第 44 卷 第 5 期　　土 壤 学 报　　Vol. 44 ,No. 5
2007 年 9 月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　Sep. ,2007

土壤学的新分支 ——计量土壤学(Pedometrics) 的形成与发展 *

史 舟[1]　R M Lark[2]
(1 浙江大学环境与资源学院农业遥感和信息技术应用研究所 ,杭州　310029)
(2 Rothamsted Research , Harpenden , Hertfordshire , AL5 2JQ , UK)

摘　要　计量土壤学(Pedometrics) 是土壤学一个新兴的分支 ,是经过澳大利亚、美国、欧洲等许多国家的土壤学家近三四十年的努力 ,而逐渐发展建立起来的。在 2002 年第 17 届国际土壤科学大会后成立了计量土壤专业委员会 ,与传统的土壤地理、土壤发生、土壤分类等专业委员会并列。本文就国际上计量土壤学产生的理论背景和技术背景 ,以及发展过程做一个综合的介绍 ,对我国在计量土壤学方面的相关工作进行了总结和讨论。

关键词　计量土壤学(Pedometrics) ;数字土壤 ;空间变异 ;综述
中图分类号　S159　　**文献标识码**　A

Pedometrics 一词首先由 Alex B. McBratney 在 20 世纪 80 年代后期提出 , 它是两个希腊词 Pedos (soil , 土壤) 和 Metron (measurement ,计量) 两词的组合[1] ,翻译为计量土壤学 ,或数字土壤学 ,此文采用计量土壤学一词。这种组合词的方式在其他学科也出现 ,如 biometrics(生物统计学; 生物测量学) 、psychometrics (心理测验学) 、econometrics(计量经济学) 等。

计量土壤学是土壤学一个新兴的分支 ,目前在西方国家的土壤学界得到了较快的发展。并在 2002 年第 17 届国际土壤科学大会后成立了计量土壤学专业委员会 ,与传统的土壤地理、土壤发生、土壤分类等专业委员会并列 ,且在第一部门 (Soil in Space and Time) 。本文就国际上计量土壤学的产生和发展做一个综合的介绍。

1　计量土壤学发展的背景

1.1　计量土壤学发展的理论背景

土壤是一形态和演化过程都十分复杂的自然综合体 ,其发育和形成受到物理、化学和生物过程的综合交互影响 ,也由此造成了其各种特性在空间尺度上具有不同程度的变异性。20 世纪初土壤科学家就开始意识到土壤空间变异性这个问题[1,2]。如 Waynick and Sharp 在美国加州大学 Davis 的两块试验田对土壤进行规则采样 ,分析其土壤总碳和总氮含量 ,发现不同的土壤具有不同的变异范围 ,对于变异较大的土壤采用混合采样可部分消除其影响[3]。英国 Rothamsted 实验站的 Fisher 研究作物对不同农业管理措施反馈时发现了田间的空间变异现象 ,设计了不同混合取样的方法来消除短程变异和远程变异的影响 ,发展了方差分析方法来检测其效果[4]。但是直至 20 世纪 60 年代末 ,土壤学家才真正采用系统的方法去研究土壤变异问题。早期 ,土壤变异被看作是麻烦事 ,因为它使土壤图的可信度下降。但是 ,人们逐渐认识到土壤空间变异性是土壤的一个重要特性 ,而不是一个麻烦。特别是随着空间统计理论的发展 ,新的处理手段的出现和大量有效数据的积累 ,使人们对土壤变异特性的理解更进一步[5]。

土壤空间变异的现象可以采用定量分类、多元统计、模糊分类、地统计、分形理论、混沌理论、数量地貌学等方法来描述[6]。其中地统计学的区域化变量理论(Regionalized variable theory) ,是由 Matheron 在 20 世纪 60 年代提出[7]。它的出现和发展为研究土壤空间变异特性提供了理论框架 ,为土壤空间插值、空间结构分析和最佳采样设计等提供了理论基

* 国家自然科学基金项目(40001008 ,40571066) 和国家出国留学基金(2003833009) 资助
作者简介:史　舟(1980～) ,博士 ,副教授 ,主要从事农业遥感和信息技术、地统计学及精确农业的研究。E-mail :shizhou @zju. edu. cn
收稿日期:2006 - 05 - 22 ;收到修改稿日期:2006 - 09 - 18

础[8]。可以说,土壤的区域化变量理论是计量土壤学出现的理论背景。

1.2 计量土壤学发展的技术背景

计量土壤学是在新的定量方法和手段的不断出现,并在土壤学中逐渐得到应用的背景下出现并发展起来的。特别是遥感技术、地面探测技术、GIS 技术和计算机技术的发展[8,9],使土壤空间变异特性信息的获取、分析、模拟、制图等工作得到了很大的进展。

与计量土壤学相关的技术中,出现和发展较早的有地统计、遥感和地理信息系统,这几个技术也是目前计量土壤应用最常用的手段。其中地统计方法在 20 世纪 70 年代引入到土壤学科中来,极大地推进了土壤空间变异和土壤过程空间不确定的定量研究。Burgess 和 Webster 在 1980 年发表了首篇关于地统计方法应用于土壤特性预测评价的研究论文,这是现代计量土壤学出现的标志[10,11]。现今,地统计学的应用涉及从土壤基本理化性质到土壤生物,乃至土壤修复及土壤采样策略的制定,地统计学在土壤学科中的应用已经渗透到方方面面,成为土壤学研究的一个必不可少的手段之一,已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一,成为许多土壤学家,特别是计量土壤学研究的一个重要工具[12]。

另外,20 世纪 70 年代以后遥感技术的不断发展,从可见光到红外,从合成孔径雷达到激光雷达,遥感探测的波谱范围和空间分辨率都在不断的扩展和提高,极大地丰富了土壤信息获取的途径。进入 20 世纪 90 年代后,地理信息系统技术的迅猛发展、全球定位技术的出现和各种土壤野外快速测定仪器的开发为土壤野外调查、数据管理和数字化制图等提供了强有力的手段。这些新技术的发展和应用是计量土壤学的出现和发展的主要推动力。

2 国际计量土壤学的发展

2.1 计量土壤学的定义与科学体系

McBratney 最初提出计量土壤学时,认为是应用数学和统计方法进行土壤定量建模,来研究分析土壤的分布、特性和行为。在 2003 年国际计量土壤学专业委员会通过广泛征求意见,确定了新的定义"利用数学和统计学方法研究土壤的分布和发生"(1)。

从另外角度理解计量土壤学就是解决不确定下的土壤科学和土壤相关问题,这个不确定主要是由于随机变异,或对土壤特性和过程缺乏认识而产生的。计量土壤学的目的就是为了更好地理解和掌握土壤在时间和空间不同尺度的变异,这有助于提高土壤的科学管理,以及对土壤本身和其在整个农业系统、生态系统或水圈中作用的认识[11]。

计量土壤学是一个多学科交叉形成的土壤科学的新分支。现在专业委员会认为它的核心是土壤学与地理信息科学、统计学交叉形成的学科。见图 1 所示,土壤学与统计学交叉形成各种定量分析方法;土壤学与地理信息科学交叉形成土壤制图学;统计学和地理信息科学交叉形成的空间统计学(2)。

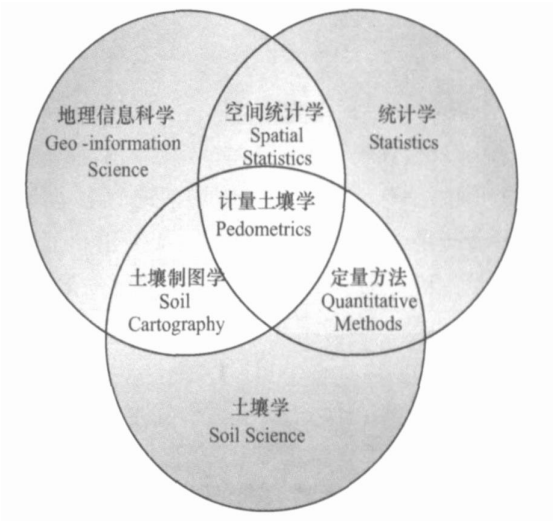


图 1 计量土壤学学科体系简图

Fig. 1 Scientific framework of pedometrics

2.2 计量土壤学组织的发展

1990 年在日本东京召开的第 14 届世界土壤科学大会上成立了计量土壤学工作组。随后每隔两年召开一次专业会议,第一次 1992 年在荷兰的瓦格宁根召开,以后陆续在美国的 Wisconsin Madison (1997 年)、澳大利亚的悉尼 (1999 年)、比利时的 Ghent (2001 年)、英国的 Reading (2003 年),最近一次在 2005 年美国佛罗里达的 Naples 召开了"Pedometrics 2005"会议。在 2002 年第 17 届世界土壤科学大会后成立了专业委员会,隶属于国际土壤科学联合会 (IUSS, International Union of Soil Sciences) 四个部门

(1) 英文原文为:"the application of mathematical and statistical methods for the study of the distribution and genesis of soils"

(2) Hengl T. Pedometric Mapping. PhD Dissertation, Wageningen University and ITC, 2003

(Division)的第一部门。目前在第一部门共有 6 个专业委员会,分别是土壤形态及微形态、土壤地理、土壤发生、土壤分类、计量土壤和古土壤。

2.3　计量土壤学应用的发展

最近十几年有关计量土壤学方面的工作发展很快。据 Hartemink 等[13]对国际著名土壤学杂志《Geoderma》从 1967 年至 2001 年共 100 卷发表的所有论文按照学科进行统计(见图 2),发现有关计量土壤学的论文从 20 世纪 90 年代以后加速发展,从先前的占该杂志年总发表篇数的不到 5 %,发展到 20 %左右。而且与其他一些土壤学分支相比,其发展潜力更大。另外,《Geoderma》杂志从 1994 年开始已经陆续出了 7 期专刊介绍有关计量土壤学的研究工作。

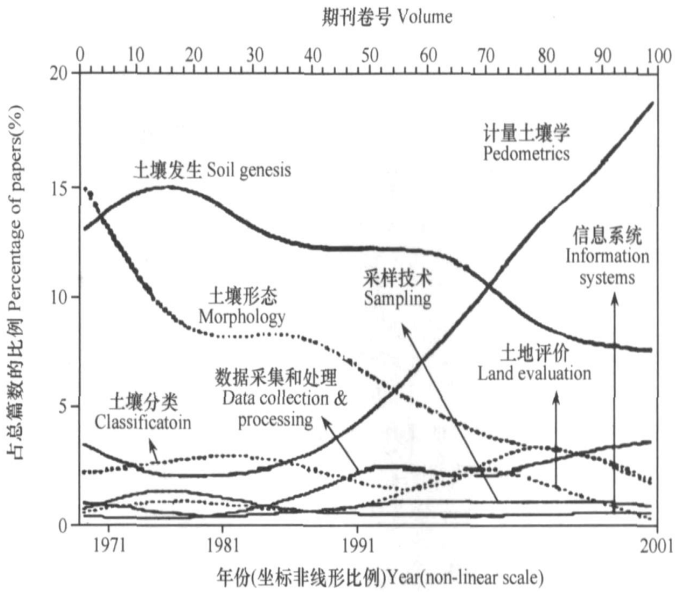


图 2　1967 年至 2001 年 100 卷《Geoderma》杂志上发表的土壤各分支学科论文统计

Fig. 2　Statistics of papers of various pedological sub-disciplines published in the 100 volumes of Geoderma between 1967 and 2001

计量土壤专业委员会在 2003 年召开的“Pedometrics 2003”会议上对计量土壤学主要应用领域和常用工具进行了调查。结果可见(表 1),在常用方法/工具中地统计方法和地理信息系统相关技术占了前三位。而在 20 个应用领域中,土壤估值预测和制图、土壤精确管理等应用位居前列。其他应用还包括土体三维可视、土壤侵蚀、土地评价和土地利用规划、土壤信息系统、土壤采样设计、土壤发生模拟、不确定评价和决策支持等。

表 1　计量土壤学主要方法/工具和应用

Table 1　Major tools and applications of pedometrics

方法/工具 Tools	应用 Applications
(协)克里格法 (Co-) Kriging techniques	时空预测 Spatio-temporal prediction
多元地统计法 Multivariate geostatistics	通用土壤制图 General-purpose soil mapping
地理信息系统和土壤数据库 GIS and soil database	植物营养和土壤管理 Plant nutrition and soil management
模糊理论 Fuzzy sets theory	精确农业 Precision agriculture
GLM 和 REML 混合模型和多元统计 GLM, REML mixed models and multivariate statistics	土壤污染制图 Mapping of soil pollutants

GLM: General Linear Model; REML: Residual maximum likelihood

另外其他主要方法还包括数字地形分析、专家系统、分形理论、Kalman 滤波、小波分析等。这些常用方法在解决土壤特性时空变异问题上各有特色,如地统计方法中,协克里格和回归克里格法主要用易于测得的土壤变量来对那些难以测得的属性或变量进行估值;而非线性克里格或随机模拟法可以对土壤特性的空间不确定进行评价,提供诸如土壤重金属污染风险评价、障碍性土壤适种评价等。另外,如空间随机模拟和马尔可夫状态方程等可以用于土壤时空变异的表征和模拟;模糊理论和专家系统应用于土壤遥感自动制图、土壤管理区划分等。

3 中国计量土壤学的现状

3.1 发展现状

目前,虽然中国没有直接提计量土壤学这个名称,中国土壤学会也还未设这样一个学术专业委员会,但中国在计量土壤学方面已经做了许多的工作。中国土壤学会下设的土壤遥感与信息专业委员会、土壤地理专业委员会所组织的学术会议及其许多会员从事的科研工作很多涉及计量土壤学的范围。对《土壤学报》1990 年至 2005 年发表的所有论文进行统计,图 3 为计量土壤学相关论文每年发表的篇数统计以及占刊物年总发表篇数的百分比,图 4 按照其采用的方法和技术手段进行分类统计。从图 3 可见,有关计量土壤学的论文从 20 世纪 90 年代末开始数量逐渐增加,从原来每年几篇增加到每年近 20 篇,其间虽然要考虑到《土壤学报》从 2002 年开始从每年 4 期增加到每年 6 期,但其占刊物年总发表篇数的比例提高到 10 %左右,其研究向前发展的趋势还是非常明显的。另外,按其采用的方法和技术手段分,地理信息系统、遥感与地统计三种技术应用最多,占了前三位。很显然,这与该三项技术本身的迅速发展和适用范围的不断拓展密切相关,特别是实用性的不断增强,使得越来越多的土壤科研工作者能够掌握和使用这些技术。

3.2 “数字土壤”与计量土壤学

目前国内很重视将现代信息技术和各种定量计算方法应用于土壤科学,特别是提出的“数字土壤”,已成立了相应的研究机构,并组织了全国性的学术会议。如中国科学院南京土壤研究所提出中国“数字土壤”整体建设框架;2005 年由中国农业大学在山西太原组织的首届数字土壤与区域可持续发展会议;2005 年中国农业科学院农业资源与区划研究所和全国农业技术推广服务中心联合组建的“数字土壤实验室”等。

但是国内研究者所从事的“数字土壤”多是基于土壤调查成果,即是以数字化土壤图为基础[14]。对“数字土壤”的定义不一致,有认为是土壤及其相关的地理海量数据,借助于信息技术通过三维空间模拟重现地球表面的土壤圈层[15]。有认为所谓“数字土壤”,就是将地理信息系统、全球定位系统等现代信息技术运用于土壤科学,整合和应用土壤资源数据的高效方式,是耕地地力评价、土壤养分资源管理、农业区划等工作的直接基础(3)。所以,国内所提的“数字土壤”更倾向于信息技术在土壤上的应用,是一项应用性技术。而国际上所提的计量土壤学,是从学科的发展出发,有其自身的理论和方法体系,是一门新的土壤分支学科。

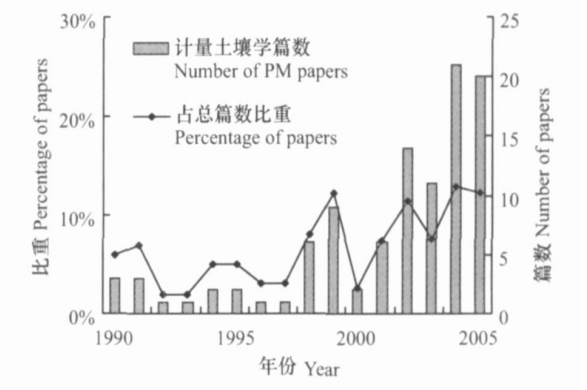
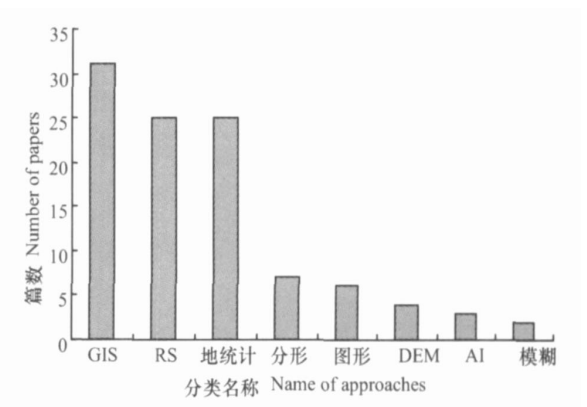


图 3 《土壤学报》1990 年至 2005 年有关计量土壤学论文数量统计

Fig. 3 Statistics of papers about Pedometrics published in Acta Pedologica Sinica between 1990 and 2005



注:GIS-Geographical Information System,地理信息系统;RS-Remote Sensing,遥感;DEM-Digital Elevation Model,数字地面模型;AI-Artificial Intelligence,人工智能

图 4 《土壤学报》1990 年至 2005 年有关计量土壤学论文按方法分类统计

Fig. 4 Statistics of papers about Pedometrics, by approach, published in Acta Pedologica Sinica between 1990 and 2005

(3) http://www.caas.ca.cn

3.3　土壤空间变异研究与计量土壤学

土壤的区域化变量理论是计量土壤学的理论基础。中国在 20 世纪 80 年代中期就有相关研究报道。如雷志栋等[16]与法国的 Vachauol 合作,做了旱地土壤的有关研究;徐吉炎等[17]从事过砂质壤土方面的空间变异性探讨等。进入 20 世纪 90 年代中后期以来,我国土壤空间变异性研究发展较快,这主要得益于相关研究工具的不断出现,如许多新的商业软件包的发布和功能的增强。应用领域从土壤物理,拓展到土壤养分、土壤污染、土壤采样等更多的领域。所采用的方法也从简单的普通克里格方法,发展到非线性克里格、多元变量克里格、随机模拟等。所以,国内土壤学界虽然没有提出计量土壤学这个术语,但是很多工作已经得到了开展,有很好的基础。

现在国际上对土壤空间变异的研究更加深入和系统,如开展三维土壤空间变异[18]、土壤时空变异[19];以及引入更多的数学方法和建模手段,诸如小波分析[20]、贝叶斯最大熵法[21]等。国内的相关研究应该重视计量土壤学新出现的方法和手段。

土壤时空变异研究与土壤发生与过程模拟有紧密的关系。目前,计量土壤学主要为土壤过程模拟模型的尺度转换提供手段[22];通过土壤转换函数(Pedotransfer functions)为模拟模型提供参数[23];或利用线性混合模型、贝叶斯最大熵法、状态空间模型等将过程模拟模型和空间预测模型相融合[11],这是当前计量土壤学研究的重点之一。

4　结　语

现代土壤学将土壤置于整个地球生态环境系统来综合考虑,用来研究土壤圈物质组成性质和物质循环能量转化及其对人类生存环境的影响[24]。这种宏观的、大尺度的、立体的、动态的研究必须要有更为复杂的系统模型和定量方法来支持,就离不开现代信息技术和数学方法的支撑,这也正是现代计量土壤学迅速发展的主要原因。

计量土壤学所提到的很多研究或方法,在过去一直被认为只是新的定量方法或新的技术手段在土壤科学中的应用,不能称其为一个分支学科。因为要构成一个新的学科分支必须十分明确该学科具有特色的理论基础(或称理论机制)、技术体系和服务对象(或称应用对象)三方面内容[25]。目前,国际土壤学界通过三四十年的努力,逐渐提出一套理论基础,同时技术体系和应用对象也在明确,应该引起我国土壤学界的重视。

另外,对于"Peodmetrics"一词,如何给予相应的中文术语和科学阐释,仍需国内土壤学同行共同探讨。

参 考 文 献

[1] Webster R. The development of Pedometrics. Geoderma, 1994, 62(1/3): 1～15

[2] Beckett P H T, Webster R. Soil variability: A review. Soils and Fertilizers, 1971, 34: 1～15

[3] Waynick D D, Sharp L T. Variability in soils and its significance to past and future soil investigations. II. Variations in nitrogen and carbon in field soils and their relation to the accuracy of field trials. University of California Publications in Agricultural Sciences, 1919, 4: 121～139

[4] Fisher R A. Statistical Methods for Research Workers. Edinburgh, UK: Oliver and Royd, 1925

[5] Webster R, Oliver M A. Statistical Methods in Soil and Land Resources Survey. Oxford: Oxford University Press, 1990

[6] Burrough P A. Soil variability revisited. Soils and Fertilizers, 1993, 56(5): 529～562

[7] Matheron G. Les Variables Régionalisées et Leur Estimation. Paris: Masson, 1965

[8] Burrough P A, Bouma J, Yates S R. The state of the art in Pedometrics. Geoderma, 1994, 62(1/3): 311～326

[9] McBratney A B, Santos M L M, Minasny B. On digital soil mapping. Geoderma, 2003, 117(1/2): 3～52

[10] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semi-variogram and punctual kriging. Journal of Soil Science, 1980, 31(2): 315～331

[11] Lark R M. Soil properties and Pedometrics. *In*: Verheye W. ed. Land Use and Land Cover, from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO. Oxford: Eolss Publishers, 2006

[12] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用. 北京: 中国农业出版社, 2006. Shi Z, Li Y. Geostatistics and Its Application in Soil Science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2006

[13] Hartemink A E, McBratney A B, Cattle J A. Developments and trends in soil science: 100 volumes of Geoderma (1967-2001). Geoderma, 2001, 100(3/4): 217～268

[14] 孙继光,王秋兵,魏忠义. 浅谈阻碍"数字土壤"技术普及的主要因素及解决途径. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(1): 110～112. Sun J G, Wang X B, Wei Z Y. Discussion on the major factors counteracting digital soil from popularization and solutions (In Chinese). Geomatics & Spatial Information Technology, 2006, 29(1): 110～112

[15] 史学正, 于东升. "数字土壤"——21 世纪土壤学面临的机遇与挑战. 土壤通报, 2000, 31(3): 104～106. Shi X Z, Yu D S. Opportunity and challenge of soil science in the 21st centuries (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(3): 104～106

[16] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究. 水利学报, 1985, (9): 10～20. Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, *et al*. Preliminary study on spatial variance of soil properties (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1985, (9): 10～20

[17] 徐吉炎, Webster R. 土壤调查数据地域统计的最佳估值研究—彰武县表层土全氮量的半方差图和块状克立格估值. 土壤学报, 1983, 20(4): 419～430. Xu J Y, Webster R. Optimal estimation of soil survey data by geostatistical method: Semi-variogram and block kriging estimation of top soil nitrogen of Zhangwu County (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(4): 419～430

[18] Grunwald S. ed. Environmental Soil-Landscape Modeling-Geographic Information Technologies and Pedometrics. New York: CRC Press, 2005

[19] Lark R M, Bellamy P H, Rawlins B G. Spatio-temporal variability of some metal concentrations in the soil of eastern England, and implications for soil monitoring. Geoderma, 2006, 133(3/4): 363～379

[20] Lark R M. Spatial analysis of categorical soil variables with the wavelet transform. European Journal of Soil Science, 2005, 56 (6): 779～792

[21] D'Or D, Bogaert P. Spatial prediction of categorical variables with the Bayesian Maximum Entropy approach: The Ooypolder case study. European Journal of Soil Science, 2004, 55(4): 763～775

[22] McBratney A B. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 50(1/3): 51～62

[23] McBratney A B, Minasny B, Cattle S R, *et al*. From pedotransfer functions to soil inference systems. Geoderma, 2000, 109: 41～73

[24] 赵其国. 发展与创新现代土壤科学. 土壤学报, 2003, 40(3): 321～327. Zhao Q G. Development and innovation of modern soil science (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 321～327

[25] 王人潮, 史舟, 王珂, 等. 农业信息科学与农业信息技术. 北京: 中国农业出版社, 2003. Wang R C, Shi Z, Wang K, *et al*. Agricultural Information Science and Agricultural Information Technology (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2003

A NEW BRANCH OF SOIL SCIENCE—PEDOMETRICS, ITS ORIGIN AND DEVELOPMENT

Shi Zhou[1] R M Lark[2]

(1 *Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou* 310029, *China*)

(2 *Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, AL5 2JQ, UK*)

Abstract Pedometrics is a new branch of soil science, which originated and developed in Europe, Australia and America over the last 30 to 40 years. The International Union of Soil Sciences (IUSS) had its Pedometrics Commission established following the 17th World Congress of Soil Science in 2002. This commission, together with others (e.g. soil geography, soil genesis, and soil classification), belongs to the first division of the IUSS (Soils in Space and Time). In this paper, attempts are made to introduce the theoretical and technical backgrounds of the genesis of Pedometrics and the course of its development and summarize and discuss works that have been done in this aspect in China.

Key words Pedometrics; Digital soil mapping; Spatial variation; Review