

壤土土壤水力特性空间变异的多重分形分析*

郭丽俊 李毅 李敏 任鑫 刘春成 朱德兰

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 为探讨壤土土壤水力特性的空间分布特征,对杨凌示范区大寨乡小麦与玉米轮作地进行直线分布土壤取样,室内测定了土壤水分特征曲线、饱和导水率、土壤含水率、容重等土壤水力特性,用 Brooks - Corey 模型对土壤水分特征曲线进行拟合,采用多重分形方法对 Brooks - Corey 模型参数 (θ_s 、 α 、 n)、饱和导水率 (K_s)、土壤含水率 (θ)、容重 (ρ) 等进行空间变异性分析。结果表明:在全部采样方向上 K_s 、 α 及 n 的变异性较强, θ_s 、 θ 及 ρ 表现为弱变异;不同采样方向上土壤水力特性参数具有多重分形特征;不同采样方向上 θ_s 、 θ 及 ρ 的多重分形结构较弱,空间变异性不强;不同采样方向上 K_s 、 α 及 n 的多重分形结构明显,广义分形维数分别为 0.7 ~ 1.9、0.6 ~ 1.2、0.9 ~ 1.1,空间变异性较强,且 K_s 比 α 和 n 具有更为复杂的空间分布结构。

关键词: 土壤水力特性 空间变异 多重分形

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0050-09

Multifractal Study on Spatial Variability of Soil Hydraulic Properties of Lou Soil

Guo Lijun Li Yi Li Min Ren Xin Liu Chuncheng Zhu Delan

(Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

In order to discuss spatial distribution characteristics of soil hydraulic properties of Lou soil, samples were taken along lines in the area of wheat and maize crop rotation in Dazhai village, Yangling, Shaanxi. Soil water characteristic curves, saturated hydraulic conductivity, soil water content and soil bulk density were measured. Brooks - Corey models were used to describe soil water characteristic curves, and the spatial variation of Brooks - Corey model parameters (θ_s , α and n), saturated hydraulic conductivity (K_s), soil water content (θ) and soil bulk density (ρ) were analyzed with multifractal method. Results indicated that K_s , α and n had stronger variability, θ_s , θ and ρ showed weak variability in the entire sampling directions; the soil hydraulic properties showed multifractal features at different sampling directions; the multifractal structures of θ_s , θ and ρ were weak at different sampling directions which indicated weak spatial variability. K_s , α and n had obvious multifractal structures at different sampling directions. Their generalized dimensions ranged from 0.7 to 1.9, from 0.6 to 1.2 and from 0.9 to 1.1, respectively, spatial variability were strong, and the spatial distribution structure of K_s was more complex than α and n .

Key words Soil hydraulic properties, Spatial variability, Multifractal

收稿日期: 2010-10-27 修回日期: 2010-12-03

* 国家自然科学基金资助项目(50709028)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2010AA10A302)和西北农林科技大学基本科研业务费专项资金资助项目(QN2009087)

作者简介: 郭丽俊, 硕士生, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: glj19850825@163.com

通讯作者: 李毅, 副教授, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: liyikitty@126.com

引言

土壤水力特性是用于表征土壤水分(溶质)运动的参数,它可以刻画土壤水分(溶质)的运动情况^[1]。土壤水力性质参数对于研究土壤水分状况及进行土壤水动力学过程的模拟具有重要意义。目前,用于模拟土壤水分特征曲线的模型很多,其中 Brooks - Corey 模型形式简单,便于推求土壤水分运动参数,并且更符合土壤脱湿过程,因而得到广泛应用^[2-3]。

国内外研究表明包括土壤水分特征曲线在内的土壤属性具有不同程度的空间变异性,土壤属性空间变异的研究方法很多,但多偏重于传统研究^[4-6],国内关于多重分形在土壤水力特性中的应用还较少。多重分形理论作为分形理论的一支有其独特的优势,起初用于湍流,后逐渐被用于分形的各个领域^[7-11],但对土壤水力特性的分析多局限于单分形^[12-15]。然而,土壤属性在某一区段表现出多重分形特点,单分形分析无疑会丢失土壤某些片段的信息,不利于土壤属性的综合诊断。Wang 等^[16]、Miranda 等^[17]、管孝艳等^[18]、Li 等^[19]研究表明土壤粒径分布具有多重分形特性;Bird 等^[20]利用多重分形原理分析了土壤孔隙的图片,提出多重分形理论是研究土壤孔隙结构的一种有效的方法;Caniego 等^[21]、Eghball^[22]、刘继龙等^[23]利用多重分形理论分别对电导率、有机质含量、土壤 pH 值、土壤硝酸盐、土壤水盐等土壤属性进行空间变异分析,得到良好的结果;Zelege 等^[24-25]提出单分形不能完全揭示土壤及土壤水的空间变异特性;朱磊等^[26]研究表明土壤水分均匀流动具有多重分形特征。

虽然壤土土壤属性空间变异性已有研究^[27],但多为传统方法,壤土土壤水力特性在空间上的多重分形结构还需要进行探讨。为此,本文以 Brooks - Corey 模型对直线上分布的壤土土壤水力特性进行建模,并采用多重分形方法分析 Brooks - Corey 模型参数、饱和导水率、土壤含水率、容重的空间结构,揭示壤土土壤属性的空间变异特征,为壤土土壤水力特性的空间变异提供参考。

1 材料与方法

1.1 大田取样及室内测定

供试原状土壤取于杨凌示范区大寨乡公路西侧的一块小麦与玉米轮作地,尺寸为 256 m × 256 m,以 2 m 的等间隔分别在南-北、东-西、西北-东南、东北-西南 4 条直线上用环刀和土盒取表层土壤,并测定其土壤含水率,每条直线上各取 128 个样品,共计

512 个点。取样前一周内有降雨,但没有进行灌溉。

用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 型离心机测定土壤水分特征曲线,测试的恒定温度为 20℃,选取的吸力为 0.001、0.01、0.03、0.05、0.08、0.1、0.3、0.5、0.7 MPa。将环刀中的土壤浸至饱和后放入离心机中,通过设置离心机转速和恒转速时间进行测试,土壤达到恒质量时完成一个吸力的测试,重复此过程,完成所有吸力的测试便得到了该样品的土壤水分特征曲线。此测试只进行了南-北、东-西两条垂直直线上的土壤样品测定,共计 256 个。

土壤饱和和导水率采用定水头环刀法测定,土壤含水率采用干燥法测定,容重采用环刀法测定。

土壤水分特征曲线用 Brooks - Corey 模型模拟^[2-3],具体形式为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (\alpha h)^{-n} \quad (1)$$

式中 θ ——体积含水率, cm^3/cm^3

θ_r ——残留含水率, cm^3/cm^3

θ_s ——饱和含水率, cm^3/cm^3

h ——压力水头, cm α, n ——拟合参数

式中待求的参数为 $\theta_r, \theta_s, \alpha, n$,但对多数土壤而言通过 RETC 程序拟合获得的 θ_r 为零,故本文只对 θ_s, α, n 进行分析计算。

因为饱和导水率受温度影响很大,为统一比较,通常都按 10℃ 时的测定结果为标准,其他温度下所测得的导水率要换算为标准温度下的导水率,具体换算方法为

$$K_s = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t} \quad (2)$$

式中 K_s ——10℃ 时的饱和导水率, mm/min

K_t ——温度 t 时的饱和导水率, mm/min

为方便表述起见,下文中 10℃ 时的饱和导水率统一简称为饱和导水率。

1.2 多重分形理论

多重分形是分形的进一步发展,可以看作单分形在空间上的缠结,能再现复杂分形在生长过程中不同层次的特征,该理论研究的主要内容是标度分布特征,通常用配分函数和奇异谱这两种方法来表征^[7-8,28-29]。

假设将长度为 L 的分形对象分成 $N(\varepsilon)$ 个尺度为 ε 的单元,物理量在各单元中概率的计算公式为

$$\mu_i(\varepsilon) = \frac{I_i(\varepsilon)}{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} I_i(\varepsilon)} \quad (3)$$

式中 $N(\varepsilon)$ ——尺度为 ε 时样本的个数

$I_i(\varepsilon)$ ——尺度为 ε (本文 ε 分别为 2、4、8、16、32、64、128 m) 时, 第 i 份内物理量的值

则 $\mu_i(\varepsilon)$ 的 q 阶概率 (配分函数) 就可以表示为

$$\mu_i(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon)^q \quad (4)$$

分析 $\mu_i(q, \varepsilon)$ 和 ε 的双对数图, 如果其为一组斜线, 则说明其具有多重分形性质; 由 $\mu_i(q, \varepsilon)$ 和 ε 的双对数图斜率可得质量指数 $\tau(q)$ 。

则广义分形维数就可以表示为

$$\begin{cases} D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(q, \varepsilon)}{\lg \varepsilon} & (q \neq 1) \\ D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \lg \mu_i(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} & (q = 1) \end{cases} \quad (5)$$

$\tau(q)$ 与 $D(q)$ 之间关系为

$$\tau(q) = (q-1)D(q) \quad (6)$$

当 $D(q) = 1$ 时, 式(6)可变形为 $\tau(q) = q-1$, 可用于衡量多重分形特征的强弱, 当所计算的 $\tau(q)$ 与 $q-1$ 最优拟合直线无限偏离时, 说明多重分形特征较强, 反之则较弱。

为了描述多重分形的细节变化, 还需要计算另一组参数, 即奇异指数 $\alpha(q)$ 和维数分布函数 $f(\alpha)$, 经勒让德变换后, $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha)$ 可以表示为

$$\alpha(q) = \frac{d(\tau(q))}{dq} \quad (7)$$

$$f(\alpha) = q\alpha(q) - \tau(q) \quad (8)$$

如果 $f(\alpha)$ 是定值, 则所研究的样本是单分形的; 如果 $f(\alpha)$ 是一个单峰函数, 表明此样本具有多重分形特性。

维数分布函数 $f(\alpha)$ 的对称程度可以用不对称系数 R 表示, 即

$$R = \frac{\Delta\alpha(q)_L - \Delta\alpha(q)_R}{\Delta\alpha(q)_L + \Delta\alpha(q)_R} \quad (9)$$

式中 $\Delta\alpha(q)_L$ —— $f(\alpha) - \alpha(q)$ 关系曲线左侧开口长度

$\Delta\alpha(q)_R$ —— $f(\alpha) - \alpha(q)$ 关系曲线右侧开口长度

$R > 0$ 表明谱向左拖尾, 其绝对值越大则谱的不对称性越明显。

2 结果分析

2.1 土壤水力特性的特征统计值

利用式(1)对南-北、东-西两条直线上的实测土壤水分特征曲线进行 Brooks - Corey 模型模拟, 得到参数 θ_s 、 α 、 n , 并利用式(2)对不同温度下的饱和导水率进行统一化处理, 对 Brooks - Corey 模型参数 (θ_s 、 α 、 n)、饱和导水率 (K_s)、土壤含水率 (θ)、容重 (ρ) 等土壤水力特性进行经典统计分析, 结果如表 1 所示。

表 1 土壤水力特性的统计特征值

Tab. 1 Statistical eigenvalues of soil hydraulic properties

参数	方位	最大值	最小值	均值	标准差	方差	变异系数
$\theta_s/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	南-北	0.601	0.388	0.424	0.034	0.001	0.081
	东-西	0.490	0.388	0.417	0.025	0.001	0.061
α	南-北	0.123	0.001	0.009	0.014	0.000	1.564
	东-西	0.054	0.001	0.006	0.008	0.000	1.165
n	南-北	0.476	0.018	0.126	0.075	0.006	0.596
	东-西	0.385	0.045	0.128	0.062	0.004	0.484
$K_s/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	南-北	0.986	0.001 2	0.263	0.264	0.070	1.002
	东-西	0.805	0.000 6	0.216	0.222	0.049	1.026
	西北-东南	0.980	0.000 5	0.282	0.259	0.067	0.920
	东北-西南	0.954	0.001 1	0.210	0.239	0.057	1.139
$\theta/\%$	南-北	28.571	18.035	24.270	2.098	4.401	0.086
	东-西	28.411	18.290	22.505	1.773	3.142	0.079
	西北-东南	30.412	18.982	23.471	2.339	5.470	0.100
	东北-西南	29.522	16.114	23.402	2.269	5.147	0.097
$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	南-北	1.668	1.029	1.417	0.113	0.013	0.080
	东-西	1.724	1.198	1.439	0.102	0.010	0.071
	西北-东南	1.699	1.130	1.388	0.117	0.014	0.084
	东北-西南	1.696	1.090	1.396	0.116	0.014	0.083

由表1可知:Brooks - Corey 模型参数(θ_s 、 α 、 n)最大值和最小值均出现在南-北方向,表明Brooks - Corey 模型参数在南-北方向上的变化较为剧烈,由变异系数也可以看出南-北方向上的变异较为强烈,并且 α 的变异程度属于强变异, n 为中等变异, θ_s 为弱变异,即表明南-北方向上的土壤水分特征曲线变化较为明显。 K_s 最大值出现在南-北方向,最小值出现在西北-东南方向,整体上 K_s 的变异系数都较大,以东北-西南方向上的变异最为强烈,这可能是由于土壤中大空隙、草根、碎石、虫孔等影响土壤饱和和导水率的因素存在,使得土壤饱和和导水率的分布极不均匀。 θ 的标准差和方差均高于其他土壤水力特性,这是因为土壤含水率比其他土壤水力特性高一到两个数量级,客观上引起标准差和方差偏大,但从其变异系数可知,土壤含水率的变异强度很弱,属于弱变异。 ρ 的高值出现在东-西方向,最低值出现在南-北方向,整体上分布较为均匀,变异性不强,为弱变异。

由上分析可知, α 和 K_s 的变异系数较大,表现为强变异; n 的变异系数介于0.1~1之间,表现为中等变异水平; θ_s 、 θ 及 ρ 的分布较为均匀,且变异系数小于0.1,为弱变异。

2.2 土壤水力特性的多重分形判断

经典统计分析只是从统计学的角度来分析土壤水力特性的变异情况,不能代表其空间结构,为此本文从多重分形角度来揭示土壤水力特性的空间变异情况。利用式(3)、式(4)对 θ_s 、 α 、 n 、 K_s 、 θ 、 ρ 等土壤水力特性的配分函数进行计算,得到 $\lg \mu_i(q, \varepsilon) - \lg \varepsilon$ 的关系图,如图1所示。初步判定其是否具有多重分形特征。

由图1可知:不同方向上的Brooks - Corey 模型参数(θ_s 、 α 、 n)、饱和导水率(K_s)、土壤含水率(θ)、容重(ρ)随 q 的变化 $\lg \mu_i(q, \varepsilon) - \lg \varepsilon$ 可以用一簇斜线来拟合,并且线性关系显著($R^2 > 0.92$),即在整体上表现为良好的标度不变性。这表明不同方向上的土壤水力特性存在一定的多重分形特征,可以用多重分形理论对其进行研究。

$\lg \mu_i(q, \varepsilon) - \lg \varepsilon$ 关系曲线只是进行多重分形的初步判定条件,不同方向上的 θ_s 、 α 、 n 、 K_s 、 θ 、 ρ 是否真正存在多重分形特征还需要分析其 $\tau(q) - q$ 关系曲线,具体形式如图2所示。由图2可以看出:

(1)不同方向上的Brooks - Corey 模型参数(θ_s 、 α 、 n)、饱和导水率(K_s)、土壤含水率(θ)、容重(ρ)的 $\tau(q) - q$ 关系曲线变化趋势一致,即 $\tau(q)$ 随着 q 的增加而增加,这表明各土壤水力特性在整个方向上表现出类似的变化趋势。

(2) θ_s 、 θ 及 ρ 的 $\tau(q) - q$ 关系曲线在所研究的方向与 $q - 1$ 拟合直线无限接近,这表明 θ_s 、 θ 及 ρ 的多重分形特征较弱,Zeleke等^[24]也发现 θ_s 的多重分形特征不明显。

(3)在所研究的方向上, K_s 、 α 及 n 的 $\tau(q)$ 是 q 的凸函数(见图2b、2c、2d),即 $\tau(q) - q$ 关系曲线存在一定的非线性关系,且与 $q - 1$ 拟合直线无限偏离,表明 K_s 、 α 及 n 的多重分形特征明显。

(4)就 α 而言,两方向的 $\tau(q) - q$ 关系曲线在 $q < 0$ 时与 $q - 1$ 拟合直线的偏离程度基本一致,但随着 q 的不断增大,南-北方向的 $\tau(q) - q$ 关系曲线与 $q - 1$ 拟合直线的偏离程度逐渐强于东-西方向,表明 α 在东-西方向上的变异要弱于南-北方向,即土壤在南-北方向上的起始释水的变化程度更为强烈。

(5)就 n 而言,南-北方向的 $\tau(q) - q$ 关系曲线与 $q - 1$ 拟合直线的偏离程度明显于东-西方向,表明土壤水分的释水速度在南-北方向上的变异程度较为明显。

(6)就 K_s 而言,当 $q < 0$ 时, $\tau(q) - q$ 关系曲线与 $q - 1$ 拟合直线的偏离程度从大到小依次为:西北-东南、东-西、东北-西南、南-北,表明 K_s 在西北-东南方向上的变异要强于其他方向,但随着 q 的不断增大这种差异性逐渐缩小,即各方向差异不明显。

2.3 土壤水力特性的广义分形维数计算

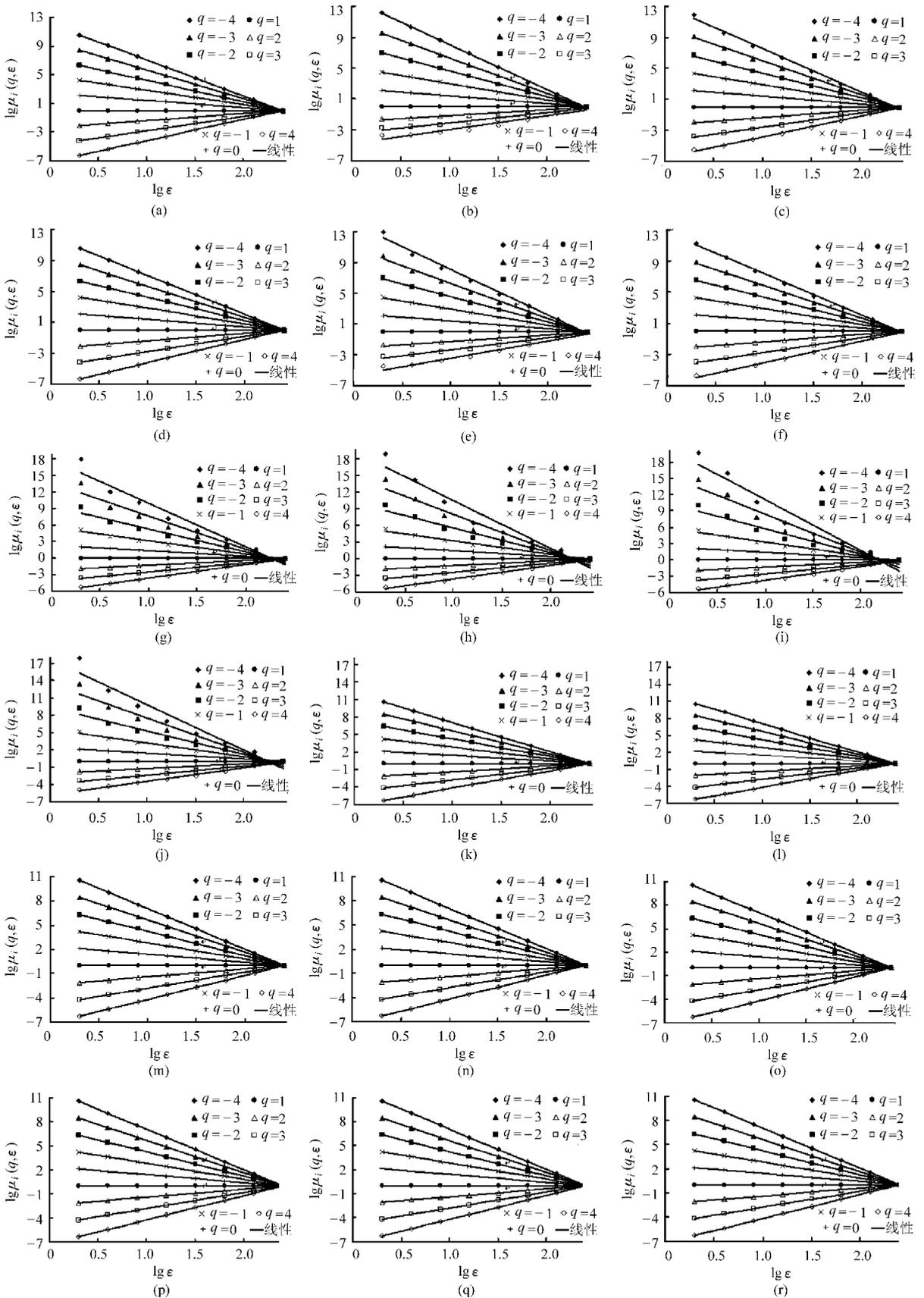
由上述分析可知土壤水力特性具有多重分形性质,利用式(5)进一步计算其广义分形维数 $D(q)$, $D(q)$ 随 q 的变化如图3所示。由图3可知:

(1)不同方向上 θ_s 、 α 、 n 、 K_s 、 θ 、 ρ 的 $D(q) - q$ 关系曲线变化略有不同,但基本变化趋势保持一致,即随着 q 不断增加 $D(q)$ 不断减小,这再次验证了所研究区域内不同方向上的土壤水力特性具有一定的多重分形结构。

(2) θ_s 、 θ 、 ρ 、 K_s 、 α 、 n 的广义分形维数变化范围分别为:0.997~1.002、0.996~1.003、0.997~1.003、0.7~1.9、0.6~1.2、0.9~1.1。由此可知各土壤水力特性 $D(q)$ 随 q 的递减程度不同, θ_s 、 θ 及 ρ 的变化程度缓于 α 、 n 及 K_s ,说明 K_s 、 α 及 n 的多重分形结构较 θ_s 、 θ 及 ρ 明显,表明其在空间上的变化更为复杂。就 α 、 n 及 K_s 而言, K_s 的变幅大于 α 、 n 。

(3) θ_s 、 θ 、 ρ 的广义分形维数变化范围很小,表明其多重分形结构较弱,特征不明显,空间变异性较强。

(4)就 θ_s 和 n 而言,南-北方向上 $D(q)$ 的变化范围要大于东-西方向,表明南-北方向上的空间变异性要强于东-西方向。

图1 土壤水力特性的 $\lg\mu_i(q, \varepsilon) - \lg\varepsilon$ 关系Fig. 1 Relationship between $\lg\mu_i(q, \varepsilon)$ and $\lg\varepsilon$ of soil hydraulic properties

(a) 南-北, θ_s (b) 南-北, α (c) 南-北, n (d) 东-西, θ_s (e) 东-西, α (f) 东-西, n (g) 南-北, K_s (h) 东-西, K_s
 (i) 西北-东南, K_s (j) 东北-西南, K_s (k) 南-北, θ (l) 东-西, θ (m) 西北-东南, θ (n) 东北-西南, θ (o) 南-北, ρ
 (p) 东-西, ρ (q) 西北-东南, ρ (r) 东北-西南, ρ

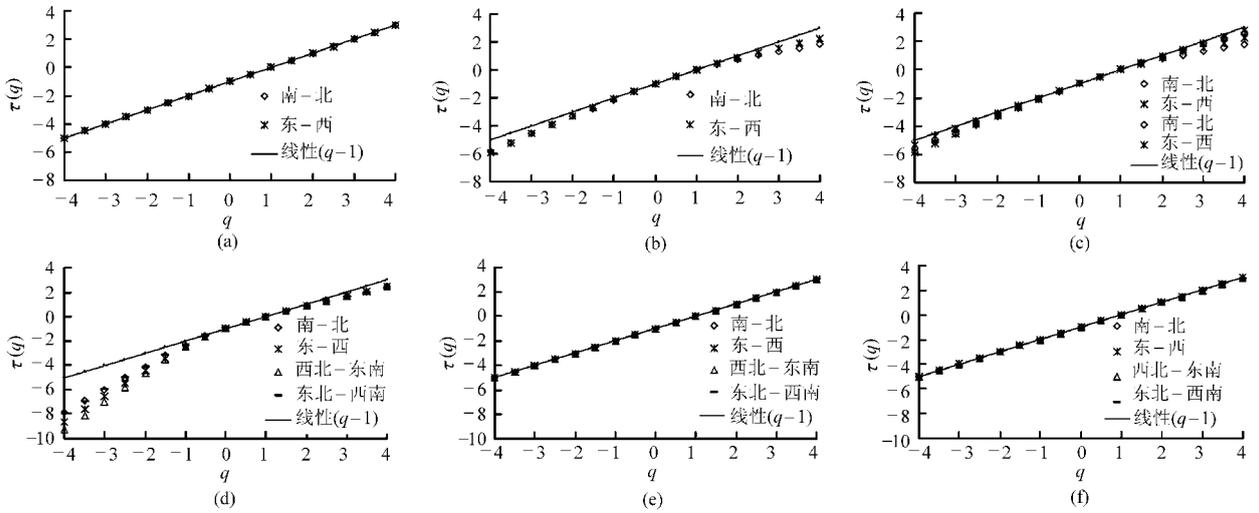


图2 土壤水力特性的 $\tau(q)$ - q 关系图

Fig. 2 Relationship between $\tau(q)$ and q of soil hydraulic properties

(a) θ_s (b) α (c) n (d) K_s (e) θ (f) ρ

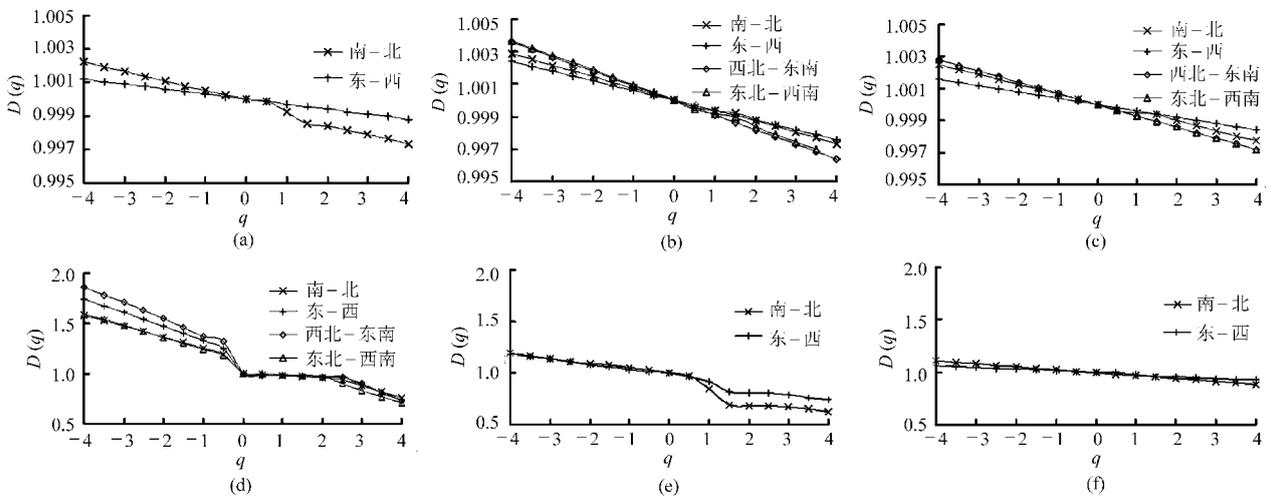


图3 土壤水力特性的 $D(q)$ - q 关系图

Fig. 3 Relationship between $D(q)$ and q of soil hydraulic properties

(a) θ_s (b) θ (c) ρ (d) K_s (e) α (f) n

(5)就 θ 而言,东北-西南、西北-东南方向上 $D(q)$ 的变化明显强于南-北、东-西方向,说明土壤含水率在东北-西南、西北-东南方向上的空间变异性强,变化较复杂,可能是由土壤结构等土壤属性的差异引起。

(6)如图 3c 所示, ρ 在东北-西南、西北-东南方向出现类似的变化趋势,即在此方向上引起土壤容重空间变异的因素是类似的,且明显区别于东-西方向。

(7)通过对图 3d 的分析表明,当 $q < 0$ 时, K_s 在西北-东南方向上的变化范围明显强于其他方向,但随着 q 的不断增大,各方向的变化趋于一致,空间差异逐渐缩小。

(8) α 的 $D(q)$ - q 关系曲线表明:随着 q 的不断增大,南-北方向上的变化强于东-西方向,尤其表现在 $q > 0$ 段,即 α 在南-北方向上的空间变异性较

强,这与 $\tau(q)$ - q 关系曲线的分析结果是一致的。

2.4 土壤水力特性奇异指数和维数分布函数计算

$D(q)$ 是从整体上表征不同方向上土壤水力特性的多重分形特性,但它们不能反映局部空间结构的分布特征。为进一步揭示不同方向上土壤水力特性的空间结构,需要对其进行进一步的局部分析,即对不同方向上的土壤水力特性的奇异指数和维数分布函数进行计算。利用式(7)及式(8)进行 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha)$ 的计算,具体结果如图 4 所示。经由式(9)计算不对称系数 R ,得出不同方向上土壤水力特性的 R 值为零,表明 $f(\alpha)$ - $\alpha(q)$ 关系曲线是对称分布的,不存在拖尾现象,由图 4 也可以看出 $f(\alpha)$ - $\alpha(q)$ 关系曲线是对称的“钟形”曲线。由图 4 可知:

(1)不同方向上的 Brooks-Corey 模型参数(θ_s 、 α 、 n)、饱和导水率(K_s)、土壤含水率(θ)、容重(ρ)的多重分形奇异谱函数 $f(\alpha)$ - $\alpha(q)$ 均呈连续“钟

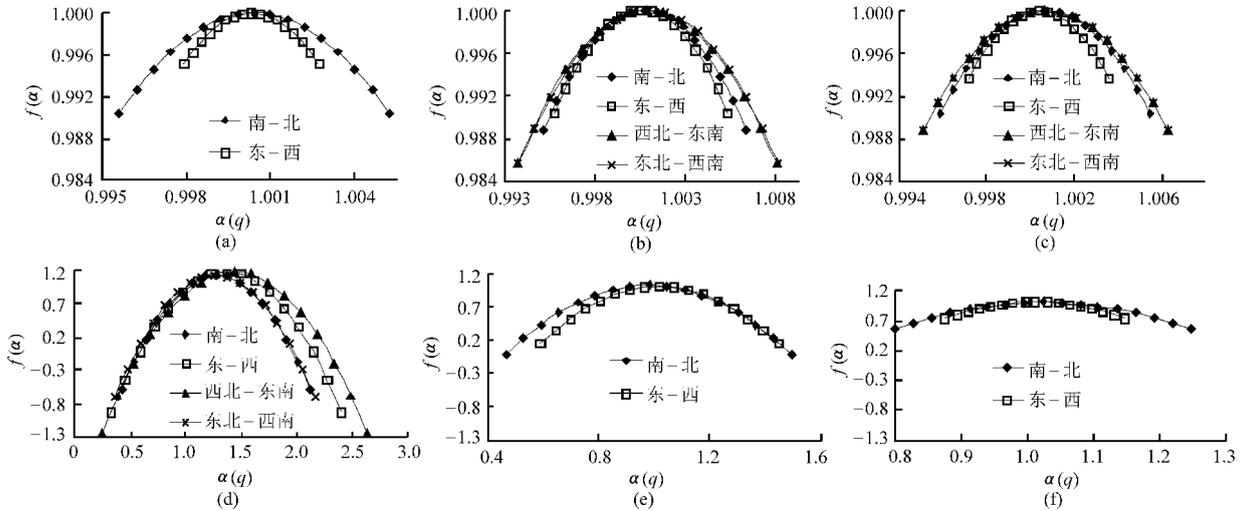


图4 土壤水力特性的多重分形谱

Fig. 4 Multifractal spectra of soil hydraulic properties

(a) θ_s (b) θ (c) ρ (d) K_s (e) α (f) n

形”分布,同一参数不同方位的 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线和同一方位不同参数的 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线都不尽相同,但绝大多数为对称的上凸曲线。

(2) θ_s 、 θ 、 ρ 、 K_s 、 α 及 n 的 $f(\alpha)$ 的变化幅度分别为:0.99~1.00、0.985~1.000、0.988~1.000、-1.23~1.16、-0.014~1.017、0.548~0.996,由此表明 K_s 、 α 及 n 的变幅较大, θ_s 、 θ 及 ρ 的变幅较少,说明 K_s 、 α 及 n 的多重分形特征明显,局部差异较大,空间变异性较强。

(3) θ_s 、 θ 、 ρ 、 K_s 、 α 及 n 的谱宽分别为:0.0048~0.0096、0.0096~0.0144、0.0064~0.0122、1.268~1.498、0.854~1.032、0.272~0.448, K_s 、 α 及 n 无论是谱宽还是谱宽变幅都较 θ_s 、 θ 及 ρ 大,表明 θ_s 、 θ 及 ρ 的多重分形特征不明显,局部差异较小,空间变异性较弱。

(4)就 θ_s 和 n 而言, $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线在南-北方向上的开口口径要大于东-西方向,表明 θ_s 和 n 在南-北方向上的局部差异较东-西方向明显。

(5)如图4b所示, θ 在东北-西南、西北-东南方向上的 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线的开口口径和 $f(\alpha)$ 的变化范围均明显大于其他方向,这表明 θ 在东北-西南、西北-东南方向上的局部变化较其他方向剧烈。

(6)就 ρ 而言, $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线的开口口径变化范围大小依次为:西北-东南、东北-西南、南-北、东-西,且 ρ 出现一定的左偏现象,表明 ρ 在东西方向上的局部差异不明显,高值分布对其影响大。

(7)就 K_s 而言, $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线的左端各方向变化不明显,但随着 $\alpha(q)$ 的增加 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线出现了不同程度的左偏,这表明引起它们

局部空间差异的信息发生了变化, K_s 的高值使得其在西北-东南方向上的变异更为突出。

(8)见图4e, α 的 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线在南-北方向上的开口口径要大于东-西方向,且东-西方向的 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线出现一定的右偏,表明 α 在东-西方向上的局部空间变异性较弱,且其空间变异是由 α 的低值分布造成。

不同采样方向上和不同土壤水力特性参数的多重分形谱的形态是不相同的,这表明引起它们空间差异的信息有所不同,而这种差异在局部条件下会更为突出。

3 结束语

基于多重分形分析揭示了壤土土壤水力特性的空间变异特性,在无标度尺度 $-4\sim 4$ 内, $\lg\mu_i(q,\varepsilon)-\lg\varepsilon$ 的关系曲线表明土壤水力特性(θ_s 、 α 、 n 、 K_s 、 θ 及 ρ)存在多重分形特征, $\tau(q)-q$ 关系曲线和 $D(q)-q$ 关系曲线从整体层面上一致表明 θ_s 、 θ 及 ρ 的多重结构较弱,而 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线再次表明其局部多重分形特征也较弱。而 K_s 、 α 及 n 正好与其相反, $\lg\mu_i(q,\varepsilon)-\lg\varepsilon$ 的关系曲线、 $\tau(q)-q$ 关系曲线、 $D(q)-q$ 关系曲线和 $f(\alpha)-\alpha(q)$ 关系曲线一致表明 K_s 、 α 及 n 具有多重分形特性,且特征明显。 θ_s 、 θ 、 ρ 、 K_s 、 α 、 n 的广义分形维数变化范围分别为:0.997~1.002、0.996~1.003、0.997~1.003、0.7~1.9、0.6~1.2、0.9~1.1,表明 θ_s 、 θ 及 ρ 的空间变异性较弱, K_s 的空间变异性很强, α 的空间变异性较强, n 的空间变异性强,且 K_s 比 α 和 n 具有更为复杂的空间分布结构。

参 考 文 献

- 1 詹卫华. 土壤水力特性分形特征的研究[D]. 北京:中国农业大学,2000.
Zhan Weihua. Study on fractals of soil hydraulic properties [D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- 2 徐绍辉,张佳宝,刘建立,等. 表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究[J]. 土壤学报,2002,39(4):498~504.
Xu Shaohui, Zhang Jiabao, Liu Jianli, et al. Suitability of models describing soil water retention curve [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 498~504. (in Chinese)
- 3 来剑斌,王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]. 水土保持学报,2003,17(1):137~140.
Lai Jianbin, Wang Quanjiu. Comparison of soil water retention curve model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1): 137~140. (in Chinese)
- 4 程强,孙宇瑞,林剑辉,等. 牧场土壤含水率与坚实度空间变异与相关性分析[J]. 农业机械学报,2009,40(3):103~107.
Cheng Qiang, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Determining spatial variability of water content and hardness in pastureland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 103~107. (in Chinese)
- 5 夏拥军,丁为民. 土壤机械阻力的连续测定及空间变异结构分析[J]. 农业机械学报,2006,37(11):70~73.
Xia Yongjun, Ding Weimin. Measurement of soil mechanical resistance on-the-go and analysis of its spatial variability [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 70~73. (in Chinese)
- 6 龚元石,廖超子,李保国. 土壤含水量和容重的空间变及其分形特征[J]. 土壤学报,1998,35(1):10~15.
Gong Yuanshi, Liao Chaozi, Li Baoguo. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 10~15. (in Chinese)
- 7 刘小刚,赵慧洁,李娜. 基于多重分形谱的高光谱数据特征提取[J]. 光学学报,2009,29(3):844~848.
Liu Xiaogang, Zhao Huijie, Li Na. Feature extraction based on multi-fractal spectrum for hyperspectral data [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 844~848. (in Chinese)
- 8 都国雄,宁宣熙. 上海证券市场的多重分形特性分析[J]. 系统工程理论与实践,2007,27(10):40~47.
Du Guoxiong, Ning Xuanxi. Multifractal analysis on Shanghai stock market [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(10): 40~47. (in Chinese)
- 9 Pont O, Turiel A, Pérez-Vicente C J. Empirical evidences of a common multifractal signature in economic, biological and physical systems [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2009, 388(10): 2 025~2 035.
- 10 Yu L, Qi D W. Analysis and processing of decayed log CT image based on multifractal theory [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 147~154.
- 11 白晓宇,袁峰,周涛发,等. 多重分形方法识别铜陵矿区土壤中 Cd 的地球化学异常[J]. 矿物岩石地球化学通报,2007,27(3):306~310.
Bai Xiaoyu, Yuan Feng, Zhou Taofa, et al. The determination of geochemical abnormality of soil Cd in Tongling mining area using multifractal method [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 27(3): 306~310. (in Chinese)
- 12 黄冠华,詹卫华. 土壤水分特性曲线的分形模拟[J]. 水科学进展,2002,13(1):55~60.
Huang Guanhua, Zhan Weihua. Modeling soil water retention curve with fractal theory [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 55~60. (in Chinese)
- 13 王康,张仁铎,王富庆. 基于不完全分形理论的土壤水分特征曲线模型[J]. 水利学报,2004,35(5):1~6.
Wang Kang, Zhang Renduo, Wang Fuqing. Model for estimating soil water retention based on incomplete fractal theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5): 1~6. (in Chinese)
- 14 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 11~15. (in Chinese)
- 15 徐绍辉,刘建立. 估计不同质地土壤水分特征曲线的分形方法[J]. 水利学报,2003,34(1):78~82.
Xu Shaohui, Liu Jianli. Fractal approach for estimating soil water retention curves of various textures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 78~82. (in Chinese)
- 16 Wang D, Fu B J, Zhao W W, et al. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land-use types on the Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2008, 72(1): 29~36.
- 17 Miranda J G V, Montero E, Alves M C, et al. Multifractal characterization of saprolite particle-size distributions after topsoil removal [J]. Geoderma, 2006, 134(3~4): 373~385.

- 18 管孝艳,杨培岭,任树梅,等. 基于多重分形理论的壤土粒径分布非均匀性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009,17(2):196~205.
Guan Xiaoyan, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Heterogeneity analysis of particle size distribution for loamy soil based on multifractal theory [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(2): 196~205. (in Chinese)
- 19 Li Yi, Li Min, Robert Horton. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions[J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 75~83.
- 20 Bird N, Cruz D M, Saa A, et al. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil [J]. Journal of Hydrology, 2006, 322(1~4): 211~219.
- 21 Caniego F J, Espejo R, Martin M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability [J]. Ecological Modeling, 2005, 182(3~4): 291~303.
- 22 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.
- 23 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 81~86. (in Chinese)
- 24 Zeleke T B, Si B C. Scaling relationships between saturated hydraulic conductivity and soil physical properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69: 1 691~1 702.
- 25 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.
- 26 朱磊,周清,王康,等. 基于多重分形理论的土壤水非均匀流动分析[J]. 水科学进展,2009,20(3):392~397.
Zhu Lei, Zhou Qing, Wang Kang, et al. Analysis of the heterogeneous soil water flow based on the multifractal theory [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 392~397. (in Chinese)
- 27 梁东丽,同延安,Ove Emteryd,等. 壤土土壤剖面中 N₂O 浓度的时间和空间变异[J]. 生态学报,2003,23(4):731~737.
Liang Dongli, Tong Yan'an, Ove Emteryd, et al. Spatial and temporal variation of nitrous oxide concentrations in soil profiles of Manural Loessial Soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 731~737. (in Chinese)
- 28 Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 1 033~1 041.
- 29 Lopes R, Betrouni N. Fractal and multifractal analysis: a review [J]. Medical Image Analysis, 2009, 13(4): 634~649.

(上接第 63 页)

- 7 John A,Christine A. Influences of root diameter, tree age, soil depth and season on fine root survivorship in *Prunus avium* [J]. Plant and Soil, 2005, 276(1~2):15~22.
- 8 张福庆,田卫东. 葡萄根系[J]. 葡萄栽培与酿酒,1997(1):40~43.
- 9 Richards D. The grape root system [M]//Jaruck J. Horticultural reviews. Victoria: The AVI Publishing Company, Inc., 1983.
- 10 Van Zyl J L. Response of grapevine roots to soil water regimes and irrigation systems [M]//Van Zyl J L. The grapevine root and its environment. Pretoria:Department of Agriculture and Water Supply,1988.
- 11 Sanders J,Brown D. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions [J]. Agronomy Journal, 1978,70(6):1 073~1 076.
- 12 Nagarajah S. Effects of soil texture on the rooting patterns of Thompson seedless vines on own roots and on Ramsey rootstock in irrigated vineyards [J]. American Society for Enology and Viticulture, 1987, 38(1):54~59.
- 13 Taylor H,Huck M,Klepper B,et al. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron [J]. Agronomy Journal,1970,62(6): 807~809.
- 14 Steele S,Gower S,Vogel J,et al. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada [J]. Tree Physiology, 1997, 17(8~9): 577~587.
- 15 Itoh S. In situ measurement of rooting density by micro-rhizotron [J]. Soil Science and Plant Nutrition,1985,31(4):653~656.
- 16 唐祚舜,李召虎. 植物根系激素研究[M]//邹琦,王学臣. 作物高产高效物理学研究进展. 北京:科学出版社,1994.