

土壤水力特性的空间尺度效应研究进展^①

舒乔生, 谢立亚

(辽宁省水土保持研究所, 辽宁朝阳 122000)

摘要: 研究土壤水力特性的空间尺度效应, 在生态水文模拟和农业水肥精准管理方面具有重大意义。水力特性空间变异研究方法主要有统计法、随机模拟法、土壤转换函数法和分形理论法; 由于土壤中物理、化学和生物等过程作用的尺度不同, 导致其空间变异方式亦不相同, 当前主要采用地统计学、谱分析、多重分形和小波分析等方法研究水力特性的尺度效应。研究过程中仍有一些问题需解决, 其中尺度转换始终是非常重要的问题, 并且要与 GIS 等技术相结合。

关键词: 水力特性; 空间变异; 尺度效应; 多重分形; 小波分析

中图分类号: S152.7

准确了解土壤水分运动和溶质运移过程是进行生态水文模拟、农业水分管理和环境监测的关键, 正确估算土壤导水率和水分特征曲线(即水力特性)是准确了解土壤水分运动和溶质运移过程的前提。土壤中物理、化学和生物等过程的综合作用使水力特性产生空间异质性, 由于这些过程对水力特性作用的尺度不同, 导致其变异性随尺度范围的改变而改变; 同时, 水力特性与土壤基本性质之间的关系在不同尺度和地域会发生变化, 这些变化增加了对土壤水分运动描述的复杂性。

研究土壤水力特性的空间尺度效应, 是揭示土壤水分养分运移规律、水肥耦合关系及节水灌溉的基础和前提; 可为确定正确的环境监测范围、合理的取样数目与间距提供科学指导, 在生态水文模拟和水肥精准管理等方面具有重大意义。

1 土壤水力特性的空间异质性

土壤水力特性可通过直接测定获取^[1], 但测定方法通常费时费力; 同时由于强烈空间异质性的存在, 获取大范围的水力特性需进行大量测定, 这在实际操作中难以进行。

许多学者对土壤水力特性的空间异质性进行了探讨^[2-5], 研究方法主要有直接法和间接法。直接法指应用统计理论对水力特性的空间变异进行直接描述, 包括Fisher经典统计学、地质统计学和随机理论等; 间接法是通过测定土壤其他特性如颗粒级配、结构等推

求水力特性, 再描述其空间变异情况, 包括土壤转换函数和分形理论等方法。

1.1 直接法

包括Fisher经典统计学和地统计学方法的统计方法, 是研究空间异质性一种最基本的方法。若将土壤水力特性看作完全随机的、相互独立的变量, 可用经典统计学进行分析, 得到土壤水力特性的统计特征, 来反映其空间变异程度。如黄冠华^[6]对国内外的试验研究进行了总结, 表明van Genuchten模型中4个参数大多符合正态分布或对数正态分布。与经典统计学相比, 地统计学在分析空间序列的变异特征方面具有独到的优势^[7], 从而被引入到土壤科学中, 并逐步用于水力特性的空间变异分析, 如Liu等^[8]通过对van Genuchten模型4个参数的空间变异结构特征进行分析, 表明饱和含水量空间变异的结构性较好, 其他3个参数的结构性较差。

土壤水力特性既具有统计学特征又具有空间结构特征, 适宜用随机理论描述。一些学者^[9]研究表明, 相对于平均法或克立格法, 随机理论可得到精度更高的饱和导水率空间分布特征。随机模拟在理论上较好地反映了空间异质性对水流运动的影响, 可得到与研究尺度相应的水力特性; 但由于解析结构复杂, 实际应用时有较大难度。

1.2 间接法

近年来, 土壤学家致力于用土壤基本性质(如物理性质)估算水力特性^[10-13], 其中最常用的是土壤转

①基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2008BADA4B03、2009BADB3B07)资助。

作者简介: 舒乔生(1973—), 男, 江西余干人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤物理与节水农业、水土保持方面的研究。E-mail: cysqs@163.com

换函数法 (PTF)^[14]。PTF 中用到的参数主要有: 土壤质地 (即土壤砂、粉和黏粒的百分含量), 土壤体积质量 (容重) 和有机质含量等, 有的模型还包括黏土矿物含量和土壤结构等参数。

土壤转换函数避免了水力特性大量的实地测试, 是研究大尺度土壤水力特性空间变异可行的方法。这一方面的研究较多, 但多为经验公式, 理论上尚感欠缺, 尤其是在各因子对模型参数的影响方面还有待深入研究; 并且 PTF 推导过程中的回归分析或神经网络模型都是基于测量区的^[10,15], 一般范围均较大如全国^[10]、洲^[12-13]和洲际^[13]范围, 这些模型需要大量数据进行验证^[16-17]。

研究空间自相似性较有效的方法为分形理论, 一般来说, 土壤在一定尺度范围内具有统计上的自相似性 (或称随机分形)^[18-19], 适宜用分形理论来描述。20 世纪 80 年代, 分形理论被引入到土壤学科, 随后逐步应用到水力特性的研究中, 它通常用土壤的结构或质地根据分形维将水力特性拟合成指数函数, 如 Rieu 和 Sposito^[20]以 Menger 海绵为概念模型, 建立了土壤孔隙度和团聚体分布的分形模型, 由此提出土壤水分特征曲线的理论模型。

分形模型的最大优点是将明确的物理意义引入到水力特性模型中, 根据土壤粒径分布推求分形维, 具有较强的实用性; 但土壤水分的保持与运动受到多种因素影响, 仅利用土壤质地不足以准确描述整个水势范围内的水分运动过程, 一个完善的分形模型可能需要包含不同层次上的土壤特征参数。

其他方法还有标定理论及其综合方法等^[4], 它们均在研究土壤水力特性空间变异起到一定的作用。

2 水力特性的空间尺度效应概述

尺度是一个与空间或时间有关的术语, 在不同领域有不同内涵, 生态学、地理学中的尺度是指研究物体或过程的跨度 (即范围) 与分辨率^[21-22], 其研究目的在于通过分析尺度对生态格局和过程的影响, 揭示自然现象的尺度规律, 包括尺度复杂性、尺度互作性和尺度转换。

由于样本信息的尺度特性不同, 某一尺度上观察到的空间分布规律, 在另一尺度上可能表现为相似性, 也可能完全不同。如不把握尺度问题, 就不能真正理解不同尺度下的分布规律, 研究成果的应用也就受到限制。研究指出, 土壤特性的空间变异特征是尺度的函数, 同一土壤特性在不同尺度上的自相关性相差较大, 随着样点间的距离增大, 随机变异的比例不断增

加, 小尺度上的结构变异特征逐步被掩盖^[23]。

水力特性的空间异质性是各种物理、化学和生物过程 (如生物活动、耕作、地形、土壤侵蚀、地质过程) 在不同尺度下综合作用的产物, 其中一些过程随尺度变化较大 (高频过程或小跨度, 如耕作因子), 另外一些则为低频过程 (大跨度, 如地质过程); 且水力特性的数值在空间距离很近时又比较接近^[23], 小间距 (高分辨率) 的变异程度通常小于大间距 (低分辨率), 这种变异程度随尺度 (跨度与分辨率) 发生变化的现象称为尺度依赖性^[24]。

水力特性与土壤物理性质之间的关系也会随尺度发生变化, 这主要是由于尺度的改变导致影响相关性的主导因子产生变化, 致使在一些尺度上较稳定的关系, 在另外一些尺度上表现为不稳定。如在较小尺度下 (如农田尺度), 这种关系可能主要受生物活动和耕作措施的影响; 若放大至小流域尺度, 地形与土壤侵蚀成为主要因子; 放大到区域尺度时, 地质过程将起控制性作用。因此, 水力特性本身的异质性可通过分形理论扩展至其他尺度, 而这种相关性却很难递推至其他尺度, 这也说明土壤转换函数 (PTF) 是依赖于尺度和地理位置的, 难以精确应用到其他尺度和区域^[17, 25-26]。有些学者试图评价现有 PTF (一般为区域尺度) 在田间尺度的应用效率, 普遍表现出不稳定性^[27]。

3 水力特性尺度效应研究方法

目前有一些数学方法可用来研究土壤水力特性的尺度依赖性, 包括地统计学、频谱分析、多重分形、小波分析等, 这些方法大都来源于时间序列分析理论。

3.1 地统计学方法

地统计学方法中的半方差函数可用来描述土壤性质的尺度依赖性^[28], 如 Goovaerts 和 Chiang^[29]曾利用协同离差系数研究土壤两特性之间的尺度依赖关系, 也有一些学者^[30-32]分析导水率的空间尺度特性。地统计学方法研究尺度特性较简单, 也较常用, 但由于它是基于二阶统计得出的 (半方差属于二阶矩), 很难识别突变量 (突然出现极大值和极小值, 如水力特性) 的空间变异性^[33-34]; 并且地统计需要空间序列满足平稳性和 (准) 高斯分布的条件, 不能分析非高斯分布空间序列的尺度效应, 因此在应用上受到一定限制。

3.2 谱分析

谱分析通过傅立叶变换将尺度转换为频度范围来分析数据序列的尺度效应, 最初用于时间序列分析, 如 Kachanoski 和 De Jong^[35]用它分析两个日期土壤平均储水量之间的时间尺度特性。应用于空间序列的研究

时, 谱分析用一定频率下傅立叶系数的平方代表该频率下的相对方差, 将序列分割成不同尺度下的分布特征^[35-37]; 类似地, 交叉频谱将两个序列的协方差进行尺度分割, 描述它们的尺度依赖关系, 称为谱相干性。谱相干性是一定频率下两个序列的交叉谱正态化参量, 其数值大小表明不同尺度下的相关程度, 能较真实地反映水力特性的尺度效应。与地统计类似, 其缺点同样是需要空间序列满足平稳性条件, 并且谱相干性无法评价不同频率分布下两个序列的尺度相关性^[24]。

3.3 多重分形

多重分形假设变量在多重尺度上的统计特征可通过幂函数联系起来^[38], 得出多尺度的奇异性指数和分形谱, 检验空间序列的空间变异性和尺度特性^[33,38-39]; 同理, 联合多重分形将两个序列通过联合分布函数联系起来得到联合多重分形谱, 可阐述两个序列空间变异的多重尺度关系^[40]。它们是分析多尺度特性的强大工具^[39,41-42], 将它们应用于土壤科学^[33, 43]和其他领域^[44]的研究也有一些报道。**Zeileke**和**Si**^[45-46]采用多重分形和联合多重分形研究土壤导水率、田间持水量等水力特性与物理性质之间的多尺度关系, 表明它比**Pearson**相关和地统计分析结果更为真实。由于多重分形将二阶矩(方差)扩展至任意阶(可为负值), 可用于非平稳性(不满足平稳性假设)空间序列的尺度分析, 也可得到水力特性不同值域(高值区、低值区)与物理性质的多重尺度相关特征, 因此在分析尺度效应方面非常有效; 它的缺陷是数据序列的概率密度与尺度之间应满足幂函数关系, 并且无法识别空间位置依赖性。

3.4 小波分析

小波分析通过构造小波基进行空(时)间和频率变换, 通过伸缩平移运算对空(时)间序列逐步进行多尺度分析, 最终达到高频处空(时)间细分, 低频处频率细分, 能自动适应空(时)间序列分析的要求, 因此它是空(时)序列尺度特性的强大分析工具。在对水力特性进行尺度分析时, 小波分析通过小波变换得到波谱能量(相当于方差), 表示水力特性在不同尺度和不同空间位置的方差分布, 它不但可表征水力特性的尺度特性, 而且能得到确定的空间位置特征^[24,47-48]。根据运算法则不同, 小波分析可分为连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT), 它们各有优缺点, 详细比较见文献^[49]。

两个小波函数的协方差与方差积的比值称为小波相干性, 它可表示空间序列在不同尺度和空间位置上的相关性, 即使两个序列的方差均较小也是有效的。

起初小波相干性主要应用于气候的变化分析^[50-51], 近年来成功用于分析土壤水力特性的尺度效应^[49,52], 结果表明: 即使**Pearson**相关分析中饱和导水率或土壤水分特征曲线参数与物理性质存在高度相关, 而小波相干分析证明这种关系依赖于尺度和空间位置, 有些尺度或空间位置上的关系甚至可能相反(正相关变为负相关)。

然而, 小波分析多用于一维空间序列的尺度分析, 对二维空间序列, 一般通过两次小波变换或用两个一维基函数直接构造二维变换, 不是真正的二维函数, 因此基函数的方向性较差, 对空间尺度特性分析产生较大的影响。通常解决的途径为超小波分析法, 应用超小波研究土壤性质的尺度效应至今仍未见报道。

4 研究展望

随着水循环在气候模拟中成为关键, 尺度问题、大尺度模型和流域变异性等问题备受关注^[53]。由于测量技术和试验能力的限制, 目前只能得到某些尺度的土壤水力特性, 如何通过这些已知信息, 了解大/小尺度相应的信息, 这就是尺度转换要解决的问题。大尺度流域的特征值并非若干小尺度值的简单叠加, 小尺度值也不能通过简单的插值得到, 需要在不同尺度之间建立某种尺度转换关系^[54]。但由于尺度的不同, 影响因子也相应变化, 这使尺度转换变得非常复杂。

土壤水力特性空间分布规律要在区域尺度水平上应用, 不仅要采集土壤的相关特性, 而且要考虑植被分布和地形分布的影响, 因此需要借助更先进的手段获取大量的信息, 如地理信息系统、全球卫星定位系统和遥感(3S)新技术。

此外, 大部空间变异研究都着力于一个方向(水平或垂直), 很少有同时考虑水平和垂直方向的空间变异性, 这主要由3个原因: ①绘制下层土壤图很困难; ②在水平和垂直方向的高异质性; ③缺乏适当的软件来评价3D模型。

参考文献:

- [1] Reynolds WD, Elrick DE, Youngs EG, Booltink HWG, Bouma J. Saturated and field saturated water flow parameters // Dane JH., Topp GC. Physical Methods, Part 4: Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America, 2002: 797-877
- [2] Liu JL, Xu SH. Applicability of fractal models in estimating soil water retention characteristics from particle size distribution data. *Pedosphere*, 2002, 12(4): 301-308
- [3] 姜娜, 邵明安, 雷迁武. 水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的

- 空间变异及其分形特征. 土壤学报, 2005, 42(6): 904-908
- [4] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓. 土壤水力学特征参数空间变异的研究方法评述. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 97-102
- [5] 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. 土壤, 2003, 35(1): 30-33
- [6] 黄冠华. 土壤水力特性空间变异的实验研究进展. 水科学进展, 1999, 10(4): 450-457
- [7] 郝明亮, 张光辉, 韩美清, 王路光, 田在锋, 陶澍. 河北省土壤苯并(a)芘含量的空间变异特征. 生态与农村环境学报, 2006, 22(4): 48-51
- [8] Liu Z, Shu Q, Wang Z. Applying pedo-transfer functions to simulate spatial heterogeneity of cinnamon soil water retention characteristics in west Liaoning Province. Water Resources Management, 2007, 21: 1 751-1 762
- [9] Russo D, Bouton M. Statistical analysis of spatial variability in unsaturated flow parameters. Water Resource Research, 1992, 28(7): 1911-1925
- [10] Rawls WJ, Gish TJ, Brakensiek DL. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. Advances in Soil Science, 1991, 16: 213-235
- [11] Minasny B, McBratney AB, Bristow KL. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. Geoderma, 1999, 93: 225-253
- [12] Wosten JHM, Pachepsky YA, Rawls WJ. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. Journal of Hydrology, 2001, 251: 123-150
- [13] Nemes A, Schaap MG, Wosten JHM. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 1 093-1 102
- [14] Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Advances in Soil Science, 1989, 9: 177-213
- [15] Minasny B, McBratney AB. The Neuro method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 352-361
- [16] Hodnett MG, Tomasella J. Marked differences between van Genuchten soil water retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer function developed for tropical soils. Geoderma, 2002, 108: 155-180
- [17] Cornelis WM, Ronsyn J, Van Meirvenne M, Hartmann R. Evaluation of pedotransfer functions for prediction the soil moisture retention curve. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 638-648
- [18] Tyler SW, Wheatcraft SW. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996
- [19] Gimenez D, Perfect E, Rawls WJ, Pachepsky YA. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: A review. Engineering Geology, 1997, 48: 161-183
- [20] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil waterproperties. I. Theory. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 1 231-1 238
- [21] Blöschl G. Scale and Scaling in Hydrology. Vienna, Austria: Technical University of Vienna, 1996
- [22] Wiens JA. The analysis of Landscape Patterns. Colorado, USA: Colorado State University, 1988
- [23] Isaaks EH, Srivastava RM. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford Univ. Press, 1989
- [24] Si BC. Spatial and scale-dependent soil hydraulic properties: A wavelet approach // Pachepsky YA. Scaling Methods in Soil Physics. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2003: 163-178
- [25] Tietje O, Tapkenhinrichs M. Evaluation of pedo-transfer functions. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 1 088-1 095
- [26] Wagner B, Tarnawski VR, Hennings V, Müller U, Wessolek G, Plagge R. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated hydraulic conductivity using an independent data set. Geoderma, 2001, 102: 275-297
- [27] Romano N, Palladino M. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. Journal of Hydrology, 2002, 265: 56-75
- [28] Nielsen DR, Wendroth O. Spatial and Temporal Statistics: Sampling Field Soil and Their vegetation. Reiskirchen: Catena, 2003
- [29] Goovaerts P, Chiang CN. Temporal persistence of spatial pattern for mineralizable nitrogen and selected soil properties. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2): 372-381
- [30] Wilson GV, Alfonsi JM, Jardine PM. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity of the subsoil of two forested watersheds. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 679-685
- [31] Bosch DD, West LT. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62: 90-98
- [32] Sobieraj JA, Elsenbeer H, Cameron G. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. Catena, 2004, 55: 49-77

- [33] Kravchenko AN, Boast CW, Bullock DG. Multifractal analyses of soil properties. *Agronomy Journal*, 1999, 91: 1 033-1 041
- [34] Seuront L, Lagadeuc FSY, Schertzer D, Lovejoy S. Universal multifractal analysis as a tool to characterize multiscale intermittent patterns: Example of phytoplankton distribution in turbulent coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 1999, 21: 87
- [35] Kachanoski RG, De Jong E. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. *Water Resource Research*, 1988, 24: 85-91
- [36] Kachanoski RG, Rolston DE, de Jong E. Spatial and spectral relationships of soil properties and microtopography: I. Density and thickness of A horizon. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49: 804-812
- [37] Webster R. Spectral analysis of gilgai soil. *Australian Journal of Soil Research*, 1977, 15: 176-194
- [38] Olsson J, Persson M, Albergel J, Berndtsson R, Zante P, Ohlstrom P, Nasri S. Multiscaling analysis and random cascade modeling of dye infiltration. *Water Resources Research*, 2002, 38(11): 1 263-1 274
- [39] Liu HH, Molz FJ. Multifractal analyses of hydraulic conductivity distributions. *Water Resources Research*, 1997, 33: 2 483-2 488
- [40] Kravchenko AN, Bullock DG, Boast CW. Joint multifractal analyses of Crop yield and terrain slope. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 1 279-1 290
- [41] Olsson J, Niemezynowicz J, Berndtsson R. Fractal analysis of high-resolution rainfall time series. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 23 265-23 274
- [42] Lee CK, Lee SL. Heterogeneity of surfaces and materials as reflected in multifractal analysis. *Heterog. Chemical Reviews*, 1996, 3: 269-302
- [43] Folorunso OA, Puente CE, Rolston DE, Pinzon JE. Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 284-294
- [44] Zeleke TB, Si BC. Scaling properties of topographic indices and crop yield: Multifractal and joint multifractal approaches. *Agronomy Journal*, 2004, 96: 1 082-1 090
- [45] Zeleke TB, Si BC. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69: 1 691-1 702
- [46] Zeleke TB, Si BC. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques. *Geoderma*, 2006, 134: 440-452
- [47] Lark RM, Webster R. Analysis and elucidation of soil variation using wavelets. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50: 185-206
- [48] Si BC, Farrell RE. Scale-dependent relationships between wheat yield and topographic indices: A wavelet approaches. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 577-588
- [49] Shu Q, Liu Z, Si B. Characterizing scale- and location- dependent correlation of water retention parameters with soil physical properties using wavelet techniques. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37: 2 284-2 292
- [50] Torrence C, Webster PJ. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *Journal of Climate*, 1999, 12: 2 679-2 690
- [51] Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11: 561-566
- [52] Si BC, Zeleke TB. Wavelet coherency analysis to relate saturated hydraulic properties to soil physical properties. *Water Resource Research*, 2005, 41: W11424, doi: 11410 11029/12005WR004118
- [53] Bergstrom S, Graham LP. On the scale problem in hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 1998, 211: 253-265
- [54] Braun P, Molnar T, Kleeberg HB. The problem of scaling in grid-related hydrological process modeling. *Hydrological Process*, 1997, 11: 1 219-1 230

Advances in Spatial Scaling Effects of Soil Hydraulic Properties

SHU Qiao-sheng, XIE Li-ya

(*Liaoning Institute of Soil Water Conservation, Chaoyang, Liaoning 122000, China*)

Abstract: It is very important to study the spatial scaling effects of soil hydraulic properties in eco-hydrological simulation and agricultural water-fertilizer precision management. Some methods, including statistics, stochastic modeling, pedotransfer function (PTF) and fractal theory, can process the spatial variability research for hydraulic properties. Spatial variability modes may vary with the scale because the scales of physical, chemical and biological processes are different. Geostatistical, spectral, multifractal and wavelet analyses are proper ways to study the scaling effects of hydraulic properties, but some problems still exist, of which the scaling transformation is very important all the along. Moreover, some new techniques such as Geographical Information System (GIS) should be integrated into the research.

Key words: Soil hydraulic properties, Spatial variability, Scaling effects, Multifractal analysis, Wavelet analysis