

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.010

# 基于联合多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数\*

刘继龙<sup>1</sup> 马孝义<sup>2</sup> 张振华<sup>3</sup> 付强<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 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】** 利用联合多重分形方法识别在不同尺度上对土壤水分特征曲线空间变异性都具有显著影响的因素, 基于得出的结论建立考虑尺度效应的小尺度和大尺度 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数, 探讨了将小尺度上得出的联合多重分形结论进行尺度扩展, 应用到大尺度上的可行性。结果表明: 小尺度和大尺度上基于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数土壤传递函数预测的土壤含水率均方根误差分别为 0.038 6、0.047 3 和 0.027 0、0.030 4, 可将小尺度上进行联合多重分形分析得出的结论进行尺度扩展, 应用到大尺度上, 且建立的土壤传递函数具有较强的理论基础和较高的预测精度。

**关键词:** 土壤水分特征曲线 土壤传递函数 联合多重分形

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)03-0051-06

## Pedotransfer Functions of Soil Water Retention Curve Based on Joint Multifractal

Liu Jilong<sup>1</sup> Ma Xiaoyi<sup>2</sup> Zhang Zhenhua<sup>3</sup> Fu Qiang<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architecture, 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

The factors that have obvious effects on spatial variability at the different scales were identified with joint multifractal, and pedotransfer functions of van Genuchten model parameters which considered scale effect at small and large scale were established based on the above deduced conclusion, furthermore, feasibility that concluded and deduced at small scale with joint multifractal and applied at large scale was explored. The results showed that root mean square error of forecasted soil water content based on pedotransfer functions of van Genuchten model parameters in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers at small scale was 0.038 6 and 0.047 3 respectively, and RMSE of forecasted soil water content based on pedotransfer functions of van Genuchten model parameters in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers at large scale was 0.027 0 and 0.030 4 respectively; conclusions deduced at small scale with joint multifractal could be applied at large scale, and pedotransfer functions based on these conclusions had strong theoretical foundation and high precision.

**Key words** Soil water retention curve, Pedotransfer functions, Joint multifractal

### 引言

在土壤水分和溶质运移模拟研究中, 土壤水分

特征曲线是必不可少的重要参数。国内外研究已表明土壤特性具有空间变异性, 随尺度的变化, 其空间变异性呈现不同的特征, 因素和过程的影响强度也

收稿日期: 2011-05-13 修回日期: 2011-06-05

\* 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资助项目(12511046)和西北农林科技大学人才专项资金资助项目(BJRC-2009-001)

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

随之发生变化<sup>[1-8]</sup>。因此,研究尺度较大时,为合理地描述土壤过程,需要布置大量的试验测点,而实际过程中试验测点数往往受到各方面因素的限制,因而非常有必要建立快速准确获取土壤水分特征曲线的方法。而研究尺度较大和精度要求不高时,可以通过建立土壤水分运动参数的土壤传递函数来快速和较为准确地获取土壤水分运动参数。

国内外学者已对土壤水分特征曲线的土壤传递函数进行了研究<sup>[9-14]</sup>,但建立的土壤传递函数主要是针对某一研究尺度,其不同尺度上的应用性受到限制。如果能确定不同尺度对土壤水分特征曲线空间变异性都具有显著影响的因素,则可建立考虑尺度效应的土壤水分特征曲线的土壤传递函数。联合多重分形理论能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<sup>[2-3]</sup>,刘继龙等<sup>[8]</sup>利用联合多重分形理论分析了对 van Genuchten 模型参数在不同尺度上的空间变异性都具有显著影响的因素,但没有在此基础上研究 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数,基于得出的联合多重分形结论建立的土壤传递函数的精度和适应性如何,以及如何将在小尺度上得出的联合多重分形结论应用到大尺度上都是值得研究的问题。为此,本文基于文献<sup>[8]</sup>在小尺度上进行联合多重分形分析得出的结论,建立考虑尺度效应的小尺度上 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数,同时将文献<sup>[8]</sup>在小尺度上分析得出的联合多重分形结论进行尺度扩展,应用到大尺度上,建立考虑尺度效应的大尺度上 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

杨凌地处关中平原腹地,东经 107°55'50" ~ 108°07'50"、北纬 34°14'30" ~ 34°19'00",区内三面环水,宝鸡峡二支渠、渭惠渠和渭高干渠等人工渠系越境而过,水利条件优越。区内地势南低北高,大致分布有 3 级阶地。境内塬、坡、滩地交错,土壤肥沃,适宜多种农作物生长。海拔高度为 435 ~ 563 m,年降水量 635.1 ~ 663.9 mm,年均气温 12.9℃,属暖温带季风半湿润气候区。

### 1.2 采样布局与测定方法

本文有 2 种采样方案,其中采样方案 1(小尺度)的试验地设在杨凌一级阶地的一林地内,在一南北方向的横断面上每隔 15 m 设一测点,总共设 32 个测点(图 1);采样方案 2(大尺度)在整个杨凌范围内取样,根据土地利用方式的不同,选择 21 个典型试验测点(图 2)。按采样方案 1 和采样方案 2

进行采样时,在每个测点用环刀取 0 ~ 20 cm 土层和 20 ~ 40 cm 土层的原状土,同时取散土。

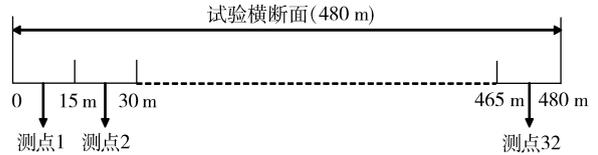


图 1 采样方案 1 的空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of sampling scheme 1

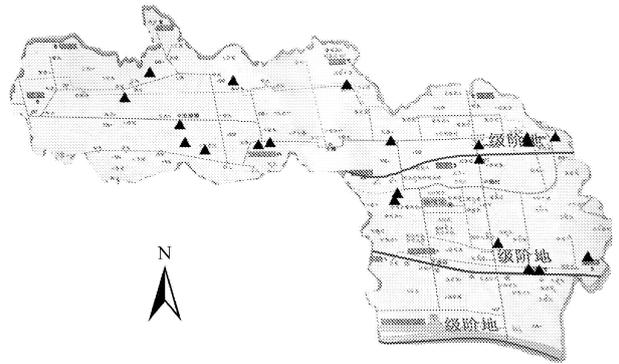


图 2 采样方案 2 的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of sampling scheme 2

各个测点不同土层的土壤容重用环刀法测定;土壤有机质含量用稀释热法测定;用 Mastersizer2000 型激光粒度仪进行土壤颗粒分析,分为砂粒(粒径 0.05 ~ 1 mm)、粗粉粒(粒径 0.01 ~ 0.05 mm)和粘粒(粒径 0 ~ 0.001 mm);测定与土壤水吸力为 0.005、0.01、0.04、0.07、0.1、0.3、0.5 和 0.7 MPa 时相对应的土壤含水率,两者之间的函数关系用 van Genuchten 模型<sup>[15]</sup>拟合,拟合公式为

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha h)^n]^m \quad (1)$$

其中

$$m = 1 - 1/n$$

式中  $\theta$ ——体积含水率  $h$ ——土壤水吸力, cm

$\theta_r$ ——滞留含水率  $\theta_s$ ——饱和含水率

$\alpha$ ——与土壤平均孔隙半径有关的参数,  $\text{cm}^{-1}$

$n$ ——曲线形状参数

### 1.3 研究方法

基于文献<sup>[8]</sup>联合多重分形分析得出的联合多重分形结论,利用 DPS 软件对土壤水分特征曲线与其他土壤基本物理性质进行逐步回归分析,建立考虑尺度效应的小尺度和大尺度 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数。

### 1.4 模型精度评价

van Genuchten 模型参数土壤传递函数的计算精度采用均方根误差表示,计算公式为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (Y_{\text{sc},i} - Y_{\text{yc},i})^2} \quad (2)$$

式中  $j$ ——测点数

$Y_{yc,i}, Y_{sc,i}$ ——土壤传递函数预测值、实测值

## 2 结果分析

### 2.1 不同土层 van Genuchten 模型参数与影响因素的联合多重分形分析

文献[8]按照采样方案1(小尺度)进行采样,利用联合多重分形方法得出不同尺度对0~20 cm土层和20~40 cm土层 van Genuchten 模型参数空间变异性都具有显著影响的因素,其中0~20 cm土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  与砂粒含量、粗粉粒含量的相关程度最高,参数  $n$  与砂粒含量、粘粒含量、土壤有机质含量的相关程度最高;20~40 cm土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  与土壤容重、土壤有机质含量的相关程度最高,参数  $n$  与粗粉粒含量、砂粒含量、土壤有机质含量的相关程度最高。

### 2.2 小尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数

基于文献[8]得出的联合多重分形结论,本文利用 DPS 软件对相关数据进行逐步回归分析,建立了考虑尺度效应的小尺度上0~20 cm土层和20~40 cm土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$ 、 $n$  的土壤传递函数,其中不同土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  为平方根处理后的数据,参数  $n$  为原始数据,相关公式为

$$\alpha_{0-20\text{cm}} = -5.874 + 19.309S_1 + 29.871S_A - 14.555S_1^2 - 22.260S_A^2 - 51.632S_1S_A \quad (R=0.7358) \quad (3)$$

$$n_{0-20\text{cm}} = 1.149 - 14.446S_{OM} + 5.015C_L + 0.593S_A - 22.279C_L^2 - 3.936C_LS_A \quad (R=0.8325) \quad (4)$$

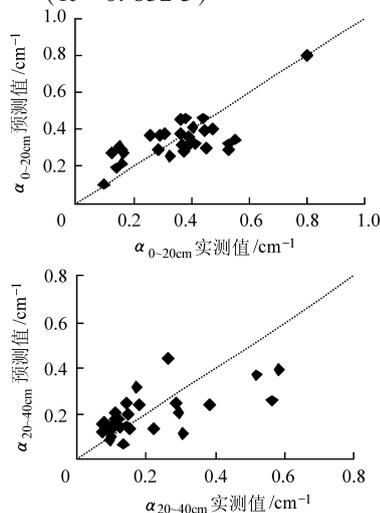


图3 小尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数土壤传递函数预测值与实测值的关系

$$\alpha_{20-40\text{cm}} = -2.529 + 4.759B_D - 156.764S_{OM} - 1.812B_D^2 + 1103.981S_{OM}^2 + 73.869B_DS_{OM} \quad (R=0.6403) \quad (5)$$

$$n_{20-40\text{cm}} = 8.049 - 10.695S_{OM} - 29.118S_1 - 6.562S_A + 30.775S_1^2 + 17.340S_1S_A \quad (R=0.8869) \quad (6)$$

式中  $S_1, S_A, C_L$ ——粗粉粒、砂粒、粘粒含量

$S_{OM}, B_D$ ——土壤有机质含量、土壤容重

图3为土壤传递函数预测的小尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数与实测值之间的关系。由图3可知,利用式(3)~(6)预测小尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数大部分落在1:1直线附近,说明土壤传递函数的预测精度较高,其中0~20 cm土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$ 、 $n$  土壤传递函数预测值的均方根误差分别为0.1044、0.0486,20~40 cm土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$ 、 $n$  土壤传递函数预测值的均方根误差分别为0.1071、0.0574。

为进一步验证考虑尺度效应的小尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数土壤传递函数的精度,将根据式(3)~(6)预测的参数  $\alpha$ (平方后)和  $n$  代入式(1),计算不同土壤水吸力下的土壤含水率,然后与试验测得的土壤含水率进行比较。图4为小尺度上基于不同土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$  的土壤传递函数预测的土壤含水率与实测值之间的关系。由图4可知,小尺度上基于不同土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$  土壤传递函数预测的土壤含水率大部分落在1:1直线附近,与实测值比较接近,其中0~20 cm土层和20~40 cm土层土壤含水率预测值的均方根误差分别为0.0386、0.0473,预测精度较高,这进一步说明可利用建立的土壤传递函数估算小尺度上的 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$ 。

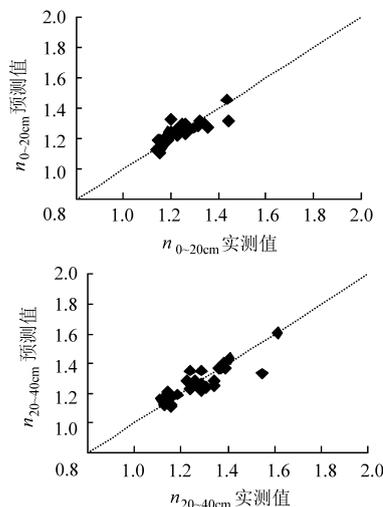


Fig.3 Relationship between forecasted and measured parameters in van Genuchten model in different soil layers at small scale

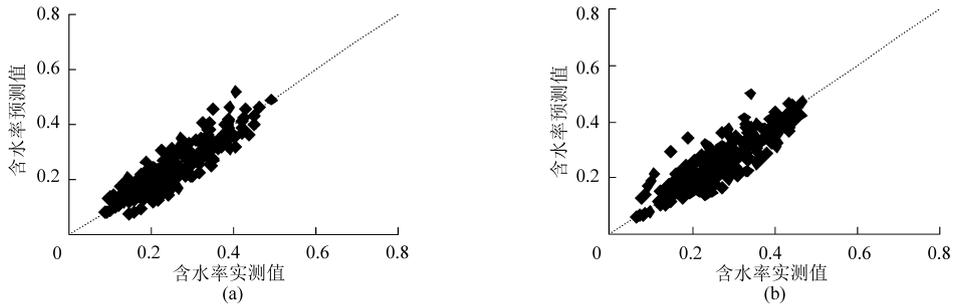


图4 小尺度上不同土层土壤传递函数预测的土壤含水率与实测值的关系

Fig.4 Relationship between forecasted and measured soil water content in different soil layers at small scale

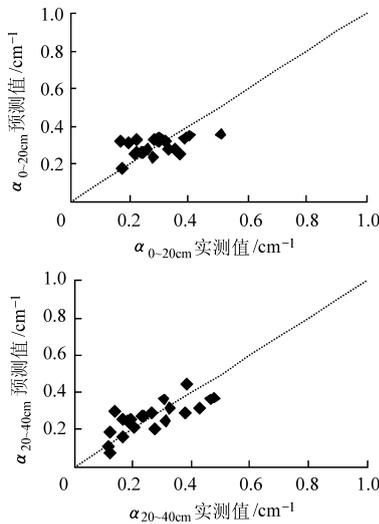
(a) 0~20 mm 土层 (b) 20~40 mm 土层

### 2.3 大尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数

分形理论可从多尺度上分析研究变量的空间变异性,可将尺度上推和尺度下推<sup>[16]</sup>。为了建立杨凌地区不同土层 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数,同时进一步验证文献[8]中得出的 van Genuchten 模型参数与影响因素之间的联合多重分形结论,将以小尺度上获取的相关数据为例得出的联合多重分形结论进行尺度扩展,应用到大尺度上,以采样方案2获取的土壤水分特征曲线及其他相关数据为基础,利用 DPS 软件进行逐步回归分析,建立了考虑尺度效应的大尺度上 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$  的土壤传递函数,其中不同土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  同样为平方根处理后的数据,参数  $n$  为原始数据,相关公式为

$$\alpha_{0-20\text{cm}} = -21.659 + 94.794S_1 - 100.437S_1^2 + 11.864S_A^2 - 11.180S_1S_A \quad (R=0.5392) \quad (7)$$

$$n_{0-20\text{cm}} = 0.769 + 34.081S_{OM} + 1.915C_L - 976.992S_{OM}^2 - 8.353C_L^2 + 4.629S_A^2 \quad (R=0.9630) \quad (8)$$



$$\alpha_{20-40\text{cm}} = -3.051 + 4.561B_D + 149.902S_{OM} - 1.576B_D^2 - 855.137S_{OM}^2 - 99.516B_DS_{OM} \quad (R=0.7603) \quad (9)$$

$$n_{20-40\text{cm}} = 0.904 - 0.959S_1 + 11.889S_A - 14.466S_A^2 + 104.355S_{OM}S_1 - 734.910S_{OM}S_A \quad (R=0.9623) \quad (10)$$

图5为式(7)~(10)预测的大尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数与实测值之间的关系。由图5可知,利用式(7)~(10)预测的大尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数大部分落在 1:1 直线附近,说明式(7)~(10)的计算精度同样较高,其中 0~20 cm 土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$ 、 $n$  土壤传递函数预测值均方根误差分别为 0.070 8、0.020 9, 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$ 、 $n$  土壤传递函数预测值的均方根误差分别为 0.072 4、0.020 9。

同样为进一步验证考虑尺度效应的大尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数土壤传递函数的精度,将根据式(7)~(10)预测的参数  $\alpha$  (平方后)和  $n$  代入式(1),计算不同土壤水吸力下的土壤含水

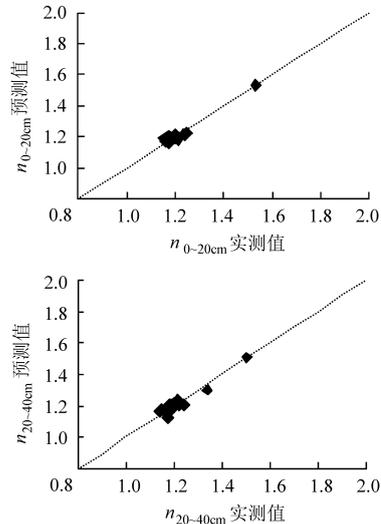


图5 大尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数土壤传递函数预测值与实测值的关系

Fig.5 Relationship between forecasted and measured parameters in van Genuchten model in different soil layers at large scale

率,然后与试验测得的土壤含水率进行比较。图6为大尺度上基于不同土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$  的土壤传递函数预测的土壤含水率与实测值之间的关系。由图6可知,大尺度上基于不同土层 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$  土壤传递函数预测的土壤含水率同样大部分也落在 1:1 直线附近,与实测值比较接近,其中 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层土壤含水率预测值均方根误差分别为 0.027 0、

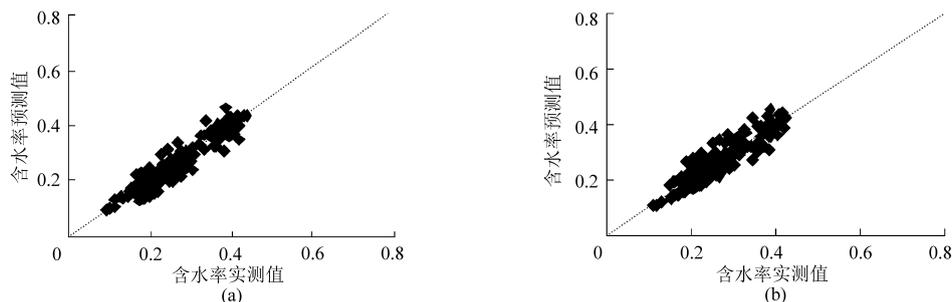


图6 大尺度上不同土层土壤传递函数预测的土壤含水率与实测值的关系

Fig. 6 Relationship between forecasted and measured soil water content in different soil layers at large scale

(a) 0~20 cm 土层 (b) 20~40 cm 土层

### 3 结束语

利用土壤水分特征曲线与影响因素在小尺度上进行联合多重分形分析得出的结论,建立了考虑尺度效应的小尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数,并将小尺度上得出的联合多重分形结论进行尺度扩展,应用到大尺度上,建立了考虑尺度效应的大尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数。结果表明:小尺度上 0~20 cm 和 20~40 cm 土层参数  $\alpha$ 、 $n$  土壤传递函数预测值的均方根误差分别为 0.104 4、0.048 6 和 0.107 1、0.057 4,小尺度上基于 0~20 cm 和 20~40 cm

0.030 4,预测精度同样较高。可以将小尺度上(采样方案 1)联合多重分形分析得出的结论进行尺度扩展,应用到大尺度上(采样方案 2),建立大尺度上 van Genuchten 模型参数  $\alpha$  和  $n$  的土壤传递函数,且建立的土壤传递函数具有较强的理论基础和较高的预测精度,可用于估算较大尺度上的 van Genuchten 模型参数,这可为构建考虑尺度效应的区域尺度上 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数提供参考。

土层参数  $\alpha$  和  $n$  土壤传递函数预测的土壤含水率的均方根误差分别为 0.038 6、0.047 3;大尺度上 0~20 cm 和 20~40 cm 土层参数  $\alpha$ 、 $n$  土壤传递函数预测值的均方根误差分别为 0.070 8、0.020 9 和 0.072 4、0.020 9,大尺度上基于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层参数  $\alpha$  和  $n$  土壤传递函数预测的土壤含水率的均方根误差分别为 0.027 0、0.030 4;可将小尺度上得出的联合多重分形结论进行尺度扩展,应用到大尺度上,且建立的土壤传递函数具有较强的理论基础和较高的预测精度,这可为构建考虑尺度效应的大尺度上 van Genuchten 模型参数的土壤传递函数提供参考。

### 参 考 文 献

- 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应[J].土壤学报,2008,45(3):544~549.  
Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial variability of soil moisture in surface layer in depressed Karst region and its scale effect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3):544~549. (in Chinese)
- Zeleeke 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.
- Zeleeke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4):440~452.
- 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡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 Mingan, 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)
- 刘世梁,郭旭东,连纲,等.黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析——以横山县为例[J].水土保持学报,2005,19(5):105~108.  
Liu Shiliang, Guo Xudong, Lian Gang, et al. Multi-scale analysis of spatial variation of soil characteristics in Loess Plateau—case study of Hengshan county [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5):105~108. (in Chinese)

- 6 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2):1~5.  
Xu Ying, Chen Yaxin, Shi Haibin, et al. Scale effect of spatial variability of soil water-salt[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):1~5. (in Chinese)
- 7 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)
- 8 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)
- 9 Bayat H, Neyshabouri M R, Mohammadi K, et al. Estimating water Rretention with pedotransfer functions using multi-objective group method of data handling and ANNs [J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 107~114.
- 10 Merdun H, Ç1nar Ö, Ramazan M, et al. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 90(1~2):108~116.
- 11 Børgesen C D, Schaap M G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils [J]. Geoderma, 2005, 127(1~2):154~167.
- 12 Givi J, Prasherb S O, Patel R M. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point [J]. Agricultural Water Management, 2004, 70(2):83~96.
- 13 Santra P, Das B S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India [J]. Geoderma, 2008, 146(3~4): 439~448.
- 14 Li Y, Chen D, White R E, et al. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu county soils in the northChina plain using pedo-transfer functions [J]. Geoderma, 2007, 138(3~4):261~271.
- 15 van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5):892~898.
- 16 王军, 邱扬. 土地质量的空间变异与尺度效应研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4):28~35.  
Wang Jun, Qiu Yang. Review on spatial variability and scale effects of land quality [J]. Progress in Geography, 2005, 24(4): 28~35. (in Chinese)
- 17 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 壤土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9):50~58.  
Guo Lijun, Li Yi, Li Min, et al. Multifractal study on spatial variability of soil hydraulic properties of lou soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):50~58. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 50 页)

- 9 李文华, 刘广权, 马松涛, 等. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水和生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(1): 61~65.  
Li Wenhua, Liu Guangquan, Ma Songtao, et al. Effect of drought stress on transpiration and growth characteristics of young plant [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science edition; 2004, 32(1): 61~65. (in Chinese)
- 10 安巧霞, 孙三民, 叶含春. 考虑环境效益的塔里木灌区棉花最优灌溉量[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):49~53.  
An Qiaoxia, Sun Sanmin, Ye Hanchun. Optimal irrigation amount for cotton field considering environmental benefits in Tarim irrigation area [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 49~53. (in Chinese)
- 11 高凯, 朱铁霞, 郭志杰, 等. 不同灌水处理对高羊茅草坪蒸散量和光合特性的影响[J]. 内蒙古民族大学学报:自然科学版, 2007, 22(4): 404~405.  
Gao Kai, Zhu Tiexia, Guo Zhijie, et al. Effect of different irrigation treatments on ET and photosynthetic characteristic of festuca arundinace turf [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities: Natural Science Edition, 2007, 22(4): 404~405. (in Chinese)