

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.01.009

不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素*

刘继龙¹ 马孝义¹ 张振华²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 鲁东大学地理与规划学院, 烟台 264025)

【摘要】 利用多重分形和联合多重分形方法,对陕西杨凌地区 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数的空间变异性及其影响因素进行了研究。结果表明:0~20 cm 和 20~40 cm 土层参数 α 都具有明显的多重分形特征,空间变异性较强,且分别是由低值和高值分布引起的;参数 n 和 θ_s 的多重分形特征不明显,空间变异性较弱。0~20 cm 和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性的相关特征并不完全相同,在观测尺度上,0~20 cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 显著相关,参数 n 与 Sand、SOM 显著相关, θ_s 与 Sand 显著相关;20~40 cm 土层参数 α 与 SOM 显著相关,参数 n 和 θ_s 都与 Sand、Silt、SOM 显著相关;在多尺度上,0~20 cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 的相关程度最高,20~40 cm 土层参数 α 与 BD、SOM 的相关程度最高。

关键词: 土壤水分特征曲线 空间变异 多重分形 土层

中图分类号: S152.7⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)01-0046-07

Spatial Variability of Soil Water Retention Curve in Different Soil Layers and Its Affecting Factors

Liu Jilong¹ Ma Xiaoyi¹ Zhang Zhenhua²

(1. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Geography and Planning Department, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract

Spatial variability of van Genuchten model parameters and its affecting factors in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers were studied with multifractal and joint multifractal methods. The results showed that in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers parameter α had obvious multifractal characteristics, and its spatial variability was strong caused by the distribution of lower and higher values respectively. The multifractal characteristics of parameter n and θ_s were not obvious, and the spatial variability was weak. Correlation characteristics between van Genuchten model parameters α and soil physical properties in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers were analyzed. At the observation scale, the correlations between parameter n and sand and silt content were significant, the parameter n and sand and organic matter content had remarkable relationship, and θ_s was significantly related to sand content in 0~20 cm soil layer. The relationship between parameters α and organic matter content was remarkable, and the parameter n and θ_s were significantly related to sand, silt and organic matter content in 20~40 cm soil layer. At the multiple scales, correlations between parameters α and sand and silt content were most obvious in 0~20 cm soil layer, and parameters α were remarkably related to bulk density and organic matter content in 20~40 cm soil layer.

Key words Soil water retention curve, Spatial variability, Multifractal, Soil layer

收稿日期: 2009-03-31 修回日期: 2009-05-09

* 国家自然科学基金资助项目(50879072、50609022)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11B04)和国家“863”高新技术研究发展计划资助项目(2006AA100209)

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

通讯作者: 马孝义, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: xiaoyimasl@yahoo.com.cn

引言

土壤水分特征曲线反映了土壤水分含量与压力水头之间的函数关系,是模拟土壤水分运动和溶质运移的重要参数。人们已提出许多模型来描述这种函数关系,其中, van Genuchten 模型因其与实测数据拟合程度好而得到广泛应用^[1]。由于土壤水分特征曲线具有明显的空间变异性^[2],使得描述土壤水分特征曲线的 van Genuchten 模型参数也具有明显的空间变异性。土壤水分特征曲线是获得其它土壤水动力学参数及土壤水分常数的基础, van Genuchten 模型参数与土壤的持水特性密切相关,因此,通过对 van Genuchten 模型参数空间变异性的研究,可为评估土壤持水能力和释水能力、土壤改良方法选优和合理的获取土壤水分运动参数等提供依据^[3-4]。

土壤特性的空间变异性存在于多尺度且不同尺度上的主要影响因子有显著差异^[5-6],多尺度上的空间变异特征分析已成为土壤特性空间变异研究的重要内容 and 热点之一。国内外学者已对土壤特性在多尺度上的空间变异特征展开了研究^[7-14],但针对 van Genuchten 模型参数在多尺度上的空间变异及其影响因素的研究较少,同时不同土层之间土壤特性的空间变异特征并不完全相同^[6,15-16]。为此,本文利用多重分形和联合多重分形方法,通过分析 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数的多重分形谱及其与影响因素的联合多重分形谱,研究杨凌地区不同土层 van Genuchten 模型参数在多尺度上的空间变异性及其影响因素。

1 研究方法 with 基本理论

1.1 研究方法

在位于陕西杨凌的一林地内,沿一南北方向的横断面(480 m)每隔 15 m 进行取样,在各取样点用环刀取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的原状土,每层各设 32 个取样点,每个取样点重复取 2~3 次,同时取散土土样。将所取的原状土浸泡 24 h 后,用烘干法测定土壤饱和含水量 θ_s 和土壤容重 (BD);用稀释热法测定土壤有机质含量 (SOM),每个样品重复测 3 次,然后取平均值;土壤颗粒分布用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定,分为砂粒 (Sand, 0.05~1 mm)、粗粉粒 (Silt, 0.05~0.01 mm) 和粘粒 (Clay, <0.001 mm);土壤风干后过 1 mm 筛,按照测定的土壤容重装入环刀中,将土样饱和,然后用离心机测定土壤水吸力为 0.005、0.01、0.04、0.07、0.1、0.3、0.5 和 0.7 MPa 时,土样对应的含水量,每个土样重

复测 2~3 次,共测土样 64 个,土壤水分特征曲线用 van Genuchten 模型拟合, van Genuchten 模型的具体形式为^[1]

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中 θ ——体积含水量, cm^3/cm^3
 θ_r ——滞留含水量 cm^3/cm^3
 θ_s ——饱和含水量, cm^3/cm^3
 h ——土壤吸力, cm
 m, n, α ——拟合参数,且 $m = 1 - \frac{1}{n}$

1.2 基本理论

1.2.1 多重分形

描述多重分形的参量有两套,一套为 $D(q)$ 和 q ,另一套为 $f(q)$ 和 $\beta(q)$ 。已有许多文献对多重分形和联合多重分形理论进行了详细的阐述,本文直接给出相关参数的计算公式,各参数的求解公式为^[8-9,12-13,17-18]

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \lg \sum_{i=1}^n \mu_i^q(\delta) / \lg \delta \quad (q \neq 1) \quad (2)$$

$$D_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \mu_i(\delta) \lg \mu_i(\delta) / \lg \delta \quad (q = 1) \quad (3)$$

$$\beta(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \lg \mu_i(\delta) / \lg \delta \quad (4)$$

$$f(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \lg \mu_i(q, \delta) / \lg \delta \quad (5)$$

其中

$$\mu_i(\delta) = \mu_i / \sum_{i=1}^n \mu_i$$

$$\mu_i(q, \delta) = \mu_i^q(\delta) / \sum_{i=1}^n \mu_i^q(\delta)$$

式中 δ ——尺度 $\mu_i(\delta)$ ——质量概率

n ——尺度取 δ 时的区间数

q —— $\mu_i(\delta)$ 的统计矩的阶

1.2.2 联合多重分形

利用联合多重分形方法研究变量 1 和变量 2 之间的关系时,有关参数的求解公式为^[8-9,17-18]

$$\beta^1(q^1, q^2) = -[\lg N(\delta)]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N(\delta)} [\mu_i(q^1, q^2, \delta) \lg \mu_i^1(\delta)] \quad (6)$$

$$\beta^2(q^1, q^2) = -[\lg N(\delta)]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N(\delta)} [\mu_i(q^1, q^2, \delta) \lg \mu_i^2(\delta)] \quad (7)$$

$$f(\beta^1, \beta^2) = -[\lg N(\delta)]^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N(\delta)} [\mu_i(q^1, q^2, \delta) \lg \mu_i(q^1, q^2, \delta)] \quad (8)$$

其中 $\mu_i(q^1, q^2, \delta) = \mu_i^1(\delta)^{q^1} \mu_i^2(\delta)^{q^2} /$

$$\sum_{i=1}^{N(\delta)} \mu_i^1(\delta)^{q^1} \mu_i^2(\delta)^{q^2}$$

式中 $\mu_1^1(\delta)$ 、 $\mu_2^2(\delta)$ ——变量 1 和变量 2 质量概率

2 结果与分析

2.1 观测尺度上不同土层 van Genuchten 模型参数的统计分析

为了准确地描述 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间的相关程度,利用 SPSS 统计分析中的相关分析对 van Genuchten 模型参数 α 、 n 、 θ_s 与土壤物理特性的相关性进行分析, van Genuchten 模型参数与土壤物理特性相关系数的绝对值越大,表明 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间的相关性越显著。变异系数(CV)表示研究变量空间变异程度的大小,CV 越大,空间变异性越大,反之,空间变异性越小。0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数与土壤基本物理特性的相关性及其变异系数如表 1 所示。从表 1 可以看出,0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 的空间变异

性都较大;参数 n 和 θ_s 的空间变异性都较小。0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间的相关特征并不完全相同,0~20 cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 显著相关,参数 n 与 Sand、SOM 显著相关, θ_s 与 Sand 显著相关;20~40 cm 土层参数 α 与 SOM 显著相关,参数 n 与 Sand、Silt、SOM 显著相关, θ_s 与 Sand、Silt、SOM 显著相关。van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间的这种相关特征,表明造成 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数的空间变异性的主要影响因素并不完全相同。van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间的这种相关特征,只是简单的直线相关分析结果, van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间关系往往是复杂的,简单的直线相关分析不一定能完整地反映出 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性之间的复杂关系。

表 1 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数的统计分析

Tab. 1 Statistics characteristic of van Genuchten model parameters in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

参数	0~20 cm 土层			20~40 cm 土层		
	α	n	θ_s	α	n	θ_s
BD	-0.120	-0.304	-0.308	-0.342	-0.274	-0.231
Clay	-0.180	-0.207	0.085	0.150	-0.024	-0.112
Silt	-0.696 **	-0.112	0.297	-0.236	-0.571 **	0.716 **
Sand	0.741 **	0.579 **	-0.566 **	0.104	0.737 **	-0.698 **
SOM	-0.332	-0.661 **	0.279	-0.475 **	-0.603 **	0.433 *
CV	0.896	0.071	0.070	1.585	0.099	0.108

注: * 和 ** 表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平下显著。

2.2 基于多重分形的 van Genuchten 模型参数的空间变异分析

为分析不同土层 van Genuchten 模型参数在多尺度上的空间变异性,求解了区间尺度为 15、30、

60、120 和 240 m 时,0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数的 $D(q)$ 和多重分形谱 ($q = -2.0$ 、 -1.5 、 -1.0 、 -0.5 、 0 、 0.5 、 1.0 、 1.5 和 2.0),具体参数值如表 2 所示,多重分形谱如图 1 所

表 2 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 van Genuchten 模型参数的多重分形谱宽度和 $D(q)$

Tab. 2 Ranges of multifractal spectra and $D(q)$ of van Genuchten model parameters in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

q	0~20 cm 土层			20~40 cm 土层		
	α	n	θ_s	α	n	θ_s
-2.0	1.313 2	1.001 6	1.001 7	1.254 3	1.002 8	1.004 4
-1.5	1.239 4	1.001 2	1.001 2	1.223 9	1.002 1	1.003 2
-1.0	1.157 0	1.000 8	1.000 9	1.179 8	1.001 4	1.002 2
-0.5	1.073 3	1.000 4	1.000 4	1.109 0	1.000 7	1.001 1
0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
0.5	0.943 6	0.999 6	0.999 6	0.865 6	0.999 2	0.999 0
1.0	0.900 7	0.999 1	0.999 1	0.745 5	0.998 5	0.998 0
1.5	0.865 2	0.998 6	0.998 8	0.664 0	0.997 8	0.997 0
2.0	0.833 2	0.998 2	0.998 3	0.614 9	0.997 0	0.996 0
$\Delta\beta$	0.951 9	0.006 6	0.006 8	0.870 7	0.011 3	0.017 1

注: $\Delta\beta$ 表示多重分形谱宽度。

示。 D_0 、 D_1 、 D_2 依次降低时,可认为研究变量具有多重分形特征^[8]。0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 的 D_0 、 D_1 和 D_2 分别为 1.000 0、0.900 7、0.833 2 和 1.000 0、0.745 5、0.614 9,不同土层参数 α 的 D_0 、 D_1 和 D_2 都依次降低,表明参数 α 的空间分布具有多重分形特征;0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 n 和 θ_s 的 D_0 、 D_1 和 D_2 近似相等,表明参数 n 和 θ_s 的多重分形特征不明显,Zeleke 等^[8] 也研究发现饱和含水量 θ_s 的多重分形特征不明显。

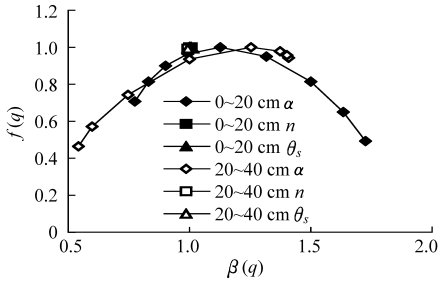


图 1 0~20 cm 和 20~40 cm 土层参数 α 、 n 、 θ_s 的多重分形谱

Fig. 1 Multifractional spectrums of parameter α , n and θ_s in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

$D(q)$ 只从整体上表征多重分形特征,不能反映局部或小尺度特征,多重分形谱可以揭示整体或大尺度中镶嵌的局部或小尺度特征^[19]。多重分形谱的范围越大,研究对象的空间变异性越强^[9];多重分形谱偏左,表明研究对象的空间变异性主要是由高值引起的,反之,表明研究对象的空间变异性主要是由低值引起的^[12]。0~20 cm 土层参数 α 、 n 和 θ_s 的多重分形谱宽度分别为 0.951 9、0.006 6 和 0.006 8,20~40 cm 土层参数 α 、 n 和 θ_s 的多重分形谱宽度分别为 0.870 7、0.011 3 和 0.017 1,表明 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 的空间变异性都较大,参数 n 和 θ_s 的空间变异性都较小,这与变

异系数的分析结果一致。0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 的多重分形谱呈现不同的变化趋势,0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 的多重分形谱分别偏右和偏左,这表明 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 的空间变异性分别是由低值和高值分布引起的。

2.3 不同土层 van Genuchten 模型参数的联合多重分形分析

由上述分析可知,0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 空间分布的多重分形特征比较明显,为此,利用联合多重分形方法对 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 与土壤物理特性在多尺度上的相关性进行了分析。求解联合多重分形参数时,由于 van Genuchten 模型参数 α 中存在极端值,致使式(6)~式(8)的拟合精度偏低,为提高式(6)~式(8)的拟合精度,对 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 都进行了平方根转换。为简单明确地表示有关参数, $\beta^1(q^1, q^2)$ 记为 β_α , $\beta^2(q^1, q^2)$ 分别记为 β_{BD} 、 β_{Sand} 、 β_{Clay} 、 β_{Silt} 和 β_{SOM} 。0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层参数 α 分别与 BD、Clay、Silt、Sand 和 SOM 的联合多重分形谱,如图 2 和图 3 所示。为便于利用联合多重分形谱分析参数 α 与 BD、Clay、Silt、Sand 和 SOM 在多尺度上的相关性,将参数 α 与土壤物理特性的联合多重分形谱投影到平面上,0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层联合多重分形谱的灰度图如图 4 和图 5 所示,颜色越深,表示 $f(\beta^1, \beta^2)$ 的值越大。若研究变量与某影响因素的联合多重分形谱的灰度图相对集中且沿对角线方向延伸,则表明研究变量与该影响因素具有某些相同的分布或者相关程度较高;若分布比较离散,则表明两者之间的分布不同或者相关程度较低^[8,20]。

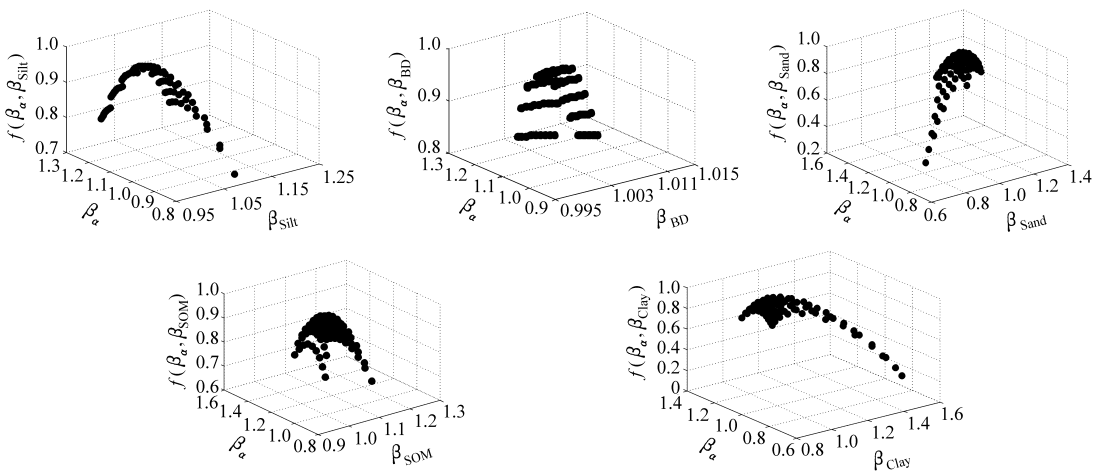
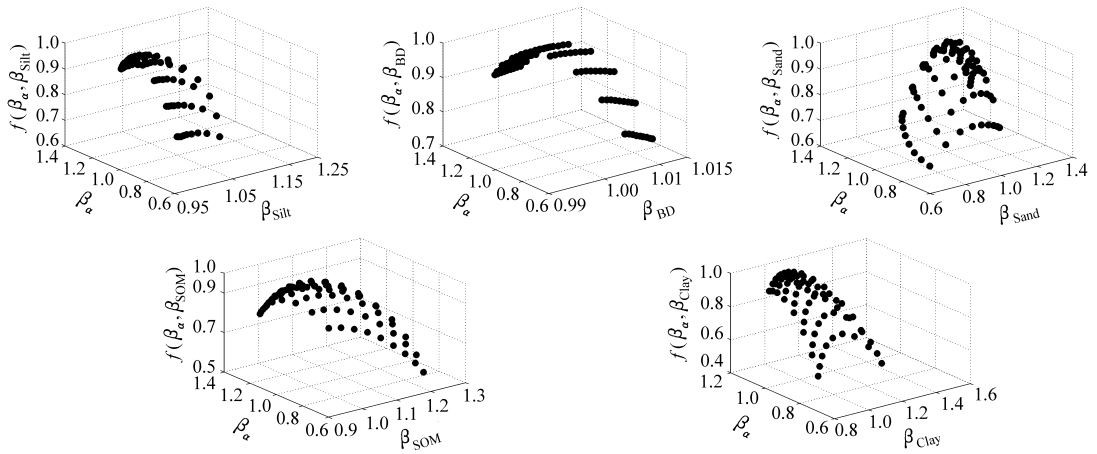
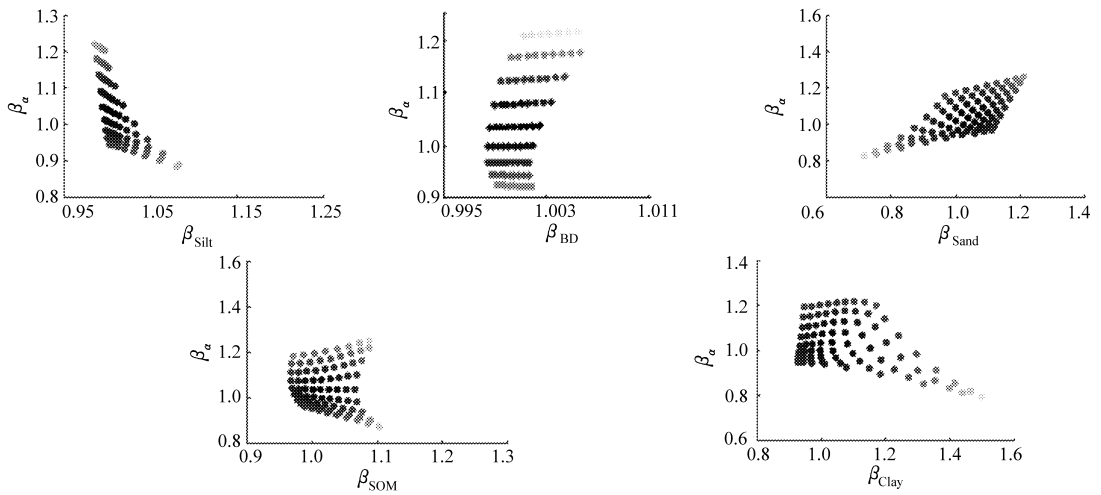
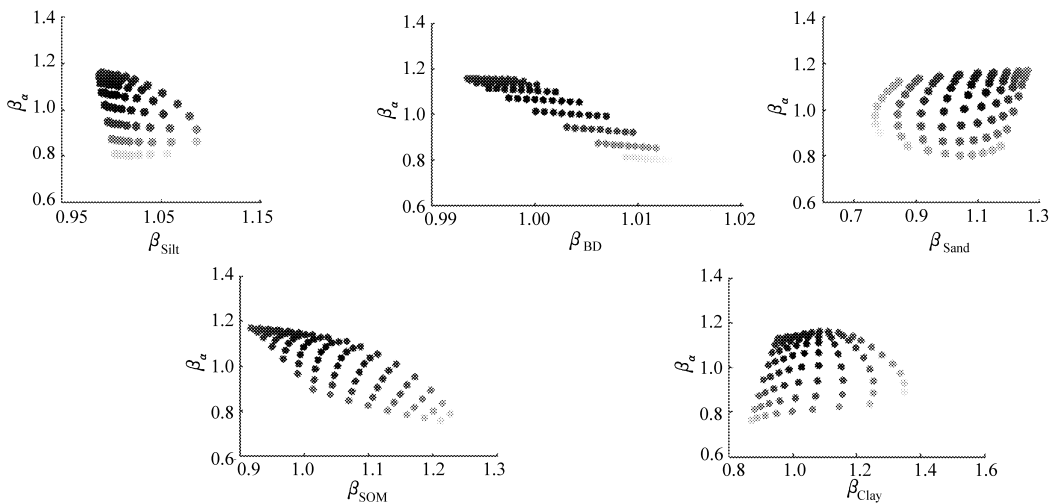


图 2 0~20 cm 土层参数 α 与土壤物理特性的联合多重分形谱

Fig. 2 Joint multifractional spectra between parameter α and soil physical properties in 0~20 cm soil layer

图3 20~40 cm 土层参数 α 与土壤物理特性的联合多重分形谱Fig. 3 Joint multifractal spectra between parameter α and soil physical properties in 20~40 cm soil layer图4 0~20 cm 土层参数 α 与土壤物理特性的联合多重分形谱的灰度图Fig. 4 Grayscale image of joint multifractal spectra between parameter α and soil physical properties in 0~20 cm soil layer图5 20~40 cm 土层参数 α 与土壤物理特性的联合多重分形谱的灰度图Fig. 5 Grayscale image of joint multifractal spectra between parameter α and soil physical properties in 20~40 cm soil layer

分析图4和图5可知,0~20 cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 的联合多重分形谱的灰度图相对比较集中且沿对角线方向延伸;20~40 cm 土层参数 α 与 BD、SOM 的联合多重分形谱的灰度图相对比较集中

且沿对角线方向延伸。参数 α 与土壤物理特性奇异指数的相关分析(表3)也表明,0~20 cm 土层 β_α 与 β_{Sand} 、 β_{Silt} 的相关程度最高,相关系数分别为 0.765 和 -0.754;20~40 cm 土层 β_α 与 β_{BD} 、 β_{SOM} 的相关程

度最高,相关系数分别为 -0.953 和 -0.842 。上述分析表明,不同土层 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性的相关特征并不完全相同,在多尺度上 $0 \sim 20$ cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 的相关程度最高, $20 \sim 40$ cm 土层参数 α 与 BD、SOM 的相关程度最高。

表3 0~20 cm 和 20~40 cm 土层参数 β_α 与土壤物理特性奇异指数的相关系数

Tab.3 Correlation between singularity indices of parameter β_α and soil physical properties in 0~20 cm and 20~40 cm soil layers

土层/cm	β_{Sand}	β_{Silt}	β_{Clay}	β_{BD}	β_{SOM}
0~20	0.765	-0.754	-0.518	0.660	-0.001
20~40	0.289	-0.505	0.130	-0.953	-0.842

3 结束语

$0 \sim 20$ cm 和 $20 \sim 40$ cm 土层参数 α 的 $D_0 > D_1 > D_2$, 多重分形特征比较明显, 参数 n 和 θ_s 的 $D_0 \approx D_1 \approx D_2$, 多重分形特征不明显。 $0 \sim 20$ cm 土层和 $20 \sim$

40 cm 土层参数 n 和 θ_s 的空间变异性都较弱; 参数 α 的多重分形谱的宽度为 0.9519 和 0.8707 , 分别偏右和偏左, 说明参数 α 的空间变异性较强, 且分别是由低值和高值分布引起的。 $0 \sim 20$ cm 土层和 $20 \sim 40$ cm 土层 van Genuchten 模型参数与土壤物理特性的相关特征并不完全相同, 在观测尺度上, $0 \sim 20$ cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 显著相关, 参数 n 与 Sand、SOM 显著相关, θ_s 与 Sand 显著相关; $20 \sim 40$ cm 土层参数 α 与 SOM 显著相关, 参数 n 与 Sand、Silt、SOM 显著相关, θ_s 与 Sand、Silt、SOM 显著相关; 在多尺度上, $0 \sim 20$ cm 土层参数 α 与 Sand、Silt 的相关程度最高, $20 \sim 40$ cm 土层参数 α 与 BD、SOM 的相关程度最高。

影响土壤水分特征曲线的因素较多, 某些因素的影响可能会被其他因素加强或掩盖, 该研究只是分析了 van Genuchten 模型参数与土壤基本物理特性之间的关系, 未考虑其他因素的影响, 此外离心机法测定土壤水分特征曲线, 测定土样的容重会发生变化, 对测定结果产生一定影响, 本文中的一些变化规律有待进一步研究和验证。

参 考 文 献

- van Genuchten R. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5):892~898.
- 赵爱辉, 黄明斌, 史竹叶. 两种土壤水分特征曲线间接推求方法对黄土的适应性评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9):11~15.
Zhao Aihui, Huang Mingbin, Shi Zhuye. Evaluation of two indirect methods to estimate soil water characteristic curve of loess soil[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9):11~15. (in Chinese)
- 白玉, 张玉龙. 半干旱地区风沙土水分特征曲线 V. G. 模型参数的空间变异性[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(3):318~323.
Bai Yu, Zhang Yulong. Spatail variability of V. G. model parameters of soil water characteristic curve of Aeolian sandy soil in northwest Liaoning[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 39(3):318~323. (in Chinese)
- 肖建英, 李永涛, 王丽. 利用 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线[J]. 地下水, 2007, 29(5):46~47.
Xiao Jianying, Li Yongtao, Wang Li. Fitting soil water characteristic curve based on the Van Genuchten model[J]. Ground Water, 2007, 29(5):46~47. (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)
- 刘晶, 刘学录. 内陆河灌区土壤水分空间变异的尺度效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(3):86~90.
Liu Jing, Liu Xuelu. Sclae effect of spatial variability of soil water content in inland irrigation areas[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2006, 41(3):86~90. (in Chinese)
- 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)
- 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.

- 9 Zeleke T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. *Geoderma*, 2006, 134(3~4):440~452.
- 10 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 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)
- 11 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异[J]. *地理研究*, 2006, 25(4):649~658.
Wang Hong, Gong Peng, Liu Gaohuan. Multi-scale spatial variations in soil salt in the Yellow River Delta[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 649~658. (in Chinese)
- 12 Eghball B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(2):339~346.
- 13 Caniego F J, Espejo R, Mart'In M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182:291~303.
- 14 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)
- 15 胡顺军, 康绍忠, 宋郁东, 等. 渭干河灌区土壤水盐空间变异性研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(2):10~12.
Hu Shunjun, Kang Shaozhong, Song Yudong, et al. Research on spatial variability of soil water and salt in Weigan river irrigation area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2):10~12. (in Chinese)
- 16 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克里格估值[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4):460~466.
Hu Kelin, Li Baoguo, Chen Deli, et al. Spatial variability of soil water and salt in field and their estimations by the Cokriging[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(4):460~466. (in Chinese)
- 17 Meneveau C, Sreenivasan K R, Kailasnath P, et al. Joint multifractal analysis: theory and application to turbulence[J]. *Phys. Rev. A*, 1990, 41(2):894~913.
- 18 Kravchenko A N, Bullock D G, Boast C W. Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6):1279~1290.
- 19 陈彦光, 周一星. 豫北地区城镇体系空间结构的多分形研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2001, 37(6):810~818.
Chen Yanguang, Zhou Yixing. A study of multifractal measures of the spatial structure of the urban system in central plains [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(6):810~818. (in Chinese)
- 20 陈双平, 韩凯, 马猛, 等. 染色体碱基序列的联合多重分形分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2):298~301.
Chen Shuangping, Han Kai, Ma Meng, et al. The joint multi-fractal analysis of the base sequence of chromosomes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2):298~301. (in Chinese)
- 21 任淑娟, 孙宇瑞, 任图生. 测量土壤水分特征曲线的复合传感器设计[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(5):56~58, 91.
Ren Shujuan, Sun Yurui, Ren Tusheng. Design of dual-sensor for measuring soil water characteristic curve[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(5):56~58, 91. (in Chinese)