

DOI: 10.11766/trxb202004270199

张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 王秋兵, 吴克宁, 史志华, 赵永存, 赵玉国, 潘贤章, 刘峰, 宋效东. 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, WANG Qiubing, WU Kening, SHI Zhihua, ZHAO Yongcun, ZHAO Yuguo, PAN Xianzhang, LIU Feng, SONG Xiaodong. Progress and Perspective of Studies on Soils in Space and Time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1060–1070.

## 土壤时空变化研究的进展与未来\*

张甘霖<sup>1, 2, 3†</sup>, 史舟<sup>4</sup>, 朱阿兴<sup>5</sup>, 王秋兵<sup>6</sup>, 吴克宁<sup>7</sup>, 史志华<sup>8</sup>, 赵永存<sup>1</sup>,  
赵玉国<sup>1, 2</sup>, 潘贤章<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>, 宋效东<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. 中国科学院大学现代农学院, 北京 100049;  
3. 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; 4. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058;  
5. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 6. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 7. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 8. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:** 理解和表征土壤的时空变化是土壤学的基本任务, 也是评估和合理发挥土壤功能的重要前提。土壤的时空变化与气候环境变迁、岩石圈风化、地表物质迁移、生物地球化学循环等圈层变化过程相耦合。围绕土壤时空变化研究的新近进展, 本文综述并展望了土壤形成和演变过程、土壤形态学、土壤调查、土壤分类、数字土壤制图与土壤退化的发展态势。未来土壤时空变化研究的关键科学问题主要包括: 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、多尺度土壤-环境关系与模拟、多元土壤信息的融合机理与数据同化。未来重点研究领域将涉及到关键带科学引领的土壤形成和演变研究、多尺度数字土壤制图与时空变化预测、基于多传感器的土壤综合观测原理与技术、完整和详尽的国家和全球土壤资源清单及共享平台建设、区域土壤资源退化机理及其功能恢复。

**关键词:** 土壤地理学; 土壤发生学; 土壤形态学; 土壤调查; 土壤制图; 土壤光谱

**中图分类号:** S159      **文献标志码:** A

## Progress and Perspective of Studies on Soils in Space and Time

ZHANG Ganlin<sup>1, 2, 3†</sup>, SHI Zhou<sup>4</sup>, ZHU Axing<sup>5</sup>, WANG Qiubing<sup>6</sup>, WU Kening<sup>7</sup>, SHI Zhihua<sup>8</sup>, ZHAO Yongcun<sup>1</sup>,  
ZHAO Yuguo<sup>1, 2</sup>, PAN Xianzhang<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, SONG Xiaodong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;  
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 4. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023,

\* 国家重点研发计划项目(2018YFE0107000) \ NSFC-广东省人民政府联合基金项目(U1901601) \ 国家自然科学基金项目(41571130051) \ 国家科技基础性工作专项(2008FY110600, 2014FY110200) 资助 Supported by the National Key Research and Development Plan of China (No. 2018YFE0107000), Joint Fund of National Natural Science Foundation of China and Guangdong Provincial People's Government (No. U1901601), National Natural Science Foundation of China (No. 41571130051), Special Project of National Science and Technology Basic Research (Nos. 2008FY110600, 2014FY110200)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 张甘霖(1966—), 男, 湖北通山人, 研究员, 土壤学专业。

收稿日期: 2020-04-27; 收到修改稿日期: 2020-05-11; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-06-11

China; 6. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 7. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 8. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Soils evolve in space and time and soil changes are coupled with the changes in climate and environment, rock weathering and biogeochemical cycling. A better understanding and accurate quantification of soil spatio-temporal variation not only act as a basic research task of soil science but also are prerequisite for scientifically evaluating and reasonably maintaining soil functions. The main objective of this study was to review the recent studies on spatio-temporal soil variation. Dozens of latest related publications were reviewed, of which the topics included soil formation and evolution, soil morphology, soil survey, soil classification, digital soil mapping and soil degradation. It is anticipated that main scientific issues may include the simulation of coupling processes between soil and environment within the framework of earth surface system, precise modeling of the soil-landscape, and the data fusion and assimilation of multisource soil information. Based on the analysis, future priority areas of soils in space and time studies may include the soil formation and evolution driven by Critical Zone processes, digital soil mapping at various scales, the principle and technology for soil information acquisition based on multi-sensors, a complete and detailed national even global soil inventory and its sharing platform, and the processes of regional soil resource degradation and the recovery of soil functions.

**Key words:** Soil geography; Pedogenesis; Soil morphology; Soil survey; Soil mapping; Soil spectral

土壤是地球表层系统的重要组成部分，在全球陆地分布中构成了完整的圈层。地表系统中的其他圈层（岩石圈、生物圈、水圈、大气圈）相互作用的连接界面就是土壤圈，因此土壤的空间分布和演化与其他圈层系统密切相关。19世纪中叶土壤学起源之初提出的土壤形成因素学说，即土壤是气候、生物、地形、母质相互作用的产物，可以看作是对这种圈层之间耦合关系的一种简单描述。事实上，土壤的时空变化与气候环境变迁、岩石圈风化、地表物质迁移、生物地球化学循环等圈层变化过程相耦合，并经历上述环境因子的变迁和日益强化的人类活动。因此，土壤时空变化研究必然从这些相关过程出发，反之也可以通过土壤的记录来解译这些环境的变化。

土壤是行星地球活的皮肤，是维系生命的载体，以其生产、支持、缓冲等功能为地球生命提供服务<sup>[1]</sup>。人类社会已经认识到，科学合理地维持土壤功能对人类自身的生存和可持续发展至关重要。在全球可持续发展目标（Sustainable Development Goals, SDGs）中，有多个目标与土壤密切相关，土壤资源的合理利用和管理是全球可持续发展解决方案中的重要环节<sup>[2-3]</sup>。土壤功能的发挥取决于土壤自身的属性，而土壤的属性又随空间和时间而变化。因此，理解和表征土壤的时空变化是土壤学的基本任务，也是评估和合理发挥土壤功能的重要前提。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。

## 1 土壤时空变化研究的内涵

土壤的时空分布是土壤形成、演化、发展的综合体现，是大自然成土因素（气候、生物、母质、地形和时间）和人为作用长期综合作用的结果。地表系统中土壤与地理环境相互作用关系的研究正是土壤时空变化研究的主题。土壤的任何变化都有其时空维度，本文所指的土壤时空变化研究主要是土体尺度以上的变化。以经典土壤地理学为学科表现形式的土壤时空变化研究包含了土壤的发生和演变、土壤分类与分布、土壤调查与制图、土壤区划和土壤资源评价等诸多方面<sup>[4]</sup>。土壤的时空分异规律研究能够有效地服务于土壤资源的可持续利用和管理。

土壤发生学是研究土壤形成和演变的土壤学学科分支。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，推测土壤过去可能的发生过程。基于土壤时间序列的方法可以揭示具有不同时间尺度响应特征的土壤性质的演变。人为活动的加剧已经对土壤过程产生深

刻的影响,就现代土壤的利用和不当使用的规模和强度而言,对于土壤与人类的关系还有很多问题亟需阐明。

土壤形态学是土壤学研究的起点。根据对土壤形态的研究,就能对土壤的组成、土壤中发生的各种过程的本质以及影响成土作用发展的种种条件进行推断和演绎。土壤剖面描述是土壤形态学的基础,包括剖面立地环境、地理位置、土壤发生层划分及其形态性质描述等。翔实的土壤剖面描述结果和实验室测定的矿物性质、土壤理化性质、微形态特征等相结合,有助于认识、理解土壤发生过程,科学划分土壤类型,有利于土壤调查、土壤制图、土地评价等工作的顺利开展。

土壤调查与制图的目的是获取土壤属性特征和时空演变的过程信息,并以地图这种可视化的方式表达土壤的空间分布规律,能够为土壤资源的利用提供空间数据支持。传统的土壤调查主要是对土壤剖面形态及影响土壤形成的地理环境进行观察与描述记载,受野外调查成本和实际分析样本数量的限制,很难进行大范围土壤信息的重复调查。传统土壤制图的技术流程包括资料收集—野外调查—室内分析—野外校核—定界成图,这种制图方法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。靠脚步丈量绘出土壤图的传统土壤地理学迫切需要引入新技术、新方法,传统土壤制图正向数字土壤制图(Predictive Soil Mapping)演变。

土壤分类的目的是建立一个土壤类别的有序等级(体系)。土壤分类的发展与土壤科学的发展密不可分,在相当长的时间内引领了土壤科学的发展方向。土壤是一个连续体,因此土壤分类相对而言必须更多地依照分类者的主观理解。除了认识土壤、组织知识等理论意义,土壤分类在实践上并不局限于传统的制图应用。在土壤数据的支持下,基于数值空间距离的分类方法一直在不断地尝试新的突破,因而土壤分类理论、方法、标准及相关分类信息数据库的集成与应用将是土壤分类在现在和将来一段时间内的重点。

土壤时空格局是土壤资源评价的基础,因此在自然和人为作用下土壤资源的演变过程也是土壤时空变化研究的重要内容。本质上,可以将土壤退化过程理解为人为影响下的土壤演变过程,因此土壤

退化也是土壤资源演变研究的重要内容。土壤退化是指在各种自然和人为因素影响下,土壤生产能力或环境调控潜力暂时性或永久性的下降,甚至完全丧失的过程。土壤退化是高度非线性的过程,具有时间上的动态性和空间上的异质性,涉及土壤学、农学、生态学及环境科学,而且也与社会科学和经济学密切相关。

## 2 土壤时空变化研究的新近进展与态势

### 2.1 土壤形成和演变过程:从土壤到地表系统物质循环

土壤发生学研究土壤的演变过程及其与环境(成土因素)之间的相互作用。土壤风化和形成速率是土壤发生学的基础科学问题之一,其研究技术和方法主要包括实验室模拟、流域物质通量平衡方法、时间序列方法等。实验室模拟测定的矿物风化速率与田间测定结果可相差数个数量级<sup>[5]</sup>,适用于矿物风化机理研究。排水采集器方法可观测自然状态下元素的淋溶和迁移,相对接近自然状态,但只能代表点位尺度的一维过程。流域物质平衡方法的依据是元素的生物地球化学平衡原理,即对于流域体系,输出元素与输入元素的差值来源于矿物的风化。通过径流、植物、土壤、岩石、干湿沉降等要素长期和动态观测,可以计算物质的输入、损失、迁移和转化<sup>[6-7]</sup>,可相对真实地估算特定区域的矿物风化和成土速率。

对于研究土壤的动态演变过程而言,土壤时间序列方法(Soil Chronosequence)具有重要的意义<sup>[8]</sup>。在获得序列中各土壤个体的绝对或相对发育时间基础上,系统比较不同相对年龄的各种土壤性质,在定量研究土壤发生过程中具有独到的价值<sup>[9-10]</sup>。近年来利用土壤时间序列方法对热带地区土壤和水稻土开展了比较深入和系统的研究,为揭示自然和人为作用下土壤的演变和可持续性提供了新的认识<sup>[10-16]</sup>。

近10年来,以关键带科学为代表的地球表层系统科学发展迅速,为土壤发生学提供了新的契机,土壤与其他关键带要素之间的相互作用逐步成为土壤发生学新的研究内容。地球关键带科学是地表系统的综合研究,涉及地质学、地球物理学、土壤学、水文学、生态学、地貌学等跨学科的系统研究(图1),但土壤发生学在其中起着核心和纽带的作用<sup>[17]</sup>。

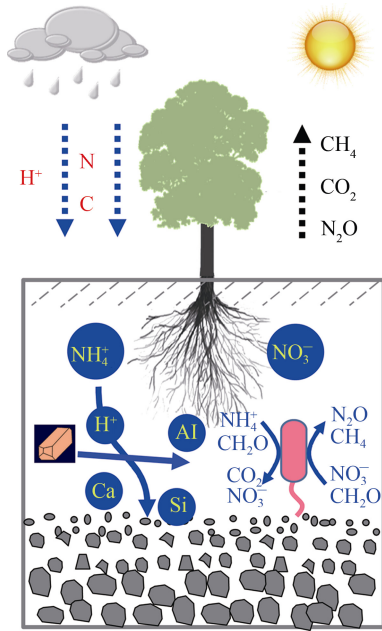


图 1 土壤形成演化过程耦合地表系统要素之间的物质迁移与转化

Fig. 1 The coupling between the soil formation and the migration and transformation of materials of earth surface system

## 2.2 土壤形态学：从描述走向数字化

土壤形态是现代土壤学的核心科学概念之一。对土壤剖面的描述是研究土壤最直观和详实的有效手段<sup>[18]</sup>。在土壤学发展过程中，土壤剖面的描述标准虽然也经历了一些变化，但其基本内容一直相当稳定。以 *Soil Survey Manual*<sup>[19]</sup>、*Field Book for Describing and Sampling Soils*<sup>[20]</sup>、*Guidelines for Soil Description*<sup>[21]</sup> 等为代表的土壤形态描述工具实际上大同小异。

传统土壤描述的信息采集设备简陋，无法充分反映土壤在空间上的连续变异特征，描述结果受描述者个人经验所限，其适用性和实用性受到了一定程度的限制，因此历史上已经获取的大量土壤形态描述资料并未发挥应有的作用。

随着不同传感技术在土壤信息获取领域逐步得到应用<sup>[22]</sup>，2014 年 Hartemink 和 Minasny<sup>[23]</sup> 首先提出了数字土壤形态计量学 (Digital Soil Morphometrics)，主要是通过不同的调查工具，定量获取土壤剖面属性、剖面属性图及其深度函数。国际土壤联合会 (International Union of Soil Sciences, IUSS) 2014 年设立了数字土壤形态计量学工作组，并于次年 6 月在美国举行了第一次国际专题研讨会。2016 年 *Digital Soil Morphometrics* 一书的面世，表明数字土壤形态计量学

体系已趋于成熟。之后又有多篇论文问世，数字化土壤形态计量学已应用于不同的学科领域<sup>[24-25]</sup>。

与传统土壤剖面形态描述相比，数字化土壤形态计量学能够更精确地定量再现土壤形态属性，并以一种相对客观的方式量化土壤变异<sup>[18]</sup>，从而实现了土壤形态属性信息的数字化，并可进一步结合数字土壤制图技术应用于不同尺度、不同专业领域。

## 2.3 土壤调查：技术引领革新

土壤调查是获取土壤类型及其空间分布信息的主要手段，是土壤资源管理的基础。然而，传统土壤调查信息的获取周期长、成本高、过程复杂、复杂区域不可达、时效性差，难以进行大范围、高覆盖度的重复调查<sup>[26]</sup>。卫星与航空遥感、近地传感在内的星地传感技术的蓬勃发展为土壤调查提供了新机遇<sup>[27]</sup>。

按照工作原理，土壤星地传感技术包括光学与辐射型、电与电磁型、电化学型、机械式型等种类。地面传感包括了这四类方式，卫星和航空遥感搭载的传感器主要是基于光学与辐射型<sup>[27]</sup> (图 2)。

土壤航空光学遥感出现于 20 世纪 20 年代。1969 年, MacDonald 和 Waite<sup>[28]</sup> 利用航空成像雷达进行土壤湿度监测试验。1972 年世界第一颗资源卫星发射成功，1975 年发射第二颗并更名为“Landsat”，此后 Landsat 卫星开始用于大面积土壤调查。进入 21 世纪，无人机遥感 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 技术快速发展，已应用于田间尺度的高分辨率土壤调查与制图。

土壤具有感应电磁的特性，在地下土壤信息获取中，电与电磁型传感器能够基于电流的变化来度量土壤导电能力，而随着土壤在空间位置上的变异，电流将发生瞬时变化。电与电磁型传感器能够有效反演黏土层埋深、土壤养分、土壤盐分、土壤质地、土壤水分等属性。

土壤光谱探测技术研究的主要任务是从探测信号获取可与传统方法相比较的土壤性质，数据预处理与预测模型的构建是其核心内容。数据预处理主要针对野外土壤光谱受到的各种环境因素以及土壤本身的差异 (土壤水分含量、土壤颗粒大小等) 的影响<sup>[27]</sup>，目前国际上主要提出了三类方法：一是利用室内外干湿样光谱对比，采用分段直接标准化法 (Piecewise Direct Standardization, PDS)、直接标准化法 (Direct Standardization, DS)、外部参数正交化法 (External Parameter Orthogonalization, EPO)



图2 现代土壤调查数据获取平台特征

Fig. 2 The characteristics of data acquisition for modern soil survey

等方法直接进行光谱曲线的转换<sup>[29-31]</sup>；二是从预测样本中挑选有代表性的子集，从而提高模型对预测样本的预测精度<sup>[32-33]</sup>；三是通过导数等预处理来提高野外光谱预测精度<sup>[34]</sup>。

土壤近地传感是利用田间传感器获取土壤近地面或土体内信息的一种科学技术<sup>[35]</sup>。自20世纪20年代以来，传感技术不断进步，自20世纪60年代出现了最早的土壤光谱辐射能研究，以及X射线荧光光谱技术的应用(X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)，20世纪70年代出现了盐碱土电磁感应技术(Electromagnetic induction, EMI)<sup>[36-37]</sup>。近年来可见-近红外光谱(Vis-NIR)发展迅速，2006年，Brown等开始建立全球土壤光谱库，此后各国也陆续开展了国家尺度的土壤光谱库建设工作<sup>[38-39]</sup>。此外，探地雷达和地震仪在土壤调查中能够更有效地获取到表下层土壤的特征信息，已逐步成为现代土壤调查的重要手段之一<sup>[40]</sup>。总之，以技术进步为标志的现代土壤信息获取为土壤时空变化研究提供了极其有力的工具，无疑为业已发端的土壤信息学奠定了技术基础。

#### 2.4 土壤分类：不断精细并与数值融合

土壤分类是科学认识和区分土壤类型的实践，也是建立土壤属性与功能之间联系的桥梁。随着科学的进步，土壤分类也在迅速发展。目前国际上土壤分类仍然是以土壤形态学为基础的诊断分类，如美国土壤系统分类(ST)和国际土壤分类参比基础(WRB)<sup>[4]</sup>。

我国近代土壤分类始于20世纪30年代，先后

经历了马伯特分类、土壤地理发生分类和土壤系统分类三个时期。土壤发生分类在我国土壤科学发展和生产应用方面发挥了重要作用，以其为基础编制了大量的大、中比例尺图，而且还编制了全国1:400万土壤图和1:1200万土壤图。中国土壤系统分类研究始于20世纪80年代初，经过近四十年年的发展，出版的*Chinese Soil Taxonomy*经过国际土壤学会的介绍后，已经传播到20多个国家。关于基层分类的研究与系统分类高级单元的原则和方法呼应，目前已取得了阶段性的进展<sup>[41]</sup>。最近10多年来，“我国土系调查和《中国土系志》编制”工作基于中国土壤系统分类建立了土族和土系划分标准<sup>[42]</sup>，并在广泛调查的基础上，陆续出版了系列《土系志》专著，将土壤分类工作推向了新的前沿<sup>[43-46]</sup>。

土壤分类方法正在由基于专家经验的人工判别逐步走向数值化自动分类<sup>[47-48]</sup>。受益于星地遥感和近地传感等技术的飞速发展，用于分类的属性逐步从基于实验室测定的物理、化学属性向传感获得的信号信息过渡。土壤光谱获取相对简单、快速、信息量大，能够反映土壤的多种关键属性，已成为数值分类体系中重要的数据来源<sup>[47]</sup>；同时现代地理信息系统技术和计算机技术的发展，为数值土壤分类提供了更强大的工具。传统的土壤分类只能将目标土壤剖面划分为一个非此即彼的具体类型，而数值分类则突破了这种界线，使用模糊或相似程度的形式表达土壤在属性空间中的关系，这为描述地理

空间中的土壤渐变特征提供了新的技术支持。

## 2.5 数字土壤制图：土壤制图新范式

数字土壤制图是利用环境协同变量预测目标土壤信息的预测性制图范式（图 3），它避免了传统制图的不足，能为土地利用和管理提供准确的土壤信息产品。

预测性土壤制图近 20 年来发展异常迅速，相关研究主要集中在采样设计、环境协同变量获取和预测模型开发三个方面<sup>[49-50]</sup>。采样方法研究的主要目

的是揭示不同背景下采样的效率和对制图精度的贡献，无论是基于概率理论的采样方法，或是基于样点空间自相关的采样方法，还是基于环境因子辅助的采样方法，都有不同程度的适用条件<sup>[51]</sup>。基于概率理论的采样设计在空间相关性较强的地区会生成一定数量的冗余点，在其他地区却有可能生成极少数的样点；环境因子辅助的采样方法旨在选择可以代表环境因子参数空间的样点来捕捉土壤的空间变异特征，以提高采样效率<sup>[52-54]</sup>。

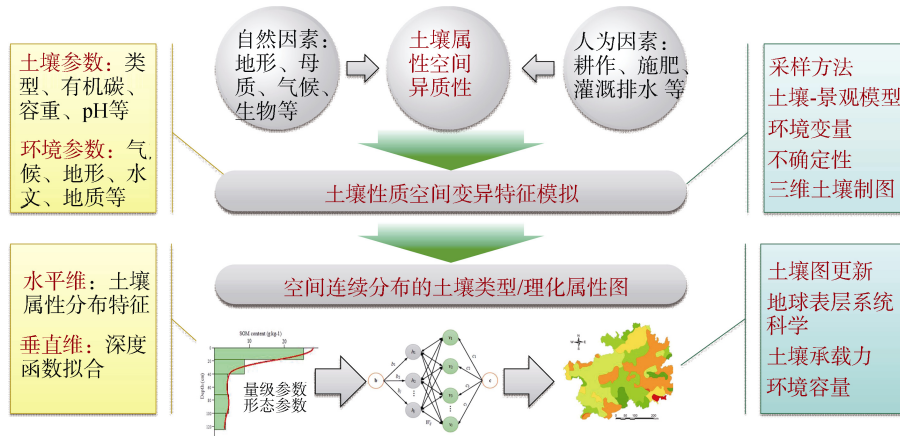


图 3 数字土壤制图基本范式

Fig. 3 Paradigm of digital soil mapping

能表征土壤环境空间变化的地理变量统称为“环境协同变量”，通常包括影响土壤形成的母质、气候、地形地貌、植被等因子<sup>[55-56]</sup>。不同因子作用的空间尺度特征是不同的，因而对制图精度的影响各异。开发新的非传统成土因素变量近期有新的进展，如使用地表动态反馈来表达土壤的时空变异特征，在平原地区取得了很好的效果<sup>[57-61]</sup>。

数字土壤制图方法（模型）的发展具有决定性的意义。不同的空间预测模型包括数理统计方法、地统计方法、模糊逻辑方法、专家知识方法，还包括遗传算法、多元自适应回归样条法等，在不同的样区都能实现一定程度上的预测精度<sup>[51, 62]</sup>。作为地表上的三维实体，土壤空间预测模型也走向了立体，三维土壤制图近年来受到重视，针对三维土壤制图提出了多种技术方案，如 3D 克里金<sup>[63-64]</sup>、神经网络<sup>[65]</sup>、回归树<sup>[66]</sup>等。三维土壤制图研究热点包括模型改进<sup>[67-68]</sup>、深度函数拟合<sup>[69-70]</sup>、各向异性表达<sup>[71]</sup>、精度检验<sup>[72]</sup>与不确定性评估<sup>[73]</sup>等技术。

数字土壤制图正在向大尺度、高精度的方向发

展，同时，结合土壤过程和转换函数，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<sup>[67-68]</sup>。

## 2.6 土壤退化：从土壤过程到地表过程

联合国粮农组织于 20 世纪 70 年代首次提出土壤退化概念，并划分了土壤侵蚀、盐碱累积等 10 大类土地退化<sup>[74]</sup>。我国土壤学家结合实际，进一步提出了较为系统的土壤退化分类方法，涵括了土壤侵蚀、土壤沙化与荒漠化、土壤贫瘠化、土壤板结化、土壤酸化、盐碱化与潜育化等多个方面<sup>[75]</sup>。目前相关研究主要围绕土壤退化的发生机理与时空演变、评价指标与评价方法、驱动因素等方面。

为深入剖析土壤退化的发生机理及演变过程，前人从土壤的物理、化学和生物学过程及其相互作用入手，在不同尺度上，深入研究了土壤退化的过程与本质<sup>[76]</sup>。并在此基础上，从历史的角度出发，结合定位动态监测，研究了各类土壤退化的演变过程及发展趋向和速率。以我国为例，重点针对南方

红壤肥力退化、污染及酸化、黄土高原土壤侵蚀和水土流失过程、西北干旱土壤沙漠化和盐渍化等开展了退化机理与动态演变研究<sup>[77-78]</sup>。

土壤退化的研究手段与土壤资源研究的趋势一致,从传统的典型样点采样分析、连续定位观测、典型区动态监测逐步发展到遥感反演、数字制图、空间分析等<sup>[79]</sup>。随着近年来高空间分辨率、高光谱遥感技术的发展,新技术手段在退化土壤的监测、预警、模拟、可视化及评估中逐渐得到广泛的应用。

土壤退化研究逐步从对土壤自身的关注向地表综合系统演变发展。当前土壤退化研究的重要趋势,是从水、土、气、生、人之间的耦合关系这一地表系统科学的角度,从不同的时空尺度分析气候变化等自然因素和人为活动对环境变化和各类土壤退化过程的影响<sup>[80]</sup>,从多方面、多角度分析土壤退化的发生机理和驱动因子,认识自然和人为过程影响下人-地关系驱动的土壤变化和退化。

### 3 土壤时空变化研究的需求与未来

土壤是人类生存和发展的基础。从传统的粮食安全保障,到土壤与生命健康、土壤与区域生态安全、土壤与全球气候变化,土壤这一重要的地表要素在国家议程上的地位持续上升。2014年联合国提出的全球可持续发展目标(SDGs)中有数个目标直接与土壤相关。管理好土壤这一近乎不可再生的自然资源,关乎到人类的生存和福祉。应对这一宏伟目标,土壤学面临挑战和革新发展的契机,既推进研究的前沿,同时支撑可持续发展目标的实现。对土壤时空变化研究而言,需要进一步明确近期需要解决的科学问题,并基于此设定研究的重点。

#### 3.1 新兴的关键科学问题

全球环境变化和强烈人为活动条件下的土壤时空变化研究面临新的挑战 and 契机。现代环境条件下,人为活动(森林砍伐、农田耕作和管理、城市建设等)及其产生的环境变化(酸雨、大气CO<sub>2</sub>含量升高、水土流失等)对土壤影响强度远远超过自然因素,可以改变土壤发生的方向和轨迹,使得成土过程更加复杂,土壤空间分布特征发生改变。土壤的定义超越了“陆地表面能生长绿色植物的疏松表层”,而是发展为“土壤圈”。同时,土壤学的研究对象和科学内涵也在不断演进,从传统的土壤自身

向地球关键带视角下的整个疏松表层延伸,研究方法上也更加全面地融合多学科技术和方法,不断走向量化。基于对相关领域研究现状的分析,未来土壤时空变化研究可聚焦以下关键科学问题。

(1) 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。以关键带科学为代表的地球表层系统科学是研究土壤时空变化的重要契机,在关键带科学范畴内能够系统地进行以土壤为重要枢纽的表层系统物质循环研究,可以综合考虑地质大循环和生物小循环对土壤形成和演变的作用。借助水文学、生物地球化学和生态学等多交叉学科,可从多尺度、多界面、多要素角度出发综合研究多过程耦合,以理解地表过程各要素的响应与交互机理。在大量的原位测定实验的基础上,需要从田间尺度到流域尺度上构建多过程耦合的数学模型,如生态过程与水文过程耦合建模研究、包气带与饱和带水文过程耦合等<sup>[2, 81]</sup>,这些模型旨在预测不同情景下物质在界面之间的通量及其环境效应,还可模拟土壤性质的演化过程和未来趋势,为土壤资源可持续利用提供支撑。以风化和成土过程为例,描述全球土被分布格局与气候、地质背景、地貌特征等之间的定量关系,需要融合风化过程、地表剥蚀与沉积过程、人为活动等多个关键要素发展预测模型。

(2) 多尺度土壤-环境关系与模拟。随着多源、多平台传感器的发展以及土壤地理信息获取和处理技术的不断进步,以土壤发生学为理论基础,通过数字土壤制图模型模拟大范围区域乃至洲际、全球尺度上的土壤相关属性的时空分布特征仍然是一个挑战。近年来,数字土壤制图已成为土壤科学和土壤制图领域的研究前沿,未来需要针对不同生态和环境类型,构建适用于区域特点的土壤-景观模型,预测土壤类型或属性分布。如何与相关学科领域不断涌现出新的知识发现模型或改进模型进行结合,实现多尺度精准模拟,是深入解剖土壤时空变异、土壤与成土要素耦合关系的重要科学问题。

(3) 多元土壤信息的融合机理与数据同化。由于观测技术手段和观测平台的多样化,土壤信息的多元获取方式导致大量异构土壤数据的生产,而任何基于观测数据的土壤管理措施(管理模型)需要具有可比的基础,因此数据的同化是一个急需解决的难题。传统实验室获取数据仍然可以作为可比的基础,但未来基于遥感、近感和接触式传感获取的

土壤信息或将发展出相对独立的标准，而这些标准的建立需要先探索不同途径获取的土壤信息与土壤功能之间的关系。

### 3.2 未来重点研究领域分析

经过近 25 年的快速发展，正像很多研究领域一样，我国土壤学正迅速从跟踪向国际第一梯队迈进，并在很多领域逐步发挥引领作用。为在国际上实现领跑，未来土壤时空变化研究可根据相关发展态势，优先发展以下领域。

(1) 以关键带（地球表层系统）科学研究引领土壤形成和演变研究的革新。现代土壤发生逐渐从自然因素发展到人为因素影响的研究，从静态发展到动态研究，从实验室到田间，从现象到机理探索，从定性到定量，从观测和模拟到模型，从以土壤为主体走向以土壤为中心的地球表层系统，到水-土-气-生-岩相互作用的关键带研究。土壤是关键带的核心部分，水是地球关键带各组成部分的纽带，是物质迁移和能量转换的主要驱动力。针对我国不同地区存在的生态环境问题，可利用已经建立的长期关键带观测站和稳定同位素、同步辐射等先进技术，多尺度、跨学科地系统研究自然和人为作用下土壤发育与相关要素耦合过程研究，进而建立生物地球化学和水文过程耦合模型，模拟多尺度水文过程、物质迁移转化过程和土壤演变过程，预测未来土壤和关键带演变趋势。

(2) 多尺度数字土壤制图与时空变化预测。由于自然条件和社会经济发展水平的差异，土壤信息可获取水平和实际需求相差较大，高分辨率土壤数据事实上存在较大的区域空白，土壤质量时空变化程度难以准确估计。土壤数据多使用以类别多边形为基础的制图表达，无法充分满足现代生产应用、流域水文模拟、全球气候模型等需求。因此，未来需要针对不同生态系统类型区，利用现代土壤调查技术，构建代表性区域土壤—景观定量模型，预测生成不同深度的三维土壤属性空间分布数据产品，为土壤资源合理利用和生态文明建设以及多目标应用提供关键土壤数据。

(3) 基于多传感器的土壤综合观测原理与技术。包括卫星与航空遥感、近地传感在内的星地传感技术的蓬勃发展为土壤调查带来了新契机。土壤星地传感技术在不同地理尺度（田块、农场、区域）获得了海量、不同分辨率的空间数据，这些数据有望较好地满足不同应用的需求。然而，传感器平台机

制差异导致了数据融合与反演困难重重。在此背景下，需要结合土壤时空变化研究的具体需求，研发更高效的土壤信息快速获取与多源数据融合、协同反演技术体系，尤其是基于超高分辨率的无人机遥感实现近地面非接触土壤和作物信息的快速获取，挖掘土壤关键参数的光谱响应机理，建立遥感信息与土壤理化属性地面观测数据的耦合关系和同化方法，进一步发展土壤信息科学（Soil Informatics）。

(4) 建立完整和详尽的国家和全球土壤资源清单，并实现共享与应用。土壤资源清单包括以多边形为表现形式的土壤类型图和基于栅格数据的属性图。土壤的特性在空间尺度上呈现不同程度的变异性，这种空间变异信息的获取、分析、模拟、制图表达等处理离不开土壤数据库的支持，尤其是多时空属性、包含更多基层分类信息的土壤剖面样点。作为一个土壤类型众多、土壤资源丰富的国家，我国现在尚未构建覆盖全国、以基层单元类型为核心的土壤类型数据库。因此，目前需要建立国家尺度土壤数据库并发展相应的解译服务技术，建立我国网络化、网格化、多时空属性的土壤数据库（Soil Grid），为土壤信息广泛地应用于土壤资源的评价、开发、利用和管理等提供支持，也能直接服务于相关部门在精准农业和生态过程模拟等方面的需求。与此同时，作为国际社会的重要一员，应积极参与乃至领导地区和至全球土壤资源数据库建设。

(5) 区域土壤资源退化机理及其功能恢复。土壤作为维系陆地生命系统不可替代的资源，土壤物理、化学和生物学性质共同决定了土壤过程和功能。土壤退化机理及其功能恢复的研究重点包括：①研究土壤退化的主要类型与驱动因素，建立以土壤过程为核心的功能模型，并开展多尺度土壤退化趋向的模拟预测与预警；②理解土壤性质和过程变化的尺度效应，及其对生源要素与水循环、温室气体排放、生物系统演替等生态过程的影响，揭示土壤质量变化与土壤功能退化或恢复的关系；③研究土壤资源服务功能的形成机制，及其与人类活动的关系，开发适用于不同土壤退化类型区的、以生态功能提升为目标的土壤质量恢复重建的关键技术与途径。

### 参考文献（References）

- [ 1 ] Blum W, Schad P, Nortcliff S. Essentials of Soil Science: Soil Formation, Functions, Use and Classification( World



- Reference Base, WRB) [M]. Stuttgart: Borntraeger Science Publishers, 2018.
- [ 2 ] 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.]
- [ 3 ] Zhang G L, Wu H Y. From “Problems” to “Solutions”: Soil functions for realization of sustainable development goals[J]. *Bulletin of the 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.]
- [ 4 ] Zhang G L, Shi X Z, Gong Z T. Retrospect and prospect of soil geography in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 ( 5 ): 792—801. [张甘霖, 史学正, 龚子同. 中国土壤地理学发展的回顾与展望[J]. *土壤学报*, 2008, 45 ( 5 ): 792—801.]
- [ 5 ] Swoboda-Colberg N G, Drever J I. Mineral dissolution rates in plot-scale field and laboratory experiments[J]. *Chemical Geology*, 1993, 105 ( 1/3 ): 51—69.
- [ 6 ] Huang L M, Zhang G L, Yang J L. Weathering and soil formation rates based on geochemical mass balances in a small forested watershed under acid precipitation in subtropical China[J]. *Catena*, 2013, 105: 11—20.
- [ 7 ] Yang J L, Zhang G L, Huang L M, et al. Estimating soil acidification rate at watershed scale based on the stoichiometric relations between silicon and base cations[J]. *Chemical Geology*, 2013, 337/338: 30—37.
- [ 8 ] Brantley S L. Understanding soil time[J]. *Science*, 2008, 321 ( 5895 ): 1454—1455.
- [ 9 ] Lichter J. Rates of weathering and chemical depletion in soils across a chronosequence of Lake Michigan sand dunes[J]. *Geoderma*, 1998, 85: 255—282.
- [ 10 ] Chen L M, Zhang G L, William R E. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75: 1807—1820.
- [ 11 ] Li J W, Zhang G L, Gong Z T. Ndisotope evidence for dust accretion to a soil chronosequence in Hainan Island[J]. *Catena*, 2013, 101: 24—30.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] He Y, Li D C, Velde B, et al. Clay minerals in a soil chronosequence derived from basalt on Hainan Island, China[J]. *Geoderma*, 2008, 148: 206—212.
- [ 14 ] Han G Z, Zhang G L. Changes in magnetic properties and their pedogenetic implications for paddy soil chronosequences from different parent materials in south China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64 ( 4 ): 435—444.
- [ 15 ] Han G Z, Zhang G L, Li D C, et al. Pedogenetic evolution of clay minerals and agricultural implications in three paddy soil chronosequences of south China derived from different parent materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15 ( 2 ): 423—435.
- [ 16 ] Huang L M, Zhang X H, Shao M A, et al. Pedogenesis significantly decreases the stability of water-dispersible soil colloids in a humid tropical region[J]. *Geoderma*, 2016, 274: 45—53.
- [ 17 ] Sullivan P L, Wymore A S, McDowell W, et al. New opportunities for Critical Zone Science[R]. White booklet: Arlington meeting for CZ science, 2017, Arlington.
- [ 18 ] Jones E J, McBratney A B. What is digital soil morphometrics and where might it be going? // Hartemink A E, Minasny B. *Digital Soil Morphometrics*[M]. Switzerland: Springer, 2016: 1—15.
- [ 19 ] Soil Survey Division Staff. *Soil Survey Manual*[M]. United States Department of Agriculture, Washington DC, 1993.
- [ 20 ] Schoeneberger P J, Wysocki D A, Benham E C, et al. *Field Book for Describing and Sampling Soils*, version 3.0[M]. Natural Soil Survey Center, Lincoln, NE, 2012.
- [ 21 ] Jahn R, Blume H P, Asio V B, et al. *Guidelines for Soil Description*[M]. 4th ed. Rome: FAO, 2006.
- [ 22 ] McBratney A B, Mendonca S, Minasny B. On digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 2003, 117: 3—52.
- [ 23 ] Hartemink A E, Minasny B. Towards digital soil morphometrics[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 305—317.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] Zhang Y, Hartemink A E. Sampling designs for soil organic carbon stock assessment of soil profiles[J]. *Geoderma*, 2017, 307: 220—230.
- [ 26 ] Hartemink A E, McBratney A. A soil science renaissance[J]. *Geoderma*, 2008, 148 ( 2 ): 123—129.
- [ 27 ] 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.]
- [ 28 ] Macdonald H C, Waite W P. Soil moisture detection with imaging radars[J]. *Water Resources Research*, 1971, 7 ( 1 ): 100—110.
- [ 29 ] 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.

- [ 30 ] 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.
- [ 31 ] 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.
- [ 32 ] ViscarraRossel 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.
- [ 33 ] 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 ( 1/2 ): 66—77.
- [ 34 ] 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.
- [ 35 ] 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.]
- [ 36 ] Ristori G, Bruno V. Metallic microelements of soil determined by X-ray fluorescence[J]. *Agrochimica*, 1969, 13 ( 4/5 ): 367.
- [ 37 ] Dejong E, Ballantyne A K, Cameron D R, et al. Measurement of apparent electrical-conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43 ( 4 ): 810—812.
- [ 38 ] Brown D J, Shepherd K D, Walsh M G, et al. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geoderma*, 2006, 132 ( 3/4 ): 273—290.
- [ 39 ] ViscarraRossel R A, Behrens T, Ben-Dor E. A global spectral library to characterize the world's soil[J]. *Earth Science Reviews*, 2016, 155: 198—230.
- [ 40 ] Song X D, Wu H Y, Hallett P D, et al. Paleotopography continues to drive surface to deep-layer interactions in a subtropical Critical Zone Observatory[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 175: 103987.
- [ 41 ] CSTCG ( Chinese Soil Taxonomic Classification Research Group ). *Chinese Soil Taxonomy*[M]. Beijing · New York: Science Press, 2001.
- [ 42 ] 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.]
- [ 43 ] Lu Y. *Chinese Soil Series · Guangdong*[M]. Beijing: Science Press, 2017. [卢瑛. *中国土系志 · 广东卷*[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [ 44 ] Li D C, Zhang G L, Wang H. *Chinese Soil Series · Anhui*[M]. Beijing: Science Press, 2017. [李德成, 张甘霖, 王华. *中国土系志 · 安徽卷*[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [ 45 ] Sui Y Y, Jiao X G, Li J W. *Chinese Soil Series · Jilin*[M]. Beijing: Science Press, 2019. [隋跃宇, 焦晓光, 李建维. *中国土系志 · 吉林卷*[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [ 46 ] Wang T W. *Chinese Soil Series · Hubei*[M]. Beijing: Science Press, 2017. [王天巍. *中国土系志 · 湖北卷*[M]. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [ 47 ] Shi Z, Wang Q L, Peng J, 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: 978—988.
- [ 48 ] Zeng R, Rossiter D G, Yang F, et al. How accurately can soil classes be allocated based on spectrally predicted physio-chemical properties? [J]. *Geoderma*, 2017, 303: 78—84.
- [ 49 ] Zhang G L, Brus D, Liu F, et al. *Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales and Boundaries*[M]. Singapore: Springer, 2016.
- [ 50 ] Zhang G L, Liu F, Song X D. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 ( 12 ): 2871—2885.
- [ 51 ] 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.]
- [ 52 ] Minasny B, McBratney A B. Latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping[J]. *Developments in Soil Science*, 2006, 31: 153—606.
- [ 53 ] Brus D J, Heuvelink G B M. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables[J]. *Geoderma*, 2007, 138: 86—95.
- [ 54 ] Zhu A X, Yang L, Li B L, et al. Purposive sampling for digital soil mapping under fuzzy logic//Hartemink A E, McBratney A, Mendonça-Santos M de L. *Digital Soil Mapping with Limited Data*[M]. Switzerland: Springer, 2008: 233—245.
- [ 55 ] Zhu A X, Band L E. A knowledge-based approach to data integration for soil mapping[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1994, 20 ( 4 ): 408—418.
- [ 56 ] Hengl T, de Jesus J M, Heuvelink G B M, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12 ( 2 ): e0169748.
- [ 57 ] Zhu A X, Liu F, Li B L, et al. Differentiation of soil conditions over low relief areas using feedback dynamic patterns extracted from MODIS[J]. *Soil Science Society*

- of America Journal, 2010, 74 (3): 861—869.
- [ 58 ] Liu F, Rossiter D G, Song X D, et al. An approach for broad-scale predictive soil properties mapping in low-relief areas based on responses to solar radiation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84: 144—162.
- [ 59 ] Liu F, Geng X, Zhu A X, et al. Soil texture mapping over low relief areas using land surface feedback dynamic patterns extracted from MODIS[J]. Geoderma, 2012, 171: 44—52.
- [ 60 ] Guo S X, Meng L, Zhu A X, et al. Data-gap filling to understand the dynamic feedback pattern of soil[J]. Remote Sensing, 2015, 7 (9): 1801—1182.
- [ 61 ] 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.
- [ 62 ] Song X D, Brus D J, Liu F, et al. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: A case study in the Heihe River Basin, China[J]. Geoderma, 2016, 261: 11—22.
- [ 63 ] Veronesi F, Corstanje R, Mayr T. Mapping soil compaction in 3D with depth functions[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124: 111—118.
- [ 64 ] Liu F, Zhang G L, Sun Y J, et al. Mapping three-dimensional distribution of soil organic matter over a subtropical hilly landscape[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (4): 1241—1253.
- [ 65 ] Aitkenhead M J, Coull M C. Mapping soil carbon stocks across Scotland using a neural network model[J]. Geoderma, 2016, 262: 187—198.
- [ 66 ] Lacoste M, Minasny B, McBratney A, et al. High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape[J]. Geoderma, 2014, 213: 296—311.
- [ 67 ] Brus D J, Yang R M, Zhang G L. Three-dimensional geostatistical modeling of soil organic carbon: A case study in the Qilian Mountains, China[J]. Catena, 2016, 141: 46—55.
- [ 68 ] 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.
- [ 69 ] Liu F, Rossiter D G, Song X D, et al. A similarity-based method for three-dimensional prediction of soil organic matter concentration[J]. Geoderma, 2016, 263: 254—263.
- [ 70 ] Veronesi F, Corstanje R, Mayr T. Landscape scale estimation of soil carbon stock using 3D modelling[J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 578—586.
- [ 71 ] Bourennane H, Salvador-Blanes S, Couturier A, et al. Geostatistical approach for identifying scale-specific correlations between soil thickness and topographic attributes[J]. Geomorphology, 2014, 220: 58—67.
- [ 72 ] 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.
- [ 73 ] 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.
- [ 74 ] Oldeman L R, Hakkeling R T A, Sombroek W G. World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note[R]. Wageningen: ISRIC, 1990: 3.
- [ 75 ] Zhang T L, Wang X X. Development and orientation of research work on soil degradation[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15 (3): 280—284. [张桃林, 王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向[J]. 自然资源学报, 2000, 15 (3): 280—284.]
- [ 76 ] Lal R, Blum W E, Valentine C, et al. Methods for Assessment of Soil Degradation[M]. CRC Press, 1997.
- [ 77 ] Zhao Q G. Spatiotemporal Variation, Mechanism and Regulation of Soil Degradation in the Red Soil Region of Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2002. [赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [ 78 ] Cheng G D, Li R. On some issues of the ecological construction of west China and proposals for policy[J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20 (6): 503—510. [程国栋, 李锐. 西部地区生态环境建设的若干问题与政策建议[J]. 地理科学, 2000, 20 (6): 503—510.]
- [ 79 ] Cheng J L, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19 (1): 50—54.
- [ 80 ] Lal R. Soil degradation by erosion[J]. Land Degradation & Development, 2001, 12 (6): 519—539.
- [ 81 ] Yang J F, Zhang C G. Earth's critical zone: A holistic framework for geo-environmental researches[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41 (3): 98—104. [杨建锋, 张翠光. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (3): 98—104.]

(责任编辑: 陈德明)