

土壤地理学的进展与展望

张甘霖^{1,2*}, 朱阿兴^{3,4}, 史舟⁵, 王秋兵⁶, 刘宝元⁷, 张兴昌⁸, 史志华⁹,
杨金玲¹, 刘峰¹, 宋效东¹, 吴华勇¹, 曾荣¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 4. 美国威斯康星大学麦迪逊分校地理系, 美国 麦迪逊 WI 53706; 5. 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; 6. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 7. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 8. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 9. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:作为土壤学和地理学学科的分支,土壤地理学是地球表层系统科学的重要组成部分,其核心研究内容是土壤的时空变化。土壤地理学研究对象从传统的土体向地球表层系统视角下的关键带转变,研究方法上全面走向数字化。本文综述了近20年来土壤地理学分支学科包括土壤发生、土壤形态、土壤分类、土壤调查与数字土壤制图等领域的研究进展,指出其发展趋势为:基础理论研究不断拓展、调查技术正经历变革、时空演变从过程观测走向模拟,同时探讨了土壤地理学的未来发展契机与面临的挑战。

关键词:土壤发生;土壤分类;土壤形态;土壤调查;土壤制图;土壤地理;进展与展望

1 引言

土壤地理学主要研究土壤与地理环境间的相关关系,涉及到土壤学、地理学、地球化学、生态学和环境科学等诸多学科(张甘霖等, 2008),研究对象包含了自然地理学涉及到的土壤圈。土壤的时空分布是土壤形成、演化、发展的综合体现,是成土因素长期综合作用的结果。传统土壤地理学研究涵盖了土壤的发生和演变、土壤分类、土壤调查、土壤分布、土壤区划和土壤资源评价等方向。随着相关学科与现代测量分析技术的快速发展,土壤地理学的研究呈现新的发展态势,从回答“土壤是什么?为什么如此?如何演变?”(张甘霖等, 2008),发展至回答“土壤如何量化描述、分类、预测、演化?”等问题。

中国土壤地理研究的重要发展阶段包括:①以

综合考察为主的区域土壤调查阶段(1950-1978年);②服务全国第二次土壤普查和学科恢复阶段(1978-2000年);③新思想和新技术引导下的学科全面发展阶段(2000年至今)(张甘霖等, 2008)。近20年来,随着调查方法和技术的发展,土壤地理学也得到了跨越式发展(Hartemink et al, 2008),其研究对象与内容有了更深的拓展。现代土壤地理学不仅关注土壤发生演变、系统分类、空间变异等基础理论问题的探讨,也更加关注土壤资源数据库的建立与集成、土壤质量的监测调控与数字化管理等实践主题(Grunwald, 2009; 龚子同等, 2014)。土壤圈在地球表层系统科学、环境保护及应对全球环境变化等问题方面的重要性已得到不同学科和社会的广泛认可。例如,联合国粮农组织2015年提出的17个可持续发展目标中至少有7项主题与土壤地理学密切相关:零饥饿、健康、清洁饮水、可持续城市、气候行

收稿日期:2018-01-15;修订日期:2018-01-20。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026, 41571130051);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02);科技基础性工作专项项目(2014FY110200) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. L1624026, No.41571130051; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02; Basic Project of State Commission of Science Technology of China, No.2014FY110200]。

通讯作者:张甘霖(1966-),男,湖北通山人,研究员,主要从事土壤发生、分类和土壤制图研究, E-mail: glzhang@issas.ac.cn。

引用格式:张甘霖, 朱阿兴, 史舟, 等. 2018. 土壤地理学的进展与展望[J]. 地理科学进展, 37(1): 57-65. [Zhang G L, Zhu A X, Shi Z, et al. 2018. Progress and future prospect of soil geography[J]. Progress in Geography, 37(1): 57-65.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.007

动、水下生物与陆地生物。土壤圈对其他圈层具有重要的交互作用、界面过程及反馈影响(赵其国, 2003), 这与国际上地球表层系统科学的研究热点——关键带在多要素、多过程、多尺度相互作用的研究实质上具有相似性(朱永官等, 2015)。有鉴于此, 本文对近20年来现代土壤地理学在土壤发生、土壤形态、土壤分类、土壤调查与数字土壤制图等方面取得的显著进展进行系统地回顾与展望。

2 土壤发生

随着学科之间的交叉、新的研究方法和手段的运用以及认识水平的提高, 现代土壤发生逐渐从自然因素发展到包括人为因素的影响研究, 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, 从观测到模型模拟, 从以土壤为主体走向以土壤为中心的地球表层系统、乃至水—土—气—生—岩交互作用的关键带研究。土壤发生的主要研究热点包括:

(1) 实验室模拟方法。土壤形成是一个长期而缓慢的过程, 短时间内很难观察到土壤本身的变化。为在短时间内观察到土壤的发生过程, 了解土壤发生过程的机理和速率, 发展了一系列的室内模拟实验, 采用加温、加压、高酸度或高碱度等控制条件, 加快矿物的风化和土壤演变的进程, 这在一定程度上促进了土壤发生学的研究。但是实验室模拟与实际差别很大, 如实验室测定的矿物风化速率可比田间测定的大几个数量级(Swoboda-Colberg et al, 1993), 不能很好地应用到田间。实验室土柱模拟也是经常采用的方法, 包括田间条件下的排水采集器研究, 可在一定程度上兼顾纯粹实验室模拟与田间条件的优点, 因而应用很广。

(2) 土壤时间序列研究。时间序列研究针对的是较长时间尺度(千年到百万年尺度)的土壤发生和演变, 通常依据土壤发育的相对年龄研究土壤中元素的迁移与变化, 将土壤剖面对比与速率联系起来。近年的研究成果包括在我国热带地区利用时间序列明确了黏粒矿物的演化特征特别是某些黏土矿物重生现象(He et al, 2008), 利用水稻土系列明确了水稻土演化规律, 特别是人为活动对土壤演变方向和速率的影响(Chen et al, 2011)。因此, 土壤时间序列方法是理解不同土壤过程作用的时间尺度的重要手段, 在定量化研究土壤发生过程中能起到

重要的作用(Brantley, 2008; Chen et al, 2011; Li, Zhang et al, 2013)。

(3) 以土壤为核心的流域元素生物地球化学循环研究。土壤不是孤立的自然体, 流域是研究元素循环和物质迁移的基本单元(Likens et al, 1995)。基于流域内岩石、土壤、干湿沉降、径流和植物的长期动态观测, 通过物质输入、损失、迁移和转化, 可研究土壤形成速率、影响因素及其演变趋势(Huang et al, 2013)。利用风化计量关系, 结合野外流域元素质量平衡, 可估算土壤的酸化速率(Yang et al, 2013)。因此, 流域方法不但可研究现代环境条件下土壤当前的发生演变速率, 还可将土壤的形成和演变与生态系统变化过程紧密联系起来。

(4) 研究对象和目标的转变。现代土壤发生研究对象正在向地球关键带研究转变。土壤是关键带的核心, 土壤发生过程也是关键带演变的重要组成部分。关键带元素生物地球化学循环是土壤形成和演变的驱动力, 一些重要的土壤发生过程如侵蚀—沉积、径流—入渗、沉降—挥发、吸收—归还、淋洗—毛管上升、转化—耦合、溶解—沉淀、风化—合成、同化—降解是研究关键带演化的核心(Jin et al, 2010; Zuo et al, 2016)。在关键带研究中, 可采用多学科手段, 从多尺度、多界面、多过程、多要素综合研究土壤演变的过程、速率、机理和驱动。近10年来开展的典型小流域矿物风化和土壤形成(Huang et al, 2013)、土壤酸化(Yang et al, 2013)、硅迁移(Yang et al, 2018)以及酸雨和植物的驱动(Zuo et al, 2016)研究是我国关键带研究的起步。国际上已发起并建立了60多个关键带观测站(Banwart et al, 2013), 涵盖了基于传感器技术的微观尺度监测与基于遥感技术的区域尺度监测。关键带科学研究的热点包括关键带结构、物质迁移转化、服务功能与建立系统模型, 以期描述地球表层系统中水文过程、生物地球化学过程与生态过程的耦合关系(杨建锋等, 2014; 安培浚等, 2016)。关键带研究代表了地球表层系统科学研究的国际前沿, 同时也是土壤发生融入现代地球表层系统科学的重要契机(Clair et al, 2015; Arvin et al, 2017; Riebe et al, 2017)。

3 土壤形态

土壤形态是认识土壤形成和演化历史的关键,

也是土壤发生的基础,是土壤发生发展历史的集中反映。尽管随着科技的发展,无须借助传统土壤剖面直接观测的土壤调查手段相继出现,但土壤剖面(soil profile)调查仍然是研究土壤最直观和详实的有效手段(Hartemink et al, 2016)。由于土壤发生层整合了土壤发生性质和土壤形成过程信息,因此土壤发生层划分和形态描述决定了土壤剖面描述的准确性和客观性。土壤形态特征是划分土壤发生层的主要依据,也是野外土壤描述的主要内容(Soil Survey Division Staff, 1993)。土壤形态是土壤调查的基础,结合土壤理化性质、矿物性质、微形态特征等,能帮助人们认识、理解土壤发生过程,科学划分土壤类型。

为便于同一或不同地域间研究成果的交流,标准的剖面描述规范显得尤为重要。随着对土壤认识的不断深入,剖面描述规范也相继得到了更新完善,例如Munsell比色卡、《土壤调查手册》(Soil Survey Division Staff, 1993; FAO, 2006),使得土壤剖面描述结果从技术规范上能越来越接近土壤的真实面貌。

传统的土壤形态调查存在诸多问题:①信息采集设备简陋,方法手段落后,形态特征获取困难,劳动强度大,成本高昂;②样品带回实验室分析后,只能分析获取到每层土壤样品性质的平均值,不能揭示土壤空间(水平方向和垂直方向)的变异,很少体现土壤属性在剖面的连续性分布;③一些土壤形态描述为定性的,没有定量表达,描述结果受描述者个人经验所限制。由于上述问题的存在,使土壤调查结果的适用性和实用性受到了限制,过去已经获取的大量土壤形态描述资料未能发挥应有的作用,造成极大的资源浪费。

自2003年以来,全波谱包括从长波到短波电磁感应中的X射线、 γ 辐射测量开始在土壤制图领域得到了较好的应用(McBratney et al, 2003)。此后,电传感器、电磁传感器、光学传感器、声学传感器、电气化学传感器及其他地球物理测量工具等普遍应用于农业和环境土壤学研究领域(Viscarra Rosel et al, 2010)。与此同时,计量土壤学也在国际上得到迅速发展,为数字化土壤形态计量学(Digital soil morphometrics, 简称为DSMorph)的形成和发展奠定了坚实的基础。2014年, Hartemink 和 Minasny 首先提出 DSMorph 的概念。他们认为, DSMorph 是通过不同的工具和技术手段,定量获取土壤剖面

属性、剖面属性图及其深度函数(Hartemink et al, 2014)。DSMorph 自问世以来,得到众多土壤学家的高度关注,其快速传播与发展,为土壤调查与制图提供了新产品,为土壤地理学提供了一种新工具,给土壤分类带来一场新革命(Demattê, 2016; Hempel et al, 2016)。

国际土壤联合会(IUSS)2014年设立了DSMorph工作组,并于次年6月在美国威斯康星大学举行了第一次DSMorph国际专题研讨会。此次专题研讨会的成功举办促进了DSMorph体系的进一步完善和这一新兴领域的蓬勃发展。2016年《Digital Soil Morphometrics》一书的面世,表明DSMorph体系已趋于成熟。之后又有多篇论文问世,将DSMorph应用于不同的领域(Wang et al, 2017)。

与传统土壤剖面形态描述相比,DSMorph能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定量反映土壤时空变异。DSMorph主要包括4个方面内容(Jones et al, 2016):①实现土壤形态属性信息数字化;②实现土体空间变异辨别(捕获)信息数字化;③集成与整合土壤形态信息,进行多变量统计分析;④与土壤深度函数等土壤经典模型集成,解译土壤形态信息,并应用于不同尺度、不同专业领域。

4 土壤分类

土壤分类体系构筑了关于土壤的系统知识,在一定程度上厘清了土壤之间在属性和空间上的距离关系,是土壤调查制图、资源评价、农业精准化管理及学术交流的基础和依据(龚子同等, 2007)。土壤分类体系伴随土壤知识的更新、土壤信息技术的发展也在不断更新、发展。中国土壤系统分类的建立,标志着土壤分类从定性(马伯特分类、发生分类)向定量(系统分类)的跨越(龚子同等, 2014)。现有的系统分类还属于“半量化”体系,以土壤形态为主导并结合部分土壤理化属性。在土壤信息全面数字化的浪潮中,土壤分类发展呈现如下特点:

(1) 从高级单元走向基层分类(土族、土系化),构建与土壤综合功能密切相关的土壤基层单元分类标准。目前,传统土壤分类已基本发展成熟,虽然各个分类体系之间仍然存在一定的分歧,以诊断层和诊断特性为基础的定量土壤分类已经是普遍共识。中国土壤系统分类建立了高级单元(土纲、

亚纲、土类、亚类)的分类标准和检索,但基层分类(土族、土系)体系还在持续建立与完善中(张甘霖等, 2013)。基层分类单元能更精准地解译土壤类型,与土壤综合功能密切相关,在应用上直接联系生产实际,可为农业生产、土地评价、土地利用规划、生态环境建设等提供重要的基础数据(张甘霖等, 2013)。历经10年多的中国土系调查,目前已建立了近5000个典型土系,完成了我国第一部基于定量标准和统一分类原则的《土系志》,朝着系统建立基于定量标准的基层分类体系迈出了重要的一步。土壤分类从高级分类走向基层分类,是对土壤变异精细认识的体现。

(2) 从传统分类走向数值土壤分类,实现土壤分类的定量化、数字化、信息化。伴随土壤信息获取技术的革新,土壤分类的体系与内涵也在不断发展。星地遥感技术的蓬勃发展实现了土壤信息的快速获取。传统的土壤分类体系是基于“有限的”数据样点和专家经验知识凝练而成,而在土壤信息的“大数据”时代,未来的土壤分类可藉由“数据”驱动完成。通过数据挖掘、分类距离、机器学习等,可实现土壤分类的数值化。数值土壤分类最早起源于20世纪60年代(Hole et al, 1960),基于有限的土壤理化属性及形态特征(转化为0/1值),其发展又伴随土壤信息的全面数字化而重新受到关注。相比于传统分类,数值土壤分类的优势在于可以最大限度地消除分类中的主观或人为因素,尽量客观地呈现土壤类型在时空中的差异。此外,数值分类还可实现分类的“多项选择(Multiple Allocation)”,解决现有体系中“每一种土壤在分类体系中仅有一个位置”的问题。全球的土壤学家致力于建立一个统一的土壤分类系统,而这一系统的核心思想即基于数值土壤分类。在全球统一的分类系统建立之前,数值土壤分类可以辅助评估现有的分类体系,也可为不同分类系统间的参比提供基准及参考信息(Hughes et al, 2017)。在数值分类体系中,土壤光谱是很好的分类指标。土壤光谱获取快速、便捷,是诸多土壤属性指标的综合反映(Viscarra Rossel et al, 2006)。基于光谱技术的优势,可辅助解决传统土壤分类调查所遭遇的难题(数据获取及分析成本高),而基于光谱差异所建立的数值土壤分类可为分类研究提供新的思路和维度。

(3) 从传统分类走向功能分类,建立面向土壤功能和服务生产实践的分类体系(Carré et al,

2007)。土壤分类的实质和理论基础,是区分地球表面三维土壤覆被这一连续体发生重要变化的边界,并试图将这种变化与土壤的功能相联系。无论是古代朴素分类体系所使用的颜色或土壤质地,还是现代分类采用的理化属性或光谱,都携带或者代表了土壤的某种潜在功能信息。土壤分类发展应更加直接、显性、深入地表达土壤的功能属性,土壤分类发展应致力于服务生产实践,为使用者提供土壤功能指标,如土壤肥力、固碳能力、抗侵蚀能力、土壤荷载等。

5 土壤调查

土壤调查是土壤属性特征和时空演变信息获取的第一步。传统意义上的土壤调查是在土壤地理学的理论指导下,对土壤剖面形态及其周围地理环境进行观察与描述记载,通过理化性质分析、分类与评价,对土壤的发生演变、分类、分布和功能进行对比分析。

传统土壤信息的获取具有周期长、成本高、过程复杂、复杂区域不可达、现势性差等显著缺点,难以进行大范围、高覆盖度的重复调查(Hartemink et al, 2008)。卫星与航空遥感、近地传感在内的星地遥感技术的蓬勃发展为土壤调查提供了新机遇,从20世纪末至今土壤遥感与近地传感的研究论文数量的与日俱增就是最好的体现。按照平台设计机制,土壤星地遥感技术可以大致分为卫星、航空、无人机和地面4种,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。卫星遥感获取的信息从亚米级的高分辨率到大于1000 m的低分辨率,能较好地满足不同应用的需求(Mulder et al, 2011)。按照工作原理,土壤星地遥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。地面传感包括了上述4类方式,其中卫星和航空遥感搭载的传感器主要是基于光学与辐射型。

土壤光谱探测技术研究热点集中在数据预处理与预测模型方面,土壤光谱预测模型方法主要包括各类线性模型与非线性模型,如支持向量机、随机森林、人工神经网络等。由于土壤波谱特性和预测模型的较大差异,建立全球、国家、区域尺度的波谱数据库是系统集成土壤预测能力的有效解决方案(Brown et al, 2006)。自20世纪60年代起,研究者基于vis-NIR光谱较为成功反演了一系列的土壤

理化属性(Viscarra Rossel et al, 2006)。近年来,结合野外原位测量光谱和其他传感器进行空间变异制图的研究越来越广泛(Muñoz et al, 2011)。土壤光学遥感探测通过大尺度的环境信息提取与光谱信息的反演,已广泛应用于土壤类型制图、土壤属性预测与土壤退化监测(Miller et al, 2015)。土壤信息多源获取集成平台的研发是研究热点之一,如澳大利亚 CSIRO 集成了 EM、vis-NIR、 γ 射线等多传感器(Viscarra Rossel et al, 2017)、美国 Veris 公司集成了 pH 电化学测试仪、vis-NIR 和 EC 传感器等。

基于土壤介电特性与水分的耦合关系,土壤微波遥感主要用于监测土壤水分、土壤盐分及干旱度。土壤微波遥感分为主动获取与被动获取两种方式。被动微波遥感能更好地反映土壤水分状况,空间分辨率较低(Moran et al, 2004),不受云层、天气等条件的限制。反之,主动微波遥感具有高空间分辨率的特征,但对地表起伏和植被响应较为敏感(Petropoulos et al, 2015)。因此,主动遥感与被动遥感的融合、微波遥感与光谱遥感的结合已逐渐成为微波遥感的重要研究主题(Shi et al, 2014)。探地雷达是地球物理科学中的核心技术手段之一,在土壤地理学研究中能有效地反演土壤质地、土壤水分等重要信息(Huisman et al, 2003),正逐渐广泛应用于地球表层系统科学中土壤剖面特征结构的探测。

早期电磁感应仪主要是对土壤水分及盐分的二维反演制图。土壤表层盐分信息尚不能满足盐碱地改良的需求,而基于电磁感应仪的土壤盐分三维制图分析为此提供了新的技术手段(Li, Shi et al, 2013),例如基于 EM38 对坡面土壤盐分的制图分析(Huang et al, 2015)。近年来,激光等离子体光谱(LIBS)和 X 射线荧光光谱传感器(XRF)在土壤重金属含量的探测方面已取得显著进展(Santos et al, 2009)。可以说,基于不同平台和频率的电磁感应探测已成为现代土壤调查和土壤信息获取的重要手段,相关研究势必成为今后该领域研究的主流。

6 数字土壤制图

对精细准确土壤信息的需求推动了数字土壤制图(亦即预测性土壤制图)的兴起,其特点是以土壤与景观定量模型为基础、以栅格数据作为表达方式在计算环境下机器辅助成图。20 世纪 90 年代初开始萌芽,当时主要运用线性回归和判别分析等建

立土壤与环境关系并绘制土壤类型或属性分布(Moore et al, 1993)。数字土壤制图发展中有 3 个重要里程碑:①2004 年在法国蒙彼利埃市召开的数字土壤制图国际研讨会;②2005 年 IUSS 设立数字土壤制图工作组,决定以 2004 年为起点,每隔 2 年举行 1 次全球性研讨会;③2009 年在美国哥伦比亚大学正式启动了“全球数字土壤制图计划”(Sanchez et al, 2009)(GlobalSoilMap.net)。数字土壤制图的理论范式仍是成土因素学说,在此基础上 McBratney 等(2003)提出了面向数字土壤制图更具操作性的 SCORPAN 范式,Grunwald 等(2011)提出了显式考虑人类活动的 STEP-AWBH 概念方程。

数字土壤制图进展包括土壤数据获取、成土环境表征与模型算法等 3 个主要方面。历史土壤图可作为协同变量或土壤环境关系规则的载体参与制图(Yang et al, 2011; Adhikari et al, 2014),历史土壤样点缺少精确地理参考,不符合任何统计标准,限制了地统计方法的使用(Liu et al, 2016)。土壤采样是获取样本数据的重要途径,可分为基于设计和基于模型的 2 类采样方法(De Gruijter et al, 2006)。对于制图验证目的,宜选用基于设计的方法;而对模型训练,发展了多种方法,如地统计、条件拉丁立方、基于聚类的目的性采样等(Minasny et al, 2006)。上述方法都不同程度地存在野外可操作性问题(McBratney et al, 2003),未来仍需开发更为灵活有效的采样方法。最新的研究动态包括基于空间推测不确定性的补样方法和考虑可达性或采样成本的采样方法,有学者提出兼顾属性域和空间域的补样方案(Li et al, 2016)、在拉丁超立方采样中加入可达性限制或成本限制(Yin et al, 2016)。

环境协同变量是土壤制图的重要支撑,与气候、地形、植被和人为活动因素相比,母质信息相对难以获取,多用地质岩性与地貌单元替代,母质类型空间分布制图是一个重要研究问题。最新研发的环境协同变量包括:地表动态反馈信息、模糊坡度、人类活动因子等。平缓地区土壤制图是一个难题,Liu 等(2012)提出了基于地表动态反馈,利用时间序列遥感观测开发环境协同变量进行土壤制图的思路和方法,已在国内外多个研究区得到成功的应用与验证(Zhao et al, 2014),近几年得到了较大的推进和发展(Guo et al, 2016; Zeng et al, 2017)。

数字土壤制图的模型方法主要有统计、空间统计、专家知识和机器学习方法等。空间统计中以回

归克里格和地理加权回归(Song et al, 2016)最为常用,近年的发展有面点克里格(Kerry et al, 2012)等;基于专家知识的方法有 SoLIM(soil-land inference model)(Zhu et al, 1996)等;机器学习方法包括神经网络、支持向量机和随机森林等(Yang et al, 2016)。目前地统计方法仍占主导地位,但机器学习开始崛起,在揭示土壤空间变异方面已显示出较大潜力。三维数字土壤制图可完整地揭示土壤分布模式,近10年来也有了较大进展(Malone et al, 2009; Liu et al, 2013; Yang et al, 2017)。

数字土壤制图未来发展主要有以下趋势(Zhang et al, 2017):①从小面积实验区走向区域、国家和全球以及实现多尺度制图,以关键属性为目标的高精度土壤图必将成为土壤资源管理的依据;②从简单景观走向复杂景观及人为作用强烈地区,攻克高度变异环境下土壤空间变化模拟的难点;③从仅关注表层的二维走向整个土体甚至风化层的三维制图,完整描述地球表层的变异,向“透明土壤”迈进;④从地统计为主导走向机器学习为主导模型,同时发生学知识与机器学习算法结合将更加深入;⑤从单源数据走向多源土壤数据和多平台传感数据的集成利用;⑥从农业生产管理应用走向生态系统服务和关键带过程研究等领域(Zhang et al, 2017)。

7 土壤地理学的未来发展

基于土壤地理学目前的发展动态与研究热点,未来发展趋势与核心问题主要有以下几点:

(1) 理论研究的拓展。全球环境变化和人为活动强烈条件下对土壤发生研究提出了新的挑战,土壤发生研究从以土壤为主体走向以土壤为中心的地球表层系统。未来的土壤发生研究将采用传统方法与先进的实验和同位素方法,结合动态和静态研究,以微观和宏观结合的定量化手段研究成土过程,将重点围绕变化的自然条件和强烈的人为干扰条件下土壤演变机理与速率。土壤发生过程模拟研究和模型的建立,有望为土壤资源的可持续利用奠定基础。

(2) 调查技术的革新。土壤信息获取技术将是全球生物地球化学、关键带科学研究中不可或缺的重要组成部分。因此,各种新型土壤传感器平台的构建与综合,不仅能拓展土壤理化性质与水土过程

的长期监测,也能实时监测大范围易获取、易变土壤属性信息及相关环境信息。卫星与航空遥感、近地传感在内的星地遥感技术的快速发展,将提供实时/准实时全球尺度的土壤地球化学组分网格数据,为长期的全球气候变化和环境监测服务。基于全球尺度的多源土壤星地遥感数据融合,有望为土壤地理学大数据分析提供契机。

(3) 时空演变过程的模型与模拟。以土壤空间分布规律为核心的传统土壤地理学正逐步从定性描述走向数字化土壤形态、数字土壤制图和计量土壤学。随着多源、多平台传感器的发展以及土壤地理信息系统技术的不断进步,数字土壤制图可预测区域、国家、全球尺度上的土壤理化属性空间分布特征。未来数字土壤制图的发展需要研究对环境要素进行刻画的新技术——特别是体现人类活动方面的环境因子、历史数据与新型数据无缝集成的新分析方法、土壤发生知识与数学模型紧密结合的新推理方法及大数据多终端的计算模式。

参考文献(References)

- 安培浚, 张志强, 王立伟. 2016. 地球关键带的研究进展[J]. 地球科学进展, 31(12): 1228-1234. [An P J, Zhang Z Q, Wang L W. 2016. Review of Earth critical zone research [J]. *Advances in Earth Science*, 31(12): 1228-1234.]
- 龚子同, 黄荣金, 张甘霖. 2014. 中国土壤地理[M]. 北京: 科学出版社. [Gong Z T, Huang R J, Zhang G L. 2014. *Chinese soil geography*[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 2007. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社. [Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. 2007. *Pedogenesis and soil taxonomy*[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 杨建锋, 张翠光. 2014. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. 水文地质工程地质, 41(3): 98-104. [Yang J F, Zhang C G. 2014. Earth's critical zone: A holistic framework for geo-environmental researches[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(3): 98-104.]
- 张甘霖, 史学正, 龚子同. 2008. 中国土壤地理学发展的回顾与展望[J]. 土壤学报, 45(5): 792-801. [Zhang G L, Shi X Z, Gong Z T. 2008. Retrospect and prospect of soil geography in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 45(5): 792-801.]
- 张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 2013. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. 土壤学报, 50(4): 826-834. [Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. 2013. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese Soil Taxonomy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 50(4): 826-834.]
- 赵其国. 2003. 发展与创新现代土壤科学[J]. 土壤学报, 40

- (3): 321-327. [Zhao Q G. 2003. Development and innovation of modern soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 40 (3): 321-327.]
- 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 2015. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 70(12): 1859-1869. [Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. 2015. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(12): 1859-1869.]
- Adhikari K, Hartemink A E, Minasny B, et al. 2014. Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark[J]. *PLoS One*, 9(8): e105519.
- Arvin L J, Riebe C S, Aciego S M, et al. 2017. Global patterns of dust and bedrock nutrient supply to montane ecosystems [J]. *Science Advances*, 3(12): eaao1588.
- Banwart S, Chorover J, Gaillardet J, et al. 2013. Sustaining Earth's critical zone basic science and interdisciplinary solutions for global challenges[M]. Sheffield, UK: University of Sheffield.
- Brantley S L. 2008. Understanding soil time[J]. *Science*, 321: 1454-1455.
- Brown D J, Shepherd K D, Walsh M G, et al. 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Geoderma*, 132(3-4): 273-290.
- Carré F, McBratney A B, Mayr T, et al. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM[J]. *Geoderma*, 142(1-2): 69-79.
- Chen L M, Zhang G L, Effland W R. 2011. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 75(5): 1807-1820.
- Clair J S, Moon S, Holbrook W S, et al. 2015. Geophysical imaging reveals topographic stress control of bedrock weathering[J]. *Science*, 350: 534-538.
- De Gruijter J, Brus D J, Bierkens M F P, et al. 2006. Sampling for natural resource monitoring[M]. New York: Springer.
- Demattê J A M. 2016. From profile morphometrics to digital soil mapping[M]//Hartemink A E, Minasny B. *Digital soil morphometrics*. Cham, Switzerland: Springer: 383-400.
- FAO. 2006. Guidelines for soil profile descriptions[R]. Rome, Italy: FAO.
- Grunwald S J A. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches[J]. *Geoderma*, 152(3-4): 195-207.
- Grunwald S J A, Thompson J A, Boettinger J L. 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4): 1201-1213.
- Guo S X, Zhu A X, Meng L K, et al. 2016. Unification of soil feedback patterns under different evaporation conditions to improve soil differentiation over flat area[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49: 126-137.
- Hartemink A E, McBratney A. 2008. A soil science renaissance [J]. *Geoderma*, 148(2): 123-129.
- Hartemink A E, Minasny B. 2014. Towards digital soil morphometrics[J]. *Geoderma*, 230-231: 305-317.
- Hartemink A E, Minasny B. 2016. *Developments in digital soil morphometrics*[M]//Hartemink A E, Minasny B. *Digital soil morphometrics*. Cham, Switzerland: Springer: 425-433.
- He Y, Li D C, Velde B, et al. 2008. Clay minerals in a soil chronosequence derived from basalt on Hainan Island, China and its implication for pedogenesis[J]. *Geoderma*, 148 (2): 206-212.
- Hempel J, Hoover D, Long R, et al. 2016. The next generation of soil survey digital products[M]//Hartemink A E, Minasny B. *Digital soil morphometrics*. Cham, Switzerland: Springer: 353-363.
- Hole F D, Hironaka M. 1960. An experiment in ordination of some soil profiles[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 24(4): 309-312.
- Huang J, Taghizadeh-Mehrjardi R, Minasny B, et al. 2015. Modeling soil salinity along a hillslope in Iran by inversion of EM38 data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4): 1142-1153.
- Huang L M, Zhang G L, Yang J L. 2013. Weathering and soil formation rates based on geochemical mass balances in a small forested watershed under acid precipitation in subtropical China[J]. *Catena*, 105: 11-20.
- Hughes P, McBratney A B, Huang J Y, et al. 2017. Comparisons between USDA Soil Taxonomy and the Australian Soil Classification System I: Data harmonization, calculation of taxonomic distance and inter-taxa variation[J]. *Geoderma*, 307: 198-209.
- Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. 2003. Measuring soil water content with ground penetrating radar[J]. *Vadose Zone Journal*, 2(4): 476-491.
- Jin L, Ravella R, Ketchum B, et al. 2010. Mineral weathering and elemental transport during hillslope evolution at the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(13): 3669-3691.
- Jones E J, McBratney A B. 2016. What is digital soil morphometrics and where might it be going[M]//Hartemink A E, Minasny B. *Digital soil morphometrics*. Cham, Switzerland: Springer: 1-15.
- Kerry R, Goovaerts P, Rawlins B G, et al. 2012. Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for map-

- ping soil organic carbon at the regional scale[J]. *Geoderma*, 170: 347-358.
- Li H Y, Shi Z, Webster R, et al. 2013. Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil[J]. *Geoderma*, 195-196: 31-41.
- Li J W, Zhang G L, Gong Z T. 2013. Nd isotope evidence for dust accretion to a soil chronosequence in Hainan Island [J]. *Catena*, 101: 24-30.
- Li Y, Zhu A X, Shi Z, et al. 2016. Supplemental sampling for digital soil mapping based on prediction uncertainty from both the feature domain and the spatial domain[J]. *Geoderma*, 284: 73-84.
- Likens G E, Bormann F H. 1995. Biogeochemistry of a forested ecosystem[M]. New York: Springer.
- Liu F, Geng X Y, Zhu A X, et al. 2012. Soil texture mapping over low relief areas using land surface feedback dynamic patterns extracted from MODIS[J]. *Geoderma*, 171-172: 44-52.
- Liu F, Geng X Y, Zhu A X, et al. 2016. Soil polygon disaggregation through similarity-based prediction with legacy pedons[J]. *Journal of Arid Land*, 8(5): 760-772.
- Liu F, Zhang G L, Sun Y J, et al. 2013. Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a subtropical hilly landscape[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 77(4): 1241-1253.
- Malone B P, McBratney A B, Minasny B, et al. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity[J]. *Geoderma*, 154(1-2): 138-152.
- McBratney A B, Mendonça Santos M L, et al. 2003. On digital soil mapping[J]. *Geoderma*, 117(1-2): 3-52.
- Miller B A, Koszinski S, Wehrhan M, et al. 2015. Impact of multi-scale predictor selection for modeling soil properties [J]. *Geoderma*, 239-240: 97-106.
- Minasny B, McBratney A B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information[J]. *Computers & Geosciences*, 32(9): 1378-1388.
- Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, et al. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 57(2): 443-452.
- Moran M S, Peters-Lidard C D, Watts J M, et al. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(5): 805-826.
- Mulder V L, de Bruin S, Schaepman M E, et al. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping: A review[J]. *Geoderma*, 162(1-2): 1-19.
- Muñoz J D, Kravchenko A. 2011. Soil carbon mapping using on-the-go near infrared spectroscopy, topography and aerial photographs[J]. *Geoderma*, 166(1): 102-110.
- Petropoulos G P, Ireland G, Barrett B. 2015. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84: 36-56.
- Riebe C S, Hahn W J, Brantley S L. 2017. Controls on deep critical zone architecture: A historical review and four testable hypotheses[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1): 128-156.
- Sanchez P A, Ahamed S, Carré F, et al. 2009. Digital soil map of the world[J]. *Science*, 325: 680-681.
- Santos D Jr, Nunes L C, Trevizan L C, et al. 2009. Evaluation of laser induced breakdown spectroscopy for cadmium determination in soils[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 64(10): 1073-1078.
- Shi J C, Guo P, Zhao T J, et al. 2014. Soil Moisture downscaling algorithm for combining radar and radiometer observations for SMAP mission[C]//Proceedings of 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Beijing, China: IEEE, doi: 10.1109/URSI-GASS.2014.6929704.
- Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual[M]. Washington, DC: United States Department of Agriculture.
- Song X D, Brus D J, Liu F, et al. 2016. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: A case study in the Heihe River Basin, China[J]. *Geoderma*, 261: 11-22.
- Swoboda-Colberg N G, Drever J I. 1993. Mineral dissolution rates in plot-scale field and laboratory experiments[J]. *Chemical Geology*, 105(1-3): 51-69.
- Viscarra Rossel R A, Behrens T. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra[J]. *Geoderma*, 158(1-2): 46-54.
- Viscarra Rossel R A, Lobsey C R, Sharman C, et al. 2017. Novel proximal sensing for monitoring soil organic C stocks and condition[J]. *Environmental Science & Technology*, 51(10): 5630-5641.
- Viscarra Rossel R A, Walvoort D J J, McBratney A B, et al. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties[J]. *Geoderma*, 131(1-2): 59-75.
- Wang Q B, Hartemink A E, Jiang Z D, et al. 2017. Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China[J]. *Geoderma*, 301: 11-18.
- Yang J L, Zhang G L. 2018. Silicon cycling by plant and its effects on soil Si translocation in a typical subtropical area [J]. *Geoderma*, 310: 89-98.

- Yang J L, Zhang G L, Huang L M, et al. 2013. Estimating soil acidification rate at watershed scale based on the stoichiometric relations between silicon and base cations[J]. *Chemical Geology*, 337-338: 30-37.
- Yang L, Jiao Y, Fahmy S, et al. 2011. Updating conventional soil maps through digital soil mapping[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 75(3): 1044-1053.
- Yang R M, Yang F, Yang F, et al. 2017. Pedogenic knowledge-aided modelling of soil inorganic carbon stocks in an alpine environment[J]. *Science of the Total Environment*, 599-600: 1445-1453.
- Yang R M, Zhang G L, Liu F, et al. 2016. Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem[J]. *Ecological Indicators*, 60: 870-878.
- Yin G F, Li A N, Zeng Y L, et al. 2016. A cost-constrained sampling strategy in support of LAI product validation in mountainous areas[J]. *Remote Sensing*, 8(9): 704.
- Zeng C Y, Zhu A X, Liu F, et al. 2017. 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*, 72: 297-309.
- Zhang G L, Liu F, Song X D. 2017. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: A review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(12): 2871-2885.
- Zhao M S, Rossiter D G, Li D C, et al. 2014. Mapping soil organic matter in low-relief areas based on land surface diurnal temperature difference and a vegetation index[J]. *Ecological Indicators*, 39: 120-133.
- Zhu A X, Band L E, Dutton B, et al. 1996. Automated soil inference under fuzzy logic[J]. *Ecological Modelling*, 90(2): 123-145.
- Zuo S M, Yang J L, Huang L M, et al. 2016. Assessment of plant-driven mineral weathering in an aggrading forested watershed in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 26(6): 817-828.

Progress and future prospect of soil geography

ZHANG Ganlin^{1,2}, ZHU A-Xing^{3,4}, SHI Zhou⁵, WANG Qiubing⁶, LIU Baoyuan⁷,
ZHANG Xingchang⁸, SHI Zhihua⁹, YANG Jinling¹, LIU Feng¹, SONG Xiaodong¹,
WU Huayong¹, ZENG Rong¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. Department of Geography, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA; 5. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 6. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 7. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 8. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi, China; 9. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil geography is the sub-discipline of soil science and geography dealing with the spatiotemporal changes of soil, and is a part of the earth surface system science. The research topic of soil geography is gradually changing from soil body to critical zone from the perspective of the earth surface system, meanwhile the research methodology develops toward "digital". Based on an introduction of the theoretical and technical backgrounds, this article reviewed the recent progress of soil geography including on soil genesis, soil morphology, soil classification, soil survey, and digital soil mapping. Future development of soil geography needs to expand the theoretical research, innovate the investigation technology, and simulate the spatiotemporal variations of soil. Furthermore, the main opportunities, trends, and challenges in the future were discussed.

Key words: soil genesis; soil classification; soil morphometric; soil survey; soil mapping; soil geography; progress and prospect