

遥感技术获取耕地质量评价指标的研究进展分析

张超^{1,2} 高璐璐¹ 郇文聚^{2,3} 李俐¹ 纪文君¹ 马佳妮¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100083;
3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

摘要: 耕地质量指标数据获取是耕地质量评价的基础,遥感为相关数据的快速、大面积获取提供了一种新的手段与方法。本文首先分析了耕地质量内涵和功能,在此基础上利用文献计量法对我国近5年耕地质量评价指标研究进行归纳,结合国外土壤质量的研究现状,提出了基于遥感技术的耕地质量评价指标体系,包括地形条件、土壤属性和田间利用状况3个维度。然后分析了不同维度各指标获取方法的研究现状,概述了目前常用的遥感数据分析方法及对应的技术原理,遥感可有效获取田面坡度、田块状况、田间道路通达度、林网化程度等指标计算所需的基础数据,土壤属性的大尺度获取方法还需进一步研究。最后针对遥感技术获取耕地质量评价指标亟待解决的问题,提出了建议与展望:挖掘耕地质量评价指标的不同尺度遥感特征;加强耕地质量评价指标遥感信息的自动化提取研究;建设耕地质量评价的遥感大数据平台,促进遥感技术在耕地质量评价中的应用。

关键词: 耕地质量; 土壤; 遥感; 评价指标; 地形条件; 田间利用状况

中图分类号: F301.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0001-13 OSID: 

Research Progress on Obtaining Cultivated Land Quality Evaluation Indexes by Remote Sensing

ZHANG Chao^{1,2} GAO Lulu¹ YUN Wenju^{2,3} LI Li¹ JI Wenjun¹ MA Jiani¹

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China
3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: The data acquisition of cultivated land quality index (CLQI) is the basis of cultivated land quality (CLQ) evaluation. Remote sensing (RS) provides a new method for rapid and large-scale monitoring of CLQ data. Firstly, the connotation and function of CLQ were analyzed. On this basis, bibliometric method was used to summarize the research of CLQI in recent five years. Combined with the research status of CLQ and soil quality, CLQI system was established based on RS, which was divided into three dimensions: topographic conditions, soil properties and field utilization status. Secondly, the research status of various index acquisition methods in different dimensions was analyzed, and the commonly used RS analysis methods and corresponding technical principles were summarized. The basic data can be effectively obtained for field slope, field condition, field road accessibility, forest network degree and other indicators, and the large-scale acquisition method of soil properties were needed further research. Finally, aiming at the problems to be solved in RS monitoring of CLQ, the following suggestions and prospects were put forward: mining the remote sensing characteristics of different scales of CLQI; strengthening the research on automatic extraction of remote sensing information of CLQI; and building a remote sensing big data platform for CLQ evaluation, so as to promote the application of RS in CLQ evaluation.

Key words: cultivated land quality; soil; remote sensing; evaluation index; topographic condition; field utilization status

1 耕地质量概述

为了深入分析遥感技术在获取耕地质量评价指标方面的应用潜力,本文从耕地的“生产、生态、生活”多重功能出发,梳理基于遥感技术的耕地质量评价框架与指标体系,分析耕地质量评价指标获取手段的应用进展和发展方向,探讨现有的国产遥感数据与处理平台在耕地质量评价工作中存在的挑战和发展方向,以期为耕地质量评价工作提供数据支撑,促进遥感技术在耕地质量评价方面的应用和发展。

综上,耕地质量内涵是多样化的,选取的耕地质量评价指标要对特定评价目标具有敏感性,可以有效地反映耕地质量和功能的差异性^[21-23]。2018年 ELSE 等^[25]分析了 65 篇与土壤质量相关的文献,总结出使用频率大于 10% 的评价指标,包含了土壤物理、化学、生物 3 方面(表 1)。本文利用文献计量法对我国近 5 年耕地质量评价指标相关研究现状进行统计分析,文献来源于中国知网文献库,总结了 56 篇文献,其中使用频率大于 10% 耕地质量评价指标及其使用频率如图 2 所示,将其归纳为土壤物理、土壤化学、土壤生物、地形特征、田间利用状况等 5 个维度。综上所述可以看出国内外同时重点关注土壤容

表 1 使用频率大于 10 % 土壤质量指标^[25]

Tab.1 Soil quality index with frequency more than 10 %

指标类型	指标
物理指标	持水性、容重、质地、土体构型、土层厚度、穿透力、导水率、孔隙度、团聚体稳定性、入渗系数
	总有机质/碳含量、pH 值、速效磷含量、速效钾含量、
化学指标	全氮含量、电导率、CEC、速效氮含量、重金属含量、其他大量营养元素(Mg、S、Ca)含量、盐渍化程度、有益微量元素含量、不稳定 C 和 N 含量
生物指标	土壤呼吸、微生物量、矿化氮、蚯蚓

重、质地、土体构型、土层厚度、土壤有机质/碳含量、pH 值、土壤养分、电导率、阳离子交换量(CEC)、重金属含量、盐渍化程度、有益微量元素、土壤呼吸、微生物量、蚯蚓等指标,此外,耕地质量还需衡量耕地的坡度地形、灌溉排水、田块状况等耕地利用情况^[26-41]。

2 遥感信息获取手段研究进展

2.1 基于遥感的耕地指标体系构建及技术流程

表 1 和图 2 中耕地质量评价指标的基础数据主

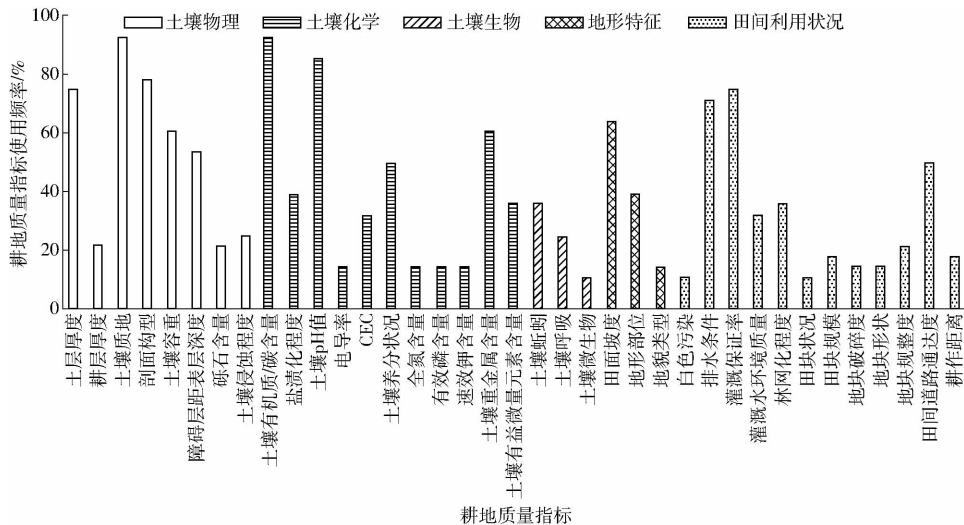


图 2 耕地质量指标使用频率

Fig. 2 Using frequency of cultivated land quality index

要通过历史积累数据库、文献资料、实地调研和遥感技术等途径获取,其中遥感数据可用于提取地形条件中的田面坡度和坡向等指标数据^[42];其他数据主要以实地调研为主,综合定点观测、现场调查、原地采样和传统实验室测定等,得到样点的数据,更新和补充历史积累数据和文献资料等现有数据。整个数据调查过程耗时费力,且较难从面上获取指标监测信息,迫切需要引入新技术提高数据调查和获取效率。遥感为相关指标提供了一种快速、大面积、无损的获取方式。本文对通过遥感手段获取的表 1 和图 2 中耕地质量评价指标进行总结,如表 2 所示。土壤蚯蚓、土壤微生物、土壤呼吸强度等土壤生物指

标的获取方法分别是样点徒手分离、培养液测定、静态气室等方法,由于这类指标具有微观与纵深分布特性,目前仍难以通过遥感技术获取这些指标的信息。

目前可用的遥感数据种类很多,按电磁波的光谱段,可分为光学多光谱和高光谱、热红外、微波雷达等数据;按传感器的工作方式,可以分为主动遥感和被动遥感数据;按获取信息尺度不同,可以分为近地面原位或车载、航空、航天等遥感数据。尺度不同影响耕地质量的主导因素差异显著,评价指标和方法选择也不同。基于遥感的基础数据包括点位、田块、区域及国家等尺度。在点位尺度,需积累原位实地调查的遥感和非遥感数据,为大尺度遥感数据的信息提取,提供建模和验证的相对真值;通过无人机、航空飞机等飞行设备搭载相应传感器,为耕地质量评价提供田块尺度的基础数据;区域、国家尺度需要通过高分系列、Landsat 系列、Sentinel 系列或 MODIS 等卫星遥感传感器,提供亚米级到千米级的遥感数据^[43-49]。

基于遥感的耕地质量评价指标信息提取应用技术流程如图 3 所示。在明确耕地质量评价需求的基础上,收集整理已有数据,科学布设调查样点更新和补充数据,获取天空地遥感及非遥感协同数据,根据

表 2 基于遥感监测的耕地质量评价指标体系

Tab.2 Evaluation index system of cultivated land quality based on remote sensing

指标维度	指标
地形条件	坡度坡向,地形部位
	土层厚度、耕层厚度、障碍层距地表深度,土壤质地,
土壤属性	土壤有机质/碳含量,土壤盐渍化程度、电导率,土壤酸碱度、pH 值,土壤重金属含量
田间利用状况	田块状况、田块规模、地块破碎度、田块形状、田块规整度,灌溉保证率、排水条件,田间道路通达度,耕作距离,林网化程度

工作需要遥感及非遥感数据的预处理,最后实施遥感分类提取土地覆被信息(植被、土壤、道路、沟渠等)和定量分析(土壤有机质含量、土壤质地、植被覆盖度等)(图3)。遥感分类研究大致可分为:基于目视解译;基于频谱纹理特征;面向对象分析;基于大数据、人工智能技术的智能化提取与分析等阶段^[50-51]。遥感影像分类经典算法包括监督分类和非监督分类。近年来,深度学习方法在遥感分类中发展迅速,深度信念网络(DBN)、卷积神经网络(CNN)、自动编码器(AE)等算法应用广泛,可有效地提取影像特征,实现信息提取^[52]。遥感数据定量

化建模过程中,数据预处理主要包括:通过平滑处理、微分变换、去包络线和小波变换等方法提取特征光谱信息;对比室内外干湿土壤光谱信息,采用外部参数正交化法(EPO)、直接标准化法(DS)、分段直接标准化法(PDS)等算法,减弱土壤水分等环境影响;通过研究代表性样本,优化土壤光谱库数据模型,提高模型预测精度^[53-55]。建模方法主要包括经验回归、物理模型和深度学习等。经验回归模型分为线性和非线性回归,简单易用,但局限于特定的时空范围,普适性较差;物理模型参数多,建模困难,普适性强;深度学习依赖于训练样本,物理机理不明

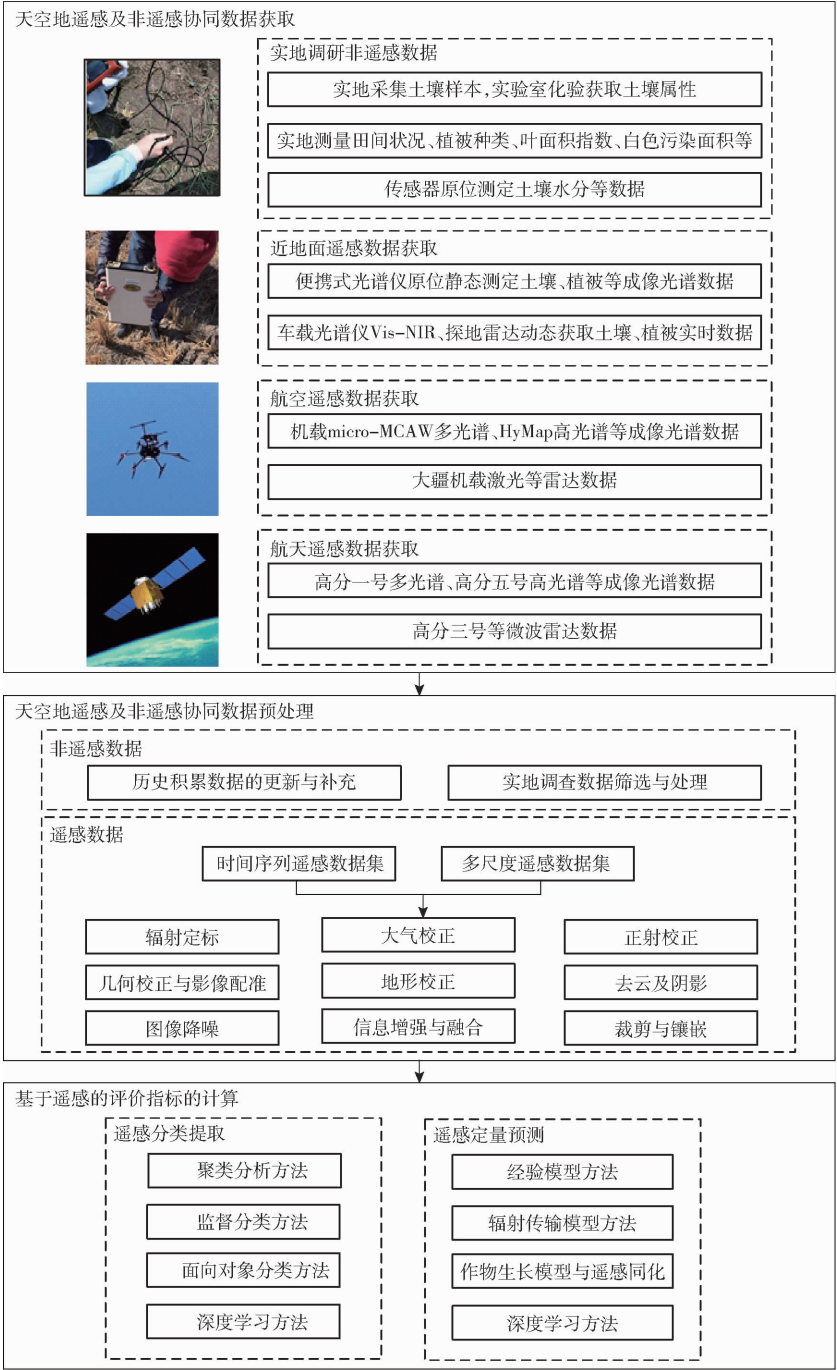


图3 遥感技术在耕地质量评价指标计算中的应用流程

Fig. 3 Application process of remote sensing in calculation of cultivated land quality evaluation indexes

确,可以实现多维度空间的自适应拟合;作物生长模型与遥感同化是一种比较新的方法,通过耦合两者之间的关系,可实现耕地质量评价指标信息的提取^[56-59]。

2.2 地形条件指标信息提取

2.2.1 坡度坡向

坡度和坡向是评价耕地地形条件的重要指标,对作物生长具有一定影响。在评价过程中,一般基于 DEM 数据提取研究区的坡度和坡向信息,该数据具有明显的尺度效应,测量方法主要包括:高程点或等高线差值法,成本低,操作简单,受数据源限制比较大;激光雷达法(LiDAR)适于采集坡面尺度的高精度地形数据,尚处于起步阶段;航空摄影测量法,尤其是无人机载荷,适宜用在小流域尺度,操作便捷;光学卫星遥感(受天气影响)和干涉雷达(不受天气影响)适合较大流域及区域尺度,受空间分辨率的影响,较难获取大比例尺 DEM 数据^[60]。目前,全国范围 1 km、90 m 和 30 m 空间分辨率的 DEM 数据产品可从地理国情监测云平台获取,满足不同尺度的耕地质量评价需求。

2.2.2 地形部位

在耕地质量评价中,数字化的地形部位提取研究较少,主要通过实地调研、地形地貌图等确定地形部位^[41,61]。基于遥感数据获取地形部位信息,主要利用 DEM 和遥感影像等,实现自动/半自动化提取。方法主要包含地形因子提取法、特征要素分析法、波谱分析法、纹理分析法、地貌分类与制图等。其中,地形因子提取法最常用,该方法基于 DEM 计算地形因子,结合已有的地质地貌资料、实地调查、专家先验知识等解译地形部位。已有 100 多种地形因子,如坡度、坡向、地面曲率、地形起伏度、地形粗糙度、地形湿度指数等^[62]。目前,由于地貌形态的复杂性,数字化地形部位分析研究主要集中于定性或半定量阶段,量化研究主要在流域范围,尚未推广到大尺度区域范围^[63-64]。

2.3 土壤属性指标信息提取

土壤是气候、母质、生物、地形和时间等诸多成土因素综合作用下的产物,具有高度的空间异质性。从 20 世纪 70 年代以来,国内外开展了土壤属性的空间制图,主要包括:

(1)基于地统计学的土壤属性空间制图。该方法是利用土壤调查样点数据,分析土壤属性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一^[65-66],有普通克里格、协同克里格、回归克里格等插值方法,此外也有辅助环境变量来提高土壤属性的空间预测精度^[67-68]。近地遥感或光谱测量可为该类方法提供精准的点位上的土壤属性数据。

(2)基于土壤-景观模型的土壤属性遥感制图。遥感数据可为模型提供气候、地形、生物、人为利用等变量因子,耦合土壤属性与环境变量的内在联系,实现空间制图。环境变量包括气候维度的地表气温、蒸散量,地形维度的坡度、坡向,生物维度的归一化差值植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI),人类活动维度的土地覆被分类等^[69-71]。张甘霖等和史舟等分别用第二次全国土壤调查样点数据作为土壤输入数据,结合土壤-景观模型,实现了全国土壤有机碳的三维制图,虽然总体精度不高,但可以得出全国土壤有机碳含量的空间变化趋势^[72-74]。遥感数据提高了大尺度或复杂地形地区土壤属性制图精度,可以得出土壤属性空间变化趋势,但对小区域尺度的土壤属性空间差异性的表达仍不够精细。

(3)基于遥感信息的土壤属性遥感定量预测。地表错综复杂,遥感信息是地表覆盖信息的综合反映。耕地表面经常由作物或作物秸秆所覆盖,卫星遥感数据多用于区域土壤退化评价、障碍性因子识别,或提供相关环境因子辅助土壤制图,而直接用于土壤属性预测一般需要选择农闲的裸土期^[75-76]。航空或无人机遥感具有时间的灵活性,可以有效补充土壤属性预测的数据^[77]。地球上不同元素、不同地物均有独特的光谱特征,遥感图像提取到的光谱被视为辨别物质的“指纹”^[78]。高光谱遥感光谱波段可达几十至几千,可有效反映各种土壤属性的细微差异,目前可用星载和机载的高光谱遥感数据较少,费用较高,限制了高光谱数据的应用,关键环节仍需深入研究。可综合利用实验室、原位或车载的近地面多种传感器,建立土壤属性与对应的光谱信息间的原理模型,为土壤属性遥感预测提供理论依据,可较精准地预测土壤多种属性,但是作业面积相对有限^[79-81]。

(4)基于植被遥感信息的间接土壤属性预测。受天气、卫星过境周期、地表覆盖物等影响,难以直接获得裸土期遥感影像数据时,可以通过地表植被间接估算土壤属性,常用的植被指数如 NDVI、增强植被指数(EVI)、土壤调节植被指数(SAVI)等,应用便捷,但精度较低,普适性较差^[82]。此外,最近有研究将土壤养分遥感反演预测结果作为作物生长模型的输入项,耦合遥感同化技术,不断迭代优化反演预测数据,使模型输出值更拟合实际作物长势或产量信息,从而逆向实现土壤属性的预测。

各个土壤属性的遥感获取研究进展总结概括如下:

2.3.1 土层厚度

土层厚度是三调耕地资源质量分类中土壤物性

参数的一个重要指标,相似的评价指标有障碍层距地表深度、有效土层厚度、耕层厚度等,这些指标是对 0~150 cm 深度的土壤进行分析。传统的土层厚度获取方法有土壤剖面法、插钎法、钻孔法、透度计法等。电磁感应法、地震折射法、大地电磁、伽马射线监测法、探地雷达等地球物理学方法也用于土层厚度信息提取。所用仪器设备包括电导率仪和探地雷达(GPR)等。微波遥感技术测量的土层深度偏浅(小于 0.1 m),难以直接探测土层厚度,GPR 可以实现土壤剖面的监测,通过测定土壤的电磁特性,来定位土壤中的物体或界面,实现对土壤结构、质地或植物根系的高精度探测。GPR 已经在土层厚度的研究中取得一些进展^[83],李俐等^[84]利用 GPR 采集回波信号探测了土壤分层位置和层厚信息。

2.3.2 土壤质地

传统的土壤质地测定方法有比重计法、吸管法、密度计法和激光粒度仪分析法等。土壤质地对土壤光谱信息的影响,一方面是质地影响土壤的持水能力,另一方面是由于土壤颗粒大小的影响。一般来说,土壤颗粒越小,土壤反射率越大;但在相同温度条件下,粘粒吸持水分能力超过粒径较粗的颗粒,使土壤反射率降低^[85]。诸多研究发现粘土与土壤光谱反射率呈显著性负相关,沙土和壤土与反射率相关性较差。土壤质地近地面遥感预测模型的决定系数 R^2 可达 0.8 以上;航空遥感研究较少, R^2 只有 0.6 左右;卫星遥感研究在起步阶段, R^2 只有 0.4 左右,现在预测结果还不能满足应用要求^[86]。土壤中的粘粒含量也可以通过 GPR 监测,随着粘粒含量的增加,GPR 谱频率峰值向低频区域偏移^[87-88]。

2.3.3 土壤有机质/碳含量

土壤有机质/碳含量(SOM/SOC)作为土壤健康诊断的重要指标,是第三次全国国土调查耕地资源质量分类工作中的一个重要土壤性质。基于光学遥感技术,土壤有机质含量对整个可见光-近红外-中红外光谱范围有影响,尤其在可见光波段。一般来说,土壤光谱反射率与土壤有机质含量呈负相关关系^[89]。土壤有机质的光谱特征是土壤理化参数的综合反映,BAUMGARDNER 等^[90]认为当土壤有机质含量大于 2% 时,其对土壤光谱特征有主要的影响作用;当土壤有机质含量小于 2% 时,掩盖其它土壤组成物质光谱特征的能力减弱。大量研究是利用地物光谱仪在近地面小尺度测定土壤光谱,实现 SOM 定量化预测。史舟等^[91]在全国采集了 16 种土壤类型 1 581 个土壤样本(有机质含量 1.66~74.84 g/kg),在室内用地物光谱仪获取不同土壤类型的反射光谱,反演建模精度 R^2 达 0.90。随着无人机的发展,越来越多用于获取较

大面积田块的厘米级遥感图像,协助农业精细化管理,SOM 反演建模精度 R^2 高达 0.90。在大尺度上为了减弱其他土壤属性和外界环境的影响,利用多时期或者不同遥感卫星的裸土期影像进行 SOM 提取。刘焕军等^[92]基于 Landsat 8 和 Sentinel-2A 两期影像,针对东北黑土区的裸土,进行土壤有机质含量遥感反演,基于单期影像的 R^2 达到 0.68,基于两期影像的 R^2 达到 0.79。

2.3.4 土壤盐渍化程度

我国有大概 1/5 耕地存在不同程度的盐渍化和次生盐渍化,土壤盐渍化程度监测是盐渍土改良和治理的重要基础。耕地质量评价一般是通过土壤盐分含量、电导率(EC)等指标量化土壤盐渍化程度。传统的获取方法,如基于电磁感应计,无法满足区域评价的需求。2000 年以来,遥感技术用于土壤盐渍化程度监测,可以通过光学和微波传感器获取信息。对于光学遥感,通过构建盐分光谱指标,如盐度指数(SI)和归一化差异盐度指数(NDSI)监测土壤盐分^[93-94]。当土壤含水量较高或表面结皮时,土壤光谱信息受到影响。通过土壤表面生长的植被受盐分胁迫程度间接反映土壤盐渍化状况,间接监测盐分的指标包括 NDVI、SAVI 等^[95]。利用微波雷达遥感监测土壤盐渍化的研究起步较晚,目前还以定性分析为主,分析土壤盐渍化程度与雷达数据后向散射系数的关系,确定盐渍化程度的空间分布,可有效弥补光学遥感数据的缺失^[96]。土壤盐渍化程度也可用 GPR 估算,反射系数随盐分的增加而增加,结合 3D 建模方法获取盐分的分布面积和渗透深度^[97]。

2.3.5 土壤 pH 值

土壤酸碱度对作物根系活动和根际微生物活动具有重要影响。pH 值主要取决于土壤溶液中 H^+ 的浓度,而 H^+ 的浓度与光谱相关性小。pH 值对土壤光谱没有直接的影响,但土壤 pH 值与植被长势、土壤水分、土地利用类型等存在着很强的相关性,pH 值间接与光谱反射率之间存在相关关系,遥感可在较大区域实现 pH 值预测。有研究表明,土壤 pH 值的遥感预测模型具有区域差异性,可能与土壤类型等有关^[98]。ZHANG 等^[99]分析了光谱指数、环境指标与 pH 值之间的关系,结果表明比值植被指数(RVI)、NDVI、归一化差异水分指数(NDWI)、土地利用等因子与 pH 值相关性较强,这些因子组合建立的预测模型 R^2 为 0.50,可以较好地估计区域尺度上的土壤 pH 值。

2.3.6 土壤重金属含量

重金属污染是我国部分耕地当前突出的土壤环境问题之一。常用的光谱监测技术有紫外-可见分

光光度法 (UV)、原子吸收光谱法 (AAS)、原子荧光光谱法 (AFS)、电感耦合等离子体-原子发射光谱法 (ICP-OES)、X 荧光光谱法 (XRF) 等。近些年来,土壤重金属分析测试技术逐渐与信息技术、遥感技术相互交叉发展^[100]。高光谱分析技术被应用于土壤重金属含量监测,其中预测效果比较好的元素包括:铬、铜、镍、铝、硅、镁、铁、锰、铅、锌、镉、钴、砷和汞等^[101]。预测模型分为两类:一类是根据土壤重金属与土壤粘土矿物、铁锰氧化物、碳酸盐和植被之间的关系,构建间接预测模型;另一类是分析不同尺度的高光谱数据与重金属元素的相关关系,直接建立模型。目前,近地面的土壤重金属含量遥感反演效果较好, R^2 在 0.8 左右^[102]。

2.4 田间利用状况信息提取

田间设施建设对于耕地质量提升和农业增收具有显著的提升效益。田间利用信息指标可转化为遥感影像分类或地物识别问题。基于遥感数据可以提取田块、水利设施、道路、行政村、防护林等地物的边界^[103-104],从而为田块状况、田块规模、地块破碎度、田块形状、田块规整度、灌溉保证率、排水条件、田间道路通达度、耕作距离、林网化程度等指标计算提供

基础数据。根据遥感分类的基本单元,可分为基于像元、面向对象等类型。传统基于像元的分类方法,未充分考虑地物之间的关联关系,存在“同物异谱”和“同谱异物”问题,严重影响耕地田块和线状地物边界提取的精度和完整性^[105]。采用面向对象方法可获得更符合实际的地物边界数据。田间利用信息多来自于对高空间分辨率遥感影像、专题图的矢量化,需要专业人员结合先验知识对遥感影像目视解译各地类的边界信息^[106](表 3)。数据真实可靠,但耗费大量的人力物力。影像自动化分割技术为边界提取提供了一种快速方式。依据遥感影像的颜色、亮度、纹理等特征信息,明确地物的对比度和异质性,选择最优分割尺度,可较为准确地提取地物边界^[107-108]。目前已有 1 000 多种分割算法,包括基于阈值聚类、边缘检测和区域提取。近年来,基于深度学习的算法越来越受到重视,在土地覆被分类方面取得显著成效^[109]。但是最优分割尺度的选取受地域、地物类型、周围环境的影响,因此自动化分割得到的边界结果一般需要手动进一步修正^[110]。此外,有研究表明,利用 MODIS 蒸散发产品,可获取农田灌溉保证率^[111]。

表 3 田间利用状况维度评价数据来源
Tab.3 Data sources of field utilization dimension

指标	获取方法或测定方法
田块状况、田块规模、地块破碎度、田块形状、田块规整度	利用已有耕地图斑数据或高分辨率的遥感影像解译、DEM 影像与实地调查
灌溉保证率、排水条件	通常以乡镇或村庄为调查单位,通过实地调查与农田水利资料图件相结合的方法获取或遥感影像解译
田间道路通达度	通过已有的道路线状数据和耕地图斑数据,或遥感影像解译,结合实地调查
耕作距离	通过已有耕地图斑数据或遥感影像解译,结合实地调查
林网化程度	利用已有耕地图斑数据、防护林矢量图或遥感影像解译

3 基于遥感技术耕地质量评价指标获取存在的挑战和发展方向

耕地质量评价指标中,地形条件的地形部位、土壤属性指标、田间利用状况指标的遥感分类提取或定量化预测均已开展了大量研究,结合不同尺度的 DEM、可见光近红外、热红外、微波雷达数据,取得了不同程度的进展。但遥感应用于耕地质量评价指标获取,还有如下问题值得继续研究。

(1)挖掘耕地质量评价指标的不同尺度遥感特征。耕地覆被类型、土壤含水率、表面粗糙度等在像元尺度都非均匀,导致地面、航空和航天多尺度遥感观测数据存在着尺度效应。为了充分利用不同尺度的遥感数据优势,需要确定耕地质量各指标与不同空间分辨率对应的“相对真值”,实现实地观测“点”数据与遥感影像像元“面”之间的转化。需要进一

步研究:地表样本点的合理布设;遥感数据、遥感产品的尺度转换;合理利用“天空地”一体数字化遥感监测网络,得到更加符合真实情况的监测结果;建立更为有效的遥感分类提取与定量化预测模型。

(2)加强耕地质量评价指标遥感信息的自动化提取研究。我国幅员辽阔,耕地地表覆盖和土壤理化性质的空间差异性大,对遥感数据产生较大的影响。遥感信息如何客观地表示耕地质量指标信息,需要进一步明确不同指标的空间分布规律与时间演变规律。基于全国不同区域均开展了耕地质量相关指标的遥感提取研究和成果,应用大数据、云计算、物联网等技术,结合共享的先验知识、标定样本,对不同时间、不同区域、不同地表覆盖、不同土壤类型下的遥感信息响应规律进行持续学习,得到演变机理和知识经验库,实现基于海量多源、多尺度遥感数据的耕地质量评价指标信息自动化提取。

(3)建设耕地质量评价的遥感大数据平台。我国农业和国土资源遥感经过多年探索,建立了全国航空、航天遥感和地面物联网的“天空地”一体数字化遥感监测网络。自然资源部充分利用国产卫星开展耕地利用情况监测工作,计划每年对耕地完成两次全覆盖监测。尚未在耕地质量评价中形成工程化的遥感数据平台,为耕地质量年度变更快速、大面积提供基础数据。需要加强对耕地质量指标的遥感大面积监测研究,逐步形成工程化的遥感数据获取

平台。

综上所述,在今后研究工作中,需进一步加强遥感理论、技术、方法普适性的探索研究,从而确定更具实际应用意义的耕地质量评价指标提取技术流程,形成可快速、大面积的工程化指标信息获取,实现耕地质量评价结果的快速更新,此外,需要开展土壤生物指标的遥感获取研究,间接监测土壤的微生物状态和动物活动,为耕地质量数量、质量、生态“三位一体”保护提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 土地利用管理司. 国土资源部关于发布2016年全国耕地质量等别更新评价主要数据成果的公告[EB/OL]. (2017-12-26)[2021-08-08]. http://g.mnr.gov.cn/201712/t20171226_1711147.html.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2018中国生态环境状况公报[EB/OL]. (2019-05-29)[2021-08-08]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>.
- [3] 新华社. 中共中央国务院关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见[EB/OL]. (2017-01-23)[2021-08-08]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-01/23/content_5162649.htm.
- [4] 张辉. 全面升级农业遥感应用[N]. 农民日报,2020-02-18(8).
- [5] 国新网. 自然资源部:充分利用卫星遥感技术 加强耕地保护监督[EB/OL]. (2020-09-18)[2021-08-08]. <http://www.scio.gov.cn/m/32344/32345/42294/43680/zy43684/Document/1687855/1687855.htm>.
- [6] 王光辉,徐雪蕾,刘慧杰,等. 创新与共享构建自然资源卫星影像云服务平台[J]. 中国测绘,2019(10):12-13. WANG Guanghui, XU Xuelei, LIU Huijie, et al. Innovation and sharing to build natural resources satellite image cloud service platform[J]. China Surveying and Mapping,2019(10):12-13. (in Chinese)
- [7] 张新乐,钱蕾,鲍依临,等. 黑土区田块尺度耕地质量遥感监测与评价[J]. 土壤通报,2020,51(6):1303-1312. ZHANG Xinle, QIAN Lei, BAO Yilin, et al. Monitoring and evaluation of cultivated land quality with remote sensing at a field scale in the black soil area[J]. Chinese Journal of Soil Science,2020,51(6):1303-1312. (in Chinese)
- [8] 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. MA Jiani, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Cultivated land quality evaluation based on inversion of NPP based on long-term sequence remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019, 50(1):202-208. (in Chinese)
- [9] 董光龙,赵轩,刘金花,等. 基于耕地质量评价与空间集聚特征的基本农田划定研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):133-142. DONG Guanglong, ZHAO Xuan, LIU Jinhua, et al. Prime cropland assignment based on cultivated land quality evaluation and spatial cluster pattern[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2):133-142. (in Chinese)
- [10] 陈正发,史东梅,何伟,等. 基于“要素-需求-调控”的云南坡耕地质量评价[J]. 农业工程学报,2020,36(12):236-246. CHEN Zhengfa, SHI Dongmei, HE Wei, et al. Quality evaluation of slope farmland in Yunnan Province based on “element-demand-regulation” framework[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(12):236-246. (in Chinese)
- [11] LÜ Y H, ZHANG C, MA J N, et al. Sustainability assessment of smallholder farmland systems: healthy farmland system assessment framework[J]. Sustainability, 2019,11(17):4525.
- [12] 姜广辉,张凤荣,孔祥斌,等. 耕地多功能的层次性及其多功能保护[J]. 中国土地科学,2011,25(8):42-47. JIANG Guanghui, ZHANG Fengrong, KONG Xiangbin, et al. The different level and the protection of multi-functions of cultivated land[J]. China Land Science, 2011,25(8):42-47. (in Chinese)
- [13] DORAN J W, PARKIN T B. Defining and assessing soil quality[M]//DORAN J W, COLEMAN D C, BEZDICEK D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA, Madison, WI,1994:3-21.
- [14] DORAN J W, PARKIN T B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set[M]//DORAN J W, JONES A J. Methods for assessing soil quality. SSSA, Madison, WI,1996:25-37.
- [15] AKHTAR-SCHUSTER M, STRINGER L C, ERLEWEIN A, et al. Unpacking the concept of land degradation neutrality and addressing its operation through the Rio Conventions[J]. Journal of Environmental Management,2017,195:4-15.
- [16] BONDI G, WALL D, BACHER M, et al. Role of soil biology and soil functions in relation to land use intensity[C]. EGU General Assembly Conference Abstracts,2017.
- [17] 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. SHEN Renfang, CHEN Meijun, KONG Xiangbin, et al. Conception and evaluation of quality of arable land and strategies for

its management[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2012,49(6):1210 – 1217. (in Chinese)

[18] 张蚌蚌,孔祥斌,郎文聚,等. 我国耕地质量与监控研究综述[J]. *中国农业大学学报*,2015,20(2):216 – 222.
ZHANG Bengbeng, KONG Xiangbin, YUN Wenju, et al. A review on quality and monitoring of arable land in China[J]. *Journal of China Agricultural University*,2015,20(2):216 – 222. (in Chinese)

[19] 孔祥斌,张蚌蚌,温良友,等. 基于要素-过程-功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J]. *中国土地科学*,2018,32(9):14 – 20.
KONG Xiangbin, ZHANG Bengbeng, WEN Liangyou, et al. Theoretical framework and research trends of cultivated land quality based on elements – process – function[J]. *China Land Science*,2018,32(9):14 – 20. (in Chinese)

[20] 杨建宇,赵龙,徐凡,等. 基于耕地连片度的高标准基本农田建设划区[J]. *农业机械学报*,2017,48(4):142 – 148.
YANG Jianyu, ZHAO Long, XU Fan, et al. Protection zoning of cultivated land comprehensive quality based on spatial autocorrelation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2017,48(4):142 – 148. (in Chinese)

[21] TIAN X, LI Z, WANG Y, et al. Evaluation on soil fertility quality under biochar combined with nitrogen reduction[J]. *Scientific Reports*,2021,11:13792.

[22] YAN S, GAO Y, TIAN M, et al. Comprehensive evaluation of effects of various carbon-rich amendments on tomato production under continuous saline water irrigation: overall soil quality, plant nutrient uptake, crop yields and fruit quality [J]. *Agricultural Water Management*,2021,255:106995.

[23] 张江周,李奕赞,李颖,等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J/OL]. *土壤学报*:1 – 17[2021 – 07 – 11].
ZHANG Jiangzhou, LI Yizan, LI Ying, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*:1 – 17[2021 – 07 – 11]. (in Chinese)

[24] MOEBIUS-CLUNE B N, MOEBIUS-CLUNE D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive assessment of soil health—the cornell framework[M]. *Cornell University, Ithaca, New York*,2016.

[25] ELSE K B, GIULIA B, BAI Z, et al. Soil quality—a critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2018,120(2):105 – 125.

[26] 陈文广,孔祥斌,廖宇波,等. 黄土高原区耕地质量评价——以陕西省延川县为例[J]. *水土保持研究*,2021,28(2):375 – 381.
CHEN Wenguang, KONG Xiangbin, LIAO Yubo, et al. Evaluation of cultivated land quality in the Loess Plateau: a case study of Yanchuan County, Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(2):375 – 381. (in Chinese)

[27] 孙晓兵,孔祥斌,温良友. 基于耕地要素的耕地质量评价指标体系研究及其发展趋势[J]. *土壤通报*,2019,50(3):739 – 747.
SUN Xiaobing, KONG Xiangbin, WEN Liangyou. Evaluation index system of cultivated land quality and its development trend based on cultivated land elements[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2019,50(3):739 – 747. (in Chinese)

[28] 温良友,孔祥斌,张蚌蚌,等. 基于可持续发展需求的耕地质量评价体系构建与应用[J]. *农业工程学报*,2019,35(10):234 – 242.
WEN Liangyou, KONG Xiangbin, ZHANG Bengbeng, et al. Construction and application of arable land quality evaluation system based on sustainable development demand[J]. *Transactions of the CSAE*,2019,35(10):234 – 242. (in Chinese)

[29] 黄海潮,温良友,孔祥斌,等. 中国耕地空间格局演化对耕地适宜性的影响及政策启示[J]. *中国土地科学*,2021,35(2):61 – 70.
HUANG Haichao, WEN Liangyou, KONG Xiangbin, et al. The impact of spatial pattern evolution of cultivated land on cultivated land suitability in China and its policy implication[J]. *China Land Science*,2021,35(2):61 – 70. (in Chinese)

[30] 辛芸娜,范树印,孔祥斌,等. 四重质量维度下的县域耕地质量评价方法研究[J]. *资源科学*,2018,40(4):737 – 747.
XIN Yunna, FAN Shuyin, KONG Xiangbin, et al. Evaluation of cultivated land quality based on four quality dimensions[J]. *Resources Science*,2018,40(4):737 – 747. (in Chinese)

[31] 孟庆香,张莉坤,郎文聚,等. 黄土丘陵区典型县域耕地健康评价:以河南宜阳县为例[J]. *中国水土保持科学(中英文)*,2021,19(1):11 – 19.
MENG Qingxiang, ZHANG Likun, YUN Wenju, et al. Health evaluation of cultivated land in typical counties of loess hilly region: a case study of Yiyang County, Henan Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*,2021,19(1):11 – 19. (in Chinese)

[32] 高涵,陈伟强,郎文聚,等. 东北典型平原区耕地健康产能评价与验证——以吉林省大安市为例[J]. *土壤通报*,2020,51(4):784 – 794.
GAO Han, CHEN Weiqiang, YUN Wenju, et al. Evaluation and verification of healthy productivity of cultivated land in the typical plain area of Northeast China—a case study of Da’an City, Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2020,51(4):784 – 794. (in Chinese)

[33] 高璐璐,张超,吕雅慧,等. 耕地健康产能多要素评价体系构建与应用[J]. *农业机械学报*,2020,51(5):215 – 222.
GAO Lulu, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Construction and application of multi-factor cultivated land health productivity evaluation system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(5):215 – 222. (in Chinese)

[34] 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.
MA Jiani, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Monitoring and evaluation of cultivated land quality supported by multi-source remote sensing[J]. *China Agricultural Informatics*,2018,30(3):14 – 22. (in Chinese)

- [35] 马瑞明,马仁会,韩冬梅,等. 基于多层次指标的省域耕地质量评价体系构建[J]. 农业工程学报,2018,34(16):249–257.
MA Ruiming, MA Renhui, HAN Dongmei, et al. Construction of cultivated land quality evaluation system in provincial level based on multilevel indicators[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(16):249–257. (in Chinese)
- [36] 王淇韬,孔祥斌,郎文聚,等. 新时期耕地质量定级方法研究及应用——以河北省平山县为例[J]. 中国土地科学,2018,32(8):59–66.
WANG Qitao, KONG Xiangbin, YUN Wenju, et al. The research and application of the method for cultivated land quality gradation in the new era: a case study in Pingshan County, Hebei Province[J]. China Land Science,2018,32(8):59–66. (in Chinese)
- [37] 张小丹,吴克宁,赵瑞,等. 县域耕地健康产能评价[J]. 水土保持研究,2020,27(3):294–300.
ZHANG Xiaodan, WU Kening, ZHAO Rui, et al. Evaluation of healthy productivity of cultivated land at county scale[J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(3):294–300. (in Chinese)
- [38] 杨淇钧,吴克宁,冯喆,等. 大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J]. 土壤学报,2020,57(3):565–578.
YANG Qijun, WU Kening, FENG Zhe, et al. Advancement and revelation of the research on soil quality assessment on large spatial scales[J]. Acta Pedologica Sinica,2020,57(3):565–578. (in Chinese)
- [39] 吴冠华,吴克宁,于兵,等. 土地整治项目区耕地质量评价方法比较研究——以德惠市为例[J]. 土壤通报,2019,50(4):786–793.
WU Guanhua, WU Kening, YU Bing, et al. Comparison of the evaluation methods of arable land quality in land consolidation project area: taking Dehui as an example[J]. Chinese Journal of Soil Science,2019,50(4):786–793. (in Chinese)
- [40] 赵瑞,吴克宁,张小丹,等. 粮食主产区耕地健康产能评价——以河南省温县为例[J]. 中国土地科学,2019,33(2):67–75.
ZHAO Rui, WU Kening, ZHANG Xiaodan, et al. Evaluation on farmland health productivity in main grain production areas: a case study in Wen County of Henan Province[J]. China Land Science,2019,33(2):67–75. (in Chinese)
- [41] 张超,乔敏,郎文聚,等. 耕地数量、质量、生态三位一体综合监管体系研究[J]. 农业机械学报,2017,48(1):1–6.
ZHANG Chao, QIAO Min, YUN Wenju, et al. Trinity comprehensive regulatory system about quantity, quality and ecology of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):1–6. (in Chinese)
- [42] 孙晓兵,孔祥斌,张青璞,等. 基于指标综合特征的耕地遗传质量和动态质量评价[J]. 农业工程学报,2020,36(22):254–265.
SUN Xiaobing, KONG Xiangbin, ZHANG Qingpu, et al. Evaluation of inherent quality and dynamic quality of cultivated land based on comprehensive characteristics of indexes[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(22):254–265. (in Chinese)
- [43] BA Y, LIU J, HAN J, et al. Application of Vis–NIR spectroscopy for determination the content of organic matter in saline-alkali soils[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2019,229:117863.
- [44] JAT H S, ASHIM D, SHARMA P C, et al. Assessing soil properties and nutrient availability under conservation agriculture practices in a reclaimed sodic soil in cereal-based systems of North-West India[J]. Archives of Agronomy and Soil Science,2017,64(4):531–545.
- [45] 王曦,李玉环,王瑞燕,等. 基于无人机的冬小麦拔节期表层土壤有机质含量遥感反演[J]. 应用生态学报,2020,31(7):2399–2406.
WANG Xi, LI Yuhuan, WANG Ruiyan, et al. Remote sensing inversion of surface soil organic matter at jointing stage of winter wheat based on unmanned aerial vehicle multispectral[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(7):2399–2406. (in Chinese)
- [46] YANG L, HE X L, SHEN F X, et al. Improving prediction of soil organic carbon content in croplands using phenological parameters extracted from NDVI time series data[J]. Soil and Tillage Research,2020,196:104465.
- [47] 陈香月,丁建丽,葛翔宇,等. 基于机器学习方法的绿洲土壤盐渍化尺度效应研究[J]. 农业机械学报,2021,52(9):312–320.
CHEN Xiangyue, DING Jianli, GE Xiangyu, et al. Scale effect on soil salinization simulation in arid oasis based on machine learning methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):312–320. (in Chinese)
- [48] ZHOU T, GENG Y, CHEN J, et al. Mapping soil organic carbon content using multi-source remote sensing variables in the Heihe River Basin in China[J]. Ecological Indicators,2020,114:106288.
- [49] ALLBED A, KUMAR L. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review[J]. Advances in Remote Sensing,2013,2(4):373–385.
- [50] 胡杰,张莹,谢仕义. 国产遥感影像分类技术应用研究进展综述[J]. 计算机工程与应用,2021,57(3):373–385.
HU Jie, ZHANG Ying, XIE Shiyi. Summary of research progress on application of domestic remote sensing image classification technology[J]. Computer Engineering and Applications,2021,57(3):373–385. (in Chinese)
- [51] 杨红艳,杜健民,阮培英,等. 基于无人机遥感与随机森林的荒漠草原植被分类方法[J]. 农业机械学报,2021,52(6):186–194.
YANG Hongyan, DU Jianmin, RUAN Peiying, et al. Vegetation classification of desert steppe based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):

- 186 – 194. (in Chinese)
- [52] 王斌, 范冬林. 深度学习在遥感影像分类与识别中的研究进展综述[J]. 测绘通报, 2019(2): 99 – 102.
WANG Bin, FAN Donglin. Research progress of deep learning in classification and recognition of remote sensing images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2): 99 – 102. (in Chinese)
- [53] WU Y, CHEN J, WU X, et al. Possibilities of reflectance spectroscopy for the assessment of contaminant elements in suburban soils[J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(6): 1051 – 1059.
- [54] MINASNY B, MCBRATNEY A B, BELLON-MAUREL V, et al. Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for the prediction of soil organic carbon[J]. Geoderma, 2011, 167/168: 118 – 124.
- [55] VISCARRA R R A, CATTLE S R, ORTEGA A, et al. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy[J]. Geoderma, 2009, 150(3 – 4): 253 – 266.
- [56] JI W, ROSSEL R A V, SHI Z. Accounting for the effects of water and the environment on proximally sensed vis-NIR soil spectra and their calibrations[J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66(3): 555 – 565.
- [57] WANG C K, PAN X Z. Improving the prediction of soil organic matter using visible and near infrared spectroscopy on moist samples[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2016, 24(3): 231.
- [58] 张智韬, 杜瑜燕, 劳聪聪, 等. 基于雷达遥感的不同深度土壤含盐量反演模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 243 – 251.
ZHANG Zhitao, DU Yuyan, LAO Congcong, et al. Inversion model of soil salt content in different depths based on radar remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 243 – 251. (in Chinese)
- [59] GUERRERO C, ZORNOZA R, GOMEZ I, et al. Spiking of NIR regional models using samples from target sites: effect of model size on prediction accuracy[J]. Geoderma, 2010, 158: 66 – 77.
- [60] 丁许. 融合地形特征的影像深度分割方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
DING Hu. Research on deep segmentation method of high-resolution imagery by integrating terrain features: taking Loess Micro Landform as an example[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019. (in Chinese)
- [61] 周增坡. 基于多源数据的典型地貌形态特征提取方法研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
ZHOU Zengpo. Study on typical geomorphological feature extraction based on multi-source data[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009. (in Chinese)
- [62] 熊礼阳, 汤国安, 杨昕, 等. 面向地貌学本源的数字地形分析研究进展与展望[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 595 – 611.
XIONG Liyang, TANG Guoan, YANG Xin, et al. Geomorphology-oriented digital terrain analysis: progress and perspectives[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 595 – 611. (in Chinese)
- [63] 汤国安, 李发源, 熊礼阳. 黄土高原数字地形分析研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 1 – 7.
TANG Guoan, LI Fayuan, XIONG Liyang. Progress of digital terrain analysis in the Loess Plateau of China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(4): 1 – 7. (in Chinese)
- [64] 赵瑞, 吴克宁, 宋文, 等. 潮土区耕地地力评价及空间差异性敏感因素分析——以温县为例[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(3): 619 – 630.
ZHAO Rui, WU Kening, SONG Wen, et al. Evaluation of the fertility of cultivated land and analysis of spatially sensitive factors in fluvo aquic soil area: a case study of Wen County[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(3): 619 – 630. (in Chinese)
- [65] HOU D, O'CONNOR D, NATHANAIL P, et al. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: a critical review[J]. Environmental Pollution, 2017, 231(1): 1188 – 1200.
- [66] ZHAO K, ZHANG L, DONG J, et al. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China[J]. Geoderma, 2019, 360: 114011.
- [67] 张世文, 葛畅, 陈晓辉, 等. 区域土壤有机碳空间分布特征与尺度效应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 159 – 168.
ZHANG Shiwen, GE Chang, CHEN Xiaohui, et al. Spatial distribution characteristics and scale effects of regional soil organic carbon[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 159 – 168. (in Chinese)
- [68] HUANG Y, LI Z, YE H, et al. Mapping soil electrical conductivity using ordinary Kriging combined with back-propagation network[J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(2): 270 – 282.
- [69] WADOUX J C, MINASNY B, MCBRATNEY A B. Machine learning for digital soil mapping: applications, challenges and suggested solutions[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 210: 103359.
- [70] 张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1060 – 1070.
ZHANG Ganlin, SHI Zhou, ZHU Axing, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1060 – 1070. (in Chinese)
- [71] ZHANG S, LIU G, CHEN S, et al. Assessing soil thickness in a black soil watershed in northeast China using random forest and field observations[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(1): 49 – 57.
- [72] SONG X D, WU H Y, JU B, et al. Pedoclimatic zone-based three-dimensional soil organic carbon mapping in China[J]. Geoderma, 2020, 363: 114145.
- [73] LIANG Z, CHEN S, YANG Y, et al. High-resolution three-dimensional mapping of soil organic carbon in China: effects of SoilGrids products on national modeling[J]. Science of the Total Environment, 2019, 685(1): 480 – 489.

- [74] LIANG Z Z, CHEN S C, YANG Y Y, et al. National digital soil map of organic matter in topsoil and its associated uncertainty in 1980's China[J]. *Geoderma*,2019,335:47–56.
- [75] SUN Q Q, ZHANG P, WEI H, et al. Improved mapping and understanding of desert vegetation-habitat complexes from intraannual series of spectral endmember space using cross-wavelet transform and logistic regression[J]. *Remote Sensing of Environment*,2020,236(44):111516.
- [76] 刘焕军,张美薇,杨昊轩,等. 多光谱遥感结合随机森林算法反演耕作土壤有机质含量[J]. *农业工程学报*,2020,36(10):134–140.
- LIU Huanjun, ZHANG Meiwei, YANG Haoxuan, et al. Inversion of cultivated soil organic matter content combining multi-spectral remote sensing and random forest algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*,2020,36(10):134–140. (in Chinese)
- [77] 杨帅,陈俊英,周永财,等. 无人机热红外遥感反演玉米根域土壤含水率方法研究[J]. *节水灌溉*,2021(3):12–18.
- YANG Shuai, CHEN Junying, ZHOU Yongcai, et al. A study on the method of UAV thermal infrared remote sensing to retrieve soil moisture content in corn root zone[J]. *Water Saving Irrigation*,2021(3):12–18. (in Chinese)
- [78] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [79] 董霖欣,李帅. 土壤重金属污染高光谱遥感定量监测[J]. *科技创新与应用*,2021,11(18):55–57.
- DONG Linxin, LI Shuai. Quantitative monitoring of soil heavy metal pollution by hyperspectral remote sensing[J]. *Technology Innovation and Application*,2021,11(18):55–57. (in Chinese)
- [80] JIA X Y, O'CONNOR D, SHI Z, et al. VIRS based detection in combination with machine learning for mapping soil pollution [J]. *Environmental Pollution*,2021,268(A):115845.
- [81] 史舟,徐冬云,滕洪芬,等. 土壤星地传感技术现状与发展趋势[J]. *地理科学进展*,2018,37(1):79–92.
- SHI Zhou, XU Dongyun, TENG Hongfen, et al. Soil information acquisition based on remote sensing and proximal soil sensing: current status and prospect[J]. *Progress in Geography*,2018,37(1):79–92. (in Chinese)
- [82] 刘焕军,鲍依临,徐梦园,等. 基于 SOM 和 NDVI 的黑土区精准管理分区对比[J]. *农业工程学报*,2019,35(13):177–183.
- LIU Huanjun, BAO Yilin, XU Mengyuan, et al. Comparison of precision management zoning methods in black soil area based on SOM and NDVI [J]. *Transactions of the CSAE*,2019,35(13):177–183. (in Chinese)
- [83] 曾昭发,刘四新,王者江,等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006:80–81.
- [84] 李俐,付雪,崔佳,等. 基于包络检波和 STFT 谱分析的探地雷达土壤分层信息识别[J]. *地球信息科学学报*,2020,22(2):316–327.
- LI Li, FU Xue, CUI Jia, et al. Soil layer identification based on envelope detector and STFT spectrum analysis of ground penetrating radar signals[J]. *Journal of Geo-information Science*,2020,22(2):316–327. (in Chinese)
- [85] GHOLIZADEH A, ŽIŽALA D, SABERIOON M, et al. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging[J]. *Remote Sensing of Environment*,2018,218(3):89–103.
- [86] SAYÃO JOSÉ V M, DEMATTÊ J. Soil texture and organic carbon mapping using surface temperature and reflectance spectra in Southeast Brazil[J]. *Geoderma Regional*,2018,14(10):e00174.
- [87] 罗古拜,曹银贵,况欣宇,等. 基于探地雷达的典型土壤物理性质探测研究进展[J]. *江苏农业科学*,2019,47(14):40–44.
- LUO Gubai, CAO Yingui, KUANG Xinyu, et al. Research progress of typical soil physical properties detection based on ground penetrating radar[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2019,47(14):40–44. (in Chinese)
- [88] 王敬朋,王金满,张雅馥. 探地雷达技术探测土壤特性的研究进展[J]. *土壤通报*,2021,52(1):242–252.
- WANG Jingpeng, WANG Jinman, ZHANG Yafu. Soil characteristics measurements with ground penetrating radar: a review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2021,52(1):242–252. (in Chinese)
- [89] BOWERS S A, HANKS R J. Reflectance of radiant energy from soils[J]. *Soil Science*,1965,100:130–138.
- [90] BAUMGARDNER M F, KRISTOF S J, JOHANNSEN C J, et al. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils[J]. *Proceedings Indiana Academy of Science*,1970,79:413–422.
- [91] 史舟,王乾龙,彭杰,等. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J]. *中国科学:地球科学*,2014,44(5):978–988.
- SHI Zhou, WANG Qianlong, PENG Jie, et al. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations[J]. *Science China: Earth Sciences*,2014,44(5):978–988. (in Chinese)
- [92] 刘焕军,潘越,窦欣,等. 黑土区田块尺度土壤有机质含量遥感反演模型[J]. *农业工程学报*,2018,34(1):127–133.
- LIU Huanjun, PAN Yue, DOU Xin, et al. Soil organic matter content inversion model with remote sensing image in field scale of blacksoil area[J]. *Transactions of the CSAE*,2018,34(1):127–133. (in Chinese)
- [93] WANG Z, ZHANG F, ZHANG X L, et al. Regional suitability prediction of soil salinization based on remote-sensing derivatives and optimal spectral index[J]. *Science of the Total Environment*,2021,775(12):145807.
- [94] SEIFI M, AHMADI A, NEYSHABOURI M R, et al. Remote and Vis-NIR spectra sensing potential for soil salinization estimation in the eastern coast of Urmia hyper saline Lake, Iran[J]. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 2020,20:100398.
- [95] 邱元霖,陈策,韩佳,等. 植被覆盖条件下的解放闸灌域土壤盐分卫星遥感估算模型[J]. *节水灌溉*,2019(10):112–116.
- QIU Yuanlin, CHEN Ce, HAN Jia, et al. Satellite remote sensing estimation model of soil salinity in Jiefangzha irrigation

- under vegetation coverage[J]. *Water Saving Irrigation*,2019(10):112–116. (in Chinese)
- [96] 张智韬,杜瑜燕,劳聪聪,等. 基于雷达遥感的不同深度土壤含盐量反演模型[J]. *农业机械学报*,2020,51(10):250–258.
ZHANG Zhitao, DU Yuyan, LAO Congcong, et al. Inversion model of soil salt content in different depths based on radar remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(10):250–258. (in Chinese)
- [97] ZAJÍCOVÁ K, CHUMAN T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: a review[J]. *Geoderma*,2019, 343(2):116–129.
- [98] 夏学齐,季峻峰,陈骏,等. 土壤理化参数的反射光谱分析[J]. *地学前缘*,2009,16(4):354–362.
XIA Xueqi, JI Junfeng, CHEN Jun, et al. Analysis of soil physical and chemical properties by reflectance spectroscopy[J]. *Earth Science Frontiers*,2009,16(4):354–362. (in Chinese)
- [99] ZHANG Y, SUI B, SHEN H, et al. Estimating temporal changes in soil pH in the black soil region of Northeast China using remote sensing[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2018,154(2):204–212.
- [100] 余涛,蒋天宇,刘旭,等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. *中国地质*,2021,48(2):460–476.
YU Tao, JIANG Tianyu, LIU Xu, et al. Research progress in current status of soil heavy metal pollution and analysis technology[J]. *Geology in China*,2021,48(2):460–476. (in Chinese)
- [101] SHARMA V, SHARMA M, PANDITA S, et al. Application of geographic information system and remote sensing in heavy metal assessment[M]//*Heavy Metals in the Environment*. Elsevier,2021:191–204.
- [102] 陈元鹏,张世文,罗明,等. 基于高光谱反演的复垦区土壤重金属含量经验模型优选[J]. *农业机械学报*,2019, 50(1):170–179.
CHEN Yuanpeng, ZHANG Shiwen, LUO Ming, et al. Empirical model optimization of hyperspectral inversion of heavy metal content in reclamation area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(1):170–179. (in Chinese)
- [103] 陈杰,陈铁桥,刘慧敏,等. 高分辨率遥感影像耕地分层提取方法[J]. *农业工程学报*,2015,31(3):190–198.
CHEN Jie, CHEN Tieqiao, LIU Huimin, et al. Hierarchical extraction of farmland from high-resolution remote sensing imagery[J]. *Transactions of the CSAE*,2015,31(3):190–198. (in Chinese)
- [104] DRĂGUT L, TIEDE D, LEVICK S R. ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*,2010,24(6):859–871.
- [105] 韩衍欣,蒙继华. 面向地块的农作物遥感分类研究进展[J]. *国土资源遥感*,2019,31(2):1–9.
HAN Yanxin, MENG Jihua. A review per-field crop classification using remote sensing[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2019,31(2):1–9. (in Chinese)
- [106] TURKER M, ARIKAN M. Sequential masking classification of multi-temporal Landsat7 ETM + images for field-based crop mapping in Karacabey, Turkey[J]. *International Journal of Remote Sensing*,2005,26(17):3813–3830.
- [107] LONG J A, LAWRENCE R L, GREENWOOD M C, et al. Object-oriented crop classification using multitemporal ETM + SLC-off imagery and random forest[J]. *GIScience and Remote Sensing*,2013,50(4):418–436.
- [108] PEÑA-BARRAGÁN J M, NGUGI M K, PLANT R E, et al. Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology[J]. *Remote Sensing of Environment*,2011,115(6):1301–1316.
- [109] CHEN L C, PAPANDREOU G, KOKKINOS I, et al. Deeplab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2018, 40(4):834–848.
- [110] ZHANG X, DU S. Learning selfhood scales for urban land cover mapping with very-high-resolution satellite images[J]. *Remote Sensing of Environment*,2016,178:172–190.
- [111] 南锡康,赵华甫,吴克宁,等. 基于遥感蒸散数据的农田灌溉水平评价和设施建设分区研究[J]. *中国农业资源与区划*,2018(7):29–37.
NAN Xikang, ZHAO Huafu, WU Kening, et al. Irrigation level evaluation and infrastructure construction zoning of basic farmland based on remote-sensing evapotranspiration data[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*,2018(7):29–37. (in Chinese)