

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.007

不同土层土壤特性空间变异性关系的联合多重分形研究*

刘继龙¹ 马孝义² 付强¹ 张振华³

(1. 东北农业大学节水农业黑龙江省高校重点实验室, 哈尔滨 150030; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 鲁东大学地理与规划学院, 烟台 264025)

【摘要】 应用联合多重分形理论研究了0~20 cm 土层土壤含水率、土壤电导率、砂粒含量、粘粒含量、粗粉粒含量、土壤粒径分布体积分形维数、土壤容重、有机质含量的空间变异性与20~40 cm 土层对应变量空间变异性在多尺度上的相互关系。结果表明:相对于0~20 cm 土层上述变量的空间变异性,20~40 cm 土层粗粉粒含量、有机质含量空间变异性的变化率最大,土壤电导率、粘粒含量、土壤粒径分布体积分形维数空间变异性的变化率最小,砂粒含量、土壤含水率、土壤容重空间变异性的变化率介于两者之间;多尺度上,0~20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量与20~40 cm 土层对应变量空间变异性在多尺度上的相关性依次减弱。

关键词: 土壤特性 空间变异性 多尺度 联合多重分形

中图分类号: S152.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)05-0037-06

Joint Multifractal of Relationship between Spatial Variability of Soil Properties in Different Soil Layers

Liu Jilong¹ Ma Xiaoyi² Fu Qiang¹ Zhang Zhenhua³

(1. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Universities in Heilongjiang Province, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Geography and Planning Department, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract

Relationship between spatial variability of soil water content, soil electrical conductivity, sand content, clay content, slit content, fractal dimension of soil particle-size distribution, bulk density and organic matter content in 0~20 cm soil layer and their spatial variability in 20~40 cm soil layer at multiple scale was studied with joint multifractal. The results showed that changing ration for spatial variability of slit content and organic matter content was the largest, the one for spatial variability of soil electrical conductivity, clay content and fractal dimension of soil particle-size distribution was the least, and the one for spatial variability of sand content, soil water content and bulk density lay between the two in 20~40 cm soil layer compared with spatial variability of corresponding variables in 0~20 cm soil layer; at multiple scale, relationship between spatial variability of soil water content, bulk density, organic matter content, clay content, sand content, soil electrical conductivity, fractal dimension of soil particle-size distribution and slit content in 0~20 cm soil layer and corresponding soil properties in 20~40 cm soil layer decreased gradually.

Key words Soil properties, Spatial variability, Multiple scale, Joint multifractal

收稿日期: 2011-06-08 修回日期: 2011-07-08

* 国家自然科学基金资助项目(50879072)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511046)、黑龙江省博士后资助经费项目(LBH-Z11226)和节水农业黑龙江省高校重点实验室开放基金资助项目(2011KFJ02)

作者简介: 刘继龙, 讲师, 博士, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: dragon6688495@yahoo.com.cn

引言

土壤特性存在空间变异性,研究和解决这一问题具有重要意义^[1]。国内外针对此问题已开展了大量研究^[2-12],并取得了很多成果,研究内容涉及土壤物理特性、土壤化学特性和土壤生物特性等,研究尺度包含小尺度、中尺度和大尺度等尺度,研究方法包括传统统计学方法、地统计学方法和分形理论等方法。土壤特性空间变异性的研究成果也在精确灌溉管理分区和精确养分管理分区等方面得到了广泛应用^[13]。

土壤是三维自然空间实体,在水平方向和垂直方向上都存在空间变异性,目前相关研究主要集中在某一水平面或不同水平面上,针对垂直方向的不同土层土壤特性空间变异性之间相互关系的研究较少。不同土层土壤特性空间变异性之间相互关系的研究有助于呈现土壤特性在三维空间上的变异特征,使土壤过程的模拟更贴近真实情况,也有助于确定如何通过某一土层土壤特性的空间变异特征反映其他土层土壤特性的空间变异特征。联合多重分形理论能够确定同一几何支撑上不同研究对象在多尺度上的相互关系^[2-3],为此,本文利用联合多重分形理论研究同一横断面0~20 cm土层土壤含水率、土壤电导率、砂粒含量(质量分数)、粘粒含量(质量分数)、粗粉粒含量(质量分数)、土壤粒径分布体积分形维数、土壤容重、有机质含量(质量分数)空间变异性与20~40 cm土层对应变量空间变异性在多尺度上的相互关系。

1 材料与方法

1.1 试验方法

如图1所示,在一横断面(南北方向,位于杨凌一级阶地的一林地内)上每隔15 m布置一个测点(共32个测点),用环刀采取每一个试验测点0~20 cm和20~40 cm土层原状土,并取散土。土壤容重和土壤含水率采用干燥法测定;土壤电导率用W. E. T土壤水分、温度、电导率测量仪测定;有机质含量用稀释热法测定;土壤颗粒大小组成用Mastersizer 2000激光粒度仪测定,然后分为0~0.001 mm、0.001~0.002 mm、0.002~0.005 mm、0.005~0.01 mm、0.01~0.02 mm、0.02~0.05 mm、0.05~0.1 mm、0.1~0.2 mm、0.2~0.25 mm、0.25~0.5 mm和0.5~1 mm共11组,此外,0.05~1 mm、0.01~0.05 mm、0~0.001 mm土壤颗粒分别划分为砂粒、粗粉粒、粘粒。

土壤粒径分布体积分形维数 D 满足^[14]

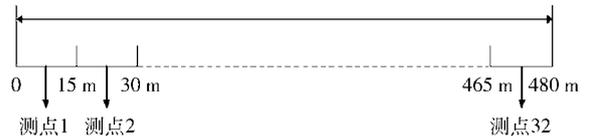


图1 试验测点空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of experimental site

$$\lg \frac{V(r < R)}{V_T} = (3 - D) \lg \frac{R}{R_{\max}} \quad (1)$$

式中 r ——测定尺度 R ——某一特定粒径
 R_{\max} ——最大土壤颗粒粒径
 V_T ——土壤颗粒总体积
 $V(r < R)$ ——粒径小于 R 的颗粒体积

1.2 研究方法

利用联合多重分形理论研究0~20 cm土层土壤含水率、土壤电导率、砂粒含量、粘粒含量、粗粉粒含量、土壤粒径分布体积分形维数、土壤容重、有机质含量空间变异性与20~40 cm土层对应变量空间变异性在多尺度上的相互关系。许多文献资料已对联合多重分形理论进行了详细阐述,具体计算过程可参照文献[3,15~16]。

2 结果分析

2.1 土壤特性空间变异性在垂直方向上的变化率

由图2(图中 $\alpha(q)$ 表示奇异指数, $f(q)$ 表示奇异指数的维数分布函数)可以看出,0~20 cm土层与20~40 cm土层有机质含量、土壤粒径分布体积分形维数、土壤含水率、土壤电导率、土壤容重、粗粉粒含量、砂粒含量、粘粒含量的多重分形谱宽度均有所差异,多重分形谱左偏或右偏的程度也有所差异。为量化上述变量空间变异性在垂直方向上的变化,以0~20 cm土层上述变量的多重分形谱宽度为基准,计算了20~40 cm土层上述变量多重分形谱宽度的变化率,变化率定义为20~40 cm土层上述变量多重分形谱宽度与0~20 cm土层上述变量多重分形谱宽度差值的绝对值除以0~20 cm土层对应变量的多重分形谱宽度再乘以100%。20~40 cm土层有机质含量、粗粉粒含量多重分形谱宽度的变化率最大,分别为144.65%、108.49%;土壤电导率、粘粒含量、土壤粒径分布体积分形维数多重分形谱宽度的变化率最小,分别为6.06%、8.61%、16.67%;砂粒含量、土壤含水率、土壤容重多重分形谱宽度的变化率介于上述两者之间,分别为45.99%、58.14%、74.36%。

上述分析表明土壤含水率、土壤电导率、砂粒含量、粘粒含量、粗粉粒含量、土壤粒径分布体积分形维数、土壤容重、有机质含量在垂直方向上的变化呈

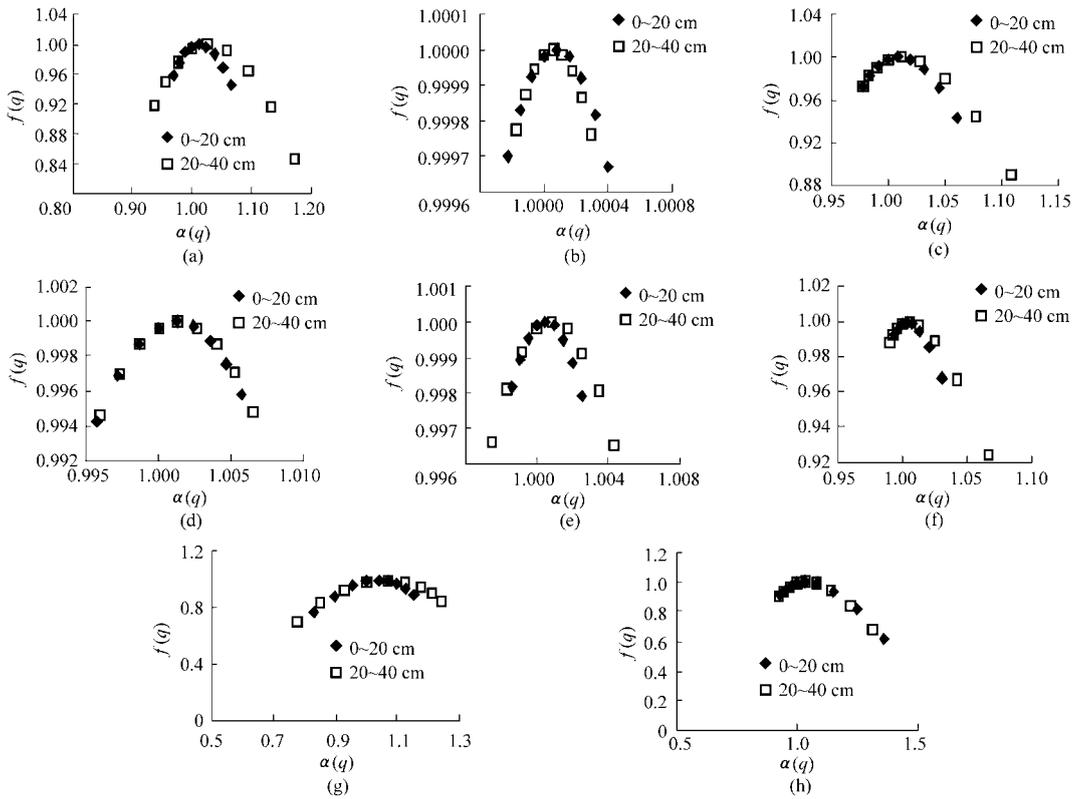


图 2 0~20 cm 与 20~40 cm 土层各土壤特性参数的多重分形谱

Fig. 2 Multifractal spectrums of soil properties parameters in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

(a) 有机质含量 (b) 土壤粒径分布体积分形维数 (c) 土壤含水率 (d) 土壤电导率 (e) 土壤容重 (f) 粗粉粒含量 (g) 砂粒含量 (h) 粘粒含量

现不同的特征。了解和掌握土壤特性在不同深度的空间变异特征,有助于了解土壤特性在三维空间上的变化特征,有助于使模拟的土壤过程更接近真实状态,实际中,由于采样时间、人力物力等因素的影响,在不同土层进行大量取样受到限制,能否利用某一土层或少数几个土层土壤特性的空间变异特征来反映其他土层土壤特性的空间变异特征,即探讨分析不同土层土壤特性空间变异性之间的关系是非常必要的。为确定不同土层上述变量空间变异性之间的相互关系,首先计算了某一尺度上(以文中取样间距采样获取的数据)0~20 cm 土层与 20~40 cm 土层上述变量的相关性。0~20 cm 土层粗粉粒含量、砂粒含量、土壤粒径分布体积分形维数、粘粒含量、有机质含量、土壤电导率、土壤容重、土壤含水率与 20~40 cm 土层对应变量之间的相关性逐渐增大,相关系数分别为 0.24、0.29、0.36、0.37、0.47、0.50、0.61、0.62。国内外研究已表明,土壤特性的空间变异性具有尺度效应,因而有必要探讨分析不同土层上述变量空间变异性在不同尺度上的相互关系。

2.2 不同土层各土壤特性参数空间变异性之间的相互关系

为探讨分析不同土层各土壤特性参数空间变异

性在不同尺度上的相互关系,绘制了 0~20 cm 土层与 20~40 cm 土层各参数的联合多重分形谱,如图 3 所示。由图 3 可知,各土壤特性参数的联合多重分形谱呈现不同的变化趋势,为更加形象直观地反映不同土层各土壤特性参数空间变异性在多尺度上的相互关系,绘制了上述各土壤特性参数联合多重分形谱对应的灰度图,如图 4 所示。图 3 和图 4 中的 α_{20} 、 α_{40} $f(\alpha_{20}, \alpha_{40})$ 分别表示 0~20 cm 土层某一土壤特性参数的奇异指数、20~40 cm 土层对应土壤特性参数的奇异指数、0~20 cm 土层某一土壤特性参数的奇异指数与 20~40 cm 土层对应变量奇异指数的联合维数分布函数。

从图 4 可以看出,0~20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量与 20~40 cm 土层对应变量联合多重分形谱的灰度图由沿对角线方向伸展且由集中趋于分散,基于联合多重分形原理^[3],说明土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量与 20~40 cm 土层对应变量在多尺度上的相关性依次降低。为进一步定量分析土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体

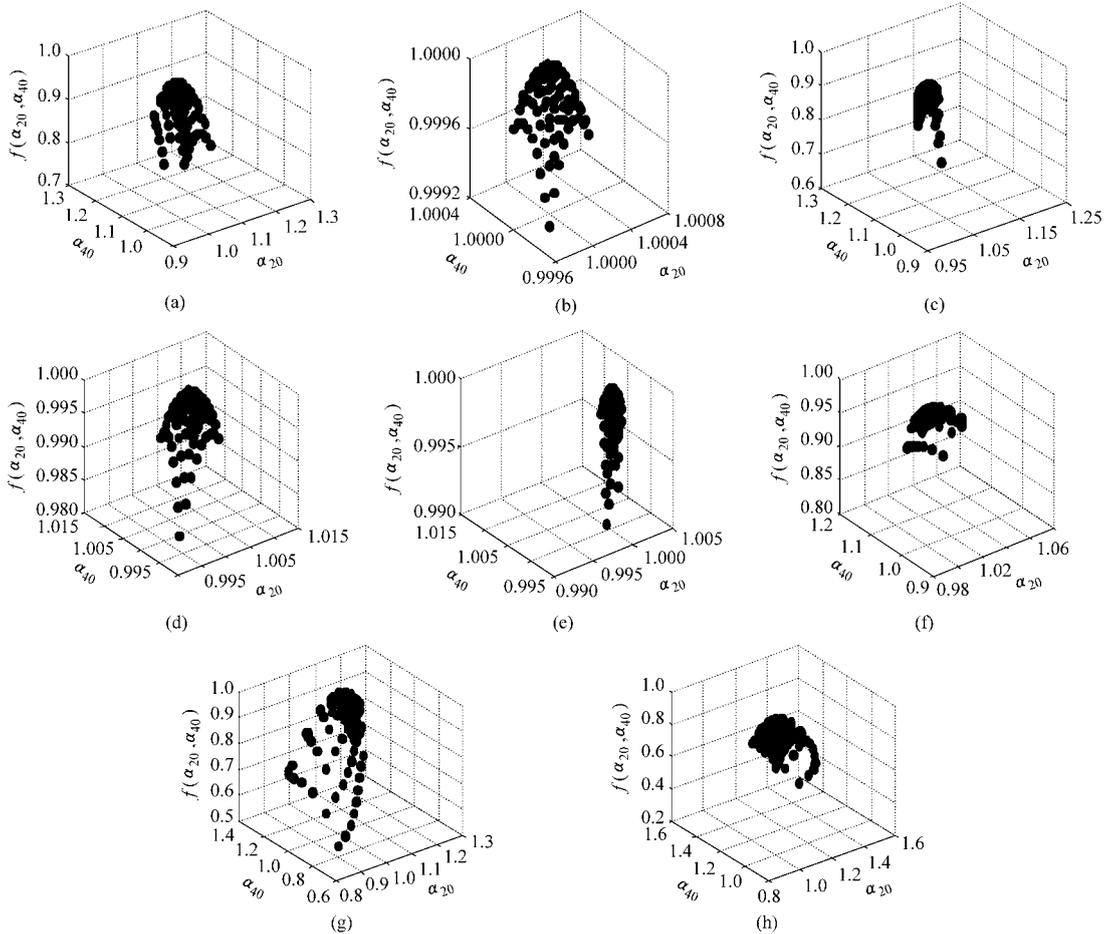


图3 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层各土壤特性参数的联合多重分形谱

Fig.3 Joint multifractal spectrums between soil properties parameters in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

(a) 有机质含量 (b) 土壤粒径分布体积分形维数 (c) 土壤含水率 (d) 土壤电导率
(e) 土壤容重 (f) 粗粉粒含量 (g) 砂粒含量 (h) 粘粒含量

分形维数、粗粉粒含量与 20~40 cm 土层对应变量空间变异性在多尺度上的相互关系,求解了 0~20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量的奇异指数与 20~40 cm 土层对应变量奇异指数之间的相关性。0~20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量与 20~40 cm 土层对应变量的相互关系依次降低,相关系数分别为 0.97、0.92、0.78、0.68、0.64、0.62、0.58、0.19,即不同土层上述变量空间变异性在多尺度上的相互关系依次减弱。联合多重分形分析得出的 0~20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量与 20~40 cm 土层对应变量在多尺度上的相互关系,与 2.1 节中在某一尺度上得出的 0~20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含

量与 20~40 cm 土层对应变量的相互关系有较大差异,多尺度分析能更深入地揭示不同土层上述变量空间变异性之间的相互关系,依据在多尺度上得出的这种相互关系能更好地判定哪些变量在深层上的空间变异特征能够用来反映对应变量在表层上的空间变异特征,也有助于了解研究变量在三维空间上的变化特征。

3 结束语

研究分析了土壤含水率、土壤电导率、砂粒含量、粘粒含量、粗粉粒含量、土壤粒径分布体积分形维数、土壤容重、有机质含量空间变异性在垂直方向上的变化率,在此基础上利用联合多重分形研究分析了不同土层上述变量空间变异性在多尺度上的相互关系。结果表明:相对于 0~20 cm 土层上述变量的空间变异性,20~40 cm 土层粗粉粒含量、有机质含量空间变异性的变化率最大,土壤电导率、粘粒含量、土壤粒径分布体积分形维数空间变异性的变化率最小,砂粒含量、土壤含水率、土壤容重空间变异

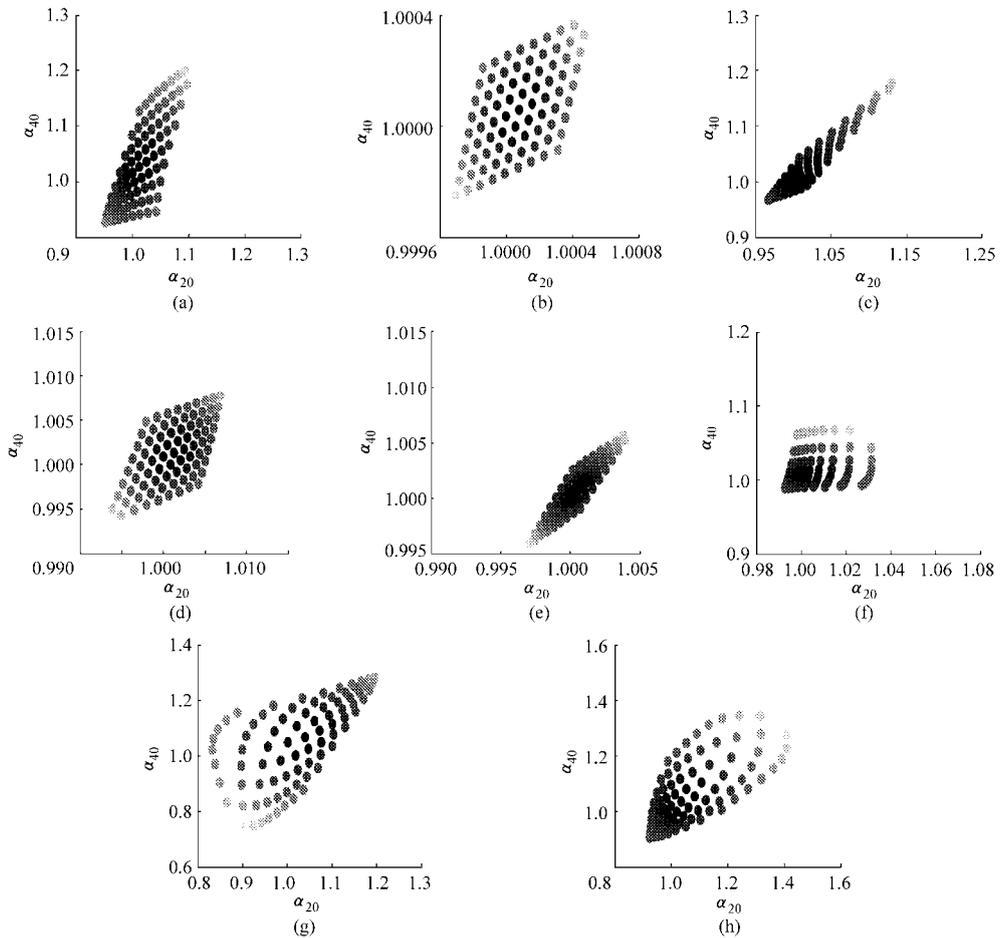


图 4 0 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 40 cm 土层各土壤特性参数联合多重分形谱的灰度图

Fig. 4 Grayscale image of joint multifractal spectrums between soil properties parameters in 0 ~ 20 cm and 20 ~ 40 cm soil layers

(a) 有机质含量 (b) 土壤粒径分布体积分形维数 (c) 土壤含水率 (d) 土壤电导率
(e) 土壤容重 (f) 粗粉粒含量 (g) 砂粒含量 (h) 粘粒含量

性的变化率介于上述两者之间；某一尺度上得出的不同土层上述变量之间的相互关系与在多尺度上得出的相互关系有较大差异，在多尺度上，0 ~ 20 cm 土层土壤含水率、土壤容重、有机质含量、粘粒含量、砂粒含量、土壤电导率、土壤粒径分布体积分形维数、粗粉粒含量与 20 ~ 40 cm 土层对应变量之间的

相关性依次降低，即不同土层上述变量空间变异性之间的相互关系依次减弱，依据在多尺度上得出的这种相互关系能更好地判定哪些变量在深层上的空间变异性能够用来反映对应变量在表层上的空间变异性，也有助于了解上述变量在三维空间上的变化特征。

参 考 文 献

- 刘继龙. 土壤水分特性的分形特征与传递函数研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
Liu Jilong. Fractal characteristics of soil water properties and their pedo-transfer functions [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010. (in Chinese)
- Zelege T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4):440~452.
- Zelege T B, Si B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69(6):1691~1702.
- 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. 水科学进展, 2010, 21(2):214~221.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedotransfer functions [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2):214~221. (in Chinese)
- 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):46~52.

- Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):46~52. (in Chinese)
- 6 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):81~86.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 81~86. (in Chinese)
- 7 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):11~16.
Hu Wei, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 11~16. (in Chinese)
- 8 李敏, 李毅, 曹伟, 等. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1 210~1 218.
Li Min, Li Yi, Cao Wei, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content at different sampling grid scales under plastic mulch drip irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1 210~1 218. (in Chinese)
- 9 Zheng Z, Zhang F R, Ma F Y, et al. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field [J]. Geoderma, 2009, 149(3~4):243~248.
- 10 R  th B, Lennartz B. Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in Southeast China [J]. Pedosphere, 2008, 18(4):409~420.
- 11 Douaik A, Meirvenne M V, Tóth T. Statistical methods for evaluating soil salinity spatial and temporal variability [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2007, 71(5):1 629~1 635.
- 12 陈翠英, 江永真, 袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10):121~124.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10):121~124. (in Chinese)
- 13 姜秋香, 付强, 王子龙. 改进的蚁群聚类在精准灌溉管理分区中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):37~42.
Jiang Qiuxiang, Fu Qiang, Wang Zilong. Application of improved ant colony clustering method in the delineation of site-specified irrigation management zones [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 37~42. (in Chinese)
- 14 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. 土壤, 2009, 41(3):396~401.
Ci En, Yang Linzhang, Cheng Yueqin, et al. Volume fractal property of soil particle size distribution of paddy soils cultivated for different years [J]. Soils, 2009, 41(3): 396~401. (in Chinese)
- 15 Meneveau C, Sreenivasan K R, Kailasnath P, et al. Joint multifractal measures: theory and application to turbulence [J]. Phys. Rev. A, 1990, 41(2):894~913.
- 16 Eghball B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(2):339~346.

(上接第 48 页)

- 15 Evertsz C J G, Mandelbrot B B. Multifractal measures (appendix B) [M]//Peitgen H O, Jurgens H, Saupe D. Chaos and Fractals. New York: Springer-Verlag, 1992: 922~953.
- 16 Miranda J G V, Montero E, Alves M C, et al. Multifractal characterization of saprolite particle-size after topsoil removal [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4): 373~385.
- 17 Takele B Zeleke, Bing C Si. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4): 440~452.
- 18 Paz-Ferreiro J, Vazquez E V, Miranda J G V. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters [J]. Geoderma, 2010, 160(1): 47~56.