

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.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.002

基于遥感技术的耕地质量评价研究进展与展望

李 婷, 吴克宁

[中国地质大学(北京)土地科学技术学院/国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100083]

摘要:快速、准确开展耕地质量评价是当前农地保护的重要课题, 随着高空间、高光谱和高时间分辨率遥感数据使高效了解我国耕地质量状况, 实现耕地质量的长期监测成为可能。为推进耕地质量信息快速获取及实时动态评价, 从耕地生产力评价、土壤环境评价和土壤健康质量评价 3 个方面界定耕地质量的复杂内涵, 系统分析、总结了遥感技术在耕地质量评价中的识别指标集, 最后从耕地质量评价的聚焦转移、耕地质量信息提取技术的多元发展、耕地质量评价成果的应用 3 个方面对遥感技术在耕地质量评价应用的发展方向进行展望。

关键词:耕地质量; 评价; 遥感; 识别; 研究进展; 展望

中图分类号:S127; F323.211 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)15-0005-05

耕地质量是一个综合性指标, 内涵丰富。陈印军等认为耕地质量是土壤质量、环境质量、管理质量和经济质量的总和^[1]。沈仁芳等认为耕地质量是多层次的概念, 较为重视耕地的空间地理质量属性^[2]。吴克宁等认为耕地质量不仅仅

体现在生产能力方面, 还应重视有益、有害元素及污染等对质量的影响^[3]。此外, 随着土地整治、土壤改良等农田基本建设力度的加大, 耕地质量在结构、布局上都发生了巨大变化。如何快速开展耕地质量评价是当前耕地保护的重要课题。遥感技术以地物信息覆盖面积大、周期性强、实时性和现势性强、准确可靠著称。传统耕地质量调查评价技术耗时费力, 迫切需要引入遥感技术对耕地质量快速评价, 适应新形势下耕地质量成果实时更新、强化监管需要。探索基于遥感技术的耕地质量信息提取可行性, 对构建基于遥感的耕地质量指标体系, 快速、准确地表达耕地状态具有重要意义。

收稿日期: 2017-03-09

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2015BAD06B01)。

作者简介: 李 婷(1992—), 女, 四川绵阳人, 硕士, 主要从事土地评价研究。E-mail: liting_1005@163.com。

通信作者: 吴克宁, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地评价与利用规划研究。E-mail: wkn0113@163.com。

flowering and corms yield of potted freesia[J]. Journal of Ecological Engineering, 2014, 15(3): 97-102.

[57] Jing H J, Li H Q. Chitooligosaccharide prolongs vase life of cut roses by decreasing reactive oxygen species [J]. Korean journal of horticultural science and technology, 2015, 33(3): 383-389.

[58] Sang N V, Minh H D, Anh D N. Study on chitosan nanoparticles on biophysical characteristics and growth of Robusta coffee in green house[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2013, 2(4): 289-294.

[59] El-Miniawy S M, Ragab M E, Youssef S M, et al. Response of strawberry plants to foliar spraying of chitosan[J]. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 2013, 9(6): 366-372.

[60] Górnik K, Grzesik M, Romanowska - Duda B. The effect of chitosan on rooting of grapevine cuttings and on subsequent plant growth under drought and temperature stress[J]. Journal of Fruit & Ornamental Plant Research, 2008(16): 333-343.

[61] Saavedra G M, Figueroa N E, Poblete L A, et al. Effects of preharvest applications of methyl jasmonate and chitosan on postharvest decay, quality and chemical attributes of *Fragaria chiloensis* fruit[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 448-453.

[62] Sathiyabama M, Charles R E. Fungal cell wall polymer based nanoparticles in protection of tomato plants from wilt disease caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 133(7): 400-407.

[63] Kerch G. Chitosan films and coatings prevent losses of fresh fruit

nutritional quality: a review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 46(2): 159-166.

[64] Hewajulige I G N, Wilson Wijeratnam R S, Perera M G D S, et al. Extending storage life of commercially important tropical fruits using bio-waxes[J]. Acta Horticulturae, 2015, 1091: 283-289.

[65] Tayel A A, Moussa S H, Salem M F, et al. Control of citrus molds using bioactive coatings incorporated with fungal chitosan/plant extracts composite [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(4): 1306-1312.

[66] Kaya M, Česonienė L, Daubaras R, et al. Chitosan coating of red kiwifruit (*Actinidia melanandra*) for extending of the shelf life[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 85: 355-360.

[67] Carvalho R L, Cabral M F, Germano T A, et al. Chitosan coating with trans - cinnamaldehyde improves structural integrity and antioxidant metabolism of fresh - cut melon[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 113: 29-39.

[68] Petriccione M, Pasquariello M S, Mastrobuoni F, et al. Influence of a chitosan coating on the quality and nutraceutical traits of loquat fruit during postharvest life[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 197(10): 287-296.

[69] Zhang Y, Zhang M, Yang H. Postharvest chitosan - g - salicylic acid application alleviates chilling injury and preserves cucumber fruit quality during cold storage [J]. Food Chemistry, 2015, 174(10): 558-563.

1 常规的耕地质量相关评价

1.1 耕地生产力评价

土壤肥力是耕地生产力的基础,目前土壤肥力评价研究主要集中在养分指标,包括全氮、碱解钾、速效钾、速效磷、有机质、pH 值、阳离子交换量(CEC)等,而土壤物理性状指标、生物指标和环境条件因子研究相对较少^[4]。在耕地生产力评价方面,一些研究依托农业部有关耕地地力课题,进行了实证研究。张海涛等进行江汉平原耕地生产力评价时,考虑土体构型、理化性状、养分状况和农田基本建设的差异,筛选出剖面构型、土地厚度、耕层厚度、耕层质地、土壤 pH 值、速效 N、速效 P、速效 K、全 N、全 P、全 K、灌溉保证率等指标^[5]。吴克宁等参照《全国耕地类型区、耕地地力等级》的评价因素和指标值,在规范土种资料的基础上筛选了影响河南省耕地地力等级的指标,并结合区域特性补充了地下水埋深、土壤侵蚀、碱化度、植被建设、缺苗率等指标^[6]。还有一些研究除了考虑土壤土地管理等要素,也涉及耕地农业利用的社会经济要素。孙希华等将影响土地生产力的因素分为自然因素和社会经济因素;在通过土壤物理性状、化学性状和生态环境三方面解析自然因素的基础上,选择了劳动力投入、农业机械化、水利化程度、化学化水平、耕地现有生产率和耕地现有人口承载力这些指标来表征社会经济要素^[7]。

1.2 土壤环境质量评价

相关研究多集中于土壤环境质量标准和地区农田(耕地)土壤环境质量现状调查和评价。较早的农田土壤环境质量研究多基于单个指标、单点的土壤环境质量评价,如 Brus 等对荷兰土壤重金属 Cd 污染状况进行了分析和评价^[8]。随着有关技术标准出台,越来越多的研究趋向于多指标分析。一些学者在研究污灌区农田、耕地、基本农田等土壤环境质量评价时,均选取 As、Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、DDT、BHC 这 8 个指标进行单项和综合评价^[9-11]。赵春雨等在压力-状态-响应(PSR)框架下,选取指标在涵盖土壤基本性质的基础上,又补充了太阳辐射、温度、降水量、气象灾害等气象指标,并且着重考察杂草、土壤动物、微生物等生物多样性和景观分形指数、多样性指数、优势度指数、破碎化指数等景观质量水平^[12]。李华等在山西永济市耕地土壤环境质量综合评价中分别检测土壤和水的污染含量,并开展综合评价^[13]。舒英格等在土壤肥力状况、重金属污染程度和立地条件这 3 组评价指标上对喀斯特山区(以贵阳市乌当区为例)石灰岩母质发育的旱耕地土壤环境质量进行全面评价^[14]。综上所述,耕地土壤环境质量评价指标经历了由单指标、单点采样到多指标、大样本采样,环境质量评价体系由单一的重金属污染状况分析拓展到包括土壤肥力、立地条件和重金属污染状况的综合考察。

1.3 土壤健康质量评价

在耕地健康质量评价方面的研究尚不多见,较多集中在土地健康、土壤健康这 2 个方面。土地健康是土地维持自身正常新陈代谢的一种状态,其自身恢复能力可缓和外界对土地生态系统的不良冲击。目前,国际上尚无统一标准的土地健康评价体系^[15]。比较具有代表性的一是 Vieira 等在土壤质量下降、表土风蚀、水土流失、植被减少、土地酸化及盐碱化等导致土地健康恶化的现象分析基础上,提出的土地条件变

化评价指标体系^[16];二是依据联合国开发计划署(united nations development programme,简称 UNDP)和世界经济合作与发展组织(organization for economic cooperation and development,简称 OECD)提出的“压力-状态-响应”(PSR)分析框架,结合土地系统特点,构建区域土地系统健康评价模型^[17];三是由目标层、准则层和指标层组成,采用综合指数法构建的土地利用系统健康评价指标框架体系^[18]。关于土壤健康,美国学者 Doran 和 Parkin 将其定义为“土壤在生态系统边界内行使维持生物生产力、改善环境质量和促进植物和动物健康机能的能力”^[19]。在选择土壤健康评价指标时,应侧重灵敏度高、使用范围广、分析测量方法切实可行的生态特点^[20]。也有研究通过重金属分析进行土壤健康诊断。一些生物学家强调用土壤微生物来评价土壤健康质量,赵吉提出应从土壤微生物量、活性、多样性和功能性 4 个方面指标来评价土壤健康^[21]。周丽霞等通过土壤微生物学特性与土壤质量的关系分析,阐明了土壤微生物对土壤健康的生物指示功能^[22]。还有一些研究通过考察土壤全碳、有机碳、全氮及微生物生物量碳和氮等指标来分析保护性耕作下黄土高原作物轮作系统土壤健康水平^[23]。总体上看,土壤健康质量评价仍然处于初步探索阶段。

2 耕地评价指标的遥感技术识别情况

2.1 遥感技术在土壤本底质量研究中的应用

自 20 世纪 20 年代以来,国内外学者在土壤光谱特性方面开展了大量研究,为耕地质量信息化监测提供了丰富的试验数据。其中土壤有机质、水分、全氮、颗粒机械组成与光谱反射率关系的研究较多,相关研究总结了土壤理化性状与反射率的关系,并建立了定量估测模型,但由于土壤反射光谱数据获取无统一标准和研究区域的差异性,不同研究的定量遥感结果区域化特征明显,共享性受到限制。表 1 列出了一些形成普遍共识的研究成果。

2.2 遥感技术在土壤污染研究中的应用

废水、废气、废弃物的不当排放和堆放,引起了严重的环境污染问题。这使通过遥感技术获取农田、草原等土壤、河湖水系污染也成为遥感应用的一个重要领域。目前关于人类活动引起生态环境污染的问题多集中于土壤重金属含量的研究,探讨其通过遥感定量检测的可行性。根据 Kooistra 等的研究,莱茵河流域土壤 Cd、Zn 与有机质含量间存在很好的正相关关系,并利用可见光-近红外反射光谱和偏最小二乘回归法预测了土壤 Cd、Zn 含量^[45-46]。Kemper 等利用土壤反射光谱预测了西班牙 Aznalcollar 矿区土壤 As、Hg、Pb 及 Fe 元素的含量^[47]。李巨宝等利用偏最小二乘法(partial least squares regression,简称 PLS)模型,建立了农田土壤中 Fe、Zn、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^[48]。王璐等根据实验室测得的土壤反射光谱,利用偏最小二乘回归法预测了 Pb、Cd、Hg 等重金属元素的含量,模拟、分析了多光谱数据估算土壤重金属含量的可行性^[49]。解宪丽等研究探讨了可见-近红外反射光谱与土壤 Cu、Pb、Zn、Cd 等 9 种重金属元素之间的相关性^[50]。龚绍琦等通过土壤重金属与土壤光谱相关分析,并利用逐步回归分析法,研究确定了 Cr、Cu、Ni 3 种重金属元素的

表 1 遥感土壤性状研究成果

土壤理化性状	研究发现	参考文献
土壤有机质	(1) 土壤光谱反射率与土壤有机质含量呈显著负相关; (2) 土壤有机质的光谱影响范围主要在可见光和近红外波段; (3) 土壤母质、含水量和长期农田耕作管理的差异会降低遥感影像与有机质的相关性	[24 - 27]
土壤水分	(1) 土壤水分含量与水分在吸收波段的吸收强度之间具有很好的线性相关关系; (2) 一般土壤含水量在 10% ~ 25%, 反射率变化显著, 而持水性差的土壤, 其灵敏度范围可能少于 10%	[28 - 31]
土壤质地	(1) 土壤黏粒由于具有很强的吸湿作用, 一般风干状态下, 土壤光谱曲线的水分吸收带主要是由黏粒吸持的水分所引起的。 (2) 可见光近红外光谱技术具有快速、便捷、非破坏等特点, 被广泛用于快速测试土壤质地。其中, 可见光波段对土壤粒径变化的敏感度要大于近红外波段	[32 - 35]
土壤氮、磷、钾	土壤营养元素 N、P、K 含量与土壤可见光、近红外光谱之间具有较高的相关性, 尤其是土壤 N 含量	[36 - 40]
土壤盐渍化程度	利用植被光谱指数和土壤光谱指数相结合的方法建立模型可以提高土壤盐渍化信息的反演精度	[41 - 44]

最佳遥感模型^[51]。史舟等的研究表明, 土壤重金属含量可以通过 X 射线荧光光谱传感器和激光等离子体光谱传感器应用测出^[52]。

2.3 遥感技术在耕地立地条件识别的应用

随着高分辨率遥感技术的发展, 基于面向对象提取耕地信息方法得到广泛应用, 刘晓娜等采用面向对象分类方法对北京大兴区遥感影像开展了耕地、交通运输用地、河流水面、水工建筑用地、农田水利用地、农田防护林地的信息提取, 通过多尺度分割, 提取出不同层次不同地类信息, 且验证精度较优^[46]。在耕地质量建设中, 农田道路等基础设施工程、灌排沟渠等水利工程及农田林网等生态防护工程以线状地物为主。针对线状地物的准确识别, 张超等以高分辨率遥感影像为数据源, 在 Canny 边缘检测基础上, 通过断点连接, 高低双长度阈值过滤, 提取出了精度优于 95% 的道路、沟渠线状工程地物信息^[53]。顾振伟等通过光谱阈值选取, 结合 Canny 算子补充提取法, 解决了微小弯曲和被遮蔽沟渠问题, 使沟渠提取精度达 91.46%^[54]。随着灌溉技术的发展, 出现了新型无渠灌溉的方式, 基于遥感的灌溉保证能力评价也不再局限于依靠沟渠等灌溉设施识别。黄健熙等以河北省衡水市为例, 基于 modis 蒸散发遥感数据, 结合气象站点数据, 在水量平衡原理基础上, 分别计算出年度有效灌溉量和灌溉需水量, 将两者的比值作为灌溉保证能力评价的量化指标, 经实例验证其评价结果满足耕地质量等级监测基本要求^[55]。扈晶晶等采用 ZY-3 遥感数据分析了农田防护林光谱特征, 并根据决策树法分类、提取出防护林信息^[56]。为实现农田防护林信息自动提取, 幸泽峰等基于 ZY-3 和 Landsat 8 遥感影像数据, 综合利用数学形态学和面向对象法提取出农田防护林的矢量结果^[57]。由于农用井、配电房等小地物识别较难实现小尺度的分割结果, 岳安志等提出基于土地整理规划图约束下的灰度归一化相关系数模板匹配法, 对某土地整理区农用井进行识别验证, 其识别准确率达 88%^[58]。

2.4 遥感技术在耕地质量综合评价中的应用

当前应用遥感进行耕地质量评价研究尚处于起步阶段, 评价数据源多以专题制图仪 (thematic mapper, 简称 TM) 或多光谱扫描仪 (mulri spectral scanner, 简称 MSS) 单一遥感影像为主, 且主要以各类植被指数与非遥感数据相结合的方式获取因子进行评价。如方琳娜等从地球观测 (systeme probatoired observation de la terre, 简称 SPOT) 多光谱影像中提取了 NDVI、DVI、RVI 以反映土壤肥力状况、水分状况、土壤退化状况, 并结合坡度信息、土地利用程度等, 构建了评价指

标体系^[59]。于晓静等对黑龙江省绥化市肇东市耕地质量进行评价, 从 MODIS 植被指数产品中提取出 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、有机质、pH、全氮、有效磷、速效钾等指标均来自野外采样、专题图等非遥感数据^[60]。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 Landsat TM 5 多光谱遥感影像为数据源, 通过建立反演模型和实地验证, 得出土壤有机质、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) 以及剖面构型、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的结论^[61]。

2.5 遥感技术可识别的归纳总结

遥感技术可识别质量评价指标体系详见表 2。

3 耕地质量评价展望

3.1 耕地质量评价的聚焦转移

传统耕地质量评价关注点随土地管理的发展不断转移。土壤学家、农学家已经由强调通过耕地生产水平表征耕地质量, 转向包括耕地环境、健康质量在内的多层次体系评价。遥感作为先进技术引入到耕地质量评价中是机遇, 也是挑战。目前遥感数据发挥的作用比较有限, 获取足够的地面实测数据需要花费大量时间和人力, 且将局部数据推广到整个研究区也存在困难, 这使得多数研究中遥感数据的应用局限在植被类型和覆盖的估算上。更多指标, 如重金属等, 多处于微观探索性的机理研究, 不适于大尺度耕地质量监测。区别于传统的耕地质量评价, 遥感技术在实际应用中有很多限制, 所受影响因素也复杂多变, 追求快速也致使精度较低。并且耕地质量相关的土壤指标信息在遥感手段检测中, 往往相互联系。如何在有效缩编指标集的同时, 又保证信息缺失程度最低, 将是耕地质量评价指标确定的关键。随着科学计数发展和地物光谱识别规则的完善, 土壤属性及其他要素属性的反演模型方法将从各方面得到发展, 指标集也可随之丰富、深化。

3.2 耕地质量信息提取技术的多元发展

在耕地质量指标信息获取、识别过程中, 遥感技术作为一种新手段正快速规范化。传感器的不断改进促使遥感数据精度在空间、光谱分辨率方面不断突破, 定量遥感正在成为研究热点, 高分辨率和高光谱数据逐渐成为基础数据和常规遥感数据, 这大大提升了遥感在耕地质量信息反演的可靠性, 如雷达遥感全天候全天时获取影像和穿透地物应该被更广泛应用于耕地质量监测。地面光谱、高光谱和多光谱数据具有很强

表 2 遥感技术可识别质量评价指标体系

监测类型	监测内容	监测指标	指标获取	遥感获取方法
田块	大小	田块集中连片度	根据田块面积大小量化	遥感影像解译田块
		田块规模	田块面积 - 田间末级设施占地面积	
	形状	田块规整度	分维数	DEM 影像
	坡降	田块平整度	数字高程模型 (digital elevation model, 简称 DEM) 影像提取各评价单元坡度值	
土壤	化学特性	有机质含量	实地采样, 实验室采样分析	光谱特性与土壤基本性质 进行分析, 建模反演
		全氮含量		
		有效磷含量		
		速效钾含量		
		CEC		
	物理特性	土壤 pH 值		
		土壤盐渍化程度		
		土壤质地		
		土壤含水量		
		土壤污染		
水	灌排设施	灌溉保证率	有效灌溉量/灌溉需水量	MODIS 陆地蒸散产品数据
		灌溉设施密度	评价单元内灌溉设施面积/评价单元总面积	遥感影像解译井
路	田间道路	道路通达度	农村道路总长度/评价单元总面积	遥感影像解译农村道路
林	农田防护林	防护林覆盖率	防护林面积/评价单元总面积	遥感影像解译防护林

的互补性,不同数据源的集成技术、信息定量提取与表达方法将是研究关键。遥感信息模型和先进知识的发展都将不断提高数据的融合、分类识别以及提取信息精度的可靠性。数理统计方法以及先进思想的应用,使得评价方法也日趋多样化;相关分析、因子分析、模糊评价、层次分析、系统聚类条评价模型的发展,使得耕地质量评价向将数据库、模型库、方法库、专家系统与 GIS 集成更加完备。GIS 强大的空间分析和数据管理功能可实现在空间数据库基础上建立针对各利用方式的应用模型,将提高农业决策的可靠性和客观性,推进耕地质量的有效管护。

3.3 耕地质量评价成果的应用

基于遥感的耕地质量评价可快速完整地掌握耕地状态变化信息,有助于空间上贯彻落实耕地占补平衡,实现有效监督,避免占多补少、占优补劣的现象,保证国家粮食安全,动态监管。遥感技术渗透到耕地质量评价的发展中,能够更加全面可靠地解释土壤特征现象,为精细化作业提供可能。融合遥感等先进技术的耕地质量评价与现代农业经营方式匹配,可在一段时期内反复验证耕地功能的差别化实现途径是否合理,将耕地视作完整的生态系统,考虑其与周边环境的联系,针对耕地质量等别变动情况,实时调整其开发利用方向,追求耕地资源的开发利用与其容量相符,以期经济效益、社会效益、生态效益组合达到最优,最终实现人地和谐发展。

4 结论与讨论

如今,耕地质量评价已不单局限于通过耕地地力评价来确定耕地潜在生产力,其相关服务领域也越来越广泛。本文在系统梳理耕地质量影响因素构成的基础上,分析了耕地质量评价因子中哪些要素可以通过遥感技术手段快速提取的可行性,以期为今后耕地质量快速评价提供参考。未来高分辨率数据与高光谱数据的融合应用将成为耕地质量快速评价的强力支撑,如何将实验室理论研究成果应用于实际更是研究突破的关键。遥感技术在耕地质量评价中的发展,将更加快

速且具体地锁定耕地利用中存在的问题,并针对问题从构成要素影响机理入手实现耕地的精准化管理。

参考文献:

[1]陈印军,肖碧林,方琳娜,等. 中国耕地质量状况分析[J]. 中国农业科学,2011,44(17):3557-3564.

[2]沈仁芳,陈美军,孔祥斌,等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. 土壤学报,2012,49(6):1210-1217.

[3]吴克宁,高 硕,汤怀志,等. 农用地分等与土地质量地球化学评估整合方案的探讨[C]// 中国土地学会. 2008 年中国土地学会学术年会论文集. 北京:中国大地出版社,2008:1547-1552.

[4]骆东奇,白 洁,谢德体. 论土壤肥力评价指标和方法[J]. 土壤与环境,2002,11(2):202-205.

[5]张海涛,周 勇,汪善勤,等. 利用 GIS 和 RS 资料及层次分析综合评价江汉平原后湖地区耕地自然地力[J]. 农业工程学报,2003,19(2):219-223.

[6]吴克宁,郑 义,康鸳鸯,等. 河南省耕地地力调查与评价[J]. 河南农业科学,2004,33(9):49-52.

[7]孙希华,侯西勇. 长清县土地生产力综合评价研究[J]. 地球信息科学,2002,4(2):89-92.

[8]Brus D J, de Gruijter J J, Walvoort D J, et al. Mapping the probability of exceeding critical thresholds for cadmium concentrations in soil in the Netherlands[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(6): 1875-1884.

[9]段飞舟,何 江,高吉喜,等. 污灌区农田土壤环境质量评价[J]. 环境科学研究,2006,19(3):114-116.

[10]巫建华,许学宏,陈 斌,等. 江苏中部典型农区耕地环境质量评价及应用研究——以海安县为例[J]. 土壤,2003,35(5):387-391.

[11]李晓秀,陆安祥,王纪华,等. 北京地区基本农田土壤环境质量分析与评价[J]. 农业工程学报,2006,22(2):60-63.

[12]赵春雨,朱永恒. 耕地质量指标体系的构建[J]. 资源开发与市场,2006,22(3):224-227.

[13]李 华,毕如田,乔显亮. 基于 GIS 技术的耕地土壤环境质量综

- 合评价研究——以山西省永济市为例[J]. 土壤, 2007, 39(4): 652–651.
- [14] 舒英格, 何腾兵, 刘元生, 等. 喀斯特山区旱耕地土壤环境质量评价——以贵阳市乌当区为例[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1100–1106.
- [15] 陈美球, 吴次芳. 土地健康研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2002, 24(3): 324–329.
- [16] FAO. Land and water development division[M]. Rome: FAO, 2000.
- [17] 郭杰, 吴斌. 土地利用系统健康评价[J]. 中国土地科学, 2011, 25(4): 71–77.
- [18] 蔡为民, 唐华俊, 陈佑启, 等. 土地利用系统健康评价的框架与指标选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(1): 31–35.
- [19] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[C]// Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, USA: Soil Science Society of America, 1994: 3–21.
- [20] 杨晓霞, 周启星, 王铁良. 土壤健康的内涵及生态指示与研究展望[J]. 生态科学, 2007, 26(4): 374–380.
- [21] 赵吉. 土壤健康的生物学监测与评价[J]. 土壤, 2006, 38(2): 136–142.
- [22] 周丽霞, 丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 162–171.
- [23] 王明明, 李峻成, 沈禹颖. 保护性耕作下黄土高原作物轮作系统土壤健康评价[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 882–886.
- [24] Sullivan D G, Shaw J N, Rickman D, et al. Using remote sensing data to evaluate surface soil properties in Alabama ultisols[J]. Soil Science, 2005, 170(12): 954–968.
- [25] 刘焕军, 张柏, 杨立, 等. 土壤光学遥感研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1197–1202.
- [26] 沙晋明, 陈鹏程, 陈松林. 土壤有机质光谱响应特征研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 21–24, 54.
- [27] 吴才武, 张月丛, 夏建新. 基于地统计与遥感反演相结合的有机质预测制图研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1568–1575.
- [28] Goetz S J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 71–94.
- [29] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy from soils[J]. Soil Science, 1965, 100(2): 130–138.
- [30] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420–427.
- [31] 何挺, 王静, 程烨, 等. 土壤氧化铁光谱特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(2): 30–34.
- [32] Thomasson J A, Sui R, Cox M S, et al. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture[J]. Transacoin of the ASAE, 2001, 44(6): 1445–1453.
- [33] 王德彩, 张雅梅, 毕会涛, 等. Vis-NIR 光谱信息辅助的土壤质地协同克里格预测制图[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 837–842.
- [34] 曾庆猛, 孙宇瑞, 严红兵. 土壤质地分类的近红外光谱分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1759–1763.
- [35] 刘超, 卢玲, 胡晓利. 数字土壤质地制图方法比较——以黑河张掖地区为例[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 177–185.
- [36] Dalal R C, Henry R J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(1): 120–123.
- [37] 张娟娟, 田永超, 姚霞, 等. 基于高光谱的土壤全氮含量估测[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 881–890.
- [38] 张娜, 张栋良, 李立新, 等. 基于高光谱的区域土壤质地预测模型建立与评价——以河套灌区解放闸灌域为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 67–72.
- [39] 陈红艳, 赵庚星, 李希灿, 等. 小波分析用于土壤速效钾含量高光谱估测研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7): 1425–1431.
- [40] 高会, 陈红艳, 刘慧涛, 等. 基于高光谱的鲁西北平原土壤有效磷含量快速检测研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 752–757.
- [41] Dehaan R L, Taylor G R. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80: 406–417.
- [42] 刘焕军, 张柏, 王宗明, 等. 基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 138–142.
- [43] 丁建丽, 伍漫春, 刘海霞, 等. 基于综合高光谱指数的区域土壤盐渍化监测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1918–1922.
- [44] 赵振亮, 塔西甫拉提·特依拜, 孙倩, 等. 土壤光谱特征分析及盐渍化信息提取——以新疆渭干河/库车河绿洲为例[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 280–288.
- [45] 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 flood plains[J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 446(1): 97–105.
- [46] 刘晓娜, 李宪海, 孙丹峰, 等. SPOT5 遥感影像城郊耕地景观提取与廊道立地分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 317–323.
- [47] 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.
- [48] 李巨宝, 田庆久, 吴昉昭. 澄阳河两岸农田土壤 Fe、Zn、Se 元素光谱响应研究[J]. 遥感信息, 2005(3): 10–13.
- [49] 王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(6): 906–913.
- [50] 解宪丽, 孙波, 郝红涛. 土壤可见光-近红外反射光谱与重金属含量之间的相关性[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 982–993.
- [51] 龚绍琦, 王鑫, 沈润平, 等. 滨海盐土重金属含量高光谱遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 169–176.
- [52] 史舟, 郭燕, 金希, 等. 土壤近地传感器进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1275–1280.
- [53] 张超, 王志浩, 杨建宇, 等. 基于 Canny 算子的农田线状工程地物自动提取方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 270–275.
- [54] 顾振伟, 张超, 杨建宇, 等. 基于高分辨率遥感影像的灌排沟渠提取方法[J]. 农业工程, 2014, 4(3): 64–67.
- [55] 黄健熙, 李荔, 张超, 等. 基于遥感蒸散发数据的耕地灌溉保证能力评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 100–106.
- [56] 扈晶晶. 基于 HJ-1 和 ZY-3 遥感图像的农田防护林信息提取研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [57] 幸泽峰, 李颖, 邓荣鑫, 等. 基于 ZY-3 影像的农田防护林自动提取[J]. 林业科学, 2016, 52(4): 11–20.
- [58] 岳安志, 张超, 苏伟, 等. 基于高分辨率遥感影像的土地整理区农用井识别[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 189–193.
- [59] 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): 71–78.
- [60] 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.
- [61] 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.