

DOI: 10.11766/trxb202308150327

张甘霖, 史舟, 王秋兵, 赵永存, 刘峰, 杨琳, 宋效东, 杨飞, 蒋卓东, 曾荣, 陈颂超, 杨顺华. 新时代土壤地理学的发展现状与趋势[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1264–1276.

ZHANG Ganlin, SHI Zhou, WANG Qiubing, ZHAO Yongcun, LIU Feng, YANG Lin, SONG Xiaodong, YANG Fei, JIANG Zhuodong, ZENG Rong, CHEN Songchao, YANG Shunhua. Development of Soil Geography in the New Era and Its Future[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1264–1276.

## 新时代土壤地理学的发展现状与趋势\*

张甘霖<sup>1, 2, 3</sup>, 史舟<sup>4</sup>, 王秋兵<sup>5</sup>, 赵永存<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>, 杨琳<sup>6</sup>, 宋效东<sup>1</sup>,  
杨飞<sup>1</sup>, 蒋卓东<sup>5</sup>, 曾荣<sup>7</sup>, 陈颂超<sup>4</sup>, 杨顺华<sup>1</sup>

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院流域地理学重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 浙江大学环境与资源学院农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058; 5. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 6. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210008; 7. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210008)

**摘要:** 土壤地理学是研究土壤时空分布规律、形成过程及其资源环境效应的土壤学学科分支, 其主要目标和任务是理解土壤形成演化的关键过程与影响因素并预测未来土壤-环境的共同演化特征, 揭示土壤资源分布规律、利用前景和保护对策, 为农业、生态环境保护等提供科学依据, 支撑土壤普查、耕地保护等国家目标。21 世纪特别是新时代 10 年以来土壤地理学取得了一些重要的进展, 研究对象和内容也发生了很大的变化, 逐渐向以土壤为核心的地球表层系统科学发展, 高强度人为活动和全球气候变化背景下的土壤时空演变研究愈加活跃。土壤地理学主要发展趋势包括土壤信息获取方式正在发生变革, 数字土壤制图向融合过程机理与数据驱动发展, 土壤时空信息的应用范围更加广泛。未来土壤地理学优先发展领域包括: 以关键带研究带动土壤发生和演变研究的革新, 基于多传感器的土壤综合观测原理与技术, 多尺度数字土壤制图与时空变化预测等。

**关键词:** 土壤地理学; 土壤时空变化; 地球关键带; 土壤信息; 数字土壤制图; 数字土壤形态学

**中图分类号:** S159      **文献标志码:** A

## Development of Soil Geography in the New Era and Its Future

ZHANG Ganlin<sup>1, 2, 3</sup>, SHI Zhou<sup>4</sup>, WANG Qiubing<sup>5</sup>, ZHAO Yongcun<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>6</sup>, SONG Xiaodong<sup>1</sup>,  
YANG Fei<sup>1</sup>, JIANG Zhuodong<sup>5</sup>, ZENG Rong<sup>7</sup>, CHEN Songchao<sup>4</sup>, YANG Shunhua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geography, Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 6. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University,

\* 国家自然科学基金项目(42130715, U1901601, 42322102)、第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0306-02)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42130715, U1901601 and 42322102) and the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No. 2019QZKK0306-02)

作者简介: 张甘霖(1966—), 男, 湖北通山人, 研究员, 主要从事土壤学研究。E-mail: glzhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2023-08-15; 收到修改稿日期: 2023-08-31; 网络首发日期: 2023-09-07

Nanjing 210008, China; 7. College of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Soil geography is the soil science discipline that studies the spatio-temporal changes and formation of soil as well as its resource and environmental impacts. The basic objectives and tasks of soil geography are to understand the key processes and controlling factors, predict the future co-evolution of the soil environment, and illustrate soil resource distribution and their potential for multiple uses. Thus, this provides scientific support for agricultural development and eco-environmental protection. The long-term development and the most recent scientific achievement especially from the soil series study has provided substantial support to the ongoing national soil survey. The subdisciplines of soil geography, including soil morphology, soil genesis, and soil mapping have achieved substantial progress during the last 20 years especially the most recent 10 years, with a significant shift of research subjects and contents. With the ever-deepening understanding of the pedosphere, the study object of soil geography has shifted from traditional surface soil to the earth's surface system, meanwhile, human activities and their impacts on soil system have gotten more attention and related studies have appeared. Along with the rapid development of remote and proximal sensing and GIS technology, modern soil survey has seen a regime shift thanks to the emergence and evolution of digital soil mapping, large-scale soil map products have been generated and become available, thus, providing strong support to other sectors. In the future, soil geography should focus on the coupling of multiple processes in the atmosphere, hydrosphere, biosphere, pedosphere, and lithosphere in the context of the earth's surface system, rapid and efficient acquisition of soil information, multiple-scale soil-environment modeling, to realize accurate prediction of soil spatio-temporal changes.

**Key words:** Soil Geography; Soil spatio-temporal changes; Earth's critical zone; Soil information; Digital soil mapping; Digital soil morphometrics

土壤地理学既是土壤科学也是地理科学学科体系的重要组成部分，是研究土壤时空变化的学科分支，包含土壤的发生和演变、土壤分类、土壤调查、土壤分布、土壤区划和土壤资源评价等重要研究内容。在现代土壤科学体系中，理解和表征土壤的时空变化，是土壤地理学的核心内容。因此，地表系统中土壤与地理环境相互作用关系的研究是土壤地理学研究的主题，也是评估和合理发挥土壤功能的重要前提<sup>[1]</sup>。土壤信息的获取、存储、表达、传输与分析是贯穿土壤时空变化研究的核心，这些信息的有效利用能为粮食安全、生态文明建设、乡村振兴、精准扶贫等国计民生提供重要的决策支持<sup>[2]</sup>。

在土壤地理学学科体系中，土壤发生发育理论与分类体系是理解土壤资源的基础。了解土壤的发生、发展规律以及土壤性质与形成条件之间的关系，是认识土壤起源与本质性状、促进土壤资源的合理开发和保证土壤资源可持续利用的科学基础。经典的土壤发生学研究对土壤发生层的性状、物理属性、化学属性、矿物学属性进行对比，将土壤形成因素与土壤形态和性质联系起来，推测土壤过去可能发生的过程。随着对地球系统科学的发展，土壤圈在地球表层系统中的核心地位及其与其他圈层之间的

协同演化研究不但拓展了土壤学的研究范畴，同时对发展地球表层系统科学有重要意义<sup>[1, 3]</sup>。

土壤调查是获取土壤空间分布信息的基础，传统土壤调查和制图依赖于土壤空间变化“从点到面”的基本假设。随着对地观测技术的迅猛发展，遥感和近地传感应用于土壤时空变化信息的获取已成为土壤信息获取的基本范式。传统土壤制图以土壤调查者经验和手工操作为基础，通过手工将不同的土壤类型或类型组合的空间分布归纳成制图单元并绘制成土壤图，而以土壤空间分布规律定量表达作为基础的数字土壤制图 (Digital Soil Mapping) 已逐步成为土壤制图的主流。新近开展的第三次全国土壤普查虽然在调查技术上主要依赖传统的野外调查，但在调查布点、结果空间表征上已大量采用现代信息技术和数字土壤制图方法。

土壤形态学是土壤学研究的起点。根据对土壤形态的研究，能对土壤的组成、土壤中发生的各种过程的物理、化学本质以及影响成土作用的环境条件进行推断和演绎。土壤剖面描述是土壤形态学的基础，其中对于土层的描述是土壤剖面调查的重点。目前以图形图像处理技术为主体的数字土壤形态学 (Digital Soil Morphometrics) 正试图建立客观定量的

标准来实现对土壤形态特征的自动识别<sup>[4]</sup>, 进而为自动土壤分类提供依据。

相对而言, 土壤分类在过去一段时间内仍然以建立基层土壤分类单元为主要任务。在全世界范围内, 以美国土壤系统分类为主流的系统分类在基本格局上并未产生大的变化, 世界土壤资源参比基础(WRB)也维持其相对稳定的态势。中国土壤系统分类初步建立了以土系为主体的基层分类体系<sup>[5]</sup>, 为定量土壤资源清单的建立奠定了基础, 而以传统发生分类为标准的土壤普查表明全球共同接受的统一土壤分类仍然是一个长期的目标。

进入 21 世纪, 特别是近 10 多年来, 随着学科发展的进步和社会需求的多元化, 土壤地理学的研究对象、内容和研究范式均有了新的变化, 概括而言, 新时代土壤地理学既秉承传统研究领域, 但研究对象向地球表层系统扩展, 在服务领域上更加面向土壤资源精准管理、生态系统碳汇调控等新需求; 信息化、人工智能、传感技术等相关科技的进步, 为土壤信息快速获取提供了可能, 并为数字土壤制图提供坚实的数据支撑, 革新了传统土壤调查与制图范式。

## 1 从土壤到地表系统

传统土壤发生学主要考虑成土因素对土壤形成的影响, 相关研究多聚焦土壤本身, 较少考虑土壤形成演变过程对环境的反馈。随着地球系统科学的发展, 对地表系统核心要素——土壤的重要性的认识不断深化, 土壤学研究的对象逐渐向包含水、土、气、生、岩等要素在内的地表系统及其内部耦合与互馈关系的拓展。从研究对象和重点关注的科学问题上来看, 土壤发生演变领域的研究, 表现出如下特点: ①土壤研究的对象与范畴拓展。传统的土壤发生学研究注重基岩风化过程的元素地球化学循环, 但大气降尘作为一个重要的土壤物质来源, 其对土壤形成的作用被长期忽视。近年来, 随着观测及测试手段的进步, 降尘在全球不同地区土壤及生态系统中的重要作用被识别并量化, 包括从远离大陆的海岛<sup>[6]</sup>到高山极地地区, 降尘以不同的方式对当地土壤及生态系统产生重要影响。对降尘的来源解析、通量及速率变化以及生态环境效应研究成为土壤发生学研究的重要课题<sup>[7-9]</sup>。②土壤发生过程的

环境效应受到重视。一些在土壤形成演变过程中易发生形态变化且具有重要环境效应的元素, 如碳、氮、磷、铁等元素循环受到重点关注。这些元素在不同系统, 如土体系统、土-水系统、陆-海系统中的迁移转化, 对气候变化、生态安全等重要全球问题产生深远影响<sup>[10-11]</sup>。③关注地表多要素耦合过程。地表环境中多要素、多过程耦合发生, 对地表各要素的耦合关系进行解耦有助于深入理解各要素的互馈机制及综合作用。如我国高寒山区, 植被根系与降尘输入的细颗粒物在山坡形成结构致密的土壤, 起到稳定地表的重要作用。该生物地貌过程不仅是理解高山土壤形成的关键, 也是理解高山生态系统及景观演变的关键(图 1)<sup>[12]</sup>。多要素耦合过程与机理也是地球关键带科学研究的重要内容<sup>[1, 3]</sup>。

将土壤置于地表系统中可实现其更大的学科及社会服务影响力。从土壤演变(包括土壤形成与土壤退化)过程与机理入手, 通过系统解析土壤与地表各要素之间的关系, 来理解土壤资源形成、退化及功能演变, 是实现土壤资源与生态系统科学管理的重要前提。例如, 近期从地表系统视角提出, 遍布于青藏高原的草毡层是高寒气候、植被、降尘输入、成土过程及人类放牧活动等多过程长期综合作用的产物, 进而提出适用于草毡土壤资源与草甸生态系统的针对性保护方案<sup>[13]</sup>。此外, 地球关键带是地球表层系统自然综合体, 在梳理地球关键带构成及其形成影响因素的基础上, 采用气候、成土母质、土壤类型、地下水深度、地貌类型与土地利用要素首次构建了地球关键带三级分类方案, 可为自然资源综合管理和国土空间生态修复提供科学依据<sup>[14]</sup>。

在自然和人为影响下土壤演化过程的碳循环效应成为新近关注的热点之一。Song 等<sup>[15]</sup>在系统比较过去三十多年来我国土壤无机碳的变化后指出, 以施肥和大气氮沉降为主导因素驱动的土壤酸化已导致大陆尺度土壤无机碳的损耗, 很大程度上抵消了土壤和生态系统有机碳的固定, 这一过程近来受到重视<sup>[16]</sup>。与此相对应的是, 最近不少研究指出, 人为添加原生土壤矿物(岩石)在改良酸性土壤同时增加 CO<sub>2</sub> 固定, 为生态系统固碳提供了可能的操作路径<sup>[17]</sup>。

近年来, 该领域呈现出的研究态势包括: ①深化地球表层系统中土壤与环境要素之间的多过程耦合机理与模拟<sup>[18]</sup>; ②完善地表多要素长期监测网络,

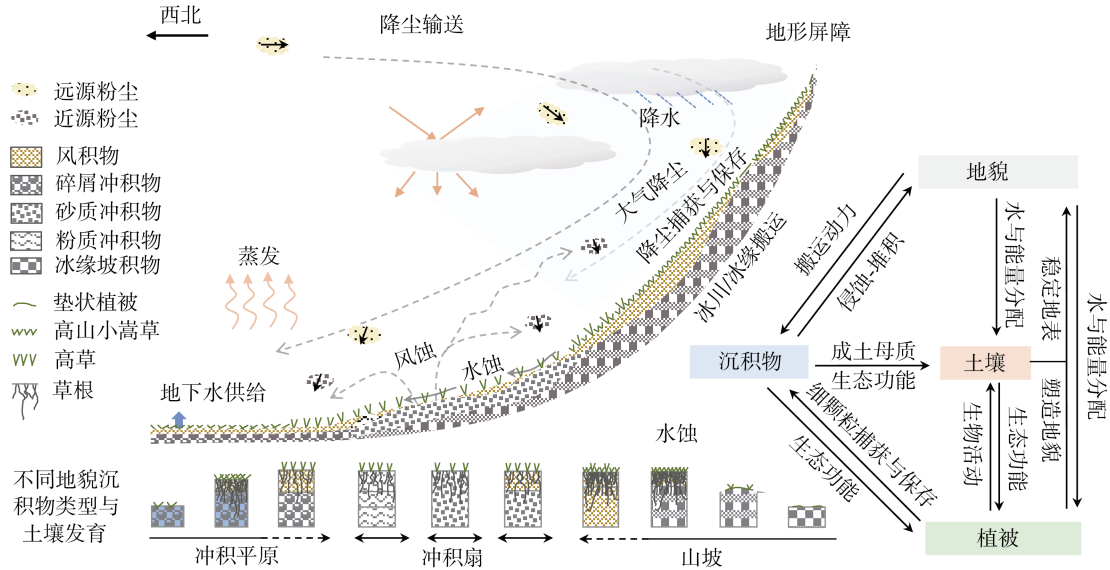


图 1 青藏高原高寒山区地表多要素耦合模型

Fig. 1 A conceptual model illustrating the coupling of multiple components and processes in the alpine regions of Qinghai-Tibet Plateau

尤其是地球关键带网络的建立,以深化地表系统“结构-过程-功能-服务”研究<sup>[19-20]</sup>; ③重点关注人类史背景下土壤生态功能及其相关属性,更好地服务气候变化、粮食安全、水安全等全球可持续发展目标的实现<sup>[21]</sup>; ④加强土壤时间研究。近年来该研究方向不断取得重要进展,这一方面源于对不同地区土壤时间序列的研究<sup>[22]</sup>,另一方面则来自测年技术的突破,特别是高精度测年技术,如单颗粒释光测年的发展为解译复杂土壤体系提供了新手段,为理解土壤形成时间及关键过程速率提供了新的可能<sup>[23-24]</sup>。

## 2 土壤遥感与近地传感

土壤遥感与近地传感是获取土壤时空分布及变化信息的重要手段,相比于传统土壤调查技术,具有经济性、快速便捷、现势性强、可大规模获取等优势,为近年来的土系调查、第三次土壤普查提供了强有力的支撑<sup>[1-25]</sup>。土壤遥感与近地传感起源于 20 世纪初,在 80 年代快速发展,其核心目标在于通过搭载光学与辐射型、电与电磁型、电化学型、机械式型等各类传感器,非接触式地探测及提取土壤信息,如理化属性、土壤类型、土壤功能等<sup>[26]</sup>。

土壤遥感按工作平台分为无人机遥感、航空遥感及卫星遥感,不同平台获取数据的空间和时间分辨率、覆盖面积等差异明显,可满足不同尺度的应

用需求。航空及卫星遥感搭载的传感器以光学与辐射型为主,空间分辨率从亚米级到公里级不等,可实现土壤信息规模化地快速获取,但其应用受限于植被覆盖的影响。无人机遥感机动灵活,可搭载多类型传感器,已广泛应用于田间尺度高分辨率土壤调查与制图,是助力精准与智慧农业发展的重要支撑。土壤遥感近年来被广泛应用于土壤类型预测制图、关键土壤属性(有机碳、土壤水分、土壤矿物、土壤质地等)预测制图<sup>[27]</sup>、土壤退化(土壤盐碱化、土壤侵蚀、土壤酸化、土壤污染等)遥感监测<sup>[28]</sup>等。

土壤近地传感主要利用田间传感器获取 2 m 以内的近地面或土体内信息,具有精准探测的优势。传感器类型多元,覆盖了不同的电磁波谱,如机械式传感器、X 射线荧光光谱(X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRF)、土壤电磁感应(Electromagnetic Induction, EMI)、激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS),以及近年来应用最为广泛、研究热度最高的可见-近红外(Visible and Near infrared Spectroscopy, vis-NIR)与中红外光谱(Middle infrared Spectroscopy)。围绕土壤近地传感的核心科学问题在于,如何提升土壤属性的探测精度,以降低传统方法的测定成本,探索的方法包括土壤水分去除、光谱预处理、光谱特征提取、建模集优选、建模算法筛选、光谱融合等<sup>[29]</sup>。主要关注的土壤属性包括单一指标,如有机质、全量及有效

态氮磷钾、pH、铁氧化物、土壤黏土矿物、阳离子交换量、碳酸钙、土壤盐分、土壤重金属等；以及功能性指标，如综合肥力、水文功能、土壤健康、土壤多样性等<sup>[30]</sup>。

为全面系统地揭示土壤光谱特性、分类和预测能力，已构建局地、国家级、洲际及全球等不同尺度的光谱库<sup>[31-32]</sup>，以可见-近红外与中红外光谱为主，并结合化学计量模型、机器学习、深度学习算法等，充分挖潜现有土壤光谱大数据的价值，以期

服务于土壤资源信息的精准获取与管理。

现有土壤遥感及近地传感技术已实现对土壤资源的天空地一体化监测（图2），可动态获取覆盖多平台、多尺度、多波段、多传感器的海量数据，研发多源异构数据同化与融合、协同反演、算法集成等关键技术，获取高精度、多要素、多时段的土壤数据产品，是亟需解决的热点及难点问题。土壤遥感与近地传感技术的蓬勃发展将新赋能新时代土壤地理学的发展，为土壤调查技术的革新带来新契机。

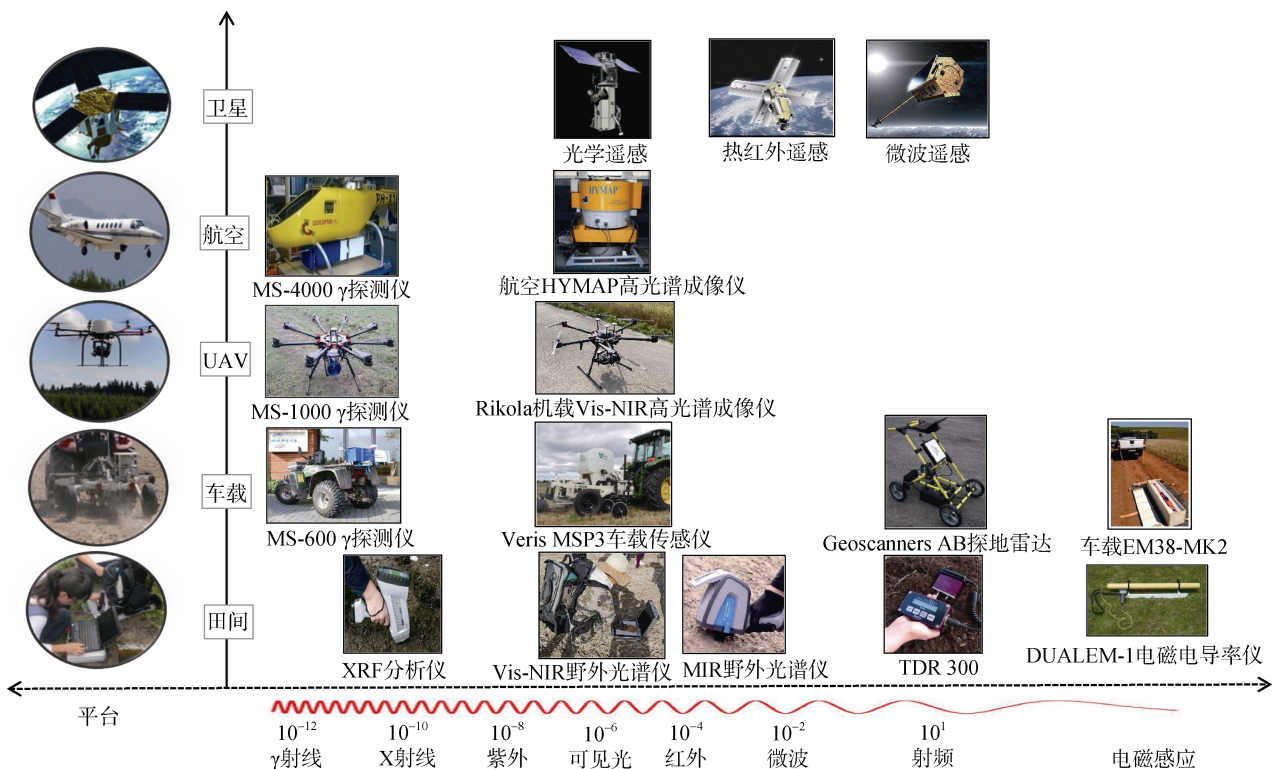


图2 天空地一体化土壤信息获取平台

Fig. 2 A comprehensive soil information acquisition platform consisting of space, aerial and proximal sensing

### 3 数字土壤制图

数字土壤制图 (Digital Soil Mapping, DSM) 已成为土壤空间分布信息表征的一般范式<sup>[1, 33-35]</sup>。该范式以土壤-景观模型为理论基础，根据与土壤发生相关的或与土壤具有协同空间变化的地理环境数据，构建土壤-环境关系，从而推理生成数字格式的土壤图<sup>[36]</sup>。随着对地观测与空间分析技术的发展，过去二十多年数字土壤制图在环境因子获取、制图模型/方法、不确定性度量等方面取得了快速发展，应用案

例也从小范围到大区域，甚至是全球尺度<sup>[37-38]</sup>。

数字土壤制图中对环境变量如气候、土壤母质、地形、生物要素等的选择是决定制图精度和准确性的关键，近年来相关研究不断拓展，开发和生成了很多新的环境变量，包括土壤近地传感器获得的数据，如电导率数据<sup>[39-40]</sup>、多光谱等数据<sup>[41-43]</sup>；利用遥感数据获取对地表更详细的表达，如地表动态反馈信息<sup>[44]</sup>、植被时序生长特征因子<sup>[45-46]</sup>、地表物候因子<sup>[45, 47-48]</sup>、土壤水分因子<sup>[49]</sup>；对地形地貌的更详细表达，如模糊坡位<sup>[50]</sup>。历史土壤图<sup>[51-53]</sup>也被当作土壤制图的一种预测因子。人类活动影响的刻画逐

渐受到人们的关注，这方面的工作包括表达农作物生长状况的环境变量<sup>[54]</sup>、农业活动强度<sup>[55-56]</sup>或土地利用变化强度<sup>[57]</sup>。研究表明，与常规因子相比，这些因子的加入可有效地提高土壤制图精度。

在土壤-环境关系的构建方法或模型研究中，基于机器学习与数据挖掘的方法能够更有效地解决土壤与环境因子之间的非线性问题，是目前为止应用非常广泛的一类方法<sup>[27, 34]</sup>。这些方法通过大数据分析 and 模式识别，可以从复杂的土地信息中提取有用的土壤特征，并进行土壤类型划分和制图，其中应用广泛的方法包括随机森林<sup>[34, 48]</sup>、贝叶斯模型<sup>[58-59]</sup>、回归树/决策树<sup>[60]</sup>等。近年来，深度学习的方法逐渐应用于数字土壤制图中<sup>[61-63]</sup>，这种数据驱动的方法为土壤科学的发展带来了新的机遇。

随着数字土壤制图的发展，土壤网格数据产品也取得了相应的进展。早在 20 世纪 90 年代，国际土壤信息中心 (ISRIC) 首先提出了土壤网格信息构建的思想和框架，并于 2000 年推出了首个 10 km 网格全球土壤质地数据 (Global Soil Data Task)<sup>[64]</sup>。联合国粮农组织对全球多个区域的土壤数据进行整合，提供了约 1km 分辨率的全球土壤网格数据产品 (Harmonized World Soil Database, HWSD)<sup>[65]</sup>。2009 年国际土壤学界在 *Science* 撰文提出全球 90 m 高精度土壤网格科学计划<sup>[66]</sup>，至今全球已推进到 250 m 分辨率的土壤网格产品 SoilGrids 1.0<sup>[38]</sup>和 2.0<sup>[67]</sup>，而高精度 (分辨率达到 100m) 土壤网格目前只在澳大利亚<sup>[68]</sup>、法国<sup>[69]</sup>、美国<sup>[70]</sup>和中国<sup>[27]</sup>等少数国家完成。

## 4 数字土壤形态学

传统土壤形态表征主要是由野外调查人员通过视觉、触觉和嗅觉等感官，对多种土壤形态进行描述<sup>[71]</sup>。虽然各国的描述规范基本一致，但其结果受描述工具限制以及描述者野外调查经验影响，描述结果多为定性或半定量的，无法准确表征土壤形态在剖面垂直和水平方向上的连续变化，科学性和合理性稍显不足。这也导致过往调查中获取的土壤形态数据很难满足高精度数字土壤制图和精准化土壤资源管理的需求<sup>[72]</sup>。

近十多年来，近地传感和计算机信息技术的飞

速发展为土壤野外调查提供了多元化的数据获取方式，也为土壤形态的获取和数字化表征提供了新的技术思路。Hartemink 和 Minasny<sup>[73]</sup>在 2014 年提出了数字土壤形态学 (Digital Soil Morphometrics, DSMorph) 的概念，并将其定义为“通过多种调查技术和方法，定量表征土壤剖面形态、属性及其深度函数的技术和方法”。同年，国际土壤联合会设立了 DSMorph 工作组，并于次年举办了第一届 DSMorph 专题研讨会。在 2016 年，《Digital Soil Morphometrics》正式面世，较为系统地阐述了数字土壤形态学的基本概念、方法和应用前景<sup>[74]</sup>。与传统土壤形态描述相比，DSMorph 可以较为准确地数字化表征土壤形态及其在剖面内分布特征，优化土壤采样方案，并与成土环境信息耦合，解译土壤演变过程<sup>[75]</sup>。

近年来，数字土壤形态学研究发展迅速，数据获取手段从实验室条件下单一传感技术向野外原位条件下多源传感信息融合技术发展，形态信息表征维度也逐步从剖面内的一维分布向土体内多维分布特征发展，数据规模逐步从小样本量向大数据样本集发展。通过利用高分辨率数码相机、可见-近红外光谱、X 射线荧光光谱、探地雷达和激光扫描仪等多种传感技术，以及机器学习和云计算等人工智能方法，DSMorph 可以快速、准确地获取土壤颜色、结构、质地、砾石、新生体以及发生层等多种形态和关键土壤属性，并表征其在剖面内的空间分异特征 (图 3)<sup>[76-78]</sup>。此外，通过耦合数字土壤形态数据库和人工智能模型，DSMorph 还能进一步预测土壤形态的空间分布规律，加深对土壤演变过程和成土环境变化的理解，提升“土壤-景观”模型和数字土壤制图的精度<sup>[79]</sup>。

## 5 土壤地理学和土壤时空信息的应用

土壤地理学应用多元，区域土壤调查是其最重要的应用场景。正是基于长期的历史积累和 21 世纪以来特别是我国土系调查成果，土壤地理学研究成果和队伍为正在开展的第三次全国土壤普查提供了全方位的支撑<sup>①</sup>。作为土壤与此同时，土壤时空信息是土壤形成演变过程及其与地理环境相互作用的综

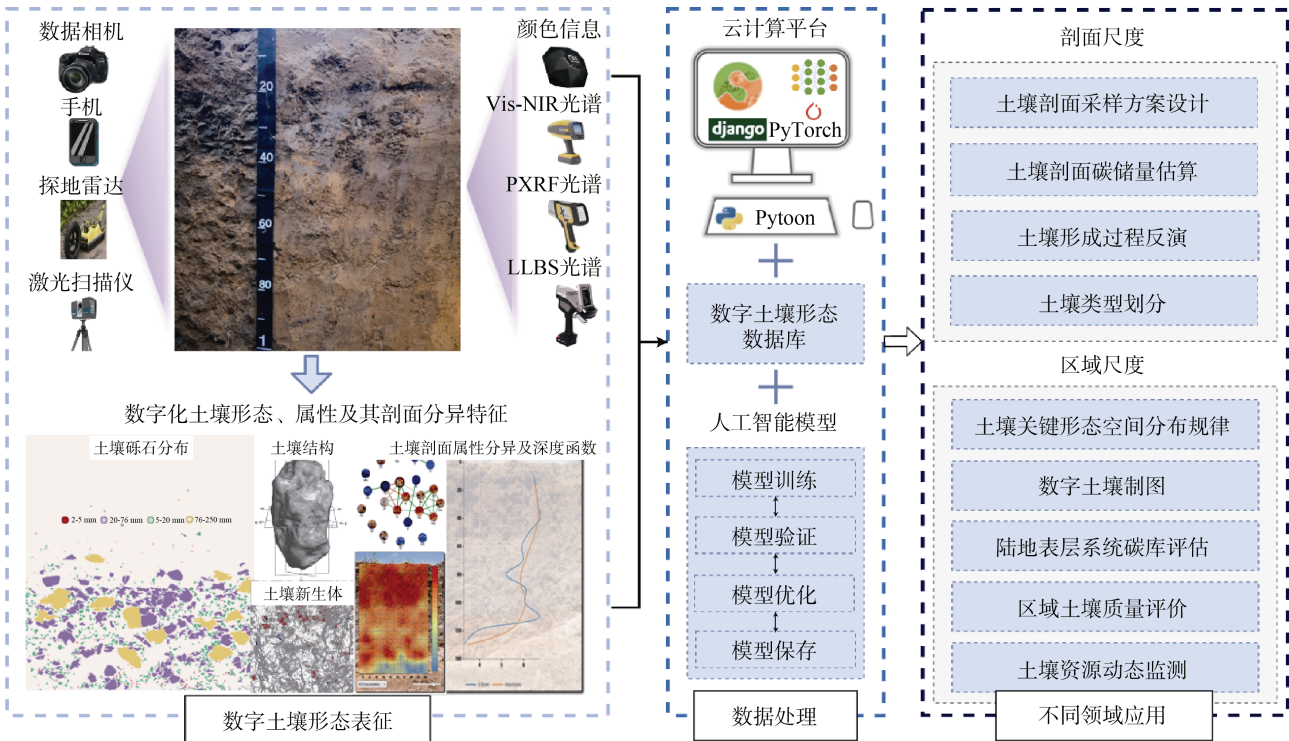


图3 数字化土壤形态及其应用

Fig. 3 Digitalized soil morphological characteristics and their applications

合体现,为农业可持续发展、生态文明建设以及“双碳”等国家战略决策提供了重要的科技支撑。

土壤是农业生产的基础,土壤质量与健康状况直接影响粮食生产能力以及作物的营养品质。在坚守“18 亿亩耕地保护红线”、防范和化解粮食安全风险的背景下,土壤时空信息已经成为土壤健康评估、障碍因子识别、中低产田改造、耕地质量建设以及作物种植结构调整与布局优化等的基础。自 20 世纪 80 年代起,我国已先后多次开展国家尺度中低产田调查,以期明确其质量等级、面积与空间分布特征。尽管由于出发点与面向对象不同,耕地质量、边际土地、中低产田甚至土壤障碍因子在定义与行业/部门标准制定方面存在一定差异<sup>[80-81]</sup>,但其核心问题仍是土壤自身特性,即,土壤物理、化学与生物性质的时空分布。例如,土层厚度、盐分含量、酸碱度、有机质含量与养分状况等。随着国家“藏粮于地、藏粮于技”重大战略的推进,迫切需要在不同尺度上全面获取中低产田及后备耕地的土壤时空信息,以评估土壤障碍消减技术的区域适宜性,提高粮食生产能力。

在全球环境变化及强烈人为活动条件下,面向

生态环境领域的土壤时空信息获取与应用是探索土壤形成过程,研究区域土壤环境质量演变,发挥土壤生态系统功能的重要保障<sup>[82-84]</sup>。土壤环境质量演变本质上属于人为影响下的土壤演变过程,因此,土壤环境质量时空信息,包括全球、国家、区域等尺度的土壤污染物时空分布信息等,在污染风险评估,不同土壤性质对污染物行为影响的解析,以及土壤污染物来源解析及其源汇关系分析中均得到了广泛的应用。同时,土壤时空信息也极大地丰富了污染物源解析和预测预警的基础数据库,并为后续的土壤污染防治和生态文明建设提供了重要科技支撑。

“十四五”时期,我国明确提出碳达峰、碳中和“双碳”目标<sup>[85-86]</sup>。陆地生态系统碳库巨大,具有强大的碳汇能力,而土壤作为陆地生态系统碳排放或固碳的核心调控纽带,土壤碳源汇强度精细核算已经成为近些年的研究热点<sup>[87]</sup>。土壤时空信息为碳储量估算、固碳减排潜力评估、土壤有机碳时空演变模拟等提供了关键核心数据支撑<sup>[88-90]</sup>。然而,工业化、城市化、农业集约化等进程快速发展导致的气候变化、土地利用方式及强度变化等已经对陆地生态系统土壤碳库产生重要影响,加之土壤碳库时空

预测模型所需高精度土壤环境数据的获取难度（特别是大范围、长序列的土壤时空数据）等因素的制约，目前对土壤碳源汇强度的估算结果依然存在较大的不确定性<sup>[88]</sup>。因此，准确把握土壤时空演变规律，充分挖掘土壤时空数据中的隐含信息，建立国家乃至全球尺度的土壤碳源汇强度精细核算方法体系，既是落实国家“双碳”目标的迫切需求，同时也可应对气候变化外交谈判提供重要科技支撑。

## 6 土壤地理学发展趋势

### 6.1 信息获取方式正在发生变革

作为全球生物地球科学、地球关键带科学研究中至关重要的有机组成部分，土壤信息获取技术正在发生由单一手段拓展到多源融合的变革。不同新型土壤遥感/传感技术手段与观测平台的发展与协同，不仅能够拓展土壤圈层多介质、多过程、多界面、多要素的长期监测，同时能实现跨尺度（从微观到宏观）实时监测易获取、易变化土壤属性信息及相关环境因子。囊括卫星遥感、航空遥感和近地传感的“天空地”一体化技术正在高速发展，将提供全球尺度实时/近实时的土壤地球物理、化学、生物属性高分辨率、高精度网格数据，为全球气候和环境变化的长期动态监测提供有力支撑。传统实验室理化分析数据在未来仍可作为参比，在探索基于不同遥感/传感平台的土壤信息与土壤功能关系的基础上，“天空地”一体化技术获取的土壤信息有望发展成为相对独立的标准。同时，鉴于多元化的技术手段和观测平台将产生大量多源异构土壤数据，亟需发展基于数据融合机理和数据同化技术，更好服务土壤地理学大数据精准建模和智能分析。

### 6.2 数字土壤制图向融合过程机理与数据驱动发展

数字土壤制图正在向大尺度、高精度的方向发展，同时，结合土壤过程机理模型，瞄准获取与土壤功能相关的非直接测定土壤信息，能够为服务多过程解译和多目标评价、实现土壤资源的精准管理提供支撑。

将过程机理与领域知识耦合到数据驱动的机器学习是土壤计量学未来潜力方向之一<sup>[88]</sup>。通过建立土壤形成和演化的数学模型，可以模拟土壤发育过程并预测土壤分布。过程模型与机器学习和深度学习相结合，可以提高数字土壤制图的准确性和可

靠性。目前已有少量结合过程模型与数字土壤制图的研究<sup>[89-90]</sup>，如，将过程模型结果作为环境协变量输入土壤制图模型。然而，这类研究非常有限，已有的研究多依赖于数字土壤制图模型，未考虑土壤-环境关系随时间的变化。

未来将需要发展适用于高分辨率大范围的数字土壤制图方法，生成土壤信息数据库。尽管最新的土壤网格数据采用了植被、地形、气候等环境协变量大数据作为输入、并采用先进的机器学习方法构建模型，然而随着大尺度网格分辨率的不断提升，土壤信息表征的不确定性随之放大，仍然无法完全满足地球系统模拟、精准农业管理及碳库估算的需求<sup>[91-92]</sup>。当前亟需发展更高精度的数字土壤制图方法，以期为土地管理和决策提供更准确的土壤信息。数字土壤制图未来的可能发展方向将利用新技术、新型数据和遗留数据来描述环境变量；定量刻画人类活动因子的影响，以更好地理解土壤形成过程；构建土壤-环境关系模型，以揭示土壤与环境之间的相互作用；将地学过程模型与数字土壤制图领域相结合，以增强土壤分布预测的准确性；开发适用于高分辨率大范围的土壤制图方法，以满足实际应用需求。

### 6.3 信息应用领域不断扩大

近年来，土壤时空信息的应用领域不断扩大，涵盖智慧农业、土壤数字孪生、法庭土壤学等诸多领域，并广泛地服务于公众科普。智慧农业是基于“精准农业”构想，融合信息技术、数据科学和现代农业的创新产物<sup>[93]</sup>。土壤是农业生产的物质基础，近年来，随着卫星遥感、低空无人机、近地传感等“天空地”立体监测手段和土壤时空预测模型的快速发展，高精度、大范围、长时间序列的土壤时空信息为智慧农业的创新发展提供了重要保障<sup>[94]</sup>。传统的土壤时空信息模型以土壤野外调查与长期定位观测数据为基础，通过气候、土壤、管理措施等环境条件驱动模型，模拟土壤演变过程。随着大数据分析、人工智能等新一代信息技术的快速发展，未来可通过虚拟世界的仿真模拟，构建现实世界土壤演变与作物生长状况模拟的土壤-作物数字孪生系统<sup>[95-97]</sup>，因此，基于数字模型与现实实体同步生长、自由交互的土壤-作物数字孪生系统，将为土壤时空信息应用领域的拓展提供新的机遇与方向。土壤时空信息在众多非传统应用领域亦快速拓展，如海绵



城市建设<sup>[98]</sup>、法庭土壤物证溯源分析<sup>[99]</sup>、军事土壤评估<sup>[100]</sup>、星际土壤对比研究<sup>[101]</sup>、解密古土壤<sup>[102]</sup>等。此外,为公众科学普及土壤的形成与演化、土壤分类与分布、土壤与环境及人类的关系等,促进公众从“被科普”逐步走向“参与土壤科学”,通过手机应用(如 mySoil)随时认知及分享脚下的土壤,乃至参与土壤调查及数字土壤制图<sup>[103]</sup>。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 ( 5 ): 1060—1070. [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.]
- [ 2 ] Zhang G L, Wu H Y. From “problems” to “solutions”: Soil functions for realization of sustainable development goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 ( 2 ): 124—134. [张甘霖, 吴华勇. 从问题到解决方案:土壤与可持续发展目标的实现[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 ( 2 ): 124—134.]
- [ 3 ] Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62: 1716—1718. [张甘霖, 朱永官, 邵明安. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49 ( 12 ): 1945—1947.]
- [ 4 ] Jiang Z D, Owens P R, Zhang C L, et al. Towards a dynamic soil survey: Identifying and delineating soil horizons in-situ using deep learning[J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115341.
- [ 5 ] Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese Soil Taxonomy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 826—834. [张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. *土壤学报*, 2013, 50 ( 4 ): 826—834.]
- [ 6 ] Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, et al. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development[J]. *Nature*, 1999, 397: 491—497.
- [ 7 ] Feng Y Y, Long H, Yang F, et al. Warmth favored dust activities on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50 ( 11 ): e2023GL103781.
- [ 8 ] Li J W, Zhang G L, Gong Z T. Nd isotope evidence for dust accretion to a soil chronosequence in Hainan Island[J]. *Catena*, 2013, 101: 24—30.
- [ 9 ] Yang F, Zhang G L, Yang F, et al. Pedogenetic interpretations of particle-size distribution curves for an alpine environment[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 9—15.
- [ 10 ] Chen L M, Zhao D B, Han G Z, et al. Iron loss of paddy soil in China and its environmental implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65( 7 ): 1277—1291. [陈留美, 赵东波, 韩光中, 等. 中国稻田土壤铁流失及其环境意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52 ( 7 ): 1253—1267.]
- [ 11 ] Yang S H, Wu H Y, Dong Y, et al. Deep nitrate accumulation in a highly weathered subtropical critical zone depends on the regolith structure and planting year[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54 ( 21 ): 13739—13747.
- [ 12 ] Yang F, Zhang G L, Sauer D, et al. The geomorphology-sediment distribution-soil formation nexus on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for landscape evolution[J]. *Geomorphology*, 2020, 354: 107040.
- [ 13 ] Zhang G L, Yang F, Long H. Save the life-sustaining matic layer on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Innovation*, 2023, 4 ( 3 ): 100418.
- [ 14 ] Zhang G L, Song X D, Wu K N. Classification method of key zones of the earth and case study of China[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, 51( 10 ): 1681—1692. [张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 地球关键带分类方法与中国案例研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51 ( 10 ): 1681—1692.]
- [ 15 ] Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. *National Science Review*, 2022, 9 ( 2 ): nwab120.
- [ 16 ] Silvero N E Q, Demattê J A M, Minasny B, et al. Sensing technologies for characterizing and monitoring soil functions: A review[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2023: 125—168.
- [ 17 ] Beerling D J, Kantzas E P, Lomas M R, et al. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands[J]. *Nature*, 2020, 583( 7815 ): 242—248.
- [ 18 ] Li Z K, Li X Y, Zhou S, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65 ( 11 ): 2083—2114. [李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52 ( 11 ): 2105—2138.]
- [ 19 ] Banwart S A, Bernasconi S M, Blum W E H, et al. Chapter one-Soil functions in earth's critical zone: Key results and conclusions//Steven A B, Donald L S. *Advances in Agronomy*[M]. Academic Press, 2017, 142: 1—27.
- [ 20 ] Yang S H, Song X D, Wu H Y, et al. Review and discussion on the earth's critical zone research: Status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023. DOI: 10.11766/trxb202211230640. [杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 等. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J]. *土壤学报*, 2023. DOI: 10.11766/trxb202211230640.]

- [ 21 ] Sullivan P L, Billings S A, Hirmas D, et al. Embracing the dynamic nature of soil structure: A paradigm illuminating the role of life in critical zones of the Anthropocene[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 225: 103873.
- [ 22 ] Zhang G L, Zhu A X, Shi Z, et al. Progress and future prospect of soil geography[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37 ( 1 ): 57—65. [张甘霖, 朱阿兴, 史舟, 等. 土壤地理学的进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37 ( 1 ): 57—65.]
- [ 23 ] Gray H J, Keen-Zebert A, Furbish D J, et al. Depth-dependent soil mixing persists across climate zones[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 ( 16 ): 8750—8756.
- [ 24 ] Yang F, Long H, Gong K Y, et al. Onset time and accretionary formation of Mollisols in Northeast China[J]. *Science Bulletin*, 2023, 68 ( 18 ): 1999—2002.
- [ 25 ] Viscarra Rossel R A, Behrens T, Ben-Dor E, et al. Diffuse reflectance spectroscopy for estimating soil properties: A technology for the 21st century[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73 ( 4 ): e13271.
- [ 26 ] Shi Z, Xu D Y, Teng H F, 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. [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.]
- [ 27 ] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67 ( 3 ): 328—340.
- [ 28 ] Wang J Z, Zhen J N, Hu W F, et al. Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11 ( 3 ): 429—454.
- [ 29 ] Viscarra Rossel R A, Adamchuk V I, Sudduth K A, et al. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time[M]//*Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 243—291.
- [ 30 ] Poppiel R R, da Silveira Paiva A F, Dematté J A M. Bridging the gap between soil spectroscopy and traditional laboratory: Insights for routine implementation[J]. *Geoderma*, 2022, 425: 116029.
- [ 31 ] Viscarra Rossel R A, Behrens T, Ben-Dor E, et al. A global spectral library to characterize the world's soil[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 155: 198—230.
- [ 32 ] Shi Z, Wang Q L, Peng J, et al. Classification of hyperspectral reflectance characteristics of main soils in China and spectral prediction model of organic matter[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2014, 44 ( 5 ): 978—988. [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.]
- [ 33 ] Zhu A X, Yang L, Fan N Q, et al. The review and outlook of digital soil mapping[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37 ( 1 ): 66—78. [朱阿兴, 杨琳, 樊乃卿, 等. 数字土壤制图研究综述与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37 ( 1 ): 66—78.]
- [ 34 ] Wadoux A M 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.
- [ 35 ] Chen S C, Arrouays D, Mulder V L, et al. Digital mapping of soil properties at a broad scale: A review[J]. *Geoderma*, 2022, 409: 115567.
- [ 36 ] McBratney A B, Santos M M, Minasny B. On digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2003, 117 ( 1/2 ): 3—52.
- [ 37 ] Hengl T, de Jesus J M, MacMillan R A, et al. SoilGrids1km: Global soil information based on automated mapping[J]. *PLoS One*, 2014, 9 ( 8 ): e105992.
- [ 38 ] Hengl T, Mendes de Jesus J, Heuvelink G B M, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12 ( 2 ): e0169748.
- [ 39 ] Besson A, Cousin I, Richard G, et al. Changes in field soil water tracked by electrical resistivity[M]//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. *Proximal soil sensing*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010.
- [ 40 ] Myers D B, Kitchen N R, Sudduth K A, et al. Combining proximal and penetrating soil electrical conductivity sensors for high-resolution digital soil mapping[M]//Viscarra Rossel R A, McBratney A B, Minasny B. *Proximal soil sensing*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010.
- [ 41 ] Viscarra Rossel R A, Fouad Y, Walter C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100 ( 2 ): 149—159.
- [ 42 ] Shi Z, Guo Y, Jin X, et al. Advancement in study on proximal soil sensing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 ( 6 ): 1274—1281. [史舟, 郭燕, 金希, 等. 土壤近地传感器研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48 ( 6 ): 1274—1281.]
- [ 43 ] Shi Z, Ji W, Viscarra Rossel R A, et al. Prediction of soil organic matter using a spatially constrained local partial least squares regression and the Chinese vis-NIR spectral library[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 ( 4 ): 679—687.
- [ 44 ] Zeng C Y, Zhu A X, Liu F, et al. The impact of rainfall magnitude on the performance of digital soil mapping over low-relief areas using a land surface dynamic feedback method[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 297—309.
- [ 45 ] 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.
- [ 46 ] Zhang L, Cai Y Y, Huang H L, et al. A CNN-LSTM model for soil organic carbon content prediction with long time series of MODIS-based phenological variables[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 ( 18 ): 4441.
- [ 47 ] Yang L, Song M, Zhu A X, et al. Predicting soil organic carbon content in croplands using crop rotation and Fourier transform decomposed variables[J]. *Geoderma*, 2019, 340: 289—302.
- [ 48 ] He X L, Yang L, Li A Q, et al. Soil organic carbon prediction using phenological parameters and remote sensing variables generated from Sentinel-2 images[J]. *Catena*, 2021, 205: 105442.
- [ 49 ] Yang C, Yang L, Zhang L, et al. Soil organic matter mapping using INLA-SPDE with remote sensing based soil moisture indices and Fourier transforms decomposed variables[J]. *Geoderma*, 2023, 437: 116571.
- [ 50 ] Qin C Z, Lu Y J, Qiu W L, et al. Application of fuzzy slope positions in predicting spatial distribution of soil property at finer scale[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1706—1714. [秦承志, 卢岩君, 邱维理, 等. 模糊坡位信息在精细土壤属性空间推测中的应用[J]. *地理研究*, 2010, 29(9): 1706—1714.]
- [ 51 ] Kempen B, Brus D J, Heuvelink G B M, et al. Updating the 1: 50, 000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach[J]. *Geoderma*, 2009, 151 ( 3/4 ): 311—326.
- [ 52 ] Yang L, Jiao Y, Fahmy S, et al. Updating conventional soil maps through digital soil mapping[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 ( 3 ): 1044—1053.
- [ 53 ] Huang W, Luo Y, Wang S Q, et al. Knowledge of soil-landscape model obtain from a soil map and mapping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 ( 1 ): 72—80. [黄魏, 罗云, 汪善勤, 等. 基于传统土壤图的土壤—环境关系获取及推理制图研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53 ( 1 ): 72—80.]
- [ 54 ] Song M, Yang L, Zhu A X, et al. Mapping soil organic matter in farming areas with crop rotation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 ( 4 ): 778—785. [宋敏, 杨琳, 朱阿兴, 等. 轮作模式在农耕地土壤有机质推测制图中的应用[J]. *土壤通报*, 2017, 48 ( 4 ): 778—785.]
- [ 55 ] Miklos M, Short M G, McBratney A B, et al. Mapping and comparing the distribution of soil carbon under cropping and grazing management practices in Narrabri, north-west New South Wales[J]. *Soil Research*, 2010, 48 ( 3 ): 248—257.
- [ 56 ] Mandal A, Majumder A, Dhaliwal S S, et al. Impact of agricultural management practices on soil carbon sequestration and its monitoring through simulation models and remote sensing techniques: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 52 ( 1 ): 1—49.
- [ 57 ] Nabiollahi K, Golmohamadi F, Taghizadeh-Mehrjardi R, et al. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate[J]. *Geoderma*, 2018, 318: 16—28.
- [ 58 ] Brus D J, Bogaert P, Heuvelink G B M. Bayesian Maximum Entropy prediction of soil categories using a traditional soil map as soft information[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59 ( 2 ): 166—177.
- [ 59 ] Poggio L, Gimona A, Spezia L, et al. Bayesian spatial modelling of soil properties and their uncertainty: The example of soil organic matter in Scotland using R-INLA[J]. *Geoderma*, 2016, 277: 69—82.
- [ 60 ] Khaledian Y, Miller B A. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 81: 401—418.
- [ 61 ] Padarian J, Minasny B, McBratney A B. Using deep learning for digital soil mapping[J]. *Soil*, 2019, 5 ( 1 ): 79—89.
- [ 62 ] Odebiri O, Mutanga O, Odindi J, et al. Deep learning approaches in remote sensing of soil organic carbon: A review of utility, challenges, and prospects[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193 ( 12 ): 802.
- [ 63 ] Yang L, Cai Y Y, Zhang L, et al. A deep learning method to predict soil organic carbon content at a regional scale using satellite-based phenology variables[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102428.
- [ 64 ] International Geosphere Biosphere Programme ( IGBP ). Global soil data task ( IGBP-DIS, ISO-image of CD ). 2000.
- [ 65 ] Nachtergaele F O, Velthuisen H van, Verelst L, et al. Harmonized World Soil Database ( version 1.2 ), 2012.
- [ 66 ] Sanchez P A, Ahamed S, Carré F, et al. Digital soil map of the world[J]. *Science*, 2009, 325 ( 5941 ): 680—681.
- [ 67 ] Poggio L, de Sousa L M, Batjes N H, et al. SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty[J]. *Soil*, 2021, 7 ( 1 ): 217—240.
- [ 68 ] Viscarra Rossel R A, Chen C, Grundy M J, et al. The Australian three-dimensional soil grid: Australia's contribution to the GlobalSoilMap Project[J]. *Soil Research*, 2015, 53 ( 8 ): 845.
- [ 69 ] Mulder V L, Lacoste M, Richer-de-Forges A C, et al. National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France[J]. *Geoderma*, 2016, 263: 16—34.
- [ 70 ] Ramcharan A, Hengl T, Nauman T, et al. Soil property and class maps of the conterminous United States at 100-meter spatial resolution[J]. *Soil Science Society of*

- America Journal, 2018, 82 ( 1 ): 186—201.
- [ 71 ] Schoeneberger P J, Wysocki D A, Benham E C, et al. Field book for describing and sampling soils[M]. Array Lincoln, Nebraska: National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, 2012.
- [ 72 ] Jones E J, McBratney A B. What is digital soil morphometrics and where might it be going? [M] // Hartemink A E, Minasny B. Digital Soil Morphometrics. Cham: Springer, 2016: 1—15.
- [ 73 ] Hartemink A E, Minasny B. Towards digital soil morphometrics[J]. Geoderma, 2014, 230/231: 305—317.
- [ 74 ] Wang Q B, Hartemink A E, Jiang Z D, et al. Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China[J]. Geoderma, 2017, 301: 11—18.
- [ 75 ] Zhang Y K, Hartemink A E. Sampling designs for soil organic carbon stock assessment of soil profiles[J]. Geoderma, 2017, 307: 220—230.
- [ 76 ] Hirmas D R, Giménez D, Mome Filho E A, et al. Quantifying soil Structure and porosity using three-dimensional laser scanning[M]// Hartemink A E, Minasny B. Digital Soil Morphometrics. Cham : Springer, 2016: 19—35.
- [ 77 ] Sun F J, Bakr N, Dang T, et al. Enhanced soil profile visualization using portable X-ray fluorescence ( PXRF ) spectrometry[J]. Geoderma, 2020, 358: 113997.
- [ 78 ] Jiang Z D, Wang Q B, Libohova Z, et al. Fe-Mn concentrations in upland loess soils in mid-continental North America: A step towards dynamic soil survey[J]. Catena, 2021, 202: 105273.
- [ 79 ] Bai X Y, Zhang J, Cui Z L, et al. Advances in the indicator and assessment approaches of medium-low yield fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 ( 4 ): 913—924. [白雪源, 张杰, 崔振岭, 等. 中低产田评价指标与主要方法研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 913—924.]
- [ 80 ] Cao X F, Sun B, Chen H B, et al. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36 ( 3 ): 336—348. [曹晓风, 孙波, 陈化榜, 等. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36 ( 3 ): 336—348.]
- [ 81 ] Luo Y M. Prospects of the research on biogeochemical processes, quality evolution and risk management of soil environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 ( 5 ): 846—851. [骆永明. 土壤环境的生物地球化学过程、质量演变和风险管理研究展望[J]. 土壤学报, 2008, 45 ( 5 ): 846—851.]
- [ 82 ] Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 ( 5 ): 1137—1142. [骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57 ( 5 ): 1137—1142.]
- [ 83 ] Yu G R, Zhu J X, Xu L, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37 ( 4 ): 490—501. [于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37 ( 4 ): 490—501.]
- [ 84 ] Yu G R, Hao T X, Zhu J X. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37 ( 4 ): 423—434. [于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37 ( 4 ): 423—434.]
- [ 85 ] Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils : Review, challenge, and research suggestions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33( 2 ): 191—197. [赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 ( 2 ): 191—197.]
- [ 86 ] Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65 ( 4 ): 641—651.
- [ 87 ] Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52 ( 6 ): 1010—1020. [朴世龙, 何悦, 王旭辉, 等. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52 ( 6 ): 1010—1020.]
- [ 88 ] Wadoux A M J C, Heuvelink G B M, Lark R M, et al. Ten challenges for the future of pedometrics[J]. Geoderma, 2021, 401: 115155.
- [ 89 ] Ma Y X, Minasny B, Welivitiya W D D P, et al. The feasibility of predicting the spatial pattern of soil particle-size distribution using a pedogenesis model[J]. Geoderma, 2019, 341: 195—205.
- [ 90 ] Wadoux A M J C, Padarian J, Minasny B. Multi-source data integration for soil mapping using deep learning[J]. Soil, 2019, 5 ( 1 ): 107—119.
- [ 91 ] Todd-Brown K E O, Randerson J T, Post W M, et al. Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations[J]. Biogeosciences, 2013, 10 ( 3 ): 1717—1736.
- [ 92 ] Varney R M, Chadburn S E, Burke E J, et al. Evaluation of soil carbon simulation in CMIP6 Earth system models[J]. Biogeosciences, 2022, 19( 19 ): 4671—4704.
- [ 93 ] Li J J, Bai P F. Realistic challenges and countermeasures of China's smart agriculture innovation practice[J].

- Scientific Management Research, 2023, 41( 2 ): 127—134. [李建军, 白鹏飞. 我国智慧农业创新实践的现实挑战与应对策略[J]. 科学管理研究, 2023, 41 ( 2 ): 127—134.]
- [ 94 ] King A. Technology : The future of agriculture[J]. Nature, 2017, 544 ( 7651 ): S21—S23.
- [ 95 ] Bauer P, Stevens B, Hazeleger W. A digital twin of Earth for the green transition[J]. Nature Climate Change, 2021, 11 ( 2 ): 80—83.
- [ 96 ] Li W, Zhu D L, Wang Q, et al. Research review on crop digital twin system for monitoring growth status and environmental response[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24 ( 6 ): 90—105. [李炜, 朱德利, 王青, 等. 监测生长状态和环境响应的作物数字孪生系统研究综述[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24 ( 6 ): 90—105.]
- [ 97 ] Klerkx L, Jakku E, Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda[J]. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2019, 90/91: 100315.
- [ 98 ] Huang J D. The review of soil's impact on the sponge city construction in China[J]. Landscape Architecture, 2017 ( 9 ): 106—112. [黄俊达. 土壤在中国海绵城市建设中的作用研究进展综述[J]. 风景园林, 2017 ( 9 ): 106—112.]
- [ 99 ] Guo H L, Wang P, Zhu J, et al. Forensic geology and soil examination[J]. Forensic Science and Technology, 2019, 44 ( 1 ): 53—59. [郭洪玲, 王萍, 朱军, 等. 法庭地质学与泥土物证检验[J]. 刑事技术, 2019, 44 ( 1 ): 53—59.]
- [ 100 ] Daigle J J, Hudnall W H, Gabriel W J, et al. The National Soil Information System ( NASIS ): Designing soil interpretation classes for military land-use predictions[J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42 ( 3/4 ): 305—320.
- [ 101 ] Che X C, Nemchin A, Liu D Y, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5[J]. Science, 2021, 374 ( 6569 ): 887—890.
- [ 102 ] Zhu Y G, Su J Q, Cao Z H, et al. A buried Neolithic paddy soil reveals loss of microbial functional diversity after modern rice cultivation[J]. Science Bulletin, 2016, 61 ( 13 ): 1052—1060.
- [ 103 ] Rossiter D G, Liu J, Carlisle S, et al. Can citizen science assist digital soil mapping?[J]. Geoderma, 2015, 259/260: 71—80.

( 责任编辑: 檀满枝 )