

内蒙古河套灌区不同土层有机质空间变异的分形

张娜^{1,2}, 张红玲², 屈忠义¹, 张栋良¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 宁夏回族自治区水利科学研究院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 以内蒙古河套灌区解放闸灌域为研究对象, 以区域内间隔 4 km 等间距 112 个取样点共 448 个样本为基础, 通过多重分形及联合多重分形方法, 对有机质含量在不同土层 (0~20 cm、20~40 cm、40~70 cm 与 70~100 cm) 的空间变异特性及其相互关系进行研究。结果显示, 有机质含量 0~20 cm 至 70~100 cm 土层的多重分形谱宽度依次为 0.933、0.795、0.824、0.805, 即在 0~20 cm 土层空间变异性最大, 而 20~40 cm 土层空间变异性最小。不同土层多重分形谱曲线均表现为左钩状 ($\Delta f > 0$), 表明在灌域内土壤有机质的空间分布中, 数值较大的数据占主导地位。同时从土壤表层到埋深 1 m 处 $D(1)/D(0)$ 依次为 0.983、0.980、0.973、0.965, 其值逐渐减小, 即空间分布逐渐由密集区域向稀疏区域转化。联合多重分形分析表明 0~20 cm 土层与 20~40 cm、40~70 cm 土层空间变异相关程度较高, 而与 70~100 cm 土层空间变异相关程度较低。

关键词: 有机质; 不同土层; 空间异质性; 多重分形; 联合多重分形; 内蒙古河套灌区
中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A

Fractal study on organic matter spatial heterogeneity of different soil layers in Inner Mongolia Hetao Irrigation District

ZHANG Na^{1,2}, ZHANG Hong-ling², QU Zhong-yi¹, ZHANG Dong-liang¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
2. Scientific Research Institute of Water Conservancy of Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: The Jiefangzha irrigation district in the Inner Mongolia Hetao irrigation area was taken as research subject. Based on 448 samples of 112 sampling points at 4 km of interval distance in the region, and using multi-fractal and joint multi-fractal method, we studied the spatial variability of organic matter concentration in different soil layers (0~20 cm, 20~40 cm, 40~70 cm, 70~100 cm) and their characteristics in the multiscale correlation. Results showed that the organic matter concentration in 20~40 cm soil layer had the smallest spatial variability, and in the surface was the strongest ($\Delta \alpha$ of 0~20 cm to 70~100 cm soil layer was 0.933, 0.795, 0.824 and 0.805). The multi-fractal spectrum curve of different layers showed a left hook ($\Delta f > 0$), indicating that the larger data dominated. Also, the spatial distribution gradually transformed from the dense region to the sparse region from the surface to the 1m depth ($D(1)/D(0)$ from the surface to the 1 m depth was 0.983, 0.980, 0.973 and 0.965). The joint multi-fractal contour map and the corresponding singular index of different soil layers showed that the correlation between 0~20 cm and 20~40 cm, 40~70 cm were relatively high, but with 70~100 cm soil layer was relatively low.

Keywords: organic matter; different soil layers; spatial variation; multifractal; joint multifractal; Inner Mongolia hetao irrigation district

由于受到自然因素和人为因素的共同作用, 土壤特性在空间分布上表现出不同程度的变异性^[1-2], 且研究区域和尺度不同时, 土壤特性空间分布的复杂性和异质性程度并不相同^[3-4]。此外, 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^[5]。垂直方向上不同土层土壤特性的空间变异特征及其主要影响因素并不完全相同^[6], 且垂直方向的不同土层土壤特性空间变异性

之间存在一定的相互关系。这种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,也有助于实现通过某一土层土壤特性的空间变异特征反映其它土层土壤特性的空间变异特征。因此,定量分析不同土层土壤特性的空间变异特征及其相互关系已成为目前水土科学的研究热点之一。

近年来,各国学者对不同尺度土壤特性参数的空间变异进行了探讨,从不同角度提出了一些值得借鉴的研究方法,如地质统计学、方差分析、自相关分析、谱分析、小波分析和分形理论等^[7]。分形理论作为一种能够解释研究对象复杂结构并定量表征均一程度的工具,已被广泛应用于土壤特性空间分布研究中^[8-11]。多重分形方法将分形集联合起来形成多重分形谱用以描述土壤特性的空间变异特性。该方法不需要数据符合某一种分布,且其结果不受研究对象取样尺度的影响,是以研究对象尺度为基础划分多尺度特征的结果。同时联合多重分形理论可以定量分析和确定同一几何支撑下不同研究对象在多尺度上的相互关系^[12-13]。

有机质含量是反映土壤地力的重要指标,其空间变异性的研究具有重要意义。然而,目前应用分形理论进行土壤有机质的空间分布特征研究,主要集中在田间尺度及某一土层上,而大区域尺度上不同土层空间变异性的相互关系研究较少。为此,本文以内蒙古河套灌区解放闸灌域内间隔 4 km 等间距 112 个取样点共 448 个样本为基础,通过多重分形及联合多重分形方法,研究土壤有机质不同土层空间变异及其相互关系,对于全面理解土壤有机质空间分布具有重要意义,并为农业技术研究中野外采样系统设计提供一定的参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区位于黄河流域上游,是我国第三大灌区且为亚洲最大的灌区,总土地面积 $1.12 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中灌溉地面积达到 $5.70 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。本文以河套灌区解放闸灌域作为研究对象,解放闸灌域是河套灌区第二大灌域,地处东经 $106^\circ 43' \sim 107^\circ 27'$,北纬 $40^\circ 34' \sim 41^\circ 14'$,东南紧邻黄河,西北地处狼山脚下。西北以总排干沟为界,东南则以总干渠为界,大部分位于内蒙古自治区杭锦后旗所辖境内。解放闸灌域总控制面积 $2.1568 \times 10^5 \text{ hm}^2$,灌溉面积 $1.421 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中耕地 $1.2193 \times 10^5 \text{ hm}^2$,林果地面积 $5.507 \times 10^3 \text{ hm}^2$,牧草地面积 $1.461 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

灌域南北长约 87 km,东西宽约 78 km,呈三角形,解放闸灌域属中温带高原型气候,风大雨少,气候干燥。地形较为平缓,地势由东南向西北微度倾斜,坡度约为 0.02%。海拔在 1 030 ~ 1 046 m 之间。

1.2 样点布设及土样采集

于 2011 年 8 月 15 日至 9 月 10 日期间,根据解放闸灌域实际控制面积,通过 ArcGIS 在数字化图(1:12.5 万)上按照 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 进行网格设计,按 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 70 cm 与 70 ~ 100 cm 共 4 层进行取样。取样区域北部以总排干沟为界,东部以四排干沟为界。采样点位置均用 GPS 定位,遍布整个灌域,基本属于平均分布。经统计,共取有效点 112 个。取样点位置如图 1 所示。

1.3 测试项目及方法

按照土壤学实验规范,土样经过风干,研磨,过筛(2 mm)后,参考《土壤、水、植物理化分析教程》^[14]中的浓硫酸-重铬酸钾容量法测定。

1.4 研究方法

多重分形方法主要用于分析单一变量的空间变异性,描述多重分形的参量有两种,一种为 $D(q)$ 和 q ,另一种为 $\alpha(q)$ 和 $f(q)$,计算过程可参考文献[12-13]。

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^n p_i^q(\delta)}{\log \delta} \tag{1}$$

$$\alpha(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \log p_i(\delta)}{\log \delta} \tag{2}$$

$$f(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \log \mu_i(q, \delta)}{\log \delta} \tag{3}$$

式中, $D(q)$ 为广义维数; q 为质量概率; $p_i(\delta)$ 为统计矩; δ 为尺度; $p_i(\delta) \alpha(q)$ 为研究对象 μ 的奇异指数; $f(q)$ 为研究对象奇异指数为奇异指数的维数分布函数;奇异指数 $\alpha(q)$ 和奇异指数维数分布函数 $f(q)$ 的关系曲线称为多重分形谱。

其中研究对象的多重分形谱的宽度越大,表示研究对象的空间变异性越强;若研究对象的多重分形谱左偏趋势比较明显,表示研究对象的高值信息对研究对象的空间分布特征影响显著,若研究对象的多重分形谱右偏趋势比较明显,表示研究对象的低值信息对研究对象的空间分布特征影响显著。

将多重分形拓展为联合多重分形后,可利用联合多重分形方法确定不同变量在多尺度上的相关性,计算公式可参考文献[15-17]。

$$\alpha^1(q^1, q^2) = - \{ \log [N(\delta)] \}^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \{ \mu_i(q^1, q^2, \delta) \times \log [p_i^1(\delta)] \} \tag{4}$$

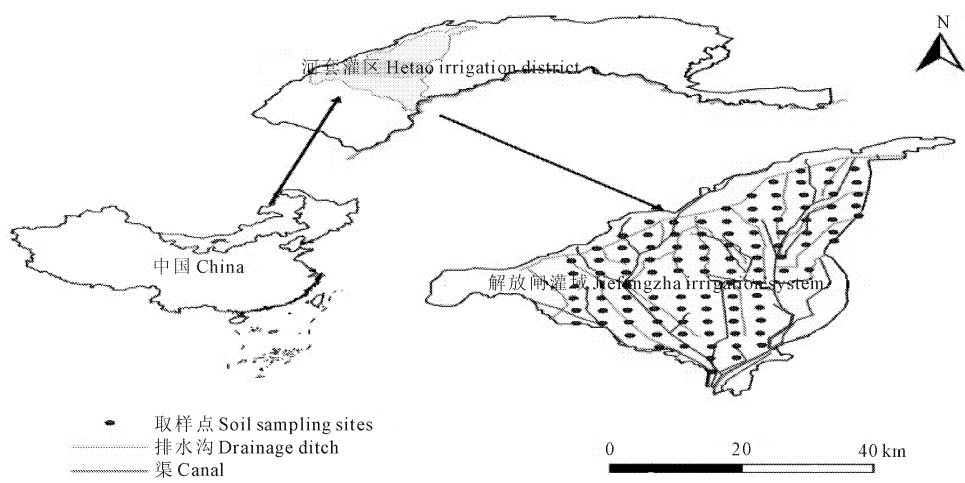


图 1 取样点分布示意图

Fig.1 Distribution map of sampling sites

$$\alpha^2(q^1, q^2) = - \{ \log [N(\delta)] \}^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \{ \mu_i(q^1, q^2, \delta) \times \log [p_i^2(\delta)] \}$$
 (5)

$$f(\alpha^1, \alpha^2) = - \{ \log [N(\delta)] \}^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \{ \mu_i(q^1, q^2, \delta) \times \log [\mu_i(q^1, q^2, \delta)] \}$$
 (6)

式中, $\mu_i(q^1, q^2, \delta) = p_i^1(\delta)^{q^1} p_i^2(\delta)^{q^2} / \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^1(\delta)^{q^1} \cdot p_i^2(\delta)^{q^2}$; $p_i^1(\delta)$ 表示研究对象 1 的质量概率, $p_i^2(\delta)$ 表示研究对象 2 的质量概率; $\alpha^1(q^1, q^2)$ 表示研究对象 1 的奇异指数, $\alpha^2(q^1, q^2)$ 表示研究对象 2 的奇异指数, $N(\delta)$ 表示研究尺度为 δ 时划分的区间个数。

联合多重分形参数 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 、 $f(\alpha^1, \alpha^2)$ 的三维图称为研究对象 1 和研究对象 2 的联合多重分形谱。当确定了联合多重分形谱参数 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 、 $f(\alpha^1, \alpha^2)$, 可以通过以下两种方法分析研究对象 1 和研究对象 2 之间的相互关系: 一种方法是将联合多重分形谱三维图转化为二维图, 用灰度值表示 $f(\alpha^1, \alpha^2)$, 然后将 $f(\alpha^1, \alpha^2)$ 投影到 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 的平面上, 得到研究对象 1 和研究对象 2 联合多重分形谱的灰度图, 如果研究对象 1 和研究对象 2 联合多重分形谱的灰度图相对集中且沿对角线方向延伸, 则可定性的说明研究对

象 1 和研究对象 2 具有某些相同的分布或者相关程度较高, 如果研究对象 1 和研究对象 2 联合多重分形谱的灰度图分布比较离散, 则反之; 另一种方法是计算 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 的相关系数, 如果 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 的相关性显著, 则可定量的说明在多大尺度上研究对象 1 与研究对象 2 的相关程度高, 反之, 可定量的说明研究对象 1 与研究对象 2 的相关程度低。

2 结果与分析

2.1 有机质含量的统计特征值

不同土层土壤有机质的统计特征结果(表 1)显示, 土壤有机质含量的均值随着土层深度的增加而减少, 即从土壤表层到埋深 1 米处土壤有机质含量递减。这一规律产生的原因: 对于原始土壤来说, 微生物是土壤有机质的最早来源, 而随着生物的进化和成土过程的发展, 动植物残体就成为土壤有机质的基本来源。在通常的自然植被条件下, 土壤有机质绝大部分直接来源于土壤上生长的植物残体和根系分泌物, 故土壤表层的有机质含量较高, 且土壤表层昼夜温差较大, 微生物分解活动较弱, 土壤有机质更易于积累。

表 1 土壤有机质含量描述性统计特征值

Table 1 Descriptive statistics of soil organic matter concentration

土层 Soil layer/cm	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Mean/%	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%
0 ~ 20	0.21	2.45	1.09	0.41	1.23	4.36	37.52
20 ~ 40	0.15	1.91	0.82	0.36	0.29	- 0.44	43.86
40 ~ 70	0.12	1.42	0.56	0.28	0.83	0.08	51.79
70 ~ 100	0.10	1.27	0.45	0.27	0.96	0.20	60.40

变异系数的大小反映总体内部各样本之间的变异程度,一般可将样本的变异程度分为 3 级: $CV < 10\%$ 为弱变异性, $10\% \leq CV \leq 100\%$ 为中等变异性, $CV > 100\%$ 为强变异性^[13]。由表 1 可知,不同土层有机质含量的变异系数介于 37.52% ~ 60.40%,均属中等变异性。变异系数随着土层深度的增加而增加。

2.2 基于多重分形配分函数的分形特征判定

根据多重分形配分函数的性质^[17],当 $\log(\epsilon) \sim \log(\chi q(\epsilon))$ 关系为线性时,表明研究区域内变量分布具有多重分形特征^[18]。拟合不同土层下土壤有机质 $\log(\epsilon)$ 与 $\log(\chi q(\epsilon))$ 的关系,图 2 给出了双对数坐标下不同 q 值对应的配分函数值。由图 2 可知,在 $-10 \leq q \leq 10$ 时, $\log(\epsilon) \sim \log(\chi q(\epsilon))$ 之间成一定的线性关系,表明研究区域内土壤有机质含量具有多重分形特征。表 2 给出了不同土层的有机质含量 $\log(\epsilon) - \log(\chi q(\epsilon))$ 拟合的斜率 K 和决定性系数 R^2 ,可知 $\log(\epsilon) - \log(\chi q(\epsilon))$ 之间均有良好的线性关系,决定性系数 R^2 位于 0.81 ~ 1.00 之间,在整

个空间尺度上表现出良好的标度不变性,同时,当 q 取不同值时, $\log(\epsilon)$ 与 $\log(\chi q(\epsilon))$ 之间拟合直线的斜率均不同,这表明了有机质含量在不同土层的空间分布上具有多重分形特征。

2.3 基于广义维数谱的多重分形分析

根据多重分形广义维数谱算法对不同土层有机质含量进行多重分形分析,在 $-10 \leq q \leq 10$ 的变化范围内得到土壤有机质分布的广义维数谱 $D(q)$,有机质不同土层广义维数谱曲线 $q - D(q)$ 见图 3。

根据广义分形维数随质量概率统计矩阶数变化的趋势对有机质含量在研究区域上的多重分形特征进行进一步判定。当质量概率统计矩阶数大于 0 时,如果随质量概率统计矩阶数的增加,广义分形维数依次减小,则可判定研究对象的多重分形特征比较明显^[19-20]。不同土层的广义分形维数均随质量概率统计矩阶数的增大而减小,这进一步说明有机质在研究区域内的空间分布格局具有多重分形特征,可以利用多重分形方法研究其空间异质性。

表 2 $\log(\epsilon) - \log(\chi q(\epsilon))$ 拟合的斜率 K 和决定性系数 R^2
Table 2 The slope K and determination coefficients R^2 of the fitting line between $\log(\epsilon)$ and $\log(\chi q(\epsilon))$

土层/cm Soil layer	$q = -10$		$q = -5$		$q = 0$		$q = 5$		$q = 10$	
	K	R^2	K	R^2	K	R^2	K	R^2	K	R^2
0 ~ 20	-21.5	0.87	-13.35	0.87	-1.62	1	6.63	0.99	13.98	0.99
20 ~ 40	-26.88	0.89	-12.27	0.91	-1.62	1	6.65	0.99	14.61	0.99
40 ~ 70	-21.94	0.90	-10.09	0.81	-1.62	1	6.35	0.99	13.75	1.00
70 ~ 100	-23.56	0.89	-10.79	0.81	-1.61	1	6.16	1.00	13.25	1.00

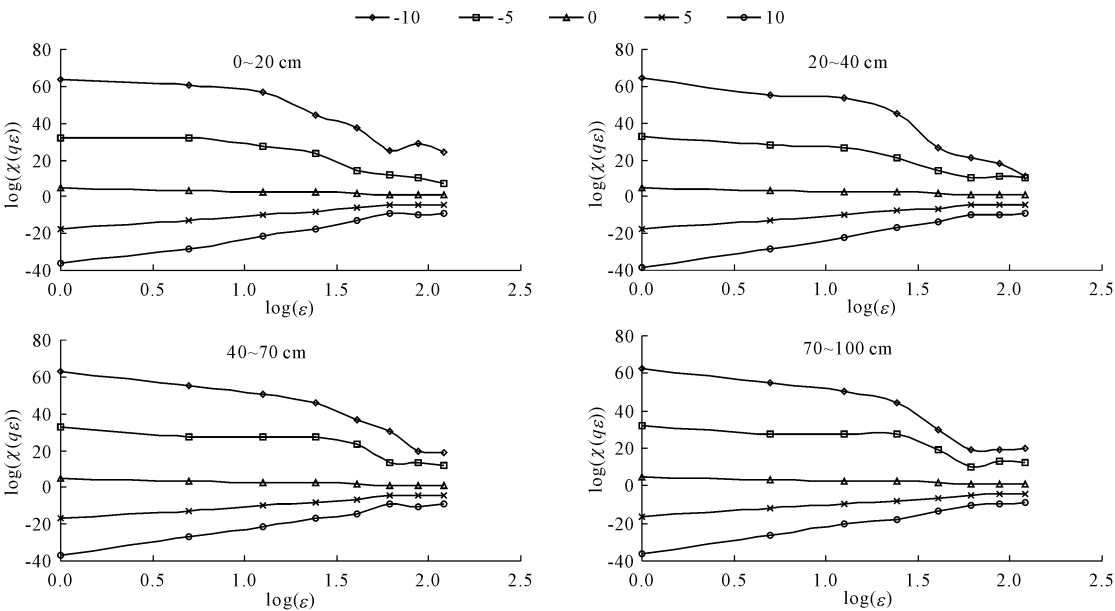


图 2 不同土层土壤有机质的 $\log(\epsilon)$ 与 $\log(\chi(q\epsilon))$ 关系
Fig.2 The relationship of $\log(\epsilon)$ and $\log(\chi(q\epsilon))$ of soil organic matter in different layers

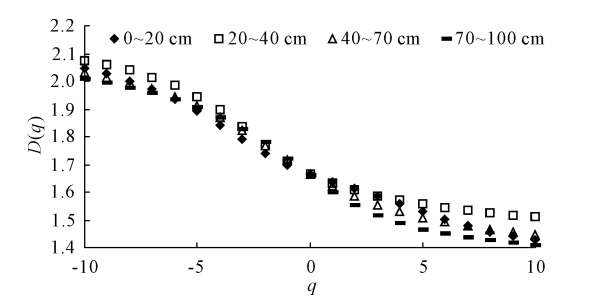


图 3 不同土层有机质含量的广义分形维数

Fig.3 Generalized multifractal dimension of soil organic matter concentration at different soil layer

定量描述土壤有机质分布的离散程度可以通过信息熵维数和盒维数的比值 $D(1)/D(0)$ 反映。 $D(1)/D(0)$ 越接近于 1 时表明土壤特征分布主要集中在密集区,接近于 0 时说明分布集中于稀疏区域^[1]。可知从土壤表层到埋深 1 m 处 $D(1)/D(0)$ 逐渐较小,认为有机质的空间分布逐渐由密集区域向稀疏区域转化。

2.4 土壤有机质空间变异性的多重分形分析

根据多重分形谱形状和多重分形谱谱宽 $\Delta\alpha =$

表 3 有机质含量空间分布多重分形谱参数

Table 3 Multifractal parameters of soil organic matter concentration

土层/cm Soil layer	D0	D1	D1/D0	D2	$\alpha\ min$	$f(\alpha\ min)$	$\alpha\ max$	$f(\alpha\ max)$	$\Delta\alpha = \alpha\ max - \alpha\ min$	$\Delta f = f(\alpha\ min) - f(\alpha\ max)$
0 ~ 20	1.665	1.638	0.983	1.612	1.315	0.299	2.248	0.029	0.934	0.270
20 ~ 40	1.665	1.632	0.980	1.607	1.451	0.918	2.246	0.385	0.795	0.533
40 ~ 70	1.665	1.621	0.973	1.584	1.368	0.658	2.192	0.428	0.824	0.230
70 ~ 100	1.659	1.601	0.965	1.554	1.347	0.783	2.153	0.557	0.805	0.226

由图 4 可知土壤有机质的多重分形谱均为“钟形”或类似开口向下的二次抛物线,但不同土层的多重分形谱的“顶点”、开口大小存在差异,说明在不同土层其空间分布及其不规则性是有差别的。由图 4 及表 3 可知不同土层间多重分形谱的谱宽 $\Delta\alpha$ 具有一定差异:0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 70 cm 及 70 ~ 100 cm 土层的多重分形谱宽度依次为 0.933、0.795、0.824、0.805,可见有机质含量不同土层的空间变异性由大到小依次为:0 ~ 20、40 ~ 70、70 ~ 100 cm 及 20 ~ 40 cm 土层。

由表 3 可知,不同土层的 Δf 均大于 0,其在多重分形谱曲线上均表现为左钩状,表明在内蒙古河套灌区解放闸灌域土壤有机质的空间分布中,数值较大的数据占主导地位,其概率分布较大。

2.5 不同土层的联合多重分形

为了探讨有机质含量在不同土层空间变异性的相互关系,同时便于用浅层易于取样测定的数据,以减少深层取样测试工作量。绘制了 0 ~ 20 cm 土层

$\alpha\ max - \alpha\ min$ 的差异来获取研究对象的空间分布及其不规则特征是多重分形分析的一个重要方面。 $\Delta\alpha$ 越大表示分布越不均匀^[21],多重分形谱 $\alpha - f(\alpha)$ 曲线呈左钩状时,即 $\Delta f > 0$,说明数据中较大值的数量占主导地位,反之,较小数值的数量占主导地位^[21]。

图 4 给出土壤有机质在 $10 \geq q \geq -10$ 情况下不同土层的多重分形谱 $\alpha - f(\alpha)$ 曲线,表 3 给出土壤有机质含量的多重分形谱参数。

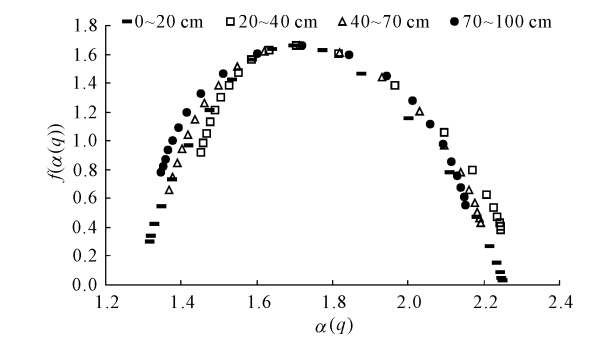


图 4 不同土层有机质含量的多重分形谱曲线

Fig.4 Multifractal spectrums of soil organic matter concentration at different soil layer

表 3 有机质含量空间分布多重分形谱参数

Table 3 Multifractal parameters of soil organic matter concentration

土层/cm Soil layer	D0	D1	D1/D0	D2	$\alpha\ min$	$f(\alpha\ min)$	$\alpha\ max$	$f(\alpha\ max)$	$\Delta\alpha = \alpha\ max - \alpha\ min$	$\Delta f = f(\alpha\ min) - f(\alpha\ max)$
0 ~ 20	1.665	1.638	0.983	1.612	1.315	0.299	2.248	0.029	0.934	0.270
20 ~ 40	1.665	1.632	0.980	1.607	1.451	0.918	2.246	0.385	0.795	0.533
40 ~ 70	1.665	1.621	0.973	1.584	1.368	0.658	2.192	0.428	0.824	0.230
70 ~ 100	1.659	1.601	0.965	1.554	1.347	0.783	2.153	0.557	0.805	0.226

与 20 ~ 40、40 ~ 70 cm 及 70 ~ 100 cm 土层的联合多重分形谱,分别用 $\alpha_{OM\ 0\sim20\ cm}$ 、 $\alpha_{OM\ 20\sim40\ cm}$ 及 $f(\alpha_{OM\ 0\sim20\ cm}, \alpha_{OM\ 20\sim40\ cm})$ 表示 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 、 $f(\alpha^1, \alpha^2)$,其它土层依次类推。为了便于分析将其联合多重分形谱投影到平面上得到联合多重分形谱的灰度图(图 6)。从图 6 可知,0 ~ 20 cm 土层与 20 ~ 40、40 ~ 70 cm 的联合分形谱灰度图相对集中且沿对角线方向延伸,表明有机质含量在 0 ~ 20 cm 土层的空间分布与 20 ~ 40 cm 及 40 ~ 70 cm 土层空间变异的相似性较高。因此,0 ~ 20 cm 土层有机质含量的空间变异性可较好反映其在 20 ~ 40 cm 及 40 ~ 70 cm 土层的空间变异性状况;而有机质含量在 0 ~ 20 cm 土层与 70 ~ 100 cm 土层的联合多重分形灰度图分布较为分散,说明二者的相关性很小,因此其空间变异不能相互表达。

为进一步量化分析土壤有机质含量 0 ~ 20 cm 土层与 20 ~ 40、40 ~ 70 cm 及 70 ~ 100 cm 土层空间

变异性的相互关系,求解了其对应奇异指数之间的相关性。0~20 cm 土层与 20~40、40~70 cm 及 70~100 cm 土层对应奇异指数的相关系数分别为 0.654、0.362、0.032,且 0~20 cm 土层与 20~40、40~70 cm 土层在 0.01 水平上显著,而与 70~100 cm 土层不显著。进一步说明有机质含量空间变异性在 0~20 cm 土层与 20~40 cm 及 40~70 cm 土层相关程度较高。

通过一元函数建立 0~20 cm 土层分别与 20~40、40~70 cm 及 70~100 cm 土层的转换模型,见表 4。

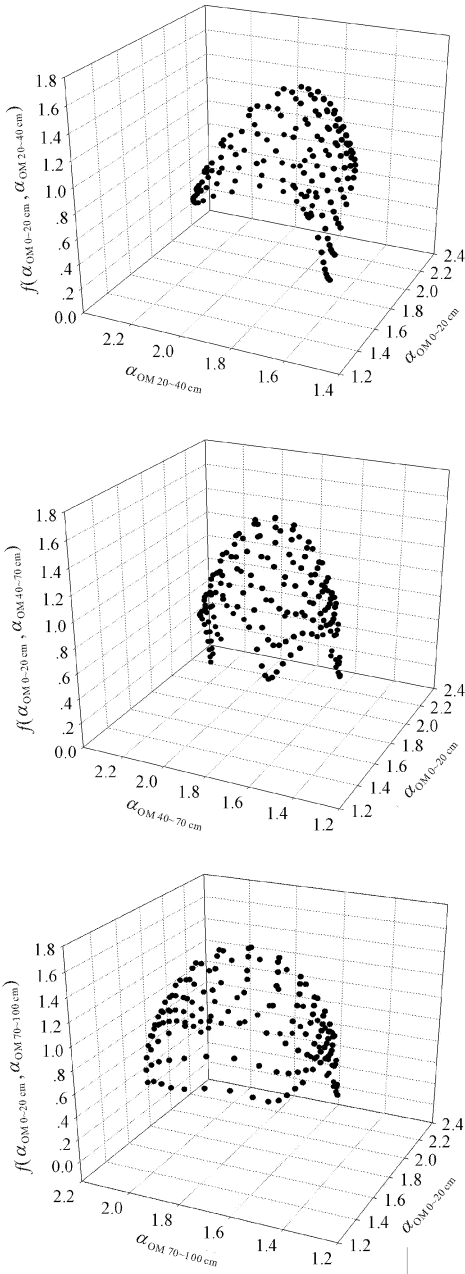


图 5 0~20 cm 土层有机质含量与其它土层的联合多重分形谱
Fig.5 Joint multifractal spectrums between organic matter concentration in 0~20 cm soil layer and other layers in mid-scale

可知:0~20 cm 仅与 20~40 cm 土层的预测效果较好,而与 40~70 cm 及 70~100 cm 土层的回归效果较差。

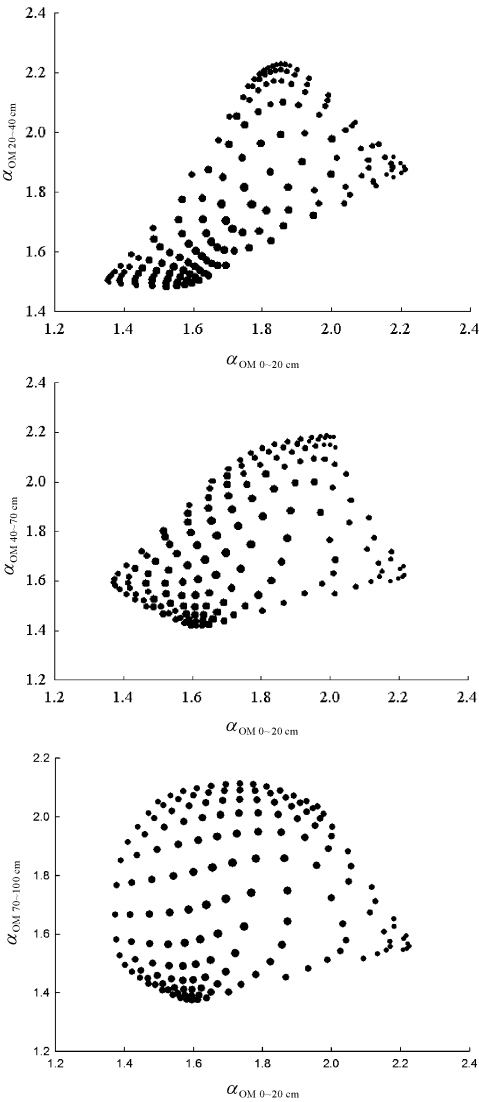


图 6 0~20 cm 土层有机质含量与其它土层的联合多重分形谱的灰度图
Fig.6 Gray scale image of joint multifractal spectrums between organic matter concentration in 0~20 cm soil layer and other layers in mid-scale

表 4 0~20 cm 土层有机质与其它土层转化模型
Table 4 The transformation model of organic matter in 0~20 cm and other soil layers

土层/cm Soil layer	模型 Modle	R^2
20~40	$y = 0.487x + 0.277$	0.410
40~70	$y = 0.207x + 0.324$	0.107
70~100	$y = 0.146x + 0.277$	0.063

这一结果与联合多重分形分析的结果相差较大,首先联合多重分形研究两个具有多重分形特征的变量在几何支撑上的关系,其涵盖了研究对象的非均匀性和各向异性等信息,体现的是变量空间分布的信息,而一元函数仅仅表达了一个变量随另一个变量的线性变化趋势,并不能很好地体现变量空间分布特征。可见,一元函数虽可简便地建立不同土层变量之间的转换函数,但并不能很好地体现变量空间变化的信息。基于联合多重分形结果建立两个变量考虑空间变异情况的转换函数有待于进一步深入研究。

3 结 论

通过多重分形及联合多重分形方法分析了内蒙古河套灌区解放闸灌域有机质含量在不同土层的空间变异特性及其相关性,得到如下结论:

- 1) 有机质含量在不同土层均为中等变异性,且变异系数随着土层深度的增加而增加。
- 2) 内蒙古河套灌区解放闸灌域有机质含量在空间分布上具有多重分形特征,其在不同土层的空间变异性由大到小依次为:0 ~ 20、40 ~ 70、70 ~ 100 cm 及 20 ~ 40 cm 土层。同时在有机质的空间分布中,数值较大的数据占主导地位。
- 3) 联合多重分形表明 0 ~ 20 cm 土层与 20 ~ 40、40 ~ 70 cm 土层空间变异相关程度较高,而与 70 ~ 100 cm 土层空间变异的相关程度较低。
- 4) 通过一元函数建立 0 ~ 20 cm 土层有机质含量分别与 20 ~ 40、40 ~ 70 cm 及 70 ~ 100 cm 土层的转换模型,其回归效果 0 ~ 20 cm 土层仅与 20 ~ 40 cm 土层较好,而与 40 ~ 70 cm 及 70 ~ 100 cm 土层较差。
- 5) 基于联合多重分形结果建立两个变量考虑空间变异情况的转换函数有待于进一步深入研究。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] Jacinthe P A, Lai R. Spatial varia bility of soil properties and trace gas fluxes in reclaimed mine land of southeastern Ohio[J]. Geoderma, 2006,136(3-4):598-608.

[3] Eghball B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractalanalysis[J]. A-

gronomy Journal, 2003,95(2):339-346.

[4] Caniego F J, Espejo R, Martin M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. Ecological Modelling, 2005,182:291-303.

[5] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

[6] 刘继龙,马孝义,付 强,等.不同土层土壤特性空间变异性关系的联合多重分形研究[J].农业机械学报,2012,43(5):37-42.

[7] 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.

[8] Kravchenko A N, Bullock D G, Boast C W. Joint multifractal analysis of soil yield and terrain slope[J]. Agronomy Journal, 2000,92:1279-1290.

[9] Lovejoy S, Schertzer D. Multifractal, cloud radiances and rain[J]. Journal of Hydrology,2006,322:59-88.

[10] Cheng Q. Multifractal interpolation[C]//Proceedings of the Fifth Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology . Trondheim, Norway:[s.n.],1999:245-250.

[11] Li Y, Li M, Robert H. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions[J]. Pedosphere, 2011,21(1):75-83.

[12] 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.

[13] Zeleke 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.

[14] 张 颀.土壤、水、植物理化分析教程[M].北京:中国林业出版社,2011.

[15] Perfect E, Centry R W, Sukop M C, et al. Multifractal Sierpinski carpets: theory and application to upscaling effective saturated hydraulic conductivity[J]. Geoderma, 2006,134:240-252.

[16] Scheuring I, Riedi R H. Application of multifractal to the analysis of vegetation pattern[J]. Journal of Vegetable Science, 1994,5(4):489-496.

[17] 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.

[18] Lee C K. Multifractal characteristics in air pollutant concentration time series[J]. The Air Soil Pollut, 2002,135(1-4):389-409.

[19] Eghball B, Schepers J S, Negahban M, et al. Spatial andtemporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis[J]. A-gron J, 2003,95(2):339-346.

[20] Peitgen H O, Jurgens H, Saupe D. Chaos and Fractals: New Fron-tier of Science[M]. NewYork: Springer-Verlag, 1992:737.

[21] Kravchenko A N, Charles W B, Donald G B. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999,91(6):1033-1041.

[22] Zeleke T B, Si B C. Scaling properties of to-pographic indices and crop yield:multifractal and joint multifractal approaches[J]. Agrono-my Journal, 2004,96(4):1082-1090.