NPKC)、含水量、阳离子交换量(CEC)
重金属含量	土壤 Pb、Cd、Hg、As、铬(Cr) 全量含量
作物属性	植被指数、光合有效利用率、叶绿素含量、蒸腾速率、根系活力、叶面积指数等
气候因子	地表温度、土壤温度、农作物温度
立地条件	海拔、坡度、坡向、表层土壤质地、土壤侵蚀性、水蚀指数、风蚀指数、黏土矿物类型

1.2 基于遥感技术的耕地质量评价

常规的耕地质量评价方法主要以经验判断、数理统计等定性、定量的方法为基础。前期采用单位粮食产量与耕地地力共同确定耕地质量等级,但忽略了其他自然与人为因素,此后在耕地质量评价指标中陆续加入立地条件、土壤质量、耕地质量等^[19-20]。也用到人为的赋值与判断,如农业部发布的 NY/T 1634—2008《耕地地力调查与质量评价技术规程》、美国土地评价与立地分析系统(land evaluation and site analysis system,简称 LESA)中均有提到运用特菲尔法、层次分析法等^[21]。但这类方法存在定量数据较少、受决策者主观影响较大、指标过多难以确定指标的权重、计算量过大等缺点。此后,以模糊数学为基础的评价方法用于农田地力、耕地质量、土壤质量和耕地质量^[22]。但该方法

有一定的局限性,信息过于简单会导致系统精度过低,对较为复杂的系统不能完全的控制^[23]。

为了改善评价方法存在的局限性,学者们从生物进化及仿生学中受到启发,借鉴自然现象通过研究自然界规律构建仿生算法,提出许多启发式的智能优化方法。近年来机器学习算法如神经网络算法、遗传算法、支持向量机等被用来进行分类评价^[24-26],它们为解决许多复杂优化问题提供了崭新的途径。神经网络算法虽然克服了传统方法的主观随意性等缺陷,但是智能评价方法同样存在一定的不足,如神经网络模型存在过度拟合、学习过程慢、可能陷入局部极小点、黑箱运行难以对结果进行解释等问题,影响输出结果的准确性。遗传算法对初始种群的选择有一定的依赖性,有许多参数的选择大部分是依靠经验,如交叉率和变异率,并且这些参数的选择严重影响了解的品质。支持向量机方法在大规模训练样本中难以实施,对解决多分类问题存在一定的困难。

基于遥感手段的耕地质量评价方法是基于常规评价方法的基础上,以遥感成像机制为基础,用遥感技术方法,与常规耕地质量评价对应的耕地质量信息提取、反演。与常规耕地质量评价法相比,遥感耕地质量评价法在尺度、精度、方法模型、试验统计等方面都有很大的不同,在能反映耕地质量的众多因子中,部分因子能被遥感技术直接或间接的反演(表 1)。基于现有的耕地质量评价体系的复杂性、高成本、周期长,利用遥感技术评价耕地质量的方法,构建基于遥感的耕地质量评价与监测体系,可以为耕地质量评价提供一个全新的模式。

目前,学者开始利用遥感卫星获取耕地质量的部分指标,如有机质含量、地形坡度、表层土壤质地等。主要是利用 GIS 和 RS 技术,通过数学和决策模型对评价因子、评价因子权重的确定和耕地分等定级,形成比较成熟的半定量耕地质量评价方法体系^[27]。如伍育鹏等提出了一种用标准样地进行耕地质量动态监测与预警的方法,该方法以标准样地的质量因素体系为控制,同时结合社会经济因素和区位因素,确定影响耕地质量变化的易变因子,根据动态监测的需要进行定期连续的野外调查和数据采集,结合遥感时相数据提取指标值,设定耕地质量变化的阈值和变化监测的时间间隔参数,对耕地质量进行动态监测^[28]。马佳妮等以多源遥感数据为基础,从地学特征、土壤特性、环境状况、建设

水平和生物多样性等 5 个维度,构建基于多源遥感的耕地质量评价指标体系,实现耕地质量信息的实时、大范围获取^[29]。结果表明,利用遥感技术提取评价指标表现出高精度的优势,同时将栅格作为评价的基本单元能够使得耕地质量的局部信息得以详细表达,有着清晰的层次;但是不能用遥感技术提取全部的指标,而且由于没有考虑尺度转换问题,获取的耕地质量指标数据太粗糙,误差较大,从而影响耕地质量评价精度。

也有学者尝试利用遥感技术进行耕地质量评价,但评价方法并未完善。如方琳娜等利用 2004 年 SPOT 卫星多光谱影像,构建基于 RS 技术的耕地质量评价指标体系^[30]。根据压力-状态-响应框架(PSR)构建评价模型,从 SPOT 多光谱影像中提取 5 项耕地质量评价因子(坡度、土壤退化指数、土壤肥力指数、土壤水分指数、土地利用程度),进行耕地质量评价。但是 PSR 建立的遥感评价体系并不完善,它没有考虑土地经济及土地健康等指标,而且利用各种植被指数表征土壤退化指数、土壤肥力指数、土壤水分指数,这种方法问题较多,如利用差值植被指数(DVI)来代表土壤含水量,在地物单一的地区,建立植被指数和土壤含水量有一定相关性,但在地物复杂的区域不可行;另外对于裸土耕地来说,DVI 无法使用。而若用比值植被指数(RVI)代表退化指数,在研究抛荒地时由于野生植被的生长,RVI 可能很小也可能很大,无法表征耕地是否退化。王铭锋等基于 GIS 与 RS 技术,结合三峡库区区域特点,从自然质量、区位条件、生态安全、空间形态 4 个层面选取指标,构建三峡库区耕地质量综合评价指标体系,对库区耕地质量进行评价与分类,并利用统计数据对研究结果进行验证,但并没有阐述选取指标的代表性程度,而且没有对耕地质量进行多尺度的评价,特别是没有从时间尺度上分析耕地质量动态变化,从而影响了评价精度^[31]。

现阶段相关研究以土壤、作物等与耕地相关的信息对区域耕地进行某种角度、程度上的判别和运用。遥感技术的引进使得耕地质量评价精度大大提高,但其中大多从方法模型出发,优化(修正)已有模型参数,使得模型在参数获取、参数质量等方面更进一步体现耕地质量的表征情况。下一步研究应在此基础上,加大遥感技术前提下的耕地质量宏观把控,突破常规手段的短板,利用持续不断发展的光谱技术,完善评价方法和评价体系。

2 作物遥感光谱技术应用

2.1 基于遥感的耕地作物信息获取

通过遥感光谱技术获取作物参数进行大范围的作物产量估产,可以为国家和区域发展提供重要的基础信息,在确保国家粮食安全和调整种植业结构等方面具有重要意义^[32]。欧盟在 1987 年提出农业遥感监测(monitring agricultural with remote sensing,简称 MARS)计划,以准确获取作物相关信息^[33]。在我国,早在 1979 年陈述彭先生便开始倡导农业遥感产量估产,国家也从 1985 年起开始将作物估产列为重要课题^[34]。

传统的作物类型、产量等信息的获取以统计上报和抽样调查为主,但对统计数据过度依赖,存在主观性强、误差大和费力耗时且缺乏空间分布等问题。遥感技术作为新型对地观测技术,因宏观性、综合性和动态性的特点,可实现在不同时空尺度下对区域农作物信息的获取^[35-36]。不同卫星平台、不同传感器和不同时空分辨率的遥感数据已广泛应用于农作物信息提取中,研发了很多针对单一类型的农作物信息监测技术方法^[37-38]。

基于遥感光谱技术的作物估产,与传统的农学预报、统计预报、气象预报等作物估算方法不同,它是引入光谱原理,通过遥感技术获取作物信息及相关参数,在宏观尺度上实现作物产量信息的快速和准确提取,简化作物产量估算过程,提高作物估算结果可靠性的方法。基于不同作物在不同生育期的光谱特征差异,利用作物生育期的遥感影像记录的地表信息,识别作物类型并提取种植面积、监测作物长势,进而评估作物产量的过程,主要包括作物识别和作物估产 2 个过程^[39]。

2.1.1 作物识别 精确地识别作物种植情况也是农业遥感一直关注的主要问题之一。而利用多时相遥感监测的时相变化特征也是识别作物类型的关键因素。Panigrahy 等用 GIS 技术和 RS 数据对耕地复种指数进行了深入研究^[40]。陈沈斌等对我国主要粮食产区农作物的遥感估产进行了研究,简单分析了不同种类、不同地区的农作物估产实施方案^[41]。冯美臣等利用 MODIS 数据与 Landsat 卫星数据相结合的方法对冬小麦面积变化和生长趋势进行了研究^[42]。

作物时序植被指数数据(植被指数^[43]、叶绿素^[44]、叶面积指数^[45]等)可表征作物的季相节律特

征,跟踪作物生长的动态轨迹以直观地反映作物从播种、出苗至成熟等过程^[46]。因此,作物的遥感识别主要是依据作物的光谱差异和物候差异。

基于低空间分辨率遥感卫星的时间序列遥感影像,分析比较不同农作物单一或多特征参量的光谱-时序曲线特征,开展全球尺度、大区域农作物种植结构提取是目前最为常用的技术方法^[47-49]。杨武德等通过对 Landsat TM 影像进行监督分类,完成了 2001 年山西省运城市冬小麦种植面积的识别和提取^[50]。现阶段相关领域已经发展到运用模糊数据、神经网络以及决策树等识别方法,如熊勤学等通过构建 MODIS-NDVI 的时序特征,利用分层方法和反向传播(BP)神经网络法,提取了江陵县中稻、晚稻、棉花的种植空间分布^[51]。由于受影像空间分辨率的制约,异物同谱和同物异谱现象易导致作物识别精度不高,且工作量大,只适合于中小尺度的作物面积监测。

基于不同作物的光谱特征,通过提取特征波长、分析光谱曲线变化,增强光谱特征空间的分离性,充分挖掘作物在空间分布上的变化特征,构建作物的光谱特征集^[52]。如张初等采用近红外高光谱图像技术提取西瓜种子的光谱反射率,运用连续投影算法进行特征波长选择,并基于特征波长建立了特征集^[53]。或直接运用高光谱影像,基于面向像元进行作物识别分类,如刘磊等利用 Landsat TM 影像,提取了呼伦贝尔地区农业种植区内冬小麦、大麦、油菜等作物的空间分布^[54]。基于面向对象的作物识别,综合考虑对象的光谱特征,如范磊等利用 ALOS 卫星 AVNIR-2 传感器影像和面向对象方法,结合植被指数获取植被信息,对影像进行分割,提取冬小麦及种植面积^[55]。此类方法充分利用了对象的光谱特征,并结合了纹理特征等进行分析,能有效减少异物同谱和同物异谱现象的影响,获得更高的识别精度。

2.1.2 作物估产 作物产量估计方面的相关研究中,最初大多数是集中于红光和近红外及中红外的特征波段研究,基于特征波段,将各波段组成的不同形式的植被指数与生物量进行相关分析,建立估产模型,如任建强等利用 AVHRR 传感器 NDVI 数据与冬小麦产量的统计数据,分别基于冬小麦产量形成关键期内各月 NDVI 数据和产量形成关键期累积 NDVI 构建了产量模型^[56]。Jiang 等提取了河南省冬小麦 NDVI,探讨 NDVI 与作物生长状况相互作

用的原理,并分析了 NDVI 与冬小麦产量的关系,建立多种模型估算产量^[57]。白丽等结合棉花生长发育规律,对棉花各时期冠层进行高光谱反射率测定,根据光谱曲线特征构建高光谱植被指数,对光谱反射率与产量进行统计分析^[58]。Ye 等利用航空高光谱影像提取冠层平均光谱反射率,采用反向神经网络算法分析柑橘的冠层平均反射率与产量之间的相关性^[59]。

也有利用遥感数据估测作物地上干物质质量,然后再依据干物质质量与产量之间的关系,构建基于遥感的生产效率模型来估算产量^[60-62]。付元元以冬小麦为研究对象,基于 2013 年小区试验和 2008 年、2009 年的大田试验采集的冠层高光谱数据,围绕叶面积指数(LAI)、地上生物量和氮营养指数(NNI)3 个作物长势参数的反演问题进行了研究,获取作物长势空间变异信息^[63]。也有引入遥感观测的作物生产参数来校正作物模型的,通过作物模型模拟作物的生长过程和产量^[64-66]。

而基于特征波段的估产研究中,受波段范围、波段数及波长位置限制,往往对作物类型不敏感,从而导致估产精度不高。现阶段主要是通过筛选光谱参数,如敏感波段、反射率等,反演不同作物的生物量,进行更精确的作物产量估算,如刘斌等利用在关键生育期内的小麦冠层高光谱数据和实测地上鲜生物量,选取并确定了适宜冬小麦生物量反演的敏感波段的最佳波段宽度^[67]。又如唐延林等测定了水稻抽穗后在不同时期冠层的高光谱反射率,发现水稻冠层光谱反射率随生育期在可见光区域逐渐增大而在近红外区域逐渐减小^[68]。在提取光谱数据的敏感波段的基础上构建模型,方法简单易行,但需要建立在大量的样本数据基础上,不具有代表性;对于作物类型复杂多样的区域存在局限性,并且缺乏对作物生长的机制性研究与描述。

2.2 作物生物生化量反演

作物的生物生化量分为物理参量和化学参量,其中物理参量包括 LAI、光合有效辐射分量(FPAR)等,化学参量包括叶片色素、氮含量;关于生物生化参量的研究中,最初是探究各项参数与高光谱数据之间的相关性,发现与之变化相关的光谱特征参数。如刘伟东等通过单相关分析和逐步回归方法研究水稻 LAI、叶绿素密度分别与光谱反射率、反射率的一阶微分光谱的相关关系,结果表明叶绿素密度与光谱数据的相关性明显优于与 LAI 的相关

性^[69]。另外,也有研究利用光谱曲线变化、最优波段组合、光谱指数等估测各项生物生化量,如柏军华等研究棉花冠层光谱对不同 LAI 的响应,分析 LAI 与冠层光谱反射率和反射率一阶微分之间的定量关系,提取棉花冠层特征光谱信息,构建 LAI 高光谱反演参数,建立估算模型^[70]。

现阶段的生化量研究中,主要通过分析光谱敏感波段、敏感参数等特征信息,建立各项生化参量的预测模型,如刘红玉等通过提取敏感波段下的纹理特征,建立基于光谱和图像特征的番茄叶片氮、磷、钾元素模型^[71]。又如陈瑛瑛等利用高光谱技术测定了稻穗的全氮含量并进行了相应的分析,得到与稻穗全氮含量相关性较高的光谱特征指数,并建立了相应的估算模型^[72]。

3 耕地质量与作物光谱响应

基于遥感高光谱影像数据基础上,研究遥感变量,如遥感植被指数、结构指数、红边波段比值、对数指数等,与各个耕地质量监测评价指标之间的内在关联性^[73-75],揭示耕地质量评价指标与作物光谱吸收和反射特性的内在机制与差异。林晨等建立了基于 MODIS 卫星数据的耕地质量自然等反演模型,以 MODIS 影像和农用地分等属性数据为基础,根据作物反射吸收原理进行遥感影像灰度值与农用地自然质量指数的相关性分析^[76]。丁美青以多光谱数据为数据源,对土壤质量遥感评价指标进行信息提取和综合分析,建立多光谱遥感影像与土壤有机质定量多项式及 BP 神经网络反演模型^[77]。欧阳玲先基于遥感与实测数据,分析遥感变量指标与耕地质量的敏感性,构建支持向量机(SVM)耕地质量评价模型,对松嫩平原南部耕地质量进行评价;并基于耕地质量评价结果探讨作物产量、植被指数、植被净初级生产力、植被覆盖度等作物指标之间的关联性,进一步反映松嫩平原南部耕地质量动态变化^[78]。马佳妮等采用 2000—2010 年 MODIS 数据,结合气象站点数据,利用 VPM 模型分别计算水稻和玉米的净初级生产力,反映作物常年长势与耕地质量的内在响应,得到表征耕地质量的评价结果^[79]。

基于实测高光谱数据,分析不同耕地质量胁迫下,不同生长期的作物信息在可见光近红外中的诊断性光谱特征,运用相关系数法、偏最小二乘法、逐步回归法、主成分分析法、多元线性回归分析等方

法^[80-81],构建耕地质量与作物光谱关联模型,揭示不同耕地质量状态下作物光谱的内在响应机制。如 Jongschaap 等通过对马铃薯叶片光谱红边区域进行提取,建立马铃薯叶片氮积累量预测模型,进行指标敏感性分析,取得较高精度^[82]。Stone 等利用小麦冠层叶片光谱数据,根据氮光谱指数(PNSI)预测小麦植株氮素积累量,分析光谱指标与作物生长及耕地质量的响应关系^[83]。Clevers 等对水稻冠层光谱与叶片含水率进行相关分析,得出 970 nm 是预测水稻含水率的最佳波段^[84]。Zhou 等提出了利用类胡萝卜素和红边波段比值构建植被用类胡萝卜素敏感指数和红边波段比值构建植被指数,研究了更准确有效的耕地质量评价指标的反演方法^[85]。

4 展望与思考

在利用遥感技术实现对耕地质量的监测评价研究中,缺乏对耕地质量与作物光谱响应机制的研究,耕地质量与作物光谱的内在关联性仍不明晰。因此,如何从大量的光谱信息中,筛选能有效表征耕地质量的光谱变量,进一步阐明作物光谱与耕地质量的内在响应机制,是目前亟待解决的问题,也是目前遥感耕地质量评价工作中的焦点。此外,直接探讨作物光谱与耕地质量的关联性,有效提高遥感耕地质量评价结果的精度,对保护耕地和快速获取耕地质量信息具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1]胡月明,刘洛,王广兴,等. 耕地质量建设与管理[M]. 北京: 科学出版社,2017:8-12.
- [2]Mori S, Kato M, Ido T. GISELA - GIS - based evaluation of land use and agriculture market analysis under global warming[J]. Applied Energy, 2010, 87(1): 236-242.
- [3]Elsheikh R, Shariff A R B M, Amiri F, et al. Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): a decision and planning support tool for tropical and subtropical crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93: 98-110.
- [4]German R N, Thompson C E, Benton T G. Relationships among multiple aspects of agriculture's environmental impact and productivity: a meta-analysis to guide sustainable agriculture[J]. Biological Reviews, 2017, 92(2): 716-738.
- [5]Liu Y S, Zhang Y Y, Guo L Y. Towards realistic assessment of cultivated land quality in an ecologically fragile environment: a satellite imagery - based approach[J]. Applied Geography, 2010, 30(2): 271-281.
- [6]付国珍,摆万奇. 耕地质量评价研究进展及发展趋势[J]. 资源科学, 2015, 37(2): 226-236.

- [7] Castaldi F, Palombo A, Santini F, et al. Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbon [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 54 – 65.
- [8] Bojórquez – Tapia L A, Diaz – Mondragón S, Ezcurra E. GIS – based approach for participatory decision making and land suitability assessment [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2001, 15(2): 129 – 151.
- [9] 朱永恒, 濮励杰, 赵春雨. 土地质量的概念及其评价指标体系研究 [J]. *国土与自然资源研究*, 2005(2): 31 – 33.
- [10] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195 – 213.
- [11] Fang H L, Liang S L, Hoogenboom G. Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM – CERES – Maize model for corn yield estimation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(4): 1039 – 1065.
- [12] Anderson M C, Zolin C A, Sentelhas P C, et al. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 82 – 99.
- [13] 陈百明. 加拿大耕地质量监测概述 [J]. *自然资源*, 1996(2): 77 – 80.
- [14] Kooistra L, Wehrens R, Leuven R S E W, et al. Possibilities of visible – near – infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 466(1/2): 97 – 105.
- [15] Kemper T, Sommer S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(12): 2742 – 2747.
- [16] 李巨宝, 田庆久, 吴昭昭. 浚阳河两岸农田土壤 Fe、Zn、Se 元素光谱响应研究 [J]. *遥感信息*, 2005(3): 10 – 13.
- [17] 于晓静. 基于 GIS 和 RS 技术的肇东市耕地质量评价研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [18] 杨建锋, 马军成, 王令超. 基于多光谱遥感的耕地等别识别评价因素研究 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 230 – 236.
- [19] Ben – Dor E, Patkin K, Banin A, et al. Mapping of several soil properties using DAIS – 7915 hyperspectral scanner data – a case study over clayey soils in Israel [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(6): 1043 – 1062.
- [20] Chang C W, Laird D A, Mausbach M J, et al. Near – infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 480 – 490.
- [21] 闫一凡, 刘建立, 张佳宝. 耕地地力评价方法及模型分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(5): 204 – 210.
- [22] Shan – Ming F U, F Xiao, Wen – Ji S U, et al. The evaluation of heavy metals pollution in soils of the lower reaches of the Hengshi River within the Dabaoshan mining area based on fuzzy mathematics [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1140 – 1146.
- [23] 杜红悦, 李 京. 土地农业适宜性评价方法研究与系统实现——以攀枝花为例 [J]. *资源科学*, 2001, 23(5): 41 – 45.
- [24] 徐剑波, 宋立生, 夏 振, 等. 基于 GARBF 神经网络的耕地土壤有效磷空间变异分析 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 158 – 165.
- [25] 张 豪, 罗亦泳, 张立亭, 等. 基于遗传算法最小二乘支持向量机的耕地变化预测 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 226 – 231.
- [26] 赖红松, 吴次芳. 基于粗糙集和支持向量机的标准农田地力等级评价 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2141 – 2154.
- [27] Xia Z Q, Peng Y P, Liu S S, et al. The optimal image date selection for evaluating cultivated land quality based on Gaofen – 1 images [J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 4937.
- [28] 伍育鹏, 郎文聚, 李武艳. 用标准样地进行耕地质量动态监测与预警探讨 [J]. *中国土地科学*, 2006, 20(4): 40 – 45.
- [29] 马佳妮, 张 超, 吕雅慧, 等. 多源遥感数据支撑的耕地质量监测与评价 [J]. *中国农业信息*, 2018, 30(3): 14 – 22.
- [30] 方琳娜, 宋金平. 基于 SPOT 多光谱影像的耕地质量评价——以山东省即墨市为例 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27(5): 73 – 80.
- [31] 王铭烽, 田风霞, 贺秀斌, 等. 三峡库区耕地质量评价 [J]. *山地学报*, 2017, 35(4): 556 – 565.
- [32] 吴炳方. 中国农情遥感速报系统 [J]. *遥感学报*, 2004, 8(6): 481 – 497.
- [33] 刘海启. 欧盟 MARS 计划简介与我国农业遥感应用思路 [J]. *中国农业资源与区划*, 1999(3): 57 – 59.
- [34] 陈述彭. 遥感在农业科学技术中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 20 – 32.
- [35] Brown J C, Kastens J, Coutinho A, et al. Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time – series MODIS vegetation index data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130: 39 – 50.
- [36] Wardlaw B D, Egbert S L, Kastens J H. Analysis of time – series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U. S. Central Great Plains [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 290 – 310.
- [37] Gallego F J, Kussul N, Skakun S, et al. Efficiency assessment of using satellite data for crop area estimation in Ukraine [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 29: 22 – 30.
- [38] Wu B F, Li Q Z. Crop planting and type proportion method for crop acreage estimation of complex agricultural landscapes [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 16: 101 – 112.
- [39] 王 莺, 巩垠熙. 遥感光谱技术在农作物估产中的应用研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2019, 35(3): 69 – 75.
- [40] Panigrahy S, Manjunath K R, Ray S S. Deriving cropping system performance indices using remote sensing data and GIS [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(12): 2595 – 2606.
- [41] 陈沈斌, 孙九林. 建立我国主要农作物卫星遥感估产运行系统的主要技术环节及解决途径 [J]. *自然资源学报*, 1997, 12(4):

- 363-369.
- [42] 冯美臣, 杨武德, 张东彦, 等. 基于 TM 和 MODIS 数据的水旱地冬小麦面积提取和长势监测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 103-109, 313.
- [43] 焦险峰, 杨邦杰, 裴志远, 等. 基于植被指数的作物产量监测方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 104-108.
- [44] 黄慧, 王伟, 彭彦昆, 等. 利用高光谱扫描技术检测小麦叶片叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1811-1814.
- [45] 杜鹤娟, 柳钦火, 李静, 等. 光学与微波植被指数协同反演农作物叶面积指数的可行性分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(6): 1587-1611.
- [46] 胡琼, 吴文斌, 宋茜, 等. 农作物种植结构遥感提取研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(10): 1900-1914.
- [47] Simonneau V, Duchemin B, Helson D, et al. The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(1): 95-116.
- [48] Xiao X M, Boles S, Liu J Y, et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(4): 480-492.
- [49] 张喜旺, 秦耀辰, 秦奋. 综合季相节律和特征光谱的冬小麦种植面积遥感估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 154-163, 295.
- [50] 杨武德, 宋艳敏, 宋晓彦, 等. 基于 3S 和实测相结合的冬小麦估产研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 131-135, 315.
- [51] 熊勤学, 黄敬峰. 利用 NDVI 指数时序特征监测秋收作物种植面积[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 144-148.
- [52] Castillejo-González I L, López-Granados F, García-Ferrer A, et al. Object- and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(2): 207-215.
- [53] 张初, 刘飞, 孔汶汶, 等. 利用近红外高光谱图像技术快速鉴别西瓜种子品种[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 270-277.
- [54] 刘磊, 江东, 徐敏, 等. 基于多光谱影像和专家决策法的作物分类研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15809-15811.
- [55] 范磊, 程永政, 王来刚, 等. 基于多尺度分割的面向对象分类方法提取冬小麦种植面积[J]. 中国农业资源与区划, 2010, 31(6): 44-51.
- [56] 任建强, 陈仲新, 唐华俊, 等. 长时间序列 NOAA-NDVI 数据在冬小麦区域估产中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(3): 326-332.
- [57] Jiang D, Wang N B, Yang X H, et al. Study on the interaction between NDVI profile and the growing status of crops [J]. Chinese Geographical Science, 2003, 13(1): 62-65.
- [58] 白丽, 王进, 蔣桂英, 等. 干旱区基于高光谱的棉花遥感估产研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2499-2505.
- [59] Ye X J, Sakai K, Garciano L O, et al. Estimation of citrus yield from airborne hyperspectral images using a neural network model [J]. Ecological Modelling, 2006, 198(3/4): 426-432.
- [60] Bastiaanssen W G M, Ali S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 94(3): 321-340.
- [61] Lobell D B, Sibley A, Ortiz-Monasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(3): 186-189.
- [62] Yuan W P, Chen Y, Xia J Z, et al. Estimating crop yield using a satellite-based light use efficiency model [J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 702-709.
- [63] 付元元. 基于遥感数据的作物长势参数反演及作物管理分区研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [64] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(3): 266-274.
- [65] Padilla F L M, Maas S J, González-Dugo M P, et al. Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery [J]. Field Crops Research, 2012, 130: 145-154.
- [66] Wang H, Zhu Y, Li W L, et al. Integrating remotely sensed leaf area index and leaf nitrogen accumulation with RiceGrow model based on particle swarm optimization algorithm for rice grain yield assessment [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 083674.
- [67] 刘斌, 任建强, 陈仲新, 等. 冬小麦鲜生物量估算敏感波段中心及波宽优选[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 125-134.
- [68] 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.
- [69] 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, 4(4): 279-283.
- [70] 柏军华, 李少昆, 王克如, 等. 棉花叶面积指数冠层反射率光谱响应及其反演[J]. 中国农业科学, 2007, 40(1): 63-69.
- [71] 刘红玉, 毛罕平, 朱文静, 等. 基于高光谱的番茄氮磷钾营养水平快速诊断[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 212-220.
- [72] 陈瑛瑛, 王徐艺凌, 朱宇涵, 等. 水稻穗部氮素含量高光谱估测研究[J]. 作物杂志, 2018(5): 116-120.
- [73] 徐涵秋. Landsat 7 ETM+ 影像的融合和自动分类研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(2): 186-194.
- [74] 张友水, 原立峰, 姚永慧. 多时相 MODIS 影像水田信息提取研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 282-288.
- [75] 李婷, 吴克宁. 基于遥感技术的耕地质量评价研究进展与展望[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(15): 5-9.
- [76] 林晨, 周生路, 吴绍华. 基于 MODIS 影像的农用地自然质量动态快速监测研究[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(1): 116-121.
- [77] 丁美青. 土地开发整理区土壤质量遥感定量评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [78] 欧阳玲. 基于遥感和 SVM 模型的松嫩平原南部耕地质量评价[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.

章慧敏, 宋旭东, 周广飞, 等. 玉米纹枯病研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 8-14.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.002

玉米纹枯病研究进展

章慧敏¹, 宋旭东¹, 周广飞¹, 张振良¹, 冒宇翔¹, 陈国清^{1,2}, 陆虎华¹, 石明亮¹, 黄小兰¹, 薛林^{1,2}, 郝德荣¹

(1. 江苏沿江地区农业科学研究所, 江苏如皋 226541; 2. 江苏省现代作物生产协同创新中心, 江苏南京 210095)

摘要:玉米是全球三大粮食作物之一,具有重要的战略地位。玉米纹枯病是一种由立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)侵染玉米引起的真菌性病害,在世界范围内广泛发生,每年造成的产量损失超过10%。由于缺少免疫和高抗材料,且玉米对纹枯病的抗性为多基因控制的数量性状,易受环境影响,导致玉米纹枯病的抗性遗传和育种应用研究进展缓慢。对玉米纹枯病致病菌与致病机制、抗病种质资源筛选、抗性及相关数量性状座位(QTL)定位、抗性机制和防治方法的研究进展进行综述,以期开展玉米纹枯病抗性研究和应用提供新思路。

关键词:玉米纹枯病; 育种; 抗病种质资源; 数量性状座位(QTL)

中图分类号:S435.131.4+9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)02-0008-07

玉米是世界上重要的粮食作物之一,也是我国的重要粮食作物,然而由于病虫害的频繁发生与流行,致使玉米产量与品质严重受损。玉米纹枯病是玉米上的病害之一,在世界范围内均可发生,其为立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)引起的真菌性病害^[1]。由于近年来玉米密植、玉米主产区的多年连作及缺少优质高抗玉米品种的应用,导致玉米纹枯病发病呈加快的趋势,一般年份发病率达40%,严

重时发病率达100%,使得玉米产量与品质快速下降^[2-4]。因此,研究并有效地控制纹枯病病害对玉米产业的发展和粮食安全具有重要价值。

1 玉米纹枯病致病病菌与致病机制

1.1 玉米纹枯病菌的分类

迄今,立枯丝核菌菌丝融合种群数量已经达到14个,Ogoshi在融合群的基础上划分亚群,发现了18个立枯丝核菌亚群^[5-7]。玉米纹枯病在全世界范围内均有发生,但各发生地病原的种类存在一定差异。研究者发现,在拉丁美洲、菲律宾只有AG1-IA^[8-9],而在土耳其的玉米上则分离到了AG-4、AG-5、AG-10、AG-Ba和WAG-Z^[10],在印度发现了AG-1-IA、AG-1-IB和AG-3^[11]。

我国各地区玉米纹枯病病菌的融合群也不尽相同。目前已经在东北地区鉴定出AG1-IA、AG1-IB、AG1-IC、AG4-HG-I、AG4-HG-III、

收稿日期:2021-04-28

基金项目:南通市科技项目(编号:JC2020102);江苏沿江地区农科所青年科技基金[编号:YJ(2020)001];江苏现代农业产业技术体系建设专项资金;江苏省第十四批“六大人才高峰”高层次人才选拔培养资助项目(编号:NY-138)。

作者简介:章慧敏(1993—),女,安徽铜陵人,硕士,研究实习员,研究方向为玉米遗传育种。E-mail:hmzhang@qq.com。

通信作者:郝德荣,博士,研究员,研究方向为玉米遗传育种。E-mail:deronghao@jaas.ac.cn。

[79] 马佳妮,张超,吕雅慧,等. 基于长时间序列遥感数据反演NPP的耕地质量评价[J]. 农业机械学报,2019,50(1):202-208.

[80] Wu M Q, Zhang X Y, Huang W J, et al. Reconstruction of daily 30 m data from HJ CCD, GF-1 WFV, Landsat, and MODIS data for crop monitoring[J]. Remote Sensing, 2015, 7(12): 16293-16314.

[81] 和海霞,杨思全,陈伟涛,等. 环境减灾卫星高光谱数据在减灾中的应用研究[J]. 航天器工程,2011,20(6):118-125.

[82] Jongschaap R E E, Booij R. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(3): 205-218.

[83] 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]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(5): 1623-1631.

[84] Clevers J G P W, Kooistra L, Schaepman M E. Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2008, 10(3): 388-397.

[85] Zhou X F, Huang W J, Zhang J C, et al. A novel combined spectral index for estimating the ratio of carotenoid to chlorophyll content to monitor crop physiological and phenological status[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 76: 128-142.