

土壤学的数字化和信息化革命

石 元 春

(中国农业大学资源环境学院, 北京 100094)

摘 要 19 世纪以来的近代土壤学的发展, 主要受到化学和地学的影响, 而物理学和数学到本世纪中叶才开始进入, 但却引发了当今土壤学的数字化和信息化革命。它表现在土壤学研究中的模式化趋势; 首先出现在土壤分类和制图上的数字化趋势; 应用信息技术的强大处理能力形成各种土壤专家系统的智能化趋势; 3S 技术和 PA 推动下农田土壤研究的精确化趋势以及土壤信息的网络化趋势。本文最后还就土壤学的数字化和信息化发展中的一些方法论问题作了讨论。

关键词 土壤学, 数字化, 信息化

中图分类号 S15

提起近代土壤学, 很自然地会想到上个世纪的李比希植物矿质营养及元素归还学说(1840)、卫和劳斯发现的离子交换现象(1850); 也会想到, 法鲁的农业地质学说(1865)、道库恰耶夫的土壤发生学说(1874)和 Hilgard 的土壤形成理论(1893)。近代土壤学是在地学和化学影响下产生和发展起来的, 这种影响一直到本世纪中叶。作为地球的一个圈层, 土壤具有明显的地学属性, 又是具有肥力特征的农业生产资料, 地学与化学的首先进入是理所当然的事。物理学和数学在这段时间里的贡献不大, 没有进入土壤学发展的主流。可是, 本世纪中叶以来, 数理在土壤学的发展中却异军突起, 引发了土壤学的数字化和信息化革命。

1 模式化趋势

一个学科对其研究对象的认识, 都有一个由经验到理性, 由概念到量化的过程。近代土壤学发展中的地学和化学研究, 揭示了土壤的某些现象和规律, 但偏经验与概念, 物理学和数学的引入, 使这种状况有了改变。达西定律提出于上世纪中叶, 1931 年 Richards 引入非饱和土壤水研究, 将土壤水的存在和运动视作一个多孔介质中流体运动的力学体系, 应用物理学和数学的相关理论和方法, 建立了土壤水动力学。1966 年, Philip 提出了不同介质的土壤、植物和大气可视作一个物理上的连续体的概念 (SPAC), 以欧姆定律的形式模拟水流通量和用电阻网络进行类比, 使一维稳定流条件下不同介质中水分运行的能量流及其指标——“水势”联成一个统一的系统^[1-3]。物理学理论和方法的引入, 推进了土壤

学的模式化和数量化研究。

模式化和数量化是骨骼和肌肉的关系,是理论概括和量化的重要形式和方法。60年代以来,特别是计算机技术的兴起,土壤过程的数学模拟发展很快,如 Sposito 的土壤化学模型 GEOCHM(1979)、Pachepskyd 的土壤盐化和碱化模型(1979)、Hutson 的土壤溶质运移模型 LEACHN 等。Hoosbeek 从发生学角度对已有土壤过程的定量模型按不同层次(空间尺度)、定量化和复杂性程度作出了土壤模型分类^[4,5],但分类中没有反映土壤变化的时间尺度(CRT 值)^[6]。90年代初,我们建立了黄淮海平原水盐运动的数学模型,以物流和能流概括和量化了这个多要素构成和时空变化复杂体系的水盐运行规律和过程^[7~9]。以后又将这种模式化研究扩展到土壤水气热耦合运移模型、土壤—作物系统及环境间的整合模型^[10]、针对冲积平原土壤质地剖面复杂多变提出的农田土壤质地剖面的随机模拟模型^[11~13],以及土壤中多离子运移模型^[14,15]、田间条件下土壤氮素运移模拟模型^[16]、土壤—作物系统中氮素循环模型^[17]、土壤中钙运移的化学过程模拟^[18,19]、干旱地区人为活动作用下的土壤过程模拟^[20]等。这种综合化、模式化和数量化的研究,越来越广泛地渗透到土壤研究的各个领域,深化了土壤学的理论性研究,也推动了土壤科学在农业的水肥管理、农田节水、作物生产、盐渍土改良、土壤资源可持续利用以及宏观测报等各个方面的应用。

2 数字化趋势

土壤的数字化工作发端于土壤的分类与制图研究。土壤分类由概念和经验转移到以诊断层和诊断特性为基础的系统分类,为土壤的数字化研究打下了重要基础^[21]。70年代和80年代初,加拿大和美国开始建土壤数据库,1986年国际土壤学会提出了建立全球和国家层次的土壤—地形数字化数据库 SOTER 计划。加拿大70年代建立的土壤数据库,已发展到包括土壤、景观和气候数据和不同比例尺的 GIS 图件的国家土壤数据库系统 NSDB(The National Soil DataBase, 1999);美国80年代初建的土壤地理数据库系统^[22]已开发成更加强和完善的数据及图形信息处理功能,并采用视窗系统及基于 Web 网络的国家土壤信息系统 NASIS(The National Soil Information System)^[23]。此项工作我国起步较晚,80年代中期才开始某些专项的土壤信息系统研究,如土壤侵蚀信息系统^[24]、京郊水土流失信息系统^[25]、海南岛土壤与土地数字化数据库^[26]干旱土壤分类检索和数据库系统^[27]、红壤资源信息系统^[28]等。1995年提出我国土壤系统分类^[29]将促进我国土壤信息系统的建立。

土壤是一个具有明显时空特性的复杂系统,在信息采集和数量化表达上的数据量大,难度也大。70年代发展起来的 RS 和 GIS 技术才对此问题的解决有了实质性的推动。RS 是通过航天航空传感器接收地物电磁波及其光谱特性,以图象形式解读有关土壤信息。目前卫星遥感的物理分辨率已达 10 米 × 10 米,最高可达 1 米 × 1 米,成象重复周期 3 天;航空遥感可以 0.05 米 × 0.05 米的分辨率实时实地采集信息。GIS 则可以进行大量图片形式的各种地面数据的储存、处理和用叠加法作三维时空分析,是计算机影像和地面数据管理系统。RS 和 GIS 成为土壤信息数量化操作和分析的得力帮手,很快就在土壤地理、调查制图、动态监测、土地资源管理等方面得到应用和日臻完善。令人高兴的是,90年代出现

了可全球性精确定位到厘米级的 GPS 技术,这就弥补了 RS 和 GIS 在实时实地精确定位上的不足。三者各司其职和相互补充地构成了一个功能完整和强大的空地信息采集处理系统,成为土壤数字化和信息化的强有力的技术支撑。

戈尔的分辨率为 1 米的“数字地球”概念,也是基于这种信息技术最新的发展才有可能提出来的。作为地球的一个重要圈层和农业的基本生产资料,数字化土壤将成为数字化地球家族中的重要一员。

3 智能化趋势

智能化是信息技术的一个重要功能,即应用人类知识和信息技术的强大处理能力对获取的信息进行解释、推理和决策,是人类思维的延伸。近一二十年来,各领域的知识系统、辅助决策系统、智能化专家系统及其相应的软件等得到迅速发展。土壤方面的专家系统如用于农用土地评价的专家系统、用于控制土壤污染的专家系统^[30]、用植被分布的光谱信息进行土壤的数值分类^[31]和基于土壤系统分类开发的 SOIL TaxES 专家系统^[32]等。Minnesota 大学、North Carolina 州立大学和 Kent 州立大学还开发了用于土壤学教学的专家系统。

我国重视对水、肥和土地管理方面专家系统的开发。具有很强实用价值的平衡施肥专家系统一直是研究开发的热点,最近中国农科院土肥所提出和商品化了的平衡施肥专家系统^[33]。农田水管理方面,我们在黄淮海平原土壤水盐运移模型基础上开发了区域水盐预报的 PWS 系统^[7-9],可以按用户输入的参数和数据提供区域地下水水位和水质,土壤水分和盐分的预报等值线图,以后又研究开发了农田土壤—作物系统水循环和科学管理的 SWAF 专家系统^[10]。土地管理信息系统方面开发的 LIS 土地管理信息系统已实现商品化^[34]。

李保国等将虚拟技术应用于专家系统的探索,使专家知识与模型量化相互补充,用虚拟技术形象地描述专家的系统推理和辅助决策,可以进行操作性设计,这将使智能化研究进到一个新的意境^[35]。智能化研究开发中,加强自动知识获取、推理策略、优化模拟以及新的开发平台的研究研制具有重要意义。智能化农业专家系统的研究发展很快,1998 年在荷兰召开的计算机农用应用国家会议上提出了上百个农业专家系统,覆盖了育种、栽培、耕作、灌溉、施肥、植保、养殖、经营管理和农业经济等各个方面。从进展和现状看,土壤学科的智能化研究尚有待加强。

4 精确化趋势

土壤领域的 RS 和 GIS 技术目前主要用于中小比例尺的宏观性工作,而农田尺度土壤的复杂空间变异仍困扰着土壤学家和农学家。当具有实时实地,快速高精度空间定位功能的 GPS 技术出现并与 RS、GIS 相互补充地构成了一个空—地数据采集、处理和可用于实时实地操作的 3S 系统后,很快就在农业上得到应用。首先在精确施肥上取得了成功,继而在喷撒农药和除草剂、耕作和播种上被采用,其最小操作单元为 12~15m²。由于使用范围的迅速扩大,当时人们称为精确农作(Precision farming),现在已统一称之为精确农业 PA(Precision Agriculture)了,发展势头强劲。在美国 9% 的玉米种植农场的 20% 农田上采

用了 PA; 明尼苏达州甜菜等经济作物地区采用 PA 的比例高达 60%~80%⁽¹⁾。PA 一改传统农业的粗放和经验为精细和科学, 可显著提高土肥水等资源的利用效率, 减少对环境的污染, 降低生产成本和增加农民收入。

PA 的实质是应用 3S 的现代数字化和智能化技术表达农田生产条件和作物状况的复杂空间变异, 并实时实地作出操作处理。而这种农田条件的空间变异性是以土壤为基础的, 所以 PA 的最初提法是“Farming by Soil Types”。1998 年美国的 PA 服务中主要是耕地制图(88%)和土壤采样(82%); 最新调查提出的 PA 研究十大需求中排在最前面的是实时传感器和土壤—作物时空变异参数⁽²⁾。第四届 PA 国际会议(1998)上土壤、耕作条件和产量的可变性方面的论文最多。PA 对土壤学提出了精确化的挑战和需求, 也为土壤学的发展提供了一个新的生长点和空间。农田土壤空间变异特性、田间土壤信息实时快速采集技术、地统计分析、模型的模拟运算、空间信息处理、图形自动生成与图象判读、多种数学方法的应用等大量工作需要开展。

5 网络化趋势

全球和国家层次的资源、环境和农业的宏观管理和服务, 对土壤/土地信息资源共享的需求日增, 土壤/土地信息的网络化已是趋势。信息网络化经历了单用户系统、集中式网络系统(局域网)、客户/服务器网络系统和 Internet/Intranet 的发展阶段。GIS 也随之发展到目前的基于网络的 WWWGIS 和 OpenGIS。土壤信息的网络化始于六七十年代各自建立的单用户土地利用系统, 如加拿大的 CGIS(1964)、美国的 LUNR(1967)等。进入 90 年代, 它们相继或正在发展为基于网络的土壤信息系统, 如上述的 NASIS^[23]和 NSDR^[32]等。国际灌溉管理研究所 1998 年建成了“世界农业水和气候图集”, 在互联网上可以查阅该数据库配合世界土壤图提供的, 以 1 平方英里为单位的, 近几十年全球农业水文和气候资料。

土壤信息的网络化, 我国目前仍处在单用户系统阶段, 比发达国家晚了一二十年。最近我们作了两件有益的尝试, 一是在李保国、钟骏平指导下完成的中国土壤系统分类中诊断层和诊断特性和土壤分类的知识库、辅助识别以及系统分类的检索与数据库系统 STDB⁽³⁾; 二是基于 WWW 的土地信息系统的研究对基于 Internet/Intranet 的客户/服务器的应用作了有益的探索, 这套体系的结构和软件经检验对区域和全国土地信息系统的建立有重要实用价值⁽⁴⁾。后发也有优势, 在当今网络技术趋于成熟和不断发展中, 我们可以在网络技术的现水平上推进, 如能讲究策略, 集中力量, 可能较快缩小差距。

6 方法论思考

应用量子力学理论和方法研究氢分子结构的成功, 从而建立了量子化学和现代化学

(1,2) Robert P C. Status of Precision Agriculture in the USA and Research Needs. 1999

(3) 蒋平安. 土壤系统分类的计算机实现及其应用. 博士论文. 中国农业大学, 1999

(4) 涂真. 基于 WWW 的土地信息系统研究. 博士论文. 中国农业大学, 1998

的理论体系;由进化论、细胞说、基因说到 DNA 双螺旋结构的发现,使生物学由经验性发展到分子基础上的现代生物学体系;当深入到 DNA 的大分子结构和纳米尺度时,生物学与物理学的统一成为当今重大科学前沿^[36];C.E.申农的信息论是将对象的运动抽象为信息流动的过程和变换系统,J.W.图契用二进位制的“bit”作为数字化符号和信息单位,才发展到今天的信息科学和技术。列举这些事例是想说明,在认识客观世界中,从方法论上说,一是通过微化以求物质构成的基本单元和共性,一是通过简化以揭示复杂系统及其运动的本质和原貌。

土壤是在气候、生物、地学条件和人类活动影响下,具有时空属性的地理体和能够提供植物生长条件的地球陆地表层。土壤的运动主要表现在一定时空条件下土壤中进行的理化和生物学过程及其所表现出的相应特性。矿质营养和元素归还、土壤发生和大小循环、诊断特性和系统分类等皆从某一侧面揭示了土壤的性状和运动过程。那么,土壤的最基本单元是什么?最本质的运动形式是什么?Pedon 是出于土壤调查的考虑而提出的最小描述和采样单元,而作为具有普遍意义的土壤的基本单元应当是符合土壤定义和本质特征的,可以统一获取信息和数字化表示的基本单元,可称之为“土素”,如生物体之细胞。单体土素中具有相对均一的土壤特性和物能运动特征。确立土壤的基本单元,必将有力地推进土壤学的数字化过程。土壤最本质的运动形式是土壤及其与环境间物质和能量的信息流的变换和转移过程。以“土素”为基本单元,通过物能信息流的运动有可能构建统一的土壤观和土壤学体系。从这个意义上说,本世纪中叶开始的数字化和信息化是土壤学的一次意义深远的革命,一次由经验走向系统理论的革命。当然,要走的路程很长。

李政道说:“科学家抽象的阐述越简单,应用越广泛,科学创造就越深刻”。爱因斯坦说:“物理上真实的东西一定是逻辑上简单的东西”,又说:“想象力比知识还重要,因为知识是有限的,而想象力概括着世界的一切,是知识进化的源泉”。

参 考 文 献

1. Philip J R. Plant water relation: some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1966, 17:245~268
2. Jones H G. *Plants and Microclimate—A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983
3. 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用. 北京:水利电力出版社,1991
4. Hoosbeek M R, Bryant R B. Towards the quantitative modeling of pedogenesis—a review. *Geoderma*, 1992, 55:183~210
5. Amundson R. Towards the quantitative modeling of pedogenesis—a review—Comment. *Geoderma*, 1994, 63: 299~302
6. 李保国. 土壤变化及其过程的定量化. *土壤学进展*, 1995, 23(2): 33~42
7. 石元春,李保国,李鹤珠等. 区域水盐运动监测预报. 石家庄:河北科学技术出版社,1991
8. 石元春. 区域水盐运动监测预报体系. *土壤肥料*, 1992, (5): 1~3
9. Li Y Z, Shi Y C, Li B G. Monitoring and prognosis of regional water and salt. *Geoderma*, 1993, 60:213~233
10. 李保国等. 农田土壤水动态模型及应用. 北京:科学出版社(印刷中),1999
11. 李卫东,李保国,石元春. 区域农田土壤质地剖面的随机模拟模型. *土壤学报*, 1999, 36(3): 289~300
12. Li W D, Li B G, Shi Y C. Application of Markov Chain theory to describe the spatial distribution of textural layers. *Soil Science*, 1997, 162(9):672~683

13. Li W D, Li B G, Shi Y C. Markov Chain simulation of soil textural layers. *Geoderma*, 1999, 92(1~2):37~53
14. Chen W L, Li Y Z, Rienk R, van der Ploeg. Modelling multi-ion transport in saturated soil and parameter estimation. I: Theory. *Z. Planzenernahr. Bodenk.*, 1990, 153:167~173
15. Chen W L, Li Y Z, van der Ploeg R R. Modelling multi-ion transport in saturated soil and parameter estimation. II: Experimental. *Z. Planzenernahr. Bodenk.*, 1990, 153. 175~179
16. 黄元仿,李韵珠,陆锦文. 田间条件下土壤氮素运移的模拟模型. *水利学报*, 1996, 6: 9~23
17. 王红旗,李韵珠. 土壤—作物系统中氮素循环转化联合模型与模拟. *水利学报*, 1997, (增刊): 47~56
18. 段建南,李保国,石元春等. 干旱地区土壤碳酸钙淀积过程模拟. *土壤学报*, 1999, 36(3): 318~326
19. Li X Y, Li B G, Lu H Y. Modeling and simulation of carbonate deposition processes in a Loess-paleosol sequence. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(supp):211~217
20. Duan J N, Li B G, Shi Y C. A modeling approach to evaluating soil change caused by man. In: Cao. Z. ed. *Soil, Human and Environment Interactions*. Beijing: China Science & Technology Press, 1998, 71~79
21. Moore A W. *Classification and Soil Information Systems*, Division of Soils. Australia, CSIRO, The Cunningham Laboratory, 1983
22. Anderson D L, Ernstrom D. *National Soil Information System*. SCS Report. Washington, 1991
23. The National Soil Information System. <http://pestilence.ftc.nrcs.gov./NASIS>. 1999
24. Ma A N. *Proceeding of International Workshop on Geographic Information System*. Published by Institute of Geography of Chinese Academy of sciences, 1987
25. 王怡堂等. 北京郊区水土流失信息系统的建立与应用. *水土保持学报*, 1989, 3(2): 1~9
26. 周慧珍. 海南岛土壤与土地数字化数据库及其制图. 北京: 科学出版社, 1994
27. 蒋平安,常松. 干旱土壤分类检索与数据库系统. *土壤学报*, 1995, 32: 225~234
28. 史舟,王人潮. 大比例尺红壤资源信息系统的研制. *浙江大学学报*, 1997, 23(6): 707~710
29. 龚子同. 中国土壤系统分类的建立和发展. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 1~11
30. Wagenet R J. 土地评价与环境保护中土壤水文性质的估计和应用. *土壤学进展*, 1992, (1): 23~26
31. Samson S A, Lewis D T. 用植被分布的光谱信息进行土壤数值分类. *土壤学进展*, 1992(4): 26~29
32. Gaibraith J. *Soil TaxES—An Expert System for Soil Taxonomy*. Ithaca: Cornell University, 1994
33. Zhang W L, Liang M Z, Lu C A. *Introduction of soil and fertilizer information system of China*. Compiled by China Association of Agricultural Science Societies, *Research Progress in Plant Protection and Plant Nutrition*. Beijing: China Agriculture Press, 1999
34. 严泰来,朱德海. *土地信息系统*. 北京: 科技文献出版社, 1994
35. 李保国,郭焱. 作物生长模拟研究进展. *科技导报*, 1997, (7): 11~12
36. 朱棣文. *生物学及其与物理科学的统一*. 北京大学自然科研处主编. 聆听大师. 北京: 北京大学出版社, 1998. 5~31

DIGITALIZATION AND INFORMATION REVOLUTION IN SOIL SCIENCE

Shi Yuan-chun

(College of Resources & Environment, China Agricultural University, Beijing 100094)

Summary

The development of soil science was influenced mainly by chemistry and geo-science since the 19th century. Physics and mathematics did not play the important role in soil science till the middle of the 20th century, but they have initiated the digitalization and information revolution in the field of soil science. This revolution finds expression in the tendency of modularization, in the tendency of digitalization which appeared first in soil classification and cartography, in the tendency of intelligentization, of which the strong treatment ability of information technology is used to form various soil expert systems, in the tendency of precision in the research of soil science which is promoted by 3S and PA and in the tendency of networking for soil information. In the end, the methodology in the development of digitalization and information of soil science is also discussed in this article.

Key words Soil science, Digitalization, Information