

## 基于遥感影像数据的土壤制图研究进展\*

赵良军<sup>1, 2</sup>, 杨 颢<sup>3</sup>, 胡月明<sup>3\*</sup>, 刘振华<sup>4</sup>, 彭代亮<sup>5</sup>,  
王 璐<sup>3</sup>, 任必武<sup>6</sup>, 黄琦丹<sup>7</sup>, 彭小桃<sup>1, 8</sup>

(1. 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室, 广东广州510663; 2. 四川轻化工大学计算机科学与工程学院, 宜宾644000; 3. 海南大学热带农林学院, 海口570228; 4. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州510642; 5. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京101408; 6. 广州市华南自然资源科学技术研究院, 广东广州510610; 7. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京210023; 8. 广东省国土资源测绘院, 广州510663)

**摘要:**【目的】数字土壤制图成本低、精度高, 是刻画土壤环境变量的新技术和新工具, 遥感技术在数字土壤制图业务化应用中发挥了重要作用, 但是还存在诸多问题和不确定性。文章总结相关研究进展, 以期基于遥感影像数据的土壤数字制图提供有益参考。【方法】梳理遥感技术在土壤类型与属性制图研究中的进展情况并进行总结展望, 以期更好地发挥高空、时间、光谱分辨率遥感数据在土壤数字制图方面的作用, 为研发新模型、提高土壤制图模型精度提供信息支撑, 为第三次全国土壤普查数字土壤制图提供有益参考。【结果】遥感数据的特征与土壤发生学理论契合并推动了土壤制图的发展, 但是, 基于遥感的土壤制图技术在快速土壤环境变量因子提取、自适应制图指标筛选、满足多层次制图需求的土壤推测制图模型构建等方面还需要进一步深入探讨。【结论】为了实现土壤类型与属性制图的业务化、流程化和自动化, 未来的研究应该着眼于从“环境变量分析—评价指标体系筛选—预测模型构建”一体化解决方案入手, 探讨如何融合多种遥感载荷、综合运用新型模型, 以提高数字土壤制图的精度, 为农业生产和土地资源管理提供更为精准的信息支撑。

**关键词:** 遥感; 土壤环境变量; 第三次土壤普查; 不确定性; 数字土壤制图

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20240103

## 0 引言

近年来, 以遥感和地理信息系统技术为基础的数字土壤制图 (Digital Soil Mapping, DSM) 逐渐成为获取大范围土壤信息的主流方法<sup>[1-3]</sup>。数字土壤制图方法作为一种新兴

收稿日期: 2023-11-07

第一作者简介: 赵良军 (1980—), 博士、高级工程师。研究方向: 地图学与地理信息系统、卫星遥感、深度学习、图像处理。Email: zhaoliangjun@suse.edu.cn

※ 通信作者简介: 胡月明 (1964—), 博士、教授。研究方向: 自然资源监测评价、遥感与土地大数据融合应用、国土空间智慧治理。Email: ymhu163@163.com

\* 基金项目: 自然资源部华南热带亚热带自然资源监测重点实验室开放基金课题项目“耕地保护知识图谱构建关键技术研究”(2023NRMK05); 高分辨率对地观测系统国家科技重大专项(民用部分)科研项目“海南自贸港智慧耕地综合治理遥感应用产业化示范”(85-Y50G26-9001-22/23); 国家自然科学基金联合基金集成项目“赤红壤区耕地质量演变机理与提升机制”(U1901601)

的、高效表达土壤及其性状空间分布的方法，较传统手工土壤制图更加高效：在空间上采用栅格的表达方式，可以充分利用丰富的遥感数据资源，不仅降低了制图成本，还显著提高了土壤图件的绘制精度<sup>[4]</sup>。遥感数据在数字土壤制图中发挥了重要的作用，成为描述土壤环境变量的新技术和新工具<sup>[5-9]</sup>。随着近地传感、高精度卫星遥感技术的快速发展，遥感技术将在数字土壤制图中发挥更大作用。

当前，作为守住耕地红线与确保国家粮食安全重要基础的第三次全国土壤普查正处于试点和筹划阶段，《第三次全国土壤普查技术规程》中明确规定了遥感影像数据在数字土壤制图中的基础性和关键性作用，但是在各省、市、县地形地貌、气候、人文地理、社会经济因素各不相同的条件下，利用遥感技术刻画环境变量、实现精准数字土壤制图，存在诸多问题和不确定性。因此，文章系统梳理了遥感影像在土壤制图研究中的进展情况，并进行总结展望，以期第三次全国土壤普查数字土壤制图提供有益参考。

## 1 遥感与土壤制图的关系

遥感 (remote sensing) 是指非接触的，远距离的探测技术，一般指运用传感器/遥感器对物体的电磁波的辐射、反射特性的探测<sup>[10-12]</sup>。遥感技术具有大面积同步观测 (范围广)、实时性、周期性、数据综合性和可比性等优点<sup>[13-15]</sup>，在地质、大气、农林业、国土等行业和领域发挥了巨大的作用，也为数字土壤制图的发展提供了有力支撑<sup>[16, 17]</sup>。土壤的形成与发展过程，最终将以土壤的空间分布来体现。数字土壤制图的目的是利用数字化的符号来反映土壤的空间分布特征和规律，便于人类存储、传输、分析和挖掘有效信息。目前，数字土壤制图的一个重要的理论基础是土壤成土因子学说，该学说将母质、气候、生物、地形和时间 5 个因素作为土壤形成的主要要素<sup>[18]</sup>。

遥感技术在周期性地监测母岩母质、气候、生物、地形地貌等成土因素过程中具有天然优势。(1) 监测母质：成土母质是土壤形成的物质基础、植物矿质养分元素 (氮除外) 以及有毒元素的最初来源<sup>[19]</sup>，在大尺度的土壤制图中可以通过遥感地质解译图中的母岩类型表示。(2) 提取气候因子：气候对土壤形成的影响是多方面的，其中以热量和降水量最为重要。热量和降水量一方面直接影响母质的风化、物质的淋溶和沉淀，另一方面通过对植物和微生物的影响而影响土壤的形成。大尺度土壤制图中涉及气候区、年均温度、年降水、相对湿度、太阳辐射量等气候因子，利用卫星遥感技术反演上述因子的案例较多<sup>[20, 21]</sup>。(3) 反映生物状态：主要包括植物、土壤动物、土壤微生物，生物的生命活动积累有机质，使土壤肥力得以形成并逐步发展<sup>[22]</sup>。在大范围的土壤制图中涉及植被类型、植被物候期，而在中小尺度涉及归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 等植被指数、叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI)、林冠郁闭度 (Canopy Closure, CC) 等。上述遥感指数产品生产比较成熟且应用广泛<sup>[23-30]</sup>。(4) 地形获取与制图：地表形态，不直接对土壤的形成产生影响，通过对水分和热量的重新分配以及对母质类型的影响而影响成土过程。高程、坡度、坡向、曲率、地形湿度指数、坡位等各种地形因子是土壤制图的重要因子，利用 DEM (Digital Elevation Model,

2024年2月

数字高程模型)等影像数据可以方便、快捷地生成上述地形因子<sup>[31]</sup>。此外,土壤是母质、气候、生物、地形等成土因素长期综合作用的产物,遥感数据的实时性(或准实时性)可以反映土壤当前状态,而历史存档遥感数据则可以真实反映土壤形成和发育过程。

综上,遥感数据的特征符合土壤发生学理论,当土壤工作者充分掌握和运用土壤空间分布规律时,剖析遥感影像中环境因素的综合信息特征,可以将部分土壤专题信息提取出来,辅助完成土壤制图任务<sup>[32]</sup>。随着遥感数据时间分辨率、空间分辨率、光谱分辨率的提高,遥感技术将在数字土壤制图中发挥越来越重要的作用。

## 2 遥感土壤制图研究现状

为了分析遥感土壤制图研究技术和发展趋势,以及当前遥感技术与土壤制图的研究热点,该文从中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)和Web of Science上检索相关发表时间在1970—2022年的相关主题文献,进行统计分析。其中,重点选取发表时间为近5年的文献用于分析,以了解当前先进技术,但对于高被引文章发表时间适当放宽。对被检索文献进行详细阅读与认真分析后,共筛选出89篇论文进行研究。

### 2.1 遥感土壤制图定性阶段

时至20世纪80年代,遥感技术已经广泛应用于土壤制图,主要是基于专家知识进行目视解译,了解地面各种物体的形状和空间分布位置,勾绘土壤分布变化界线,分析土壤形成条件,推断土壤类型和性状<sup>[33]</sup>。如庄卫民<sup>[34-35]</sup>在福建晋江地区的土壤调查中,采用1974年1月9日成像的陆地卫星ETRS-1的多光谱扫描仪(MSS)影像,利用卫片、航片和地面工作相结合的方法,建立土壤色调特征信息标志、土壤质地特征信息标志和土壤环境特征信息标志,并进行植被和农业利用状况解译,经过室内目视解译、野外核验和手工绘图等步骤完成了研究区1:25万土壤调查制图工作,查明研究区8个土类、18个亚类和37个土属。同时期,为了探索利用航天遥感资料进行土壤自动分类与制图的可能性,以墨西哥中部盖赖塔洛市的西南面积约917 km<sup>2</sup>区域为研究区,刘兴文<sup>[36]</sup>利用Landsat-2(ETRS-2)于1976年3月28日所摄取的CCT磁带数据,根据联合国粮农组织的土壤分类系统,基于非监督分类法进行自动分类与制图,辅以目视解译方法,实现了土壤类型、深度、质地等土壤制图,土壤图制图精度达到1:25万土壤图的精度要求。

在第二次全国土壤普查工作成果图件编制阶段,多位学者进行了基于遥感影像的土壤制图技术探索。如王庆云等<sup>[37]</sup>以兼有平原、湖区、垄岗和低丘多种地貌的武汉市为研究区,进行涵盖8个土类、17个亚类、38个土属和162个土种的土壤制图,研究表明采用基本图幅资料、卫星像片、县级土壤普查成果三者结合的卫片编绘成图法,具有成图快、精度高、成本低的优点,是适应我国实情的可行技术方案。王人潮等<sup>[38]</sup>借鉴早期国内外卫片影像目视土壤解译与制图技术经验,利用地质、地形、植被或农业利用等已有环境因素资料,运用土壤地理学专业知识剖析MSS卫片影像的综合特征,获取土壤信息,

勾绘土斑预判图，研究表明采用彩色卫片影像进行土壤目视综合解译制图法的土壤解译率一般在 95% 以上，南方平原农区也可达 75% 以上，可判图斑的准确率达 95%~100%；与土壤普查成果图对照，土壤分类标准相同的图斑吻合率达到 80% 以上；该方法可供县级土壤普查成果图的检查和在地区、省级的拼接汇总中应用，而且还为地区、省级和全国土壤图更新，以及编制各类专用土壤图开拓了一条快速、经济和优质的新途径。姚力等<sup>[39]</sup>以河北邢台地区为研究区，利用 1974—1976 年 4 幅假彩色陆地卫星影像数据，结合地形图、土壤图、河北省古河道图、地质图、水文地质图等资料，进行主要土壤类型的编译（包括风积新成土、盐化潮土、棕壤、褐土、石灰性褐土、始成褐土、粗骨土、冲积新成土、潮土、湿潮土、脱潮土、潜育型水稻土和非土壤物质），研究表明利用遥感技术进行地区级土壤调查汇总制图，在技术路线、制图方法和精度上都是可行的。

综上所述，早期的遥感土壤制图研究，以土壤发生学和地理景观学为主要理论基础和依据，把土壤发生分类、成土因素及在卫星图像中的影像特征三者联系起来，通过建立卫星图像的判读标志进行综合分析和推断，研究表明在上世纪 80 年代，应用卫星图像进行土壤系统判读编制土壤图是可行的，按照当时的土壤分类系统并结合相关资料，土壤解译分类可以判读到土属一级<sup>[40]</sup>。当时，遥感技术在土壤制图中尚属于目视解译阶段，可界定为定性研究阶段。

## 2.2 遥感土壤制图定量阶段

20 世纪 90 年代开始，多位学者利用卫星遥感数据开展土壤类型制图研究。此阶段遥感技术在土壤制图中也由定性阶段提升到定量阶段，发生了质的飞跃，为精准数字土壤制图奠定了基础。

### 2.2.1 土壤类型制图

土壤类型图可以反映土壤分布规律<sup>[41]</sup>，展示土壤资源的数量和质量，摸清土壤资源的家底，为我国土壤资源可持续利用、保护、管理和相关决策提供科学依据。依据 2023 年《第三次全国土壤普查技术规程》中《土壤类型制图技术规范》要求，由于地形地貌对土壤形成具有重要影响，在土壤类型制图中应根据不同的地形地貌特征选取相应的制图技术，才能获得较优的制图效果。多位学者在不同地形地貌区域结合卫星遥感数据开展了土壤类型制图研究。

针对平原区，传统的土壤分类方法依赖于土壤专家的野外工作及经验，分类过程需耗费大量的人力、物力、财力和时间，以及传统的土壤分类方法精度不高等问题，以土壤发生学理论为基础，在土类级别从室内土壤高光谱和 Sentinel-2A 遥感影像进行土壤分类，可以宏观地了解平原区土壤分布特征<sup>[42]</sup>。由于平原区土壤分类及制图中单时相数据存在易受气候、地形地貌等因素干扰而导致制图精度不高，利用裸土时期多时相 Landsat 8 遥感影像、DEM 数据和第二次全国土壤普查数据，基于主成分分析方法从所有单时相遥感影像中提取出多种分类特征，按照分类特征类型进行压缩处理，得到新的多时相分类特征；将不同分类特征进行组合并分别进行最大似然法分类，得到不同分类特征组合下的土壤类型图，研究表明压缩处理后得到的多时相遥感数据分类特征完成制图的精度更

2024年2月

高<sup>[43]</sup>。此外,平原区地形因子和母质信息在平缓地区推理能力有待提高,利用高分二号(GF-2)遥感影像提取归一化植被指数和纹理特征并结合母质信息、地形属性组成环境因子集,基于C5.0决策树构建土壤类型预测模型,将获取的推理规则应用于土壤—景观模型并对土种类型进行分类,将母质、地形融合遥感信息应用于地形平缓区域土种级别的土壤分类研究具有一定可行性<sup>[44]</sup>。

针对平原与丘陵区,段梦琦<sup>[45]</sup>探讨了不同环境变量对基于遥感影像数字土壤制图结果及其精度的影响,确定了针对不同地形地貌地区的土壤类型制图环境因子重要性排序,进一步根据环境因子的重要性明确了对不同地区数字土壤制图的最优环境变量特征组合,并明确了最佳的土壤类型分类方法,提高了土壤分类的适用性和准确性。

针对山地丘陵区域,采用融合地学知识的方法进行基于系统分类标准的土壤遥感自动分类,在土壤遥感分类中加入数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM)或DEM数据,结合高分辨率遥感影像,可以显著改善分类效果、大幅度提高分类精度<sup>[46, 47]</sup>。

针对半干旱沙漠区,传统土壤类型图划分精度不高,难以满足精准农业、生态环境建设和土地管理等需求。李超等<sup>[48]</sup>为了提高土壤类型图的制图精度和时效性,基于野外实地调查和专家知识,分析了土壤类型分布特征与环境因素之间的关系,探讨了基于多时相Landsat8 OLI影像数据的半干旱沙区土类/亚类遥感调查制图方法,为半干旱沙区数字土壤调查制图提供了有益参考。

针对滩涂区域,在海涂区域淤蚀较快、海岸变化快,滩涂上控制点少,野外定位困难,以及土壤类型、土壤盐分变化相对较快的地区,利用遥感资料在滩涂地区进行土壤解译制图,具有现实性强、土壤分布规律显示清楚、调查周期短、经费较省等优势<sup>[49]</sup>。

综合上述土壤类型制图研究成果可知,在地形起伏较大的山地丘陵地区,其制图精度通常高于地形起伏较小的平原地区,但是应该注重高精度卫星遥感数据的运用,以提高小尺度条件下的制图精度;在地形起伏较小的平原地区,可以从遥感数据中提取植被指数、水体指数、湿度指数等多种环境要素,利用多源、多时相数据辅助分析、提取可以反映土壤类型分布特征的因子,从而提高平原、沙漠和滩涂等平缓区土壤类型制图精度。

### 2.2.2 土壤属性制图

土壤属性遥感制图主要是获取与土壤属性相关的气候、生物、母质、地形、人为因素等环境变量,构建不同土壤属性制图模型并生成土壤属性图<sup>[50]</sup>,在有机质/有机碳、氮、磷、钾、盐渍度等预测和评估中应用较为广泛。

(1) 基于环境变量协同的空间自相关的插值方法。该方法主要是协同克里金与回归克里金插值,通过遥感手段获取的土壤属性目标变量的协同环境变量的信息,以提高目标变量的插值精度,例如遥感植被变量(如植被指数、湿度指数及作物生长期指数等)、土壤反射率<sup>[51, 52]</sup>、土壤调节植被指数(MSAVI)和湿度因子等作为协同变量。研究表明基于遥感数据的辅助信息提高了有机质空间模拟精度<sup>[53]</sup>。利用遥感光谱信息也可以作为有效的辅助变量,张鸿晨<sup>[54]</sup>分析了稻田土壤与虾沟土壤之间有机质含量、土壤粒度、土

壤酸碱度和土壤高光谱数据的差异和规律，利用哨兵2号卫星13个波段的遥感影像建立水稻全生育周期的土壤光谱反馈面，分析全生育周期的土壤光谱反馈面对于土壤有机质数字制图的影响，研究结果证明从土壤光谱反馈面提取的特征向量能够明显提高土壤有机质数字制图的精度；李思缔<sup>[55]</sup>通过GEE（Google Earth Engine）平台在线处理并构建“作物全生育期光谱反馈面”，结合其他辅助环境变量，基于协同克里格法对土壤有机质进行分布预测制图，该方法证明了作物全生育期光谱反馈面可以作为有效辅助变量应用于平原区土壤有机质制图。

回归克里格建立目标变量和辅助环境变量的回归模型，将回归残差进行普通克里格估计，利用回归预测的趋势项和残差的普通克里格估计相加进行估值。如邹润彦<sup>[56]</sup>根据土壤发生学理论，基于地面土壤采样点数据，利用遥感获取DEM、高程、坡度、坡向、曲率、地形粗糙指数、植被覆盖度、归一化植被指数、年平均降水、年平均温度等环境数据，构建与因变量土壤有机碳（Soil Organic Carbon, SOC）的地理加权回归（Geographically Weighted Regression, GWR）模型，并采用地理加权回归克里格插值方法进行SOC制图，表明地理加权回归克里格是一种相对准确和高效的土壤属性空间预测手段。

(2) 基于环境相关的推测方法。该方法是利用遥感环境变量构建土壤属性制图模型，获取土壤属性空间分布信息。研究者们对一系列基于环境相关的推测方法进行了深入探讨。首先，王磊等<sup>[57]</sup>运用环境一号A星（HJ-1A）数据和多元回归分析构建了土壤速效磷光谱诊断模型，实现了县域耕地土壤速效磷含量的空间制图。Guo等<sup>[58]</sup>和Zhu等<sup>[59]</sup>在此基础上引入了土壤光谱反馈面的概念，通过分析土壤光谱信息变化，构建了三维土壤光谱反馈面，从而提高了土壤有机质制图的精度。为了进一步提高制图的精度，曹佳萍等<sup>[60]</sup>利用Sentinel-2影像提取遥感变量，结合气象变量和DEM，应用随机森林模型预测耕地表层土壤有效磷含量，通过加入遥感变量显著提升了模型的精度；李莹莹<sup>[61]</sup>基于国产高分辨率卫星GF-1遥感数据提取植被指数，有效地应用于土壤预测中。

吴子豪<sup>[62]</sup>在多因子模型中运用HJ-1A/B和Landsat 8卫星数据获取农田种植与管理因子，构建了环境因子集，通过选择最佳的多元混合线性回归（Cubist）模型进行SOC反演，生成了精细的SOC空间分布图。此外，何香霖<sup>[63]</sup>利用Sentinel-2的增强型植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）时间序列数据构建农作物生长参数，结合遥感变量和自然变量，通过随机森林模型预测表层土壤有机碳含量，展示了环境变量相互结合的效果。针对光学遥感数据易受不良天气影响的问题，马国林<sup>[64]</sup>在土壤盐渍化制图中利用Sentinel-1 SAR和Sentinel-2 MSI数据构建了不同传感器的土壤盐分预测模型。张振华<sup>[65]</sup>在整年的Modis遥感影像中提取植被物候信息，通过Boruta特征选择筛选了影响土壤盐分分布的环境参量。蒙莉娜<sup>[66]</sup>综合考虑了前述学者预测方法的优势，结合基于相似性土壤制图理论，利用MODIS、DEM、土壤属性数据进行生态地理区划，并通过K均值聚类分析划分了新疆地区的生态地理分区，对土壤盐渍化进行了预测。上述研究为数字土壤制图提供了多样的方法和思路，通过不同环境变量的综合利用，不断优化了制图模型，为提高制图的准确性和可靠性贡献了有益的经验。

2024年2月

总体来看,遥感技术在土壤环境因子提取、土壤光谱信息获取和辅助土壤属性制图等方面发挥了重要作用。随着遥感技术的发展,多光谱、高光谱、航天、航空等多类影像数据在土壤制图定量监测方面的精度会越来越高,特别是高光谱遥感技术以其光谱分辨率高、波段连续性强和空间分辨率高等特点,在土壤属性定量遥感监测中,将发挥越来越大的作用<sup>[67]</sup>。利用遥感技术,结合机器学习模型构建预测模型,不仅可以解决区域级别的数字化制图的问题<sup>[68]</sup>,还可以为解决土壤数字制图所面临的空间大数据计算难题提供有效方案<sup>[69]</sup>,遥感土壤制图预测建模技术具有较大的潜力从科研走向业务实践。

### 3 遥感土壤制图的发展趋势分析

土壤属性和土壤类型制图兴起于 Landsat 系列卫星的出现,经历了人工绘图、人机交互目视解译、监督/非监督分类、基于机器学习/神经网络的自动分类阶段。随着遥感应应用技术、机器学习、神经网络和云计算等新技术的发展,融合遥感技术的土壤制图呈现出新的发展趋势。

#### 3.1 基于遥感的土壤属性数字制图

从业务层面来看,早期由于影像空间分辨率的限制,遥感数据进行土壤制图以粗线条的土壤类型制图应用为主,主要用于分析典型表层土壤类型<sup>[49]</sup>。数字土壤制图方法作为一种新兴的、高效表达土壤及其性状空间分布的方法,较传统手工土壤制图更加高效,尤其在土壤属性制图方面,研究和应用也相对深入和广泛。随着遥感数据空间分辨率、光谱分辨率的提高,利用遥感数据进行土壤属性制图居多,例如土壤盐渍化、土壤有机质、土壤养分、土壤有机碳等方面的监测,应用范围越来越广泛,应用目标越来越具体。以土壤养分为例,当前的研究基本能够实现氮、磷、钾等元素的定量化分析。目前,针对土壤有机碳的研究热情较高,为全球碳汇、碳中和提供了基础资料<sup>[70-72]</sup>。特别地,《第三次全国土壤普查技术规程》中明确了基于环境辅助变量的数字土壤属性与土壤制图工作的可行性:结合三调业务要求,遥感制图可利用土壤属性与气候、地形、人为因素等环境变量的相关性,通过遥感技术提取这些环境变量,结合平原、丘陵、山地、高原、盆地的地形分区,筛选不同情境下的环境变量,通过深度学习等算法构建土壤属性制图模型,按照方法相对成熟、精度较优的原则,筛选土壤属性制图模型,实现土壤属性数字制图。相对传统采样方法,遥感技术的监测周期性短、多空间尺度、多角度、多源、覆盖范围大、省时省力等优势,利用遥感技术进行土壤数字制图是技术发展的必然趋势。

#### 3.2 融合多种遥感载荷综合制图

从遥感技术层面来看,早期主要基于 Landsat 卫星多光谱扫描仪 (Multispectral Scanner, MSS) 60 m 的多光谱数据,基于目视解译、野外核验、手工绘图等步骤进行中、大比例尺的土壤数字化制图<sup>[33-36]</sup>, Landsat 卫星专题制图仪 (Thematic Mapper, TM)、增强型专题制图仪 (Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+)、陆地成像仪 (Operational

Land Imager, OLI) 等传感器的出现, 推动了数字化土壤制图技术的快速发展, 基于 Landsat 系列卫星影像数据的土壤类型与土壤属性制图技术沿用至今<sup>[50, 73, 74]</sup>。随着遥感载荷的发展, 多时相、高空间分辨率、高光谱分辨率影像数据在土壤制图过程中发挥了重要作用, 解决了滩涂区、山地丘陵区域、平原区和干旱沙漠区域等复杂地形条件下的土壤制图难题<sup>[42-49]</sup>。依据土壤成土因子学说理论, 遥感数据在提取植被、地形、地表温度、土壤水分等土壤环境因子中发挥重要作用, 但是单个遥感载荷数据难以满足复杂条件下的制图需求, 融合可见光+雷达数据、多光谱+高光谱、地面+无人机+卫星遥感等多种类型数据融合、综合制图将是土壤遥感制图的必然趋势。

### 3.3 新模型提高遥感建模精度

从模型方法层面来看, 早期遥感土壤调查与制图主要采用目视解译和手工绘图<sup>[33-35]</sup>, 基本能够满足 1:25 万土壤图的精度要求。随后, 基于地统计学方法的克里格插值方法应用较为广泛<sup>[75-79]</sup>, 基于监督/非监督分类的遥感方法也应用于土壤类型分类<sup>[80]</sup>。随着信息技术的发展, 机器学习、神经网络等多种模型应用于遥感土壤类型与属性<sup>[81, 82]</sup>, 模糊集理论<sup>[83]</sup>、决策树<sup>[84-86]</sup>、不确定性模型<sup>[4,87]</sup>和随机森林算法<sup>[88-90]</sup>等广泛应用数字土壤制图, 大幅度提高了制图精度和工作效率。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

该文梳理了遥感与土壤制图的关系, 介绍了遥感技术在定性与定量化的土壤类型、土壤属性制图中的作用, 并系统分析了遥感土壤制图的发展趋势, 得到的主要研究结论如下。

(1) 遥感数据的特征符合土壤发生学理论。遥感技术在时间、空间和光谱分辨率的提高, 更好地适应了数字土壤制图的需求, 在监测母质、提取气候因子、反映生物状态、地形获取与制图等方面具有显著优势。

(2) 遥感技术推动了土壤属性制图的发展。随着遥感技术的发展, 土壤属性制图由定性评价逐渐走向了定量预测与数字模拟, 在土壤盐渍化、土壤有机质、土壤养分和土壤有机碳空间分布推测方面, 遥感数据供了更为细致和全面的信息, 提高了土壤制图的精度和工作效率, 显著降低了业务工作成本。

### 4.2 展望

遥感技术在土壤类型与土壤属性制图中发挥着重要作用, 但仍然存在一些待探讨的问题。如大范围遥感土壤制图环境变量因子与土壤属性的相关性分析、快速提取; 适应不同地理环境、不同地形地貌特征的遥感土壤制图指标体系构建与应用; 构建更加通用、适应性强、可迁移的预测模型, 以满足不同层级(国家、省、市、县)、不同研究区的制图需求等。未来的研究应该着眼于“环境变量分析—评价指标体系—预测模型”一体化解决方案, 探讨融合多种遥感载荷、综合运用新型模型, 以提高数字土壤制图的精度, 实现土壤类型与属性制图的业务化、流程化和自动化, 为农业生产和土地资源管理提供



2024年2月

更为精准的支持。

综上所述,遥感技术在土壤类型与属性制图中发挥着关键的作用,从提供有效素材到推动定量预测,对土壤研究领域产生了深远的影响。尽管面临一些挑战,但随着技术的不断发展和研究的深入,遥感技术将继续在数字土壤制图中发挥重要作用,为实现精准农业和可持续土地管理提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1] Yang R M, Liu L A, Zhang X, et al. The effectiveness of digital soil mapping with temporal variables in modeling soil organic carbon changes. *Geoderma*, 2022, 405: 115407.
- [2] Hendriks C M J, Stoorvogel J J, Álvarez-Martínez J M, et al. Introducing a mechanistic model in digital soil mapping to predict soil organic matter stocks in the Cantabrian region (Spain). *European Journal of Soil Science*, 2021, 72 (2): 704-719.
- [3] Malone B, Searle R. Updating the Australian digital soil texture mapping (Part 2): spatial modelling of merged field and lab measurements. *Soil Research*, 2021, 59(5): 435-451.
- [4] 张磊. 不确定性指导下的自适应数字土壤制图补样方法[硕士论文]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [5] Behrens T, Scholten T. Digital soil mapping in Germany—A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169 (3): 434-443
- [6] Mulder V L, De Bruin S, Schaepman M E, et al. The use of remote sensing in soil and terrain mapping—A review. *Geoderma*, 2011, 162(1-2): 1-19.
- [7] Dewitte O, Jones A, Elbelrhiti H, et al. Satellite remote sensing for soil mapping in Africa: An overview. *Progress in physical geography*, 2012, 36(4): 514-538.
- [8] Maynard J J, Levi M R. Hyper-temporal remote sensing for digital soil mapping: Characterizing soil-vegetation response to climatic variability. *Geoderma*, 2017, 285: 94-109.
- [9] 朱阿兴, 杨琳, 樊乃卿, 等. 数字土壤制图研究综述与展望. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 66-78.
- [10] Baret F, Jacquemoud S, Hanocq J F. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 1993, 7(1): 65-82.
- [11] Ju J, Gopal S, Kolaczyk E D. On the choice of spatial and categorical scale in remote sensing land cover classification. *Remote sensing of environment*, 2005, 96(1): 62-77.
- [12] Guo H, Ying W, Fang W. Overview of remote sensing approaches to drought monitoring. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 23(1): 111-116.
- [13] Aplin P. Remote sensing: ecology. *Progress in Physical Geography*, 2005, 29(1): 104-113.
- [14] Aurin D A, Dierssen H M. Advantages and limitations of ocean color remote sensing in CDOM-dominated, mineral-rich coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 125: 181-197.
- [15] Vanhellemont Q, Ruddick K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161: 89-106.
- [16] Quenum M, Nolin M C, Bernier M. Digital mapping of soil phosphorus maximum sorption capacity. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(5): 733-750.
- [17] Miller B A, Schaetzl R J. The historical role of base maps in soil geography. *Geoderma*, 2014, 230: 329-339.
- [18] Jenny H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941.
- [19] 王海荣. 成土母质对土壤元素分布特征的影响[硕士论文]. 北京: 中国地质大学, 2023.
- [20] 吴莹, 王振会, 翁富忠. 沙漠地区微波地表发射率年内变化规律与气候因子的关系分析. *国土资源遥感*, 2014, 26 (3): 55-60.
- [21] 阿卜杜热合曼·吾斯曼, 玉素甫江·如素力, 张发, 等. 基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系. *草业科学*, 2023, 40(7): 1779-1792.
- [22] 杨扬, 赵润野, 黄浩育. 土壤的形成与特性. *农村经济与科技*, 2017, 28(14): 9, 11.
- [23] 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 2003(5): 979-987.
- [24] 王鹏新, 龚健雅, 李小文, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型. *地球科学进展*, 2003(4): 527-533.
- [25] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 等. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. *遥感学报*, 2010, 14(4): 725-741.

- [26] 方秀琴,张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述. 国土资源遥感,2003(3):58-62.
- [27] 毛智慧,黎丽莉,程露,等. 广东省植被叶面积指数时空变化特征及其影响因素. 地球科学与环境学报,2023,45(4):907-919.
- [28] 王聪. 基于多源遥感数据的毛竹林冠层郁闭度多尺度反演研究[硕士论文]. 杭州:浙江农林大学,2016.
- [29] 杨妍婷. 基于高分遥感数据的森林郁闭度估测方法研究[硕士论文]. 杭州:浙江农林大学,2019.
- [30] 孙珊珊. 森林郁闭度遥感估测方法研究[硕士论文]. 北京:中国林业科学研究院,2021.
- [31] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展. 地理学报,2014,69(9):1305-1325.
- [32] 王深法,王人潮,吴加平,等. 应用遥感技术进行土壤制图的优点. 土壤,1991(3):123-125.
- [33] 戴昌达,卜兆宏,徐彬彬,等. 遥感技术在土壤资源调查制图中的应用. 自然资源,1978(1):30-40,117-120.
- [34] 庄卫民. 卫片—航片和地面工作相结合的土壤调查方法. 福建农学院学报,1981(3):51-62.
- [35] 庄卫民. 晋江地区土壤区划的卫片解译. 福建农学院学报,1982(2):39-51.
- [36] 刘兴文. 土壤遥感自动分类与制图的初步试验. 土壤学报,1982(2):184-193,210.
- [37] 王庆云,区仲生,何世源. 应用卫星图象编绘地区(市、州)土壤专业图件的技术探讨. 土壤肥料,1985(1):19-23.
- [38] 王人潮,王深法,苏海洋. MSS卫片影像目视土壤解译与制图技术研究——1:25万假彩色卫片目解综合法. 浙江农业大学学报,1986(2):5-13.
- [39] 姚力,林培. 土壤调查地区级汇总的遥感制图试验研究. 环境遥感,1988(3):177-182.
- [40] 卢家诚,朱世清,杨锦汉. 应用卫星图象编制土壤图的条件和方法——以1:100万广州、汕头幅土壤图为例. 土壤,1989(6):312-316.
- [41] Pasztor L, Laborcsi A, Bakacsi Z, et al. Compilation of a national soil-type map for Hungary by sequential classification methods. *Geoderma*, 2018, 311: 93-108.
- [42] 张小康. 松嫩平原北部典型土壤遥感分类研究[硕士论文]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [43] 刘焕军,杨昊轩,徐梦园,等. 基于裸土期多时相遥感影像特征及最大似然法的土壤分类. 农业工程学报,2018,34(14):132-139,304.
- [44] 陈荣. 平原—丘陵混合区域土壤制图方法研究[硕士论文]. 武汉:华中农业大学,2021.
- [45] 段梦琦. 基于遥感技术的山东省不同地形土壤类型制图研究[硕士论文]. 青岛:青岛农业大学,2022.
- [46] 罗红霞. 地学知识辅助遥感进行山地丘陵区基于系统分类标准的土壤自动分类方法研究[博士论文]. 武汉:武汉大学,2005.
- [47] 芦倩,赵维俊,黄鑫. 基于高分辨率遥感影像的土壤类型制图研究. 甘肃农业大学学报,2022,57(6):188-197.
- [48] 李超,文天晟,张凤荣,等. 半干旱沙区土类/亚类的遥感调查制图方法. 农业工程学报,2018,34(6):189-196.
- [49] 丁应祥,胡永清. 东台市沿海滩涂TM遥感资料的土壤解译制图. 南京林业大学学报(自然科学版),1991(3):38-43.
- [50] Silvero N E Q, Dematte J A M, Julia de Souza Vieira, et al. Soil property maps with satellite images at multiple scales and its impact on management and classification. *Geoderma*, 2021, 397: 115089.
- [51] Sudduth K A, Hummel J W. Evaluation of reflectance methods for soil organic matter sensing. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(4): 1900-1909.
- [52] Ben-Dor E, Banin A. Visible and near-infrared (0.4 - 1.1  $\mu\text{m}$ ) analysis of arid and semiarid soils. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(3): 261-274.
- [53] 李志斌. 基于地统计学方法和Scorpan模型的土壤有机质空间模拟研究[博士论文]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [54] 张鸿晨. 基于作物全生育期土壤光谱反馈面的虾稻区土壤有机质反演与制图[硕士论文]. 武汉:华中师范大学,2020.
- [55] 李思缔. 基于作物全生育期光谱反馈面的平原区土壤有机质制图[硕士论文]. 武汉:华中师范大学,2021.
- [56] 邹润彦. 环鄱阳湖区农田土壤有机碳空间变异特征及其影响因素研究[硕士论文]. 南昌:江西财经大学,2019.
- [57] 王磊,顾晓鹤,王宝山,等. 基于HJ-1A超光谱影像的县域尺度耕地土壤速效磷含量遥感制图研究. 土壤通报,2015,46(6):1314-1320.
- [58] Guo S, Zhu A X, Meng L, et al. Unification of soil feedback patterns under different evaporation conditions to improve soil differentiation over flat area. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2016, 49: 126-137.
- [59] Zhu A X, Miao Y, Liu J, et al. A similarity-based approach to sampling absence data for landslide susceptibility mapping using data-driven methods. *Catena*, 2019, 183: 104188.
- [60] 曹佳萍,张黎明,邱龙霞,等. 基于稀疏样点的南方丘陵地区耕地土壤有效磷制图. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(2):290-301.
- [61] 李莹莹. 基于GF-1遥感数据的森林土壤养分三维空间预测研究[硕士论文]. 南宁:广西大学,2022.

2024年2月

- [62] 吴子豪. 平原农田区土壤有机碳空间分异及机理[博士学位论文]. 武汉:武汉大学,2021.
- [63] 何香霖. 农作物生长参数与遥感变量用于土壤有机碳推测制图的有效性研究[硕士学位论文]. 南京:南京大学,2021.
- [64] 马国林. 耦合多源传感器与机器学习算法的渭一库绿洲土壤盐分估测[硕士学位论文]. 乌鲁木齐:新疆大学,2021.
- [65] 张振华. 耦合植被物候与SoLIM的新疆绿洲土壤盐渍化数字制图[硕士学位论文]. 乌鲁木齐:新疆大学,2020.
- [66] 蒙莉娜. 生态地理分区框架下的新疆绿洲土壤盐渍化动态研究[硕士学位论文]. 乌鲁木齐:新疆大学,2021.
- [67] 张东辉. 黑土养分信息提取的高光谱遥感方法研究[博士学位论文]. 北京:核工业北京地质研究院,2018.
- [68] 杨珺婷,李晓松. 应用哨兵2号卫星遥感影像数据和机器学习算法对锡林郭勒草原土壤表层有机碳及全氮的估算. 东北林业大学学报,2022,50(1):64-71.
- [69] 伍维模. 基于INLA-SPDE的土壤有机碳多尺度贝叶斯空间建模与制图研究[博士学位论文]. 杭州:浙江大学,2021.
- [70] 杨博宇,白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策. 中国矿业,2021,30(5):1-9.
- [71] 赵明月,刘源鑫,张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展. 生态学报,2022,42(23):9405-9416.
- [72] 王薇茜,虞依娜,谢嘉洪,等. 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳,氮,磷的积累及化学计量特征. 生态学报,2023,43(5):11.
- [73] Sorenson P T, Shirliffe S J, Bedard-Haughn A K. Predictive soil mapping using historic bare soil composite imagery and legacy soil survey data. *Geoderma*,2021,401:115316.
- [74] Gharsallah M E, Aichi H, Stambouli T, et al. Assessment and mapping of soil salinity using electromagnetic induction and Landsat 8 OLI remote sensing data in an irrigated olive orchard under semi-arid conditions. *Soil and Water Research*,2022,17(1):15-28.
- [75] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil science*,1997,162(4):291-298.
- [76] Bardossy A, Lehmann W. Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis. *Journal of Hydrology*,1998,206(1-2):1-15.
- [77] Ersoy A, Yunsel T Y, Cetin M. Characterization of land contaminated by past heavy metal mining using geostatistical methods. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*,2004,46:162-175.
- [78] Rivero R G, Grunwald S, Bruland G L. Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. *Geoderma*,2007,140(4):428-443.
- [79] De Risi R, De Luca F, Gilder C E L, et al. The SAFER geodatabase for the Kathmandu valley: Bayesian kriging for data-scarce regions. *Earthquake Spectra*,2021,37(2):1108-1126.
- [80] 孔德庸. 新疆焉耆盆地土壤盐分空间变异特征分析及盐渍化土壤制图技术研究[硕士学位论文]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2008.
- [81] 孙越琦. 常用机器学习模型在土壤属性空间预测与数字化制图中性能表现对比研究[硕士学位论文]. 郑州:郑州大学,2022.
- [82] 曾鹏源. 基于深度学习的土壤数字制图研究[硕士学位论文]. 郑州:郑州大学,2022.
- [83] 赵量. 基于模糊集理论的土壤-景观定量关系提取及制图应用[硕士学位论文]. 南京:南京农业大学,2007.
- [84] 周银. 基于决策树方法的县级土壤数字制图研究[硕士学位论文]. 杭州:浙江大学,2011.
- [85] 许伟. 基于遥感影像与C5.0数据挖掘算法的土壤制图研究[硕士学位论文]. 武汉:华中农业大学,2018.
- [86] 韩浩武,许伟,黄魏,等. 基于遥感影像和决策树算法的土壤制图. 土壤通报,2019,50(1):8-14.
- [87] 袁雅萍. 利用不确定性模型实现土壤推理制图中知识的获取与融合[硕士学位论文]. 武汉:华中农业大学,2016.
- [88] 望陈运. 基于随机森林算法的土壤图斑分解[硕士学位论文]. 武汉:华中农业大学,2017.
- [89] 周紫燕. 基于多源遥感数据及随机森林算法的土壤制图研究[硕士学位论文]. 武汉:华中农业大学,2020.
- [90] 刘成,董超,王卓然,等. 山丘区人类活动因子对土壤类型数字制图模型精度的影响. 中国农业信息,2023,35(3):58-74.

## Research progress on soil mapping based on remote sensing image data\*

Zhao Liangjun<sup>1, 2</sup>, Yang Hao<sup>3</sup>, Hu Yueming<sup>3\*</sup>, Liu Zhenhua<sup>4</sup>, Peng Dailiang<sup>5</sup>,  
Wang Lu<sup>3</sup>, Ren Biwu<sup>6</sup>, Huang Qidan<sup>7</sup>, Peng Xiaotao<sup>1, 8</sup>

(1. Key Laboratory of Natural Resources Monitoring in Tropical and Subtropical area of South China, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510663, Guangdong, China; 2. School of Computer and Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China; 3. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China; 4. Collage of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 5. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 6. South China Academy of Natural Resources Science and Technology, Guangzhou 510610, China; 7. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 8. Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department Of Guangdong Province, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Purpose] Digital soil mapping, with low cost and high accuracy, is a new technology and a new tool for portraying soil environmental variables. Remote sensing technology plays an important role in the operational application of digital soil mapping, but there are still many problems and uncertainties. This paper summarizes the progress of related research with the aim of providing useful references for digital soil mapping based on remotely sensed image data. [Method] This paper reviewed the progress of remote sensing technology in the study of soil type and property mapping and provided a summary and outlook, with a view to better exploiting the role of high spatial, temporal, and spectral resolution remote sensing data in digital soil mapping, providing information support for the development of new models, and improving the accuracy of soil mapping models for the upcoming third national soil survey. [Results] The study indicated that the characteristics of remote sensing data align with soil science theories and drive the development of soil mapping. However, further exploration was needed in areas such as rapid extraction of environmental variable factors, adaptive indicator selection and the construction of predictive models that meet the needs of multi-level mapping. [Conclusion] In order to achieve the operational, procedural and automated mapping of soil types and properties, future research should focus on an integrated solution from "environmental variable analysis – evaluation indicator system selection – predictive model construction", exploring how to integrate various remote sensing payloads and comprehensively apply new models to improve the accuracy of digital soil mapping to provide more accurate support for agricultural production and land resource management.

**Key words:** remote sensing; soil environmental variables; third national soil survey; uncertainty; digital soil mapping