

# 数字土壤制图及其研究进展

孙孝林<sup>1,2</sup>, 赵玉国<sup>2</sup>, 刘 峰<sup>2</sup>, 王德彩<sup>2</sup>, 梁传平<sup>1</sup>

(1. 广西大学农学院, 南宁 530004; 2. 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)

**摘 要** 数字土壤制图经过近二十年的发展, 理论基础和技术体系已经相当成熟, 得到了土壤学界的普遍接受, 正广泛应用于各种层次的土壤调查与制图实践中, 制图成果也被应用于相关学科的研究和实践中。本文在大量数字土壤制图研究的基础上, 综述了数字土壤制图的理论基础、基本构成、当前研究的主要问题以及未来将面临的挑战和发展方向。数字土壤制图的理论基础可分为土壤学、地理学和数学三种, 此外还有土壤学与地理学、地理学与数学的相互结合。它的基本构成包括四个主要部分: 土壤协变量、土壤采样、土壤空间推理系统和制图验证。当前, 数字土壤制图研究的主要问题体现在六个方面: 土壤协变量的生产和处理、土壤数据收集、土壤空间推理系统、土壤制图结果的验证、土壤图的展示和制图结果的应用。未来, 随着数字土壤图的广泛应用, 它将面临的挑战主要是提高制图分辨率和扩大制图范围。同时, 随着数字土壤制图的日益成熟, 它将迈向一个更高的研究领域和更广阔的应用领域, 即数字土壤评价。这个新领域将再一次显著地提高土壤信息的服务功能和质量。

**关 键 词** 数字土壤制图; 研究进展; 数字土壤评价

中图分类号 S154 文献标识码: A 文章编号 0564-3945(2013)03-0752-08

上世纪 90 年代初, 逐渐兴起了以 3S(地理信息系统、全球定位系统和遥感)、模型模拟、环境信息为基础, 以优化土壤调查与制图技术、提高土壤信息服务质量为目的的土壤调查与制图研究<sup>[1-3]</sup>。经过近二十年的努力, 这类研究终于形成了有别于传统土壤调查与制图技术的现代化技术体系, 即数字土壤制图(digital soil mapping)<sup>[1]</sup>。

Lagacherie 和 McBratney(2007)将数字土壤制图定义为: “利用数学模型从土壤观测、土壤知识及相关环境变量中推测土壤类型、属性时空演变的土壤信息系统”<sup>[4]</sup>。其一般模式可简述为: (1)拟定制图对象(土壤类型或属性)、抉择制图分辨率和格网大小; (2)收集、整理、分析环境信息(包括专家知识); (3)根据研究目的和环境信息, 设计土壤采样方案; (4)野外采样及实验室分析, 获取土壤信息; (5)模拟土壤信息与环境信息之间的关系模型; (6)应用土壤-环境关系模型, 预测生成数字土壤图; (7)验证制图结果的准确性, 评价制图结果是否满足制图需要, 否则返回到(1)中, 降低制图要求或制图分辨率, 或返回到(3)中增加土壤采样来提高制图结果的质量(图 1)<sup>[1]</sup>。从数字土壤制图的一般模式中可以看到, 数字土壤制图是一种基于环境协变量(environmental covariate)的预测性方法, 因而又被称为预测性土壤制图<sup>[1,2]</sup>。与传统土壤制图相比, 数字土

壤制图具有诸多优点: 低成本、记载性强、易更新、高效率、客观一致性以及提供制图结果的可信度<sup>[1,4-6]</sup>。

目前, 数字土壤制图的理论基础和技术体系已受到了土壤学界的普遍接受<sup>[6-8]</sup>, 正广泛应用于各种层次的土壤调查和制图实践中<sup>[9-11]</sup>, 制图成果也被应用于相关学科的研究和实践中<sup>[6,12-13]</sup>。例如, 国际土壤科学联合会(International Union of Soil Science)成立了数字土壤制图工作组(Working Group on Digital Soil Mapping), 该工作组从 2004 年开始, 每两年举办一次全球数字土壤制图工作组会议(Global Workshop on Digital Soil Mapping), 至今已举办了五次。2009 年, “全球数字土壤制图”<sup>[14]</sup>计划(GlobalSoilMap.net)在美国正式启动, 旨在建立全球土壤重要属性的高分辨率数字土壤图。Carré 等(2007)以数字土壤制图为基础, 评价气候变化对土壤的影响<sup>[6]</sup>。李润奎等(2007)利用 SoLIM 模型生成的数字土壤图, 研究水文动态<sup>[12]</sup>。2012 年, “全球数字土壤制图”东亚节点在南京启动。可以看到, 数字土壤制图具有广阔的前景<sup>[6-8]</sup>, 在不久的将来, 将深刻影响土壤学的研究和应用。

对数字土壤制图的综述在国际上已不鲜见<sup>[2,3,7,13,15]</sup>, 但在国内, 仅有少数文章零散地论述了数字土壤制图<sup>[5,10,15-19]</sup>。另一方面, 尽管数字土壤制图已被广泛接受, 但仍有诸多方面的问题需要更多、更深入的研究<sup>[7,13]</sup>。更

收稿日期 2012-03-13, 修订日期 2012-10-12

基金项目 广西大学科研基金项目(XBZ111320)资助

作者简介 孙孝林(1980~), 男, 湖北荆州人, 博士, 讲师, 主要研究数字土壤制图、土壤资源评价、土壤信息系统。E-mail: sun\_xiaolin@yahoo.com

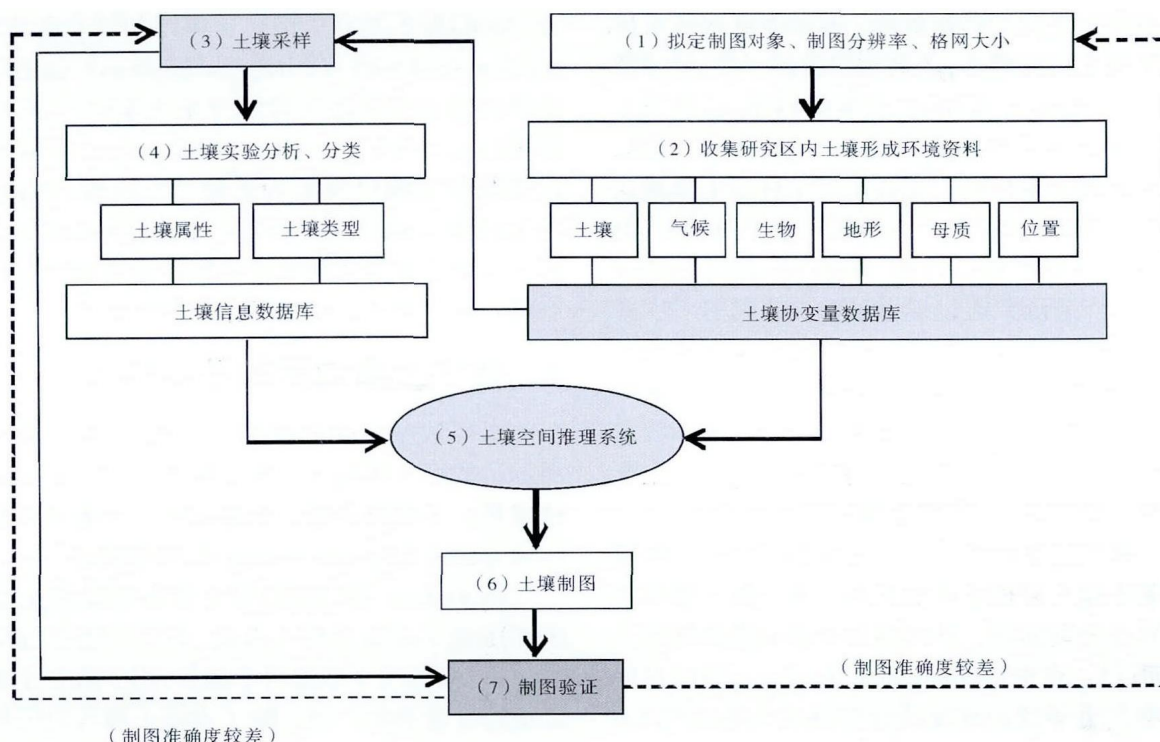


图1 数字土壤的基本构成

Fig. 1 Basic components of digital soil mapping

重要的是,数字土壤制图即将迈向下一个更新、更高、更广阔的领域——数字土壤评价(digital soil assessment)<sup>[6,13]</sup>。为了清楚地认识数字土壤制图,促进和推动我国数字土壤制图研究的发展,有必要对数字土壤制图的研究现状和未来发展进行综述。为此,本文首先介绍数字土壤制图的理论基础和基本组成,然后总结数字土壤制图当前正在研究的主要问题及未来将面临的挑战和发展方向。

## 1 数字土壤制图的理论基础

现代盛行的数字土壤制图建立在三种主要的理论基础之上。第一种以土壤学为理论基础,即土壤发生学理论,以 Jenny 的土壤形成数学公式为代表<sup>[1]</sup>。这种理论认为:土壤是气候(c 或 cl, climate)、生物(o rganisms)、地形(r, topography)、母质(p, parent material)和时间(a 或 t, age)综合作用的产物。因此,在一定的土壤形成环境下,必然产生与该环境相对应的土壤类型和属性<sup>[5,16]</sup>。此外,根据土壤学理论,土壤自身的性质很可能与其他土壤性质有着某种较强的联系,因而土壤信息(s, soil)本身也能指示土壤的其他性质<sup>[1]</sup>。通过对有限点的采样,建立环境因素(包括土壤)与土壤类型和属性之间的关系模型,例如线性回归、模糊推理、分类树等,进而应用该模型到研究区的环境因素数据库

中,预测制图该研究区的土壤类型和属性。由于这类研究都基于土壤与其所处环境之间的关系,因而这类制图方法又被称为“环境相关”(environmental correlation)和 CORPT(或 CLORPT)(即前述五大成土因素的英文首写)<sup>[20]</sup>。

第二种以地理学为理论基础,可称为地理方法或纯空间方法<sup>[1]</sup>。这种理论可归结为地理学第一定律的基本假设:空间上任何事物都与其他任何事物相关,但距离较近的事物之间比距离较远的事物之间更相关<sup>[21]</sup>。这个基本假设产生了多种空间内插方法,主要的两种为:反距离加权和地统计学中的克里格。反距离加权在早期的研究中应用较广<sup>[1]</sup>,但在后期的研究中逐渐被克里格所取代。克里格主要考虑土壤空间差异性的结构特征,以及与其它空间属性(例如容易测得的土壤属性、环境变量等)之间的相关性<sup>[22]</sup>,从而根据采样点与未采样点之间的相对位置,构建土壤属性的空间变异函数,据此来计算未采样点周围若干采样点对该点的“影响”权重,从而估算未采样点的属性值<sup>[22]</sup>。

第三种以数学为理论基础,主要有马尔科夫链(Markov chain)、贝叶斯(Bayesian)概率、函数理论<sup>[23-27]</sup>。马尔科夫链将土壤在空间上出现的现象视为马尔科夫链,通过对一定位置上的土壤进行采样和分析,再利用切普曼-柯尔莫哥洛夫(Chapman-Kolmogorov)方程,

计算出土壤类别之间的转移概率,从而推算出未采样点上出现某类土壤的概率,达到制图目的<sup>[25-26]</sup>。贝叶斯概率根据采样观测、专家知识、土壤资料等,计算出土壤属性或类型在未采样点上出现的概率及条件概率,结合已采集到的土壤信息,推算出未采样点上出现这些土壤属性或类型的概率<sup>[23,24]</sup>。函数理论使用较少,例如样条函数和高精度曲面模拟 (high accuracy surface modeling)<sup>[27]</sup>。样条函数通过拟合采样点之间的多项式函数,模拟出采样点之间的最优光滑曲面,从而预测制图土壤<sup>[21]</sup>。高精度曲面模拟以曲面理论为基础,以采样点数据为支撑,通过数学方法,求解复杂的几何函数方程组,最后用求解得到的方程组内插采样点上的土壤属性值到整个研究区上,实现土壤制图的目的<sup>[27]</sup>。

除这三种理论基础外,数字土壤制图出的一些模型还常常基于这三种理论中的几种,来分解土壤在空间上的变异并分别制图,从而更加准确地预测制图土壤。例如,回归-克里格 (regression-kriging)、协同克里格都以土壤发生学理论和地统计学理论为基础<sup>[20]</sup>。Liu

等(2006)提出的克里格与土壤图相结合的方法(kriging combined with soil map-delineation),也是以土壤发生学理论和空间地统计学理论为基础<sup>[28]</sup>。地统计随机模拟 (geostatistical stochastic simulation)以地统计学理论和数学中随机现象为基础<sup>[29-30]</sup>。Li 等(2010)创立的马尔科夫-地统计 (Markov chain geostatistics)以马尔科夫链理论和空间地统计学理论为基础<sup>[26]</sup>。目前,尚未有模型同时基于土壤学理论和数学理论。

2 数字土壤制图的基本构成

根据数字土壤制图的一般模式(第一部分),图 1 展示了数字土壤制图的基本构成。其中,最主要的基本构成是:土壤协变量、土壤采样、土壤空间推理系统 (soil spatial inference system)和制图验证。

McBratney 等(2003)对土壤协变量和土壤空间推理系统做了详细介绍<sup>[1]</sup>。因此,本文仅结合近年来的最新研究,概括性介绍这两个部分。用于数字土壤制图的土壤协变量非常广泛,除了表征土壤形成因素的环境

表 1 土壤协变量及其来源和在数字土壤制图研究中的应用频度  
Table 1 Soil covariates and their sources and frequencies of use

类型 Factor	土壤协变量 Soil covariate	来源 Source	应用频度 a Application frequency	
			文献 <sup>[1]</sup> Reference <sup>[1]</sup>	文献 <sup>[13]</sup> Reference <sup>[13]</sup>
土壤	地表多光谱、高光谱、雷达波、射线、电导率、土壤属性、土壤类型、土壤专家知识	遥感、实验分析、土壤专家知识和经验、土壤图、遗留土壤数据	35%	51%
气候	平均气温、平均降雨量、潜在蒸散量、太阳辐射量、地表温度、土壤水分	气象站和遥感资料 (如美国国家海洋大气局 (NOAA)的气象卫星、陆地卫星 Lansat-5 等等)	5%	6%
生物	植被类型、地表覆盖、土地利用、生物量、产量	遥感资料、植被图、田间测定	25%	34%
地形	高程、坡度、坡向、曲率、剖面曲率、平面曲率、特定汇流面积、地形湿度指数、径流强度系数	数字高程模型	80%	24%
母质	成土母质	地质图、遥感、电场、磁场及电磁场探测、专家知识	25%	6%
时间	成土时间	地表电磁探测、 <sup>14</sup> C 测定、专家估计	0%	0%
位置	相对位置	GPS 测定、量测	20%	30%

a: 文献<sup>[1]</sup>基于以往所有数字土壤制图研究,文献<sup>[13]</sup>基于最近发表的 90 篇数字土壤制图研究论文。

表 2 数字土壤制图模型及其应用要求和应用  
Table 2 Modeling methods used for digital soil mapping and their requirements and frequencies of use

理论依据 Theoretical base	模型 Model	应用要求 Application requirement	应用频度 a Application frequency
土壤学	线性回归、模糊数学、决策/分类树、专家知识、线性判别分析、广义线性模型、神经网络、回归分类树、多项式逻辑回归、随机森林 (random forest)	需要土壤协变量,但只需要小样本土壤采样	大量 大量 中量
地理学	地统计学 (简单克里格、普通克里格、指示克里格、析取克里格等)、反距离加权	不需要土壤协变量,但需要大样本土壤采样	大量
数学	马尔科夫链、贝叶斯概率、高精度曲面建模、样条函数	不需要土壤协变量,但需要大样本土壤采样	少量
土壤学和地理学	协同克里格、回归克里格、泛克里格、飘移克里格	既需要土壤协变量,又需要大样本土壤采样	
土壤学和数学	(暂无)		
数学和地理学	地统计随机模拟、马尔科夫地统计	仅需要大样本土壤采样	

a: 作者根据近二十年数字土壤制图研究文献所做的经验估测; b: 尽管大多数研究采用大样本土壤采样,但 Li(2010)[31]的研究表明回归克里格并不需要大样本土壤采样。



因子外,还包括土壤自身的某些性质、土壤专家知识、土壤资料、遗留数据,以及空间位置,这些协变量一起构成了 McBratney 等(2003)提出的 scorpan 模型<sup>[1]</sup>。表 1 列出了各类土壤协变量以及它们的来源和应用频度。土壤空间推理系统是从环境信息中推断土壤信息的系统,主要是各种模型模拟方法。用于数字土壤制图的模型模拟方法非常繁多,按照各自依据的制图基本理论,表 2 列出了这些方法以及它们的应用要求和应用频度。

土壤采样是数字土壤制图中的重要部分,它不仅决定数字土壤制图的准确度,还直接决定制图的成本<sup>[32,33]</sup>。事实上,研究土壤采样已有很长历史,例如,Youden 和 Mehlich(1937)<sup>[34]</sup>。随后,由于地统计学在土壤研究中的广泛应用,土壤采样越来越受关注<sup>[35]</sup>。进入数字土壤制图研究阶段,出于降低制图成本的目的,土壤采样受到了更多的关注,例如 de Gruijter 等(2006)对采样进行了全面、系统的论述<sup>[36]</sup>。土壤采样可分为两种基本方式:基于模型的采样(model-based sampling)和基于设计的采样(design-based sampling)。前者基于模型假说,有目标地采样,适用于描述一个区域内每一位置上的土壤性状,即土壤制图;后者基于经典统计抽样理论,无目标、随机地采样,适用于描述一个区域内土壤全体的统计特征<sup>[36]</sup>,例如平均值、标准差。杨琳等(2010b)的研究将空间采样技术分为三类:经典采样、地统计学采样和目的性采样<sup>[35,37]</sup>。显然,基于设计的采样对应于第一类,即经典采样;基于模型的采样对应其他两类,即空间采样和目的性采样。常用的经典采样方法有:简单随机采样、系统随机采样、分层简单随机采样、二级随机采样、群组随机采样、分层群组随机采样<sup>[36]</sup>。其中,系统随机采样的应用最广泛,绝大多数研究使用了这种方法。地统计学采样基于已知变量在空间上的变异规律(即变异函数)(有时也包括土壤-环境关系<sup>[38]</sup>),通过降低克里格方差,寻找出最优的采样方案。可以看到,该方法仅适用于含有已知土壤空间变异的地区<sup>[35]</sup>,例如 Lesch(2005)<sup>[38]</sup>、Brus 和 Heuvelink(2007)<sup>[39]</sup>等等。目的性采样是根据专家知识或者土壤-环境关系,有意识地设置采样点,例如 Hengl 等(2003)提出把采样点均匀地分布在属性、地理空间上<sup>[32]</sup>。Zhu 等(2007)<sup>[37]</sup>和杨琳等(2010b)<sup>[35]</sup>根据典型景观位置设置采样点,Brungard(2010)利用条件拉丁方(conditioned latin hypercube)优化采样设计<sup>[33]</sup>。除这些研究外,基于遗留土壤数据更新土壤信息的大量土壤制图研究<sup>[40]</sup>也是基于土壤调查者专家知识的目的性采样方法。在数字土壤制图中,土壤采样不仅用于制图,还用于制图验证<sup>[41]</sup>(图 1)。该问题将在下文进行论述。

制图验证是数字土壤制图区别于传统土壤制图的一大特点。因此,它也是数字土壤制图中的主要组成部分<sup>[6,19,41]</sup>。制图验证是指将制图结果与实际值相比较,评价制图结果的准确性。它建立在土壤采样和土壤图质量指标的基础上。常用制图验证的土壤采样方法有:经典采样方法、数据分割和交叉验证。例如 Zhu 等(2008)<sup>[37]</sup>使用系统随机采样和群组随机采样, Sun 等(2011)<sup>[11]</sup>使用折叠刀法(一种数据分割技术), Sun 等(2012)<sup>[42]</sup>使用交叉验证。常用的质量指标有很多种,对于土壤类型制图,主要有:用户准确度、生产者准确度和卡帕系数(kappa)<sup>[11,42]</sup>;对于土壤属性制图,主要有:平均误差、平均绝对误差、均方根误差、一致性系数等等<sup>[3,16-19]</sup>。Brus 等(2011)在系统综述大量研究的基础上,对制图验证作了细致总结<sup>[41]</sup>。他们推荐使用基于设计的采样方法,即经典采样方法,来验证数字土壤图。但在制图预算不充足的情况下,他们建议使用数据分割或交叉验证。对于评价制图质量的指标,他们建议使用总体纯度(overall purity)、制图单元纯度(map unit purity,即用户准确度)和土壤类型代表性(soil class representation,即生产者准确度)来评价土壤类型图,而使用预测误差空间累积分布函数(spatial cumulative distribution function of prediction error,例如平均值、中值、百分位数等等)来评价土壤属性图。

### 3 数字土壤制图当前研究的主要问题

目前,数字土壤制图技术已经相当成熟,正在逐步完善<sup>[6-13]</sup>。当前的大量研究正在对以下六个方面进行深入分析:土壤协变量的生产和处理、土壤数据收集、土壤空间推理系统、土壤制图结果的验证、土壤图的展示和制图结果的应用<sup>[7,13]</sup>。

在土壤协变量方面,很多研究尝试利用各种来源的遥感资料(例如高光谱遥感影像<sup>[43]</sup>、航空射线<sup>[44]</sup>、中分辨高时相的 MODIS 遥感影像),作为指示土壤属性的土壤协变量<sup>[45]</sup>。根据史舟(2011)等<sup>[46]</sup>的研究,最近兴起的土壤近地传感(proximal soil sensing)将给数字土壤制图提供更多的土壤协变量。此外,一些研究还通过各种前处理方法,从其他土壤协变量中,推演出新的土壤协变量(例如气候-地形指数),或判定土被的结构单元(例如景观单元、土被-土链单元等),或分解出分辨率逐渐降低的空间组成部分<sup>[7]</sup>。另有一些研究利用土壤学专家知识来建立和选择土壤协变量<sup>[47-48]</sup>。

从图 1 中可以看到,土壤数据是土壤制图的两个基本元素之一,直接决定制图质量,因而在数字土壤制图中特别重要。当前的数字土壤制图研究主要从三个

方面来研究这个问题:(1) 发展最优采样方法<sup>[13,35-40]</sup>;(2) 利用遗留土壤数据<sup>[10,13,42,43]</sup>;(3) 开发准确、廉价、高效的土壤传感器(soil sensor,例如反射光谱)<sup>[7,13]</sup>。有研究认为,收集土壤数据的重要性高于其他方面,例如土壤协变量、土壤空间推理系统<sup>[13,49]</sup>。

土壤空间推理系统是数字土壤制图的核心(图 1),因而一直以来都是数字土壤制图研究的热点<sup>[7]</sup>。这方面的研究主要集中在 3 个方面:(1) 应用新的推理系统;(2) 比较各种推理系统之间的应用效果;(3) 改进现有的推理系统。例如 Shi 等(2009)应用高精度曲面模拟技术对土壤 pH 制图,并比较它与其他制图技术的应用效果<sup>[27]</sup>;Sun 等(2011)在分类树模型中加入逐步变量选取程序<sup>[11]</sup>等等。此外,Grunwald(2010)强调将土壤学内涵融入到推理系统中<sup>[13]</sup>。

数字土壤图的最大优点是提供制图结果的可信度,为土壤图的应用(如环境评价、决策制定等)提供更明确的信息。因此,合理地、标准化地验证制图结果显得十分必要<sup>[7,13]</sup>。尽管这方面的研究目前较少,但这个问题越来越受重视。例如,Dobos 等(2006)将数字土壤图的准确性(位置、属性、逻辑一致性、历程(lineage))量测列为未来数字土壤制图研究中的重要问题<sup>[51]</sup>;Carré 等(2007)指出,数字土壤图的验证结果直接关系到数字土壤制图的应用和未来发展<sup>[6]</sup>;Lagecherie (2007)认为,未来数字土壤制图的发展必须建立一套适用于任何数据结构、任何数字土壤产品的综合性制图验证程序<sup>[7]</sup>;Brus 等(2011)评比了制图验证所使用的土壤采样方法和准确度指标,并推荐使用一定的指标来对土壤制图质量进行评价(如前所述)<sup>[41]</sup>;Malone 等(2011)提出新的方法来量度数字土壤图的预测精度和不确定性<sup>[52]</sup>。

为了更好地发展土壤调查与制图技术,以及充分、有效地利用土壤图,一些研究对数字土壤图的展示问题进行了研究。例如,Hengl 等(2004)研究了土壤图不确定性(uncertainty)的显示方法<sup>[20]</sup>;Smith 等(2008)应用 3D 技术显示制图结果<sup>[50]</sup>。目前,主要有三种土壤图可视化技术:(1) 科学可视化(Scientific visualization, SciVis);(2) 虚拟现实(Virtual reality, VR);(3) 地理信息系统,其中,地理信息系统最常用<sup>[51]</sup>。

随着数字土壤制图技术的日益成熟,数字土壤制图逐渐从研究转向了应用,以解决各种各样的环境问题,或者用于更新现有的传统土壤图。研究探讨的环境问题主要有:土壤碳库及全球气候变化、富营养化及环境质量评价、水文状态(例如土壤湿度、饱和导水率等)以及土壤退化(盐化、酸化和侵蚀)<sup>[6,7,13]</sup>。杨琳等(2010a)

<sup>[10]</sup>和 Sun 等(2011)<sup>[11]</sup>分别在加拿大和香港应用数字土壤制图技术更新当地现有的传统土壤图。Grunwald (2010)指出,数字土壤制图研究将更加侧重于环境应用和评价<sup>[13]</sup>。

## 4 数字土壤制图未来将面临的挑战和发展方向

经过近二十年的发展,数字土壤制图技术已被广泛接受,即将从研究阶段走向应用阶段<sup>[13]</sup>。因此,它未来将面临的挑战主要是提高制图分辨率和扩大制图范围<sup>[7]</sup>。例如,Lagecherie(2007)预想未来十年,数字土壤制图的发展目标是建立全球 100 米分辨率的多种土壤属性图<sup>[7]</sup>。为了应对这个挑战,需要从以下几个方面着手。第一,利用高精度的数字高程模型(例如激光雷达(light detection and ranging, LIDAR))、航天飞机雷达地形测量(shuttle radar topography mission, SRTM)、遥感测量的土壤表层属性图(例如高光谱、射线资料)、传感器测定的局域土壤属性(例如光谱)建立专用于数字土壤制图的空间基础数据库<sup>[7,13]</sup>。第二,将数字土壤制图融入到已有的土壤调查中<sup>[7,13]</sup>。这是因为数字土壤制图的实施仍然依赖已有的土壤调查和知识;反过来,传统土壤制图显然又需要数字土壤制图技术来提高制图效率和降低制图成本<sup>[7]</sup>。因此,数字土壤制图和已有的土壤调查之间可以互相协调、配合,例如:在数字土壤制图中充分利用遗留土壤数据;在土壤空间推理系统中加入研究区的土壤知识;在当前进行的土壤调查中广泛应用数字土壤制图中的方法<sup>[7,13]</sup>。第三,由于土壤的空间差异将随着制图分辨率的增加、制图面积的增大而增加,因此,还需要发展土壤空间推理系统来处理不同尺度下的土壤空间变异。这样的系统并不是某一种能适应任何情况的最佳模型,而是由多种模型相互结合形成的、区域性最优的土壤制图系统<sup>[7,13]</sup>。除了分辨率和制图范围的挑战之外,数字土壤制图还面临着如何利用时间这个成土因素进行制图的挑战。迄今为止,极少有研究利用时间来预测制图土壤<sup>[1,13]</sup>。这主要是因为成土时间信息的缺乏所造成的。然而,由于当前人类活动对土壤的影响较大,这个问题显得更加重要<sup>[7]</sup>。

数字土壤制图的日益成熟并不意味着该领域的研究即将结束。相反,它将迈向下一个新领域,即数字土壤评价<sup>[6,7,13]</sup>。数字土壤评价由三部分组成。首先,用数字土壤制图技术,制图表达土壤属性在空间上的分布。在这一过程中,由于不可避免的制图不确定性,且这种不确定性会遗传、传播到土壤图的应用中,给土壤图的应用也带来不确定性<sup>[6,51]</sup>。因此,这一过程不仅需要提供



土壤图本身, 还需要提供土壤图的不确定性。第二部分是根据数字土壤图上的土壤信息, 评价土壤的功能和受到的危害, 同时也可以结合大气、生物圈、水等信息, 评价影响生态功能的土壤过程<sup>[6,7]</sup>。同样地, 这一过程也需要根据土壤图的不确定性, 以及评价体系, 来分析评价结果的不确定性。显然, 这样的评价结果与普通的评价结果相比, 提高了评价结果的可靠性和可用性<sup>[6,7,13]</sup>。最后一个部分是结合政策、社会、经济参数和环境危害, 建立、模拟、测试不同情况下会出现的环境状况(及对应的不确定性), 提出相应的土壤保护策略, 为决策制定者提供更可靠、更全面的信息, 从而制定合理的决策<sup>[6,51]</sup>。可以看到, 数字土壤评价将数字土壤制图推向了更高的研究领域和更广阔的应用领域, 将再一次显著地提高土壤信息的服务功能和质量。

## 参考文献

- [1] MCBRATNEY A B, MENDONCA S M L, MINASNY B. On digital soil mapping [J]. *Geoderma*, 2003, 117: 3 - 52.
- [2] SCULL P, FRANKLIN J, CHADWICK O A, et al. Predictive soil mapping: A review [J]. *Prog. Phys. Geog.*, 2003, 27: 171 - 197.
- [3] 孙孝林, 赵玉国, 赵量, 等. 应用土壤 - 景观定量模型预测土壤属性空间分布及制图[J]. *土壤*, 2008, 40(5): 837 - 842.
- [4] LAGACHERIE P, MCBRATNTY A B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for Digital Soil Mapping [C]. In *Digital Soil Mapping, an introductory perspective*. Developments in soil science, vol. 31. Amsterdam: Elsevier, 2007: 3 - 24.
- [5] 朱阿兴, 李宝林, 杨琳, 等. 基于 GIS、模糊逻辑和专家知识土壤制图及其在我国应用前景[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 844 - 851.
- [6] CARRÉ F, MCBRATNEY A B, MYAR T, et al. Digital soil assessments: Beyond DSM [J]. *Geoderma*, 2007, 142: 69 - 9.
- [7] LAGACHERIE P. Digital soil mapping: a state of the art [C]. In *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Dordrecht: Springer, 2008: 3 - 14.
- [8] GRINAND C, ARROUAYS D, LAROCHE B, et al. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: sampling intensity, validation procedures and integration of spatial context [J]. *Geoderma*, 2008, 143: 180 - 190.
- [9] HOWELL D, KIM Y G, HAYDU-HOUDESHELL C A. Development and application of digital soil mapping within traditional soil survey: What will it grow into? [C]. In *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Dordrecht: Springer, 2008: 43 - 51.
- [10] 杨琳, SHERIF F, YOU J, 朱阿兴, 等. 基于土壤 - 环境关系的更新传统土壤图研究[J]. *土壤学报*, 2010a, 47: 1039 - 1049.
- [11] Sun X L, Zhao Y G, Zhang G L, et al.. Application of a digital soil mapping method in predicting soil orders on mountain areas of Hong Kong based on legacy soil data [J]. *Pedosphere* 2011, 21: 339 - 350.
- [12] 李润奎, 朱阿兴, AUGELLO P C, 等. SWAT 模型对高精度土壤信息的敏感性研究[J]. *地球信息科学*, 2007, 9: 73 - 90.
- [13] GRUNWALD S. Current state of digital soil mapping and what is next [C]. In *Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science 2*, Dordrecht: Springer, 2010: 3 - 12.
- [14] SANCHEZ P A, AHAMED S, CARRÉ F, et al. Digital Soil Map of the World [J]. *Science*, 2009, 325: 680 - 681.
- [15] BEHRENS T, SCHOLTEN T. Digital soil mapping in Germany-a review [J]. *J. Plant Nutr Soil Sc*, 2006, 169: 434 - 443.
- [16] 杨琳, 朱阿兴, 李宝林, 等. 应用模糊 c 均值聚类获取土壤制图所需土壤 - 环境关系知识的方法研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 16 - 23.
- [17] 孙孝林, 赵玉国, 张甘霖, 等. 预测性土壤有机质制图中模糊聚类参数的优选[J]. *农业工程学报*, 2008(9), 24: 31 - 37.
- [18] 孙孝林, 赵玉国, 秦承志, 等. DEM 栅格分辨率对多元线性土壤 - 景观模型及其制图应用的影响 [J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 971 - 977.
- [19] 孙孝林. 基于土壤 - 地形关系的数字土壤制图研究[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文, 2009.
- [20] HENGL T, HEUVELINK G B M, STEIN A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging [J]. *Geoderma*, 2004, 120: 75 - 93.
- [21] 李新, 程国栋, 卢玲. 空间内插方法比较 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260 - 265.
- [22] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [23] COOK S E, CORNER R J, GREALISH G J, et al. A rule-based system to map soil properties [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1893 - 1900.
- [24] LAGACHERIE P, VOLTZ M. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach [J]. *Geoderma*, 2000, 97: 187 - 208.
- [25] LI W, ZHANG C, BURT J E, et al. Two-dimensional Markov chain simulation of soil type spatial distribution [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 1479 - 1490.
- [26] LI W, ZHANG C. Simulating the spatial distribution of clay layer occurrence depth in alluvial soils with a Markov chain geostatistical approach [J]. *Environmetrics*, 2010, 21: 21 - 32.
- [27] SHI W, LIU J, DU Z, et al. Surface modelling of soil pH [J]. *Geoderma*, 2009, 150: 113 - 119.
- [28] LIU T L, JUANG K W, LEE D Y. Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70: 1200 - 1209.
- [29] JUANG K W, CHEN Y S, LEE D Y. Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils [J]. *Environ. Pollut.*, 2004, 127: 229 - 238.
- [30] ZHAO Y, XU X, HUANG B, et al. Using robust kriging and sequential Gaussian simulation to delineate the copper- and lead-contaminated areas of a rapidly industrialized city in Yangtze River Delta, China [J]. *Environ. Geol.*, 2007, 52: 1423 - 1433.
- [31] LI Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? [J] *Geoderma*, 2010, 159: 63 - 75.
- [32] HENGL T, ROSSITER D G, STEIN A. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps [J]. *Aust. J. Soil*

- Res., 2003, 41: 1403 - 1422.
- [33] BRUNGARD C W, BOETTINGER J L. Application of conditioned latin hypercube sampling for DSM of arid rangelands in Utah, USA [C]. In Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science 2, Dordrecht: Springer, 2010: 67 - 75.
- [34] YOU DEN W J, MEHLICH A. Selection of efficient methods for soil sampling [J]. Contributions of the Boyce Thompson Institute for Plant Research, 1937, 9: 59 - 70.
- [35] 杨琳, 朱阿兴, 秦承志, 等. 基于典型点的目的性采样设计方法及其在土壤制图中的应用[J]. 地理科学进展, 2010b, 29(3): 279 - 286.
- [36] DE GRUIJTER J J, BRUS D J, BIERKENS M F P, et al. Sampling for Natural Resource Monitoring [M]. New York: Springer, 2006.
- [37] ZHU A X, YANG L, LI B L, et al. Purposive sampling for digital soil mapping for areas with limited data [C]. In Digital Soil Mapping with Limited Data. Dordrecht: Springer, 2008: 233 - 245.
- [38] LESCH S M. Sensor-directed response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties [J]. Comput. Electron Agr., 2005, 46: 153 - 179.
- [39] BRUS D J, HEUVELINK G B M. Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables [J]. Geoderma, 2007, 138: 86 - 95.
- [40] HARTEMINK A E, MCBRATNEY A B, MENDONCA-SANTOS M L. Digital soil mapping with limited data [M]. Dordrecht: Springer, 2008.
- [41] BRUS D J, KEMPEN B, HEUVELINK G B M. Sampling for validation of digital soil maps [J]. Eur. J. Soil Sci., 2011, 62: 394 - 407.
- [42] SUN X L, ZHAO Y G, WANG H L, et al. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and number of clusters [J]. Geoderma, 2012, 171 - 172: 24 - 34.
- [43] MADEIRA N J S, ROBBEZ-MASSON J M, MARTINS E. Visible-NIR hyperspectral imagery for discriminating soil types in the la Peyne watershed, France [C]. In Developments in soil science, vol. 31. Amsterdam: Elsevier, 2007: 219 - 234.
- [44] WILFORD J, MINTY B. The use of airborne gamma-ray imagery for mapping soils and understanding landscape processes [C]. In Digital Soil Mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, vol. 31. Amsterdam: Elsevier, 2007: 207 - 218.
- [45] ZHU A X, LIU F, LI B, et al. Differentiation of soil conditions over low relief areas using feedback dynamic patterns [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2010, 74: 861 - 869.
- [46] 史舟, 郭燕, 金希, 等. 土壤近地传感器研究进展. 土壤学报, 2011, 48(6): 1274 - 1281.
- [47] WALTER C, LAGACHERIE P, FOLLAIN S. Integrating pedological knowledge into digital soil mapping [C]. In Digital Soil Mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, vol. 31. Amsterdam: Elsevier, 2007: 281 - 300.
- [48] MCKENZIE N, GALLANT J. Digital soil mapping with improved environmental predictors and models of pedogenesis [C]. In Digital Soil Mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, vol. 31. Amsterdam: Elsevier, 2007: 327 - 352.
- [49] MINASNY B, MCBRATNEY A B. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function [J]. Geoderma, 2007, 140: 324 - 336.
- [50] SMITH B, KESSLER H, SCHEIB A J, et al. 3D Modelling of Geology and Soils—A Case Study from the UK [C]. In Digital Soil Mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, vol. 31. Amsterdam: Elsevier, 2007: 183 - 191.
- [51] DOBOS E, CARRÍ F, HENGL T, et al.. Digital soil mapping as the support to production of functional soil maps [M]. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
- [52] MALONE B P, DE GRUIJTER J J, MCBRATNEY A B, et al. Using Additional Criteria for Measuring the quality of predictions and their uncertainties in a digital soil mapping framework [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2011, 75: 1032 - 1043.

## Digital Soil Mapping and Advance in Research

SUN Xiao-Lin<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu-Guo<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, WANG De-Cai<sup>1</sup>, LIANG Chuan-Ping<sup>2</sup>

(1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Digital soil mapping has been largely accepted by the soil science community after two decades of research. It is now being practiced world-widely at various levels of soil survey and mapping, while its products have been used in vast fields of research and practice. Based on the past studies of this topic, this paper reviewed the theories, basic components, current main issues and future challenges and development of the topic. The theories mainly originated from three fields: pedogenesis, geography and mathematics, some of which were sometimes combined with another, e.g., pedogenesis and geography, geography and mathematics. The four main components were soil covariates, soil sampling, spatial inference system and validation. Currently, studies focused on six aspects: producing and processing of soil covariates, soil data collection, spatial inference system, soil map validation, presentation and application. In the future, challenges are to increase mapping resolution and enlarge mapping area. Besides, as digital soil mapping becomes more and more mature, it will be applied into a more promising new area, i.e., digital soil assessment, which is expected to significantly improve the functions and qualities of soil information service.

**Key words:** Digital soil mapping, Research progress, Digital soil assessment