

# 土壤空间变异研究进展

区美美 王建武

(华南农业大学热带亚热带生态研究所 广州 510642)

**摘 要** 本文主要综述了土壤空间变异研究的进展,包括土壤水分特征及状态参数、物理性质、化学性质、重金属及其它元素的空间变异研究。讨论了尺度效应及套合结构模型在空间变异研究中的应用和研究进展,指出应根据不同研究目的采用不同的研究方法,并确定恰当的研究尺度,分析统计结果应结合区域生态系统进行分析。

**关键词** 土壤特性;空间变异;尺度及套合结构  
**中图分类号** S152

近年来,随着“精细农业”(Precision Agriculture)的发展,要求快速、有效地采集和描述影响作物生长环境的空间变异信息<sup>[1,2]</sup>。土壤空间变异的研究,可以为提高田间信息采集精度,减少采样数目和降低采样成本提供理论基础和方法指导;同时,通过研究不同尺度下土壤特性的尺度效应,阐述其空间变异尺度效应,实现不同空间尺度间的转化,为进一步提高田间采集信息的效率和改善农田的精细管理提供理论依据<sup>[2,3]</sup>。本文系统综述了土壤空间变异研究的主要内容及其方法,重点讨论了尺度效应及套合结构模型在空间变异研究中的应用,旨在为空间变异研究提供借鉴资料。

## 1 土壤性质空间变异

土壤性质空间变异包括土壤水分特征及状态参数、物理性质、化学性质、土壤重金属及其它元素等性质的变异。

### 1.1 对土壤水分特征及状态参数的研究

土壤水分特征及状态参数包括土壤水分含量、水力传导率、水吸力、容重及湿度等。雷志栋等<sup>[4]</sup>根据田间实验资料,对田间土壤的颗粒组成、容重、土壤水吸力、含水量和饱和导水率等进行了测定和统计分析,按一定精度和置信水平的要求确定了取样数目;根据半方差和自相关图分析了土壤特性的空间结构-方向性和相关距离,应用克里格(Kriging)法进行了最优内插计算,并根据 12 个入渗方程的适用范围和入渗参数的空间变异性进行了初步分析。史海滨等<sup>[5]</sup>运用线性地质统计理论,探讨了土壤含

水量在方向上的变异程度,确定研究区域的半方差函数二维平面结构为带状各向异性套合结构模型,给出了土壤水分区域估值合理取样数,将 Kriging 最优内插无偏估计法扩展为待估域的土壤水分含量外延估计,通过模糊聚类分析,绘制了区域土壤水分含量的信息分布图。张建辉<sup>[6]</sup>对有坡度(10°)的丘陵区旱地土壤湿度进行空间变异性的研究,表明土壤湿度在纵横各方向上的变异规律显著不同。张玉龙<sup>[7]</sup>研究了沈阳地区棕壤含水量空间变异,在 Kriging 插值基础上绘制成立体透视图,直观地表示实验区土壤含水量在不同方向上的变异。龚元石<sup>[8]</sup>研究小区农田含水量和容重空间变异时,将分形理论与地统计学结合,实现了对土壤特征值空间变异性的复杂程度的定量化,分析讨论了土壤指标在不同空间尺度上的分维的变化特征。李小昱<sup>[9]</sup>对农田土壤含水量、坚实度的空间变异性研究中,指出用分形理论的分维数可以表达土壤特性在空间上的不均一程度。

### 1.2 对土壤物理性质的研究

土壤物理性质包括土壤颗粒组成、孔隙度、结构等性质。吕军等<sup>[10]</sup>通过对水稻土物理性质的田间观测和分析,用自相关函数和半方差函数分析其空间变异结构,表明各性质变程不一,并且具有方向性,用通径分析方法探索性质之间的相互关系,并用 Kriging 进行内插估值,得出已知点数的选取应由变程大小和被测点的设置决定。梁春祥<sup>[11]</sup>通过半方差函数和自相关函数分析土壤饱和导水率、粘粒、水稳性团聚体、孔隙度等空间变异性,采用 Kriging

法对未采样点进行估测,用 Cokriging 法由一种参数估测另一种参数,从而可以大大减少野外工作量,提高工作效率。Larisa Poszdneyakova 等<sup>[12]</sup>也利用 Cokriging 法由电导率估测钠吸附比,取得满意结果。Jose A. Amador 等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,在 cm 尺度,土壤物理性质(如容重、含水量)变异较小,而化学性质(如有机质、碳矿化度)变异较大。Husson O 等<sup>[14]</sup>研究越南湄公河三角洲芦苇平原上酸性硫酸盐土的空间变异时,将土壤物理化学性质与自然植被、地下水位、微地形等联系起来分析,不仅提高了调查的效率,而且可以更深入地了解土壤起源和农业利用过程。

### 1.3 对土壤化学性质的研究

对土壤化学性质的研究主要集中在土壤盐分、营养元素方面。McBratney 和 Webster<sup>[15]</sup>以表土 pH 数据为例,详细讨论了应用地统计学理论进行土壤特性的区域估值和确定合理采样数目的方法,结果表明,应用该方法可比传统的随机采样方法提高效率 3~9 倍。Chung 等<sup>[16]</sup>也应用地统计学方法研究了粉质壤土中交换性磷和钾,土壤 pH 值,有机质含量,容重,以及楔入阻力等的空间变异性,并用于采样方案的设计,同样得到用克立格方法可以提高采样效率的结论。Davis JG 等<sup>[17]</sup>研究了土壤 pH、可交换性酸、有效磷、交换性盐基和有机质的空间变异,得到了土壤化学性质空间变异的模式,并在两个地方作了比较,证明了对采样策略的重要意义。Oliveira JJ 等<sup>[18]</sup>研究了巴西钠盐土上化学性质的空间变异,得出各种元素的空间分布特征以及空间相关关系。Souza LC de 等<sup>[19]</sup>结合传统统计学和地统计学研究半干旱区冲积土土壤盐分的空间变异,根据空间变异分析结果,作图表示盐分的变异,为土壤管理和复垦提供了依据。Lee-CK 等<sup>[20]</sup>研究小区农田化学性质以及产量空间变异性,得到化学性质与产量的相互关系。

李菊梅<sup>[21]</sup>以 5m 距离为间隔的方格法取点,分析了铵态氮、硝态氮、氯离子等 7 种营养元素指标,运用传统统计法和地统计法分析,计算的半方差有两种趋势,一是没有空间结构性,可以用传统统计学进行统计;二是存在空间变异结构,采用直线或曲线拟合方程,并估计了这几种元素在南北、东西及全方位的半方差图参数。张有山,秦耀东等<sup>[22, 23]</sup>探索了内蕴假设、半方差函数以及 Kriging 插值等理论问题,对大比例尺区域土壤养分空间变异进行定量分析。对存在空间变异结构的元素,直接用点

Kriging 方法绘制等值线图,对与间距无关的元素,用 MonteCarlo 模拟方法画出均匀分布图,再假设半方差与滞后距(lag h)之间存在一个极小的斜率,从而绘制等值线图。白由路<sup>[24]</sup>采用 GPS 技术对整个黄淮海平原定点采样,用地统计方法对土壤盐分进行研究,将结果结合实地调查和 GIS 处理分析,得出黄淮海平原的盐渍土分布的状况。郭旭东等<sup>[25]</sup>基于地理信息系统和地统计学研究了河北省遵化市土壤表层(0~20cm)五种营养元素的空间变异规律,指出 GIS 能够将系统变量的属性数据同地理数据相结合,使大范围内进行地统计学分析变得较为方便。在分析方法上,采用了半方差函数、分维数及各向异性比等指标,深入揭示该区土壤的空间结构。

### 1.4 对重金属、微量元素等其它元素的研究

Arrouays D 等<sup>[26]</sup>用地统计学方法研究了短距离土壤重金属,包括铅、铜和铬的空间变异,结果表明如果采样方案不恰当,重金属含量的空间变异可能会掩盖其变化。张朝生等<sup>[25]</sup>采用地统计、空间自相关和分形 3 种方法,研究长江水系沉积物中 11 种重金属元素,发现其均有较显著的空间分布特征。表明地统计学方法可以通过变异函数的变化揭示变量空间分布的结构和方向性特征,空间自相关方法可通过自相关指标对变量空间自相关性的显著性进行检验,分形方法则可通过分维数反映变量空间分布结构的复杂性。徐尚平等<sup>[28]</sup>用因子克立格法(Factorial Kriging Analysis)分析了内蒙地区土壤中 10 种微量元素含量的空间结构特征,成功解决了影响微量元素含量的因子间尺度不同的问题。

### 1.5 对其它特性的研究

Di 等<sup>[29]</sup>应用地统计学方法定量研究了土壤分类中判断冲积层的指标,如锈斑出现深度,砂砾出现深度,以及壤砂土和/或粗质地土层厚度的空间变异性,获得了克立格标准误差与采样间隔和采样数目的关系图,并从图中确定了所研究指标给定精度的合理采样数目和采样间隔,结果表明,地统计学方法比传统方法在设计采样方案时更有效,用较少数目的样品可以获得同样精度的估值。王建红等<sup>[30, 31]</sup>用地统计方法研究了海涂土壤电导率的空间变异,将电导率的空间变异分为系统变异和随机变异两类来探索变异产生的原因及规律。秦耀东等<sup>[32]</sup>比较了几种常用的估计土壤空间变异的计算方法,介绍了析取克立格的理论和计算方法,并应用于地下水埋深的分布情况的估计,结果表明析取克立格估计方差比普通克立格所估计的方差小。

## 2 尺度效应和套合结构模型

土壤定性和定量信息在不同空间和时间尺度间的转换已经成为土壤科学中的重要研究课题。尺度问题的产生,是由于土壤是一个不均匀、具有高度异质性的复合体,即其空间分布的结构常常不是单纯的一种,而是多种或多层次的结构叠加<sup>[33]</sup>。

随着对在比田块小区较大的(如景观,区域)或较小的(分子,结构)尺度上操作过程理解的深入,研究者们对尺度问题的兴趣与日俱增。Antonio.P.M<sup>[34]</sup>研究免耕的玉米和大豆田里两个采样尺度(分别是 7.6cm 或 15.2cm 和 3.05m 的采样间隔)的磷和钾的空间变异模式。结果表明,不同的采样尺度所揭示的土壤属性的空间变异模式是不同的,并认为更大的采样间隔,如 60m 到 120m,不能识别出 P 和 K 空间变异的周期模式。这说明,研究土壤特性的空间变异时,选择采样尺度要根据研究目的选择合适的尺度。Materon 于 1982 年提出了因子克立格分析法( Factorial Kriging Analysis ),成功地引入了尺度的概念,不仅有利于一般实验半变异函数线性套合模型中模型类型和数量的选择,而且有助于对区域化变量在不同尺度的相关特征进行分析。Goulard.M.随后提出了一种对几个区域化变量的半变异和协半变异函数的系数同时进行拟合的方法<sup>[26]</sup>。

土壤变异尺度的大小不同,通常是因不同过程引起的,各过程是同时起作用的,而各尺度的变异往往迭合在一起<sup>[33,34]</sup>。Jounel 等和 Clark 认为,具有复杂变化的区域化变量的空间变异性,不能用一个简单的理论模型描述,需要用两个或两个以上的理论模型描述。其结构是多个结构的相互叠加,称为套合结构(nested structure)。所谓套合结构,是把分别出现在不同距离 h 上或不同方向上同时起作用的变异组合起来,对全部有效的结构信息作量化的概括,以表示区域化变量的主要特征。

史海滨等<sup>[5]</sup>运用线性地统计学理论,研究了土壤含水量的带状各向异性的套合结构,获得了空间二维平面不同方向套合结构模型。李子忠<sup>[3]</sup>通过研究农田水分、无机氮和电导率的空间变异,得到了空间二维平面不同采样尺度的土壤特性的空间变异及其套合结构模型。

## 3 结 论

### 1. 土壤空间变异研究首先从研究土壤物理性

质开始,逐步扩展到化学性质及其他性质的研究,目的都是为了揭示土壤特性的空间分布规律,用于指导生产实际。在今后的研究中,可以更多地将土壤特性的空间变异研究与区域环境、作物产量及田间管理措施相结合,摸清农田系统内各变量空间变异特性及产生的原因,从而更好地为农业生产服务。

2. 尺度问题越来越受到重视,研究中应注意各变量在不同尺度上的空间变异特征,探索土壤信息在大小尺度间的转化。

3. 注意研究方法的适用性。地统计是目前应用较多的研究方法,但应因地制宜,可以结合 3S 技术,引入分形理论,更加有效准确地表达土壤特性空间变异的规律。

## 参考文献

- 1 汪懋华.“精细农业”发展与工程技术创新. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1~8.
- 2 Mvbratney, A.B., Pringle, M.I. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. Precision Agriculture, 1999, 1(2): 125~152.
- 3 李子忠. 不同尺度下农田土壤水分和无机氮的空间变异性. 中国农业大学博士论文, 2000.
- 4 雷志栋, 杨诗秀等. 土壤空间变异性初步研究. 水利学报, 1985, (9): 10~21.
- 5 史海滨, 陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值. 水利学报, 1994, 7: 70~77.
- 6 张建辉, 何敏蓉等. 丘陵区土地湿度的空间变异性研究. 土壤通报, 1996, 27(2): 61~62.
- 7 张玉龙, 代国英等. 沈阳地区棕壤含水量空间变异规律的研究. 沈阳农业大学学报, 1997, 7, 28 (3): 200~204.
- 8 龚元石, 廖超子等. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. 土壤学报, 1998, 35(1): 10~15.
- 9 李小昱, 雷延武等. 农田土壤特性的空间变异性及分形特征. 干旱地区农业研究, 2000, 18(4): 61~65.
- 10 吕军, 俞劲炎. 水稻土物理性质空间变异性研究. 土壤学报, 1990, 27(1): 8~15.
- 11 梁春祥, 姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性的研究. 土壤学报, 1993, 30(1): 69~77.
- 12 Larisa Poszdneyakova, Renduo Zhang. Geostatistical analysis of soil salinity in a large field. Precision Agriculture, 1999, 1(2): 153~165.
- 13 Jose,A.A., Yong W., et al. Fine-scale spatial variability of physical and biological soil properties in Kingston, Rhode Island. Geoderma 2000, 98, 83~94.

- 14 Husson.O., Verburg.P.H., et al. Spatial variability of scid sulphate soils in the Plain of Reeds, Mekong delta, Vietnam. *Geoderma* 2000, 97, 1~19.
- 15 McBratney, A.B., Webster, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties?. *Soil Sci*, 1983, 135: 177~183.
- 16 Chung, C.K., Chong, et al. Sampling strategies for fertility on a stoy siltloam. *soil communication of soil science and plant analysis*, 1995, 26 (5&6): 741~763.
- 17 Davis, J.G., Hossner, L.R., et al. Variability of soil chemical properties in two sandy, dunal soil of Niger. *Soil Science*, 1995, 159: 5, 321~330.
- 18 Oliveira. J.J., Chaves.L.H.G., et al. Spatial variability of chemical properties in a saline-sodic soil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 1999, 23: 4, 783~789.
- 19 Souza.L.C.de, Queiroz.J.E., et al. Spatial variability of soil salinity in an alluvial soil of the semi-arid region of Paraiba state. *Pevista Brasileira.de. Engenharia Agricola.e. Ambiental*, 2000, 4 (1): 35~44.
- 20 Lee.C.K., Kaho.T., et al. Field information maps using geostatistics in the paddyfield. 2000- ASAE- Annual-International-Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA, 9~12-July-2000. 2000, 1~17; ASAE Paper No. 00108.
- 21 李菊梅, 李生秀. 几种营养元素在土壤中的空间变异. *干旱地区农业研究*, 1998, 16 (2): 58~64.
- 22 张有山, 林启美等. 大比例尺区域土壤养分空间变异定量分析. *华北农学报*, 1998, 13(1): 122~128.
- 23 秦耀东. 土壤空间变异研究中的半方差问题. *农业工程学报*, 1998, 12: 42~47.
- 24 白由路, 李保国等. 黄淮海平原土壤盐分及其组成的空间变异特征研究. *土壤肥料*, 1999(3): 22~25.
- 25 郭旭东, 傅伯杰等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 555~563.
- 26 Arrouays. D., Martin.S., et al. Short-range spatial variability of metal contents in soil on a one hectare agricultural plot. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31: 3~4, 387~400.
- 27 张朝生, 章申等. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究. *地理学报*, 1998, 53(1): 87~95.
- 28 徐尚平, 陶澎等. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征. *地理学报*, 2000, 55(3): 338~344.
- 29 Di,H.J., Trangmar, B.B., et al. Use of Geostatistics in Designing Sampling Strategies for Soil Survey. *Soil Sci. Soc. Am.J*, 1989, 53, 1163~1167.
- 30 王建红, 吴玉卫等. 海涂土壤电导率的空间变异性研究. *浙江农业大学学报*, 1999, 25(2): 139~142.
- 31 王建红, 傅庆林等. 土壤空间变异理论在海涂土壤研究中的初步应用. *浙江农业学报*, 1998, 10(5): 230~234.
- 32 秦耀东, 李保国. 应用析取克立格方法估计区域地下水埋深分布. *水利学报*, 1998, 8: 28~32.
- 33 王政权编著. *地统计学及其在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999. 74~96
- 34 Antonio, P.M. Spatial Variability Patterns of Phosphorus and Potassium in No-Tilled Soils for Two Sampling Scales. *Soil Sci. Soc.Am. J*, 1996, 60, 1743~1781.

## REVIEW OF RESEARCH ON SOIL SPATIAL VARIABILITY

Ou Meimei      Wang Jianwu

( *Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agriculture University, Guangzhou 510642* )

**Abstract** This paper reviews advances in the research on soil spatial variability, including soil water characteristics, soil physical properties, chemical properties and heavy metal, etc. It also discusses application of the scale effect and nested structure model and advances in the research. Research scales and methods should depend on the objective of the research and analysis of the statistical results take into account the corresponding regional eco-system.

**Key words** Soil properties, Spatial variability, Scale and nested structure