

分形方法在土壤特性空间变异研究中的应用

方萍, 吕成文, 朱艾莉

(安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽芜湖 241000)

摘要: 土壤特性空间变异研究对土壤制图、精准施肥、农业可持续发展等方面具有重要意义。分形几何学是一种探索复杂性的事物的新科学方法和理论, 在研究土壤特性空间变异中将大有可为。本文主要综述了 2000 年以后分形理论在土壤物理特性、化学特性、水分特征及状态参数的空间变异研究中的应用进展, 最后对分形理论在土壤特性空间变异研究中的发展方向进行了展望。

关键词: 分形; 土壤特性; 空间变异性

中图分类号: S152.7

环境的空间异质性是群落中物种能够生存^[1-2]和种群持续生长^[3]的主要因素。自然界土壤分布极为复杂, 同一质地的土壤在同一平面或不同深度上并不完全均质, 其他土壤物理特性参数, 如体积质量(容重)、粒径组成等在各点的值也并不相同。这种土壤特征在空间分布上的非均一性, 称为土壤特性的空间变异性^[4]。土壤特性空间变异性的研究即是根据观测或取样测定的资料, 分析土壤各特性参数的空间变化特征、参数自身及各参数间的空间关系, 以及将分析成果应用于确定合理的取样或观测点的数目, 对未测点的参数进行最优估值等, 还可结合标定理论的应用分析预测状态变量的空间分布^[5]。土壤特性空间变异的研究可以为土壤制图、精准施肥、作物种植规划等提供科学依据。

1 分形方法在土壤特性空间变异研究中的应用

土壤特性空间变异的研究方法多是地统计学方法, 分形方法使用较少。把分形理论引入研究土壤特性空间变异, 不仅会弥补以前方法的不足, 完善土壤特性空间变异研究方法, 还会促进其多元化发展。分形方法既可以用于定量地分析土壤的物理参数和状态参数如土壤机械组成、含水量、土壤养分和土壤微量元素、土壤力学参数等, 也可用于确定土壤空间变异尺度, 揭示土壤特性的空间变异程度。关于分形理论已有相关文献介绍。现就涉及分形的一些参数和其在土壤特性空间变异研究中的意义加以介绍。描述分形

特征的一个重要参数是分形维数, 简称分维。它是描述不规则物体或分形体的主要指标, 分维不同, 物体的复杂程度或它的动态演化过程也就不同^[6]。分维值 D 表征样本之间的结构性, 可以表示土壤特性的均匀度。分形维数 D 的大小是指事物复杂程度的一种量度^[7]。在滑动平均加权的基础上加入了奇异性因子, 多维分形插值可用于研究土壤元素空间分布。

1.1 在土壤物理特性研究中的应用

土壤物理特性空间变异的研究大多是针对土壤的体积质量、颗粒组成、各种含水量、导水率、扩散率、渗透系数等的研究, 确定其相关距离、合理的取样数及克里格插值图, 以此为生产实践提供指导意义^[8]。

土壤被认为是一种具有分形特征的分散多孔介质, 土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数, 在维数上表现出黏粒含量越高、质地越细、分形维数越高^[9]。任雪等^[10]研究结果表明: 土壤沙粒含量越高, 分形维数越小; 粉粒和黏粒含量越高, 分形维数越大。

分维值 D 表征样本之间的结构性。 D 值越小, 表示样本之间土壤特性的差异越大, 即均一程度越差; 相反, D 值越大, 表示样本之间土壤特性值的差异越小, 即均一性程度越好^[7]。苏里坦等^[11]将分形理论与地统计学原理相结合, 计算了该流域地下水埋深和自然植被盖度的分形维数和变异系数, 认为分形维数可表示样本特性在空间的不均一程度, 分维与均匀度呈反比。李小昱等^[12]对农田土壤含水量和坚实度的空间变异性研究中, 用分形理论计算了含水量与坚实度的

分形维数分别为1.80, 1.64。分维值 D 可表示土壤特性值在空间的不均一程度, D 值较大, 土壤特性随空间的变化有较大的随机性, 均一程度较好, 采样间距可大些。

刘继龙等^[13]等对土壤含水率的广义分形维数和多重分形谱进行研究后发现降雨或灌溉后, 土壤含水率的空间分布趋于均匀, 短距离变异占主要地位; 土壤水分经长时间蒸发和植物蒸腾后, 空间异质性增强, 长距离变异影响逐渐显著。冯雪等^[14]将地统计学原理与分形理论相结合, 对研究区域 0~100 cm 的土壤水分空间变异特性进行初步探讨。结果表明: 随着深度的增加, 分维值减小。说明土层越深, 土壤含水量值的差异越小, 空间依赖性越强。而土层平均含水量越高, 分维数越低。

土壤颗粒分形维数越高, 表征土壤结构越紧实, 而分形维数越小, 则土壤质地相对松散、通透性较好^[15]。土壤中 >0.25 mm 的团聚体及水稳性团聚体含量越高, 团粒结构的分形维数越小, 土壤肥力越高, 土壤越有良好的结构与稳定性^[16]。

分形维数与土壤体积质量成显著正相关, 与有机质含量成显著负相关, 与非毛管孔隙度和总孔隙度成极显著负相关, 而与毛管孔隙度的相关性不明显^[17]。

黄土粒度分维值可以揭示第四纪以来东亚季风在周期和强度上的变化及沉积区成壤环境的变化^[18-19]。红土母质显示风成特性, 风化强度增大, 黏粒含量增加, 体积分维值越大, 平均粒径减小, 分选系数增大。红土体积分维特征可以指示红土所经历的化学风化的强弱^[20]。

土壤粒径的分形维数是表征土壤物理性质的重要参数之一, 能反映土壤质量。土壤特性空间变异的研究基本是围绕“土壤沙粒含量越高分形维数越小, 粉粒和黏粒含量越高, 分形维数越大。”这个结论进行深入的。可以利用分形维数对土壤的粗粒化和理化性质变化的趋势进行分析, 进而对土壤荒漠化程度、土壤退化程度和地貌石漠化程度进行判断。分维越小, 土壤中的黏粒含量越少, 体积质量越小, 土壤总孔隙度越大, 土壤相对越分散, 土壤的通气性就越好, 土壤结构性也就越好。红土中黏粒和粉砂的体积百分含量是影响其体积分维大小的重要因素。黏粒含量越大, 体积分维越大, 而黏粒含量主要受控于红土经历的风化程度, 所以红土粒度体积分维值的高低旋回可以指示红土的成土环境。黏粒体积分数增大引起土壤颗粒分维增加的原因在于细颗粒的比表面积比粗颗粒的大^[21]。

1.2 在土壤化学特性研究中的应用

传统的土壤化学性质空间变异研究主要是通过测量土壤养分、盐分等的数值, 在取得数据的基础上, 对这些数据进行最优无偏内插估计, 或模拟这些数据的离散性、波动性。如果研究尺度较大或取样数目较大时, 将会加大实验数量, 应用这种方法将有很大困难。目前应用分形理论研究土壤化学性质的空间分布特征时, 多数情况下用单一分形维数表征土壤化学性质的空间分布特征。

Mendonca 等^[22]和 Zhuang 等^[23]的研究表明, 土壤结构以及土壤有机质的变化, 可以通过分形维数来描述。龙健等^[24]研究发现: 土壤颗粒分形维数与土壤有机质之间存在显著的线性关系 ($p < 0.01$)。分形维数能较好地表征喀斯特石漠化过程中土壤养分状况。赵来等^[25]在安徽土壤普查数据的基础上, 对皖南地区水稻土的分形特征进行了研究, 在一定范围内, 分维数随着土壤的吸收性能、氮元素含量及有机质含量的增大而增大。任雪等^[10]通过相关研究得出结论: 分形维数不但与土壤中的有机质、全氮、全磷含量呈极显著的正相关, 而且与可被植物吸收利用的速效形态养分碱解氮、速效钾、速效磷等的含量呈极显著的正相关关系。

Sokołowska 等^[26]探讨发现: 分形维数和有机质含量的线性关系不明显, 是否呈线性关系取决于样本的混合组分之间的相互作用强弱。Yeten 等^[27]运用分形地统计学和神经网络相方法对土耳其东南部地区硝酸盐的累积特性进行了研究。Bekele 等^[28]应用分形地统计学分析了耕地土壤 EC 的空间变异性及影响因素。赵良菊等^[29]研究发现: 土壤有机质及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的分形维数分别为 1.891 及 1.912, 土壤有效磷及钾的分形维数均为 1.984; 指出土壤特性的分形维数越低, 土壤特性空间分布的均一程度越差, 即空间变异程度较大, 反之, 其空间分布较均一, 变异程度低。赵锐峰等^[30]从不同层次土壤盐分的分维图得出结论: 随机性因素强、结构性差、分布复杂时分维数高; 相反, 当随机性因素差、结构性好、分布简单时分维数低。

通常的统计方法只能描述地球化学元素围绕均值周围的变化规律, 为了更有效地研究地球化学元素异常值的分布规律, 必须采用多维分形和高阶矩统计方法^[31]。袁峰等^[32]用多维分形方法研究了铜陵地区土壤中 Cd 元素的空间分布特征, 结果表明: 多维分形方法合理地强化了局部区域的估值结果, 可以较好地表达土壤元素空间分布的局部奇异性。

土壤特性分形值越大, 土壤特性随空间变化有较

大的随机性,均一程度越好,变异程度越低,土壤特性可能受人为作用的影响较大,反之受结构性因素如土壤母质、地形、地貌、气候等的影响较大。分形插值对刻画土壤元素空间分布的局部异常性和污染效果较好,由于不是遵循最优无偏估计对描述元素分布的一般特征效果不明显。

1.3 在土壤水分特征及状态参数研究中的应用

土壤水分特性参数对描述土壤水分及污染物的运移有重要作用。由于土壤结构和地形的复杂性,使得土壤水分特性具有很大的空间变异性。从而给土壤水分实地测量带来很大困难。分形方法通过间接方法估测土壤水分特征参数就可以很好地解决这个问题。分形几何的应用已被广泛用于模拟多孔介质的结构如土壤及其水力特性^[33]。

Ghanbarian-Alavijeh 和 Millán^[34]研究表明:表面分形维数 (D_S) 和土壤在永久萎蔫点含水量 (θ_{pwp}) 呈正相关。詹卫华^[35]基于 Menger 海绵结构推导出一种反映土壤孔隙结构特征的水分特征曲线模型,同时分析了基于颗粒质量分布的分形维数与水分特征曲线拟合分形维数的相关关系,并利用该相关关系预测对应土壤的水分特征曲线。黄冠华和詹卫华^[36]对水力传导度空间变异性的分形进行了模拟。姜娜等^[37]将分形理论和地统计学方法结合起来对坡面土壤入渗特性的空间变异进行了研究。稳定入渗率、均入渗率和前 30 min 累积入渗量 3 个参数的分形值 D 分别为 1.88、1.92 与 1.85,样本之间土壤特性值的差异较小,短距离的变异影响占主导地位,采样间距可缩短一些。王薇等^[38]用包括方位-分维法在内的 4 种插值方法研究了渗流弥散的空间变异性,认为方位-分维法是一种体现分形思想的、行之有效的估值方法,有着良好的应用前景。

土壤水分特征参数空间变异,首先需要解决土壤水分特征参数的测定问题,分形理论通过利用分形维数与表征土壤水分特征的参量建立相关关系就可以间接测定土壤水力特征参数。分形还可以预测土壤水分特征曲线和定量描述参数的空间变异特征。分形理论在研究土壤水分特征及状态参数时将大有可为。

2 分形方法在土壤特性空间变异研究中的应用展望

分形理论在对土壤空间特性量化研究上取得了一定进展,在对土壤特性参数与分形维数的关系研究上取得了很多成果。由于我国对分形理论的研究起步较晚,分形理论在土壤特性空间变异研究中还存在许

多问题需要解决。

(1) 土壤并不是理想意义上的分形,它只是在一定的空间尺度范围内才有分形特征,具体表现为土壤特性的自相关范围。土壤特性的自相关范围与土壤样本间距的设置之间的影响有待深入研究。

(2) 分形插值可以用来模拟起伏不平的地面,还可以解决空间插值问题,研究把二者结合起来解决土壤特性在仿真地面的空间插值问题很有现实意义。

(3) 分维值与土壤特性均匀度的关系还需进一步研究。

(4) 分维值有多种算法,导致得出的结论不统一,缺少对不同分维值的最优算法研究。

参考文献:

- [1] 张宏,史培军,郑秋红. 半干旱地区天然草地灌丛化与土壤异质性关系研究进展. 植物生态学报, 2001, 25(3): 366-370
- [2] 王政权. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950
- [3] Ellner SP. Habitat structure and population persistence in an experimental community. Nature, 2001, 412: 538-543
- [4] Hillel D. Application of soil physics. New York: Academic Press, 1980: 21-50
- [5] 李毅,刘建军. 土壤空间变异性研究方法. 石河子大学学报(自然科学版), 2000, 4(4): 331-337
- [6] 路琴,杨明,何春霞. 分形理论及其在农业科学与工程中的应用. 土壤通报, 2009, 40(3): 716-720
- [7] 龚元石,廖超子,李保国. 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
- [8] 姜秋香,付强,王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展. 水土保持研究, 2008, 15(1): 250-253
- [9] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分析特征. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74
- [10] 任雪,褚贵新,王国栋,乔旭,宋日权,王绍明. 准噶尔盆地南缘绿洲-沙漠过渡带“肥岛”形成过程中土壤颗粒的分形研究. 中国沙漠, 2009, 29(2): 298-304
- [11] 苏里坦,宋郁东,张展羽. 天山北麓地下水与自然植被的空间变异及其分形特征. 山地学报, 2005, 23(1): 14-20
- [12] 李小昱,雷廷武,王为. 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): 61-64
- [13] 刘继龙,马孝义,张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形. 农业工程学报, 2010, 26(1): 81-86
- [14] 冯雪,张振华,姚付启,李清翠,张燕. 烟台果园土壤水分空间变异规律研究. 土壤学报, 2009, 46(2): 226-230
- [15] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1 896-1 899

- [16] 封磊, 洪伟, 吴承祯, 宋萍. 杉木-观光木混交林不同经营模式土壤团粒结构的分形特征. 山地学报, 2004, 22(3): 315-320
- [17] 王富, 贾志军, 董智, 李红丽, 甄宝艳, 孙明高, 张卫平. 不同生态修复措施下水库水源涵养区土壤粒径分布的分形特征. 水土保持学报, 2004, 22(3): 315-320
- [18] 刘连文, 陈骏, 季峻峰, 鹿化煜, 陈旸. 陕西洛川黄土的粒度分维值及其意义. 高校地质学报, 1999, 5(4): 412-417
- [19] 毛龙江, 刘晓燕, 许叶华. 南京江北地区下蜀黄土粒度分形与全新世环境演变. 中国沙漠, 2006, 26(2): 264-267
- [20] 姜永见, 朱丽东, 叶玮, 李凤全, 李建武. 庐山JL剖面红土粒度体积分形特征及其环境意义. 山地学报, 2008, 26(1): 36-44
- [21] 李毅, 李敏, 曹伟, 张江辉. 农田土壤颗粒尺寸分布分维及颗粒体积分数的空间变异性. 农业工程学报, 2010, 26(1): 94-102
- [22] Mendonca ED, Silva AC, Fontes MPF, Reis EL. Fractal dimension of humic acids as influenced by complex formation. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35: 2 747-2 755
- [23] Zhuang J, McCarthy JF, Perfect E, Mayer LM, Jastrow JD. Soil water hysteresis in water-stable microaggregates as affected by organic matter. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72: 212-220
- [24] 龙健, 李娟, 邓启琼, 李阳兵, 熊康宁. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639
- [25] 赵来, 吕成文. 皖南地区水稻土的分形特征研究. 安徽师范大学学报, 2005, 28(3): 352-355
- [26] Sokolowska Z, Warchulska P, Sokolowski S. Trends in soil fractal parameters caused by accumulation of soil organic matter as resulting from the analysis of water vapor adsorption isotherms. Ecological Complexity, 2009, 6: 254-262
- [27] Yeten B, Gumrar F. The use of fractal geostatistics and artificial neural networks for carbonate reservoir characterization. Transport in Porous Media, 2000, 41: 173-195
- [28] Bekel EA, Hudnall WH, Daigle JJ. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties. Journal of Terramechanics, 2005, 42(3/4): 339-351
- [29] 赵良菊, 肖洪浪, 郭天文, 赖丽芳, 杨文玉, 包兴国. 甘肃省灌漠土土壤养分空间变异特征. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 70-74
- [30] 赵锐锋, 陈亚宁, 洪传勋, 李卫红, 白云岗. 塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异和格局分析——以岳普湖绿洲为例. 地理研究, 2008, 27(1): 136-143
- [31] 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(3): 311-318
- [32] 袁峰, 白晓宇, 张颖慧, 周涛发, 张鑫, 陈兴仁, 陈永宁, 陈富荣, 贾十军. 典型矿集区土壤中重金属元素的多维分形空间分布特征研究——以铜陵矿集区土壤中Cd为例. 土壤通报, 2009, 40(1): 167-170
- [33] Cihan A, Perfect E, Tyner JS. Water retention models for scale-variant and scale invariant drainage of mass prefractional porous media. Vadose Zone J., 2007, 6: 786-792
- [34] Ghanbarian-Alavijeh B, Millán H. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. Geoderma, 2009, 51: 224-232
- [35] 詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟. 水科学进展, 2002, 13(1): 55-60
- [36] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39(4): 490-497
- [37] 姜娜, 邵明安, 雷廷武. 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
- [38] 王薇, 罗宏, 张征, 吕连宏, 迟志淼, 李延峰, 陈袁袁. 渗流弥散的空间变异性及空间插值方法的比较研究. 科学技术与工程, 2005, 5(18): 1 252-1 257

Applied Studies of Fractal Theory on Spatial Variability of Soil Properties: A Review

FANG Ping, LV Cheng-wen, ZHU Ai-li

(College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: Spatial variability of soil properties is significant of soil mapping, precision fertilization and sustainable development of agriculture. Fractal geometry is a new scientific method and theory to explore complexity, as a tool to research the spatial variability of soil properties will have a brilliant future. This paper summarized the literatures of the fractal theory in the spatial variability of soil physical properties, chemical properties, moisture characteristics and state parameters after 2000. Finally, the prospects of the application of the fractal theory were probed.

Key words: Fractal, Soil properties, Spatial variability