

基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究^①

王 燕¹, 蒙仲举^{1*}, 斯庆毕力格², 丁延龙¹, 王则宇¹, 万 芳¹, 吴小龙¹

(1 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2 鄂尔多斯市林业局, 内蒙古鄂尔多斯 017000)

摘要:为探明农田因管理方式不同而导致的土壤粒径分布(PSD)差异,在阴山北麓农牧交错区选择典型莜麦留茬地、翻耕耙平地、翻耕不耙平地进行了研究。试验选择表层 0~10 cm 土壤为研究对象,运用多重分形理论分析探讨不同管理方式下土壤颗粒的分布特征及差异。研究表明:不同管理方式下研究区土壤颗粒组成中黏粒含量均极低,翻耕不耙平地 and 莜麦留茬地以粉粒和细砂为主,翻耕耙平地以粉粒和极细砂为主;广义维数谱 $D(q)$ 为反“S”型递减函数,且 $D_0 > D_1 > D_2$,多重分形谱 $f(q)$ 为左勾状单峰曲线, $\Delta\alpha$ 值在 2.405~2.596,非均一性高,可用多重分形来表征土壤 PSD 特征;多重分形参数 D_1 、 D_2 同黏粒含量呈显著正相关关系, D_0/D_1 与粉粒呈显著正相关关系,与砂粒成负相关关系, Δf 反之;管理方式对土壤 PSD 及多重分形参数 D_0 、 $\Delta\alpha$ 、 Δf 有显著影响($P < 0.05$),对 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 、 α_0 影响不显著。根据试验结果,建议当地农田在生产后进行留茬或秸秆覆盖处理,结合当地主风向选择适宜翻耕方式。

关键词:农田;多重分形;土壤粒径分布;管理方式;半干旱区

中图分类号: S153.6 文献标识码: A

土壤中各粒径级所占百分比被称为土壤粒径分布(particle size distribution, PSD),各粒径级含量大小与土壤结构、土壤肥力及水分运动密切相关,同时可以间接反映土壤风蚀程度^[1-3]。人类活动的影响以及土壤内部作用导致土壤颗粒在排列、分布方面表现出局部与整体相似的性质,又称自相似特性或分形^[4]。分形理论通常是用来描述土壤 PSD 的自相似性、均质性以及异质性^[5],打破了通过土壤中各粒径级颗粒含量占比表征土壤 PSD 的传统方法。众多学者已经在黄土高原^[6-7]、局部小流域^[8]、沙漠地区^[9-11]以及河谷区域^[12-13]对不同土地类型土壤 PSD 差异性进行了研究,而在因管理方式不同使同种土地类型土壤 PSD 异质性方面研究较少。因研究对象复杂多变,采用单一分形难以完全揭示其变化规律,而多重分形则是利用函数通过描述土壤不同层次、不同结构细微的差异和变化趋势,进一步反映整体特征^[6],所以多重分形相较于单一分形更适合用于描述土壤颗粒的分布状况。

阴山北麓旱作农区秋冬时期正值大风季节,传统秋季翻耕致使耕地表层土壤疏松,加之降水稀少及放牧活动的影响,出现不同程度风蚀现象。土壤含水量、地表覆盖度及粗糙度、土壤特性^[14]是影响土壤风蚀

的主要因素。土地管理方式不同导致地表覆盖状况及粗糙程度产生差异,进而影响土壤特性以及土壤抵御风蚀的能力^[15],因此利用土壤颗粒分布特征反映不同管理方式下土壤风蚀后的差异性是可行的^[16]。基于此,本研究以当地生产结束后传统管理方式农田为研究对象,应用多重分形方法探究不同管理方式下各表层土壤经风蚀后土壤颗粒组成及分布规律,为当地农田生产后选择合理的管理方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于阴山北麓中部的农牧交错区(41°13'52" N, 111°13'24" E),平均海拔高度 1 675 m,气候类型为中温带大陆性半干旱季风气候,降水多发生在 7—9 月,为 250~400 mm;年均温度为 3.3℃;年均蒸发量 1 839.0 mm;无霜期 100 d 左右;北风为该区全年主风向,年均风速 4.5 m/s,年大风日数为 65 d。研究区地势较为平坦开阔,土壤类型为栗钙土,母质为各类基岩的残积物;地带性植被类型为荒漠草原,开垦种植主要农作物为马铃薯、春小麦、莜麦、油菜等,开垦深度为 25~30 cm,农耕制度为一年一熟。

基金项目:国家自然科学基金项目(51769019)资助。

* 通讯作者(mengzhongju@126.com)

作者简介:王燕(1993—),女,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: wangyan0830@163.com

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取与样品采集 实地调查发现,研究区秋季生产结束后农田管理方式主要为翻耕或留茬,翻耕又分为翻耕耙平和翻耕不耙平两种,因土壤质地为砂质壤土,所以表层土壤更易发生风蚀。据此,在 2017 年 11 月中旬,选择开垦年限同为 37 a 的典型连作苜蓿留茬地,在留茬高度 15 cm、翻耕耙平、翻耕不耙平地各设置 3 块样地进行采样。样地走向与当地主风向平行,采样前一周无降水。各样地内用五点法取 0~5 cm 层土样带回实验室,阴干,适当处理后备用。本研究共获得 45 个土样。

1.2.2 土壤样品指标测定 将阴干后的土样用 2 mm 土壤筛筛去植被枯落物和地表杂物。称取 5 g 土样加入 10 ml 过氧化氢充分加热,再加入 10 ml 盐酸充分反应至土壤样品中的碳酸盐完全除去,加入蒸馏水静置 24 h,反复测试 pH 直至 pH 在 6.5~7.0;然后加入六偏磷酸钠超声处理 30 s 后,使用 Mastersizer3000 激光粒度仪测定土壤 PSD^[15]。本研究按照美国制土壤分类标准,将土壤粒径分为 7 类,即极粗砂(粒径 2 000~1 000 μm)、粗砂(粒径 1 000~500 μm)、中砂(粒径 500~250 μm)、细砂(粒径 250~100 μm)、极细砂(粒径 100~50 μm)、粉粒(粒径 50~2 μm)和黏粒(粒径<2 μm)。

1.2.3 多重分形参数计算 取激光粒度仪对土壤样品测量区间 $I=[0.02, 2 000]$,按照对数等差递增的方法将区间划分为 100 个小区域 $I_i=[\theta_i, \theta_{i+1}]$, θ_i, θ_{i+1} 为机测粒径范围, $i=1,2,3,\dots,100$,测量得到的各子区间 I_i 内的土壤颗粒体积分数用 v_i 表示,即 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_{100}$, 则

$$\sum_{i=1}^{100} v_i = 100 \tag{1}$$

根据激光粒度仪区间划分原理, $\lg(\theta_{i+1}/\theta_i)$ 为一个常数。为利用多重分形方法分析区间 I 的土壤粒度特征,必须使各子区间长度相同,从而构造一个新的无量纲区间 $J=[\lg(0.02/0.02), (2000/0.02)]=[0,5]$, 含 100 个等距子区间 J_i 。在区间 J 内,有 $N(\varepsilon)=2^k$ 个尺寸相同小的区间 $\varepsilon=5 \times 2^{-k}$, 每一个小区间内至少包含一个测量值,为了在最小的子区间内包含测量值, k 的取值范围为 1~6。 $\mu_i(\varepsilon)$ 为每个子区间土壤粒径分布的概率密度,利用 $\mu_i(\varepsilon)$ 构造一个配分函数族^[17]。其中, $u_i(q, \varepsilon)$ 为第 i 个子区间的 q 阶概率, q 为整数, $-10 < q < 10$, 则粒径分布多重分形的广义维数谱为:

$$u_i(q, \varepsilon) = p_i(\varepsilon)^q / \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon)^q \tag{2}$$

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon)^q]}{\lg \varepsilon} \quad (q \neq 1) \tag{3}$$

$$D(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) \lg p_i(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} \quad (q=1) \tag{4}$$

粒径分布的多重分形奇异性指数为:

$$\alpha(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} u_i(q, \varepsilon) \lg p_i(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} \tag{5}$$

则相对于奇异性指数的多重分形谱函数为:

$$f(\alpha(q)) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} u_i(q, \varepsilon) \lg u_i(q, \varepsilon)}{\lg \varepsilon} \tag{6}$$

通过最小二乘法拟合计算,可得 $D(q)$ 、 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha(q))$ ^[5,18], 利用公式(3)、(4)以步长为 1 计算 $-10 < q < 10$ 内的广义维数谱 $D(q)$, 本文中只讨论当 $q=0, 1, 2$ 时,对应的 D_0, D_1, D_2 , 其分别为容量维数、信息熵维数和关联维数^[19]。其中, D_0 描述土壤 PSD 范围的大小,值越大代表土壤 PSD 的范围广; D_1 反映土壤 PSD 测度的密集性, D_1 值越大则土壤 PSD 测度在局部越稀疏; D_2 代表土壤 PSD 测量距离的匀称水平, D_2 值越大说明土壤 PSD 越匀称; D_1/D_0 可以衡量土壤 PSD 异质程度,该值越接近 1 说明土壤 PSD 越集中在密集区。 $\alpha(q)$ 是多重分形谱的奇异性指数,表征土壤 PSD 在局部上的分维; α_0 是多重分形谱奇异性强度的均值,与土壤 PSD 在局部的密集程度有关, α_0 值越大,局部密集程度越小^[20]; $\Delta\alpha$ 为多重分形谱谱宽,用于描述土壤结构在空间上的异质性,侧面反映土壤各粒级体积含量在空间分布的差异以及非均质水平, $\Delta\alpha$ 值越大表明土壤各粒级体积含量在空间分布上越不均匀,变异程度越高^[4]。多重分形谱函数 $f(\alpha(q))$ 表征土壤分布的复杂性、不规则性以及非均匀性,当 $\Delta f < 0$ 时,在土壤粒级分布范围中体积分数占比较小颗粒对土壤的复杂程度、不规则程度以及不均匀程度起主导作用, $\Delta f > 0$ 时,体积分数占比较大颗粒起主导作用^[4,21]。

2 结果与分析

2.1 不同管理方式土壤粒径分布特征

表 1 为土壤颗粒体积分数表,其能够直观反映不同管理方式之间土壤颗粒的分布存在明显差别。由表 1 可知,各样地土壤粒度组成以粉粒和砂粒为主,黏粒含量极低,其体积分数在 0.000 47%~

0.016 6%，粉粒体积分数变化范围为 35.940% ~ 48.679%；砂粒中，翻耕不耙平和苜麦留茬地细砂含量最多，极细砂次之，翻耕耙平地反之，并有粗砂和极粗砂分布。3 类管理方式表层土壤颗粒含量因地表状况不同而表现出差异性，苜麦留茬地因

地表有留茬覆盖，促使地表粗糙度增大，减弱风对地表的吹蚀，对地表细物质有固定作用；翻耕耙平地机械耙平过程中使得地表颗粒受外力发生粘结，紧实度较高，而翻耕不耙平地土壤较松散，黏粒和粉粒更易被风蚀。

表 1 土壤颗粒体积分数(%)
Table 1 Volume percentages of soil particles under different management patterns

管理方式	黏粒	粉粒	砂粒				
			极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
翻耕不耙平	0.000 47	35.940	18.760 54	26.039 6	15.997 69	3.265 5	0.000 3
翻耕耙平	0.002 9	48.679	23.428 54	20.519 48	6.279 72	1.092 76	0.000 12
苜麦留茬	0.016 6	42.890	15.530 45	20.062 03	15.657 57	3.906 9	1.936

2.2 土壤粒径分布多重分形特征

广义维数谱 $D(q)$ 可以从不同层面描述 PSD 分形结构特征的复杂程度和非均质性。由图 1 可知， q 与 $D(q)$ 呈反“S”型递减函数关系，且具有一定宽度。当 $q < 0$ 时， $D(q)$ 的变化幅度为苜麦留茬地 > 翻耕耙平地 > 翻耕不耙平地，表明苜麦留茬地 PSD 分形结构更复杂、在细微处的描述更准确。当 $q > 0$ 时， $D(q)$ 的变化趋势度较 $q < 0$ 更为明显，说明 $D(q)$ 在小概率测度区域内描述的准确性优于大概率测度区域。结合表 2 可知，广义维数谱参数 D_0 、 D_1 、 D_2 存在如下关系： $D_0 > D_1 > D_2$ ，说明土壤颗粒呈现不均匀分布的状态。 D_0 的分布范围在 0.838 ~ 0.850， $0 < D_0 < 1$ ，说明各样地在 0.02 ~ 2 000 μm 区间内有部分区域没有土壤颗粒分布，且苜麦留茬地相较于翻耕耙平地、翻耕不耙平地 PSD 范围更广。 D_1 值变化范围为 0.700 ~ 0.708，表明各样地 PSD 相对集中，导致这一现象产生的原因是各样地土壤中黏粒的体积分数较小(0.000 47 ~ 0.016 6)。 D_2 分布范围在 0.655 ~ 0.661，变化范围较小，说明各样地土壤粒径在各局部分布差异较大，离散性小，均匀性较差。 D_1/D_0 平均值为 0.835，较接近于 1，表明各样地 PSD 集中在密集区，且翻耕耙平地 D_1/D_0 值明显高于其他两块样地，结合表 1 发现，翻耕耙平地土壤颗粒 88.5% 集中在 2 ~ 250 μm 。

由图 2 可知，多重分形谱函数为单峰曲线，且左右不对称，说明各样地的土壤在环境演替中不同位置发生了不同程度的变化导致 PSD 出现了非均匀性的现象^[22]。曲线呈左勾状，即 $\Delta f > 0$ ，表明各样地在 PSD 中体积分数占比较大的颗粒占主导地位。其中翻耕耙平地 Δf 值最小，接近于 0，结合图 2 可知，翻耕耙平地 PSD 多重分形谱的不对称性较小，体积分数占比较小或占比较大的颗粒变异对土壤粒径在整体上的分布的影响是相同的。 $\Delta\alpha$ 值分布范围在 2.405 ~

2.596，且苜麦留茬地 $\Delta\alpha$ 值明显大于其他样地，结合表 2 可知，苜麦留茬地土壤颗粒在空间分布非均匀性较高。 α_0 由小到大排列为翻耕不耙平地 < 翻耕耙平地 < 苜麦留茬地，说明翻耕不耙平地 PSD 局部密集程度最大，翻耕耙平地次之，苜麦留茬地最小。由此可见，苜麦留茬地地表留茬能有效降低大风对地表细颗粒物剥离、吹蚀，且对过境风沙流有截留作用，所以苜麦留茬地表现出细颗粒物含量较多，粒径分布范围较广。翻耕不耙平地相较于翻耕耙平地而言，粒径在局部分布更集中，逐渐向均一化方向演替。

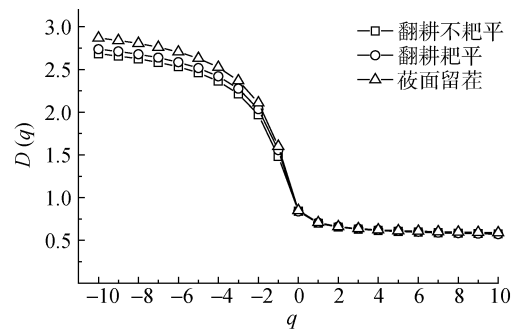


图 1 不同管理方式 PSD 广义维数谱曲线图
Fig. 1 Generalized dimension spectra of PSDs under different management patterns

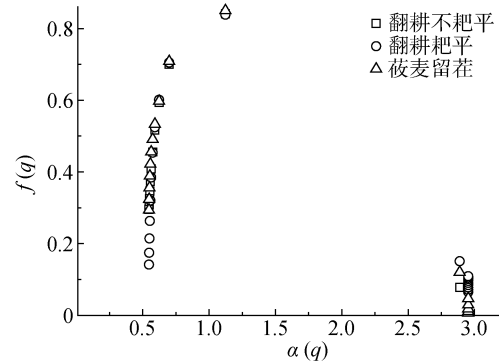


图 2 不同管理方式 PSD 多重分形谱
Fig. 2 Multifractal spectra of PSDs under different management patterns

表 2 不同管理方式 PSD 多重分形参数
Table 2 Multifractal parameters of PSDs under different management patterns

多重分形参数	翻耕不耙平	翻耕耙平	苜蓿留茬
D_0	0.841	0.838	0.850
D_1	0.700	0.705	0.708
D_1/D_0	0.832	0.841	0.833
D_2	0.655	0.661	0.660
α_0	1.123	1.131	1.154
$\Delta\alpha$	2.405	2.476	2.596
Δf	0.295	0.077	0.293

2.3 土壤粒径分布多重分形参数与土壤质地的关系

表 3 相关性分析表明： D_0 与土壤质地的相关性不显著，这与 Posadas 等^[23]研究结果相同，虽然黏粒

含量会影响二者相关性，但 D_0 值并未随着黏粒含量变化而产生明显变化。 D_1 与黏粒存在显著的正相关关系，与粉粒和砂粒的相关性较差，说明随着黏粒含量的增加， D_1 值增大，PSD 范围逐渐变宽。 D_0/D_1 与粉粒呈显著正相关关系，与砂粒呈显著负相关关系，与黏粒的正相关性较好(0.842)，由此表明随着粉粒含量的升高，PSD 向密集区靠拢。 D_2 与黏粒呈显著正相关，说明黏粒体积分数的增加促使土壤颗粒在可观测粒径范围内分布越均匀。相较粉粒、砂粒， α_0 、 $\Delta\alpha$ 与黏粒的相关关系更强，且结合表 1、表 2 发现，随着黏粒的增加， α_0 、 $\Delta\alpha$ 均呈现增大的趋势。 Δf 与粉粒呈极显著负相关关系，与砂粒呈显著正相关关系，与黏粒的负相关关系较好(-0.788)，表明砂粒含量上升，粉粒含量下降，土壤颗粒分布中体积占比较大的范围逐渐向砂粒域倾斜。

表 3 土壤颗粒组成与 PSD 多重分形参数相关性分析
Table 3 Correlation coefficients of soil particle composition and PSD multifractal parameters

	D_0	D_1	D_1/D_0	D_2	α_0	$\Delta\alpha$	Δf	黏粒	粉粒	砂粒
D_0	1	0.614	-0.617	0.125	0.881	0.814	0.688	-0.095	-0.647	0.645
D_1		1	0.242	0.860	0.915	0.958	-0.151	0.727*	0.204	-0.207
D_0/D_1			1	0.704	-0.170	-0.045	-0.996	0.842	0.999*	-0.999*
D_2				1	0.580	0.677	-0.635	0.976*	0.676	-0.678
α_0					1	0.992	0.261	0.388	-0.209	0.206
$\Delta\alpha$						1	0.139	0.500	-0.085	0.082
Δf							1	-0.788	-0.999*	0.998*
黏粒								1	0.821	-0.822
粉粒									1	-0.989**
砂粒										1

注：** 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关，* 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。

2.4 管理方式对土壤质地及多重分形参数的影响

通过方差分析可知，管理方式对黏粒、粉粒、砂粒、多重分形参数 D_0 、 $\Delta\alpha$ 、 Δf 均呈现出显著的影响($P<0.05$)。不同管理方式下黏粒含量与 $\Delta\alpha$ 从小到大排序为翻耕不耙平地<翻耕耙平地<苜蓿留茬地，苜蓿留茬地 $\Delta\alpha$ 、 D_0 值最大，黏粒含量最高，原因是留茬后增加了下垫面粗糙度和地表盖度，降低了近地面风速，减少大风对地表细物质搬运，另外两类由于在生产结束后进行翻耕，导致地表土质疏松，加之无任何植被覆盖，所以地表的细物质更易被吹蚀，导致地表粉粒和砂粒体积分数相对增加，颗粒分布相对集中，分选性增强，地表逐渐向粗粒化方向演替。翻耕耙平地的 Δf 接近于 0，虽体积占比较大的砂粒对 PSD 起主导作用，但由于粉粒体积分数与砂粒相差较小(2.603%)，所以粉粒影响砂粒对 PSD 的主导作用。同时从表 4 可知，管理方式对 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 、 α_0 的影响均不显著。

表 4 管理方式对多重分形参数与土壤质地的影响
Table 4 Effects of management patterns on multifractal parameters and soil particle composition

多重分形参数	翻耕不耙平	翻耕耙平	苜蓿留茬	F
D_0	0.841 a	0.838 a	0.850 b	10.434*
D_1	0.700 a	0.705 a	0.708 a	0.281
D_1/D_0	0.832 a	0.841 a	0.833 a	0.319
D_2	0.655 a	0.661 a	0.660 a	0.057
α_0	1.123 a	1.131 a	1.154 a	4.698
$\Delta\alpha$	2.405 a	2.476 a	2.596 b	2.823*
Δf	0.295 a	0.077 b	0.293 a	4.498*
黏粒(%)	0.000 47 a	0.0029 b	0.0166 b	20.559*
粉粒(%)	35.940 a	48.697 b	42.890 b	12.123*
砂粒(%)	64.063 a	51.3 b	57.093 a	12.142*

注：* 及同行不同小写字母表示不同管理方式间差异在 $P<0.05$ 水平显著。

3 讨论

不同管理方式促使土壤环境和土壤颗粒含量发生相对改变,是造成土壤 PSD 非均匀性及异质性的根本原因^[24]。臧英等^[25]研究发现,翻耕不耙平相较于翻耕耙平在降低土壤风蚀方面有显著效果;王仁德等^[26]研究发现留茬地地表的细粒物质相对较多,翻耕不耙平地次之,翻耕耙平地最小,这与本研究结果存在差异。这是由于留茬地不仅改变了地表粗糙程度,而且有效地保护地表细小颗粒不被移动,使得土壤被风蚀的程度最小,但本试验样地的走向与主风向平行,翻耕产生的地垄并没有起到增大地表粗糙度的作用,反而耙平过程中土壤颗粒受到机械碾压导致表层土壤颗粒粘附,受到相同程度大风吹蚀时翻耕耙平地地表细粒物质更不易被吹蚀。茹豪等^[27]在黄土高原研究发现,土地利用类型对多重分形参数 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 影响显著,Paz-Ferreiro 等^[28]研究发现不同土地利用方式的 PSD 也存在差异,从而对多重分形特征产生影响,而本研究得出管理方式对多重分形参数 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 、 α_0 无显著影响,究其原因可能是以风为主要营力对地表土壤颗粒的搬运、沉积、排列组合、粘附产生了较强的影响,以至于弱化了地表状况差异对 PSD 多重分形参数产生的影响。董莉丽和郑粉莉^[29]在黄土高原的不同土地类型土壤多重分形特征研究中发现, D_1 值之间差别较小。白一茹和汪有科^[30]对黄土丘陵区研究发现,不同土地利用方式对多重分形参数 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 、 $\Delta\alpha$ 均无显著影响。本研究 3 种样地经大风吹蚀后苜蓿留茬地的黏粒含量最多,非均一性高,翻耕耙平地次之,翻耕不耙平地最弱,建议当地农田在生产后进行留茬或秸秆覆盖处理,如需翻耕,则结合当地主风向选择合适的翻耕方式。另外,后续研究应通过野外观测和风洞模拟试验等途径,进一步补充和完善本研究所得结论,以对阴山北麓农牧交错区乃至整个半干旱区的农田风蚀特征有更加全面和深入的认识。

4 结论

1)研究区不同管理方式下土壤颗粒组成中黏粒含量均极低,翻耕不耙平和苜蓿留茬地以粉粒和细砂为主,翻耕耙平地以粉粒和极细砂为主。

2)研究区土壤广义维数谱 $D(q)$ 为反“S”型递减函数,且 $D_0 > D_1 > D_2$ 。多重分形谱 $f(q)$ 为左勾状单峰曲线, $\Delta\alpha$ 值在 2.405 ~ 2.596,非均一性高,用多重分形来描述 PSD 分布特征是合理的。

3)研究区土壤多重分形参数 D_1 、 D_2 与黏粒含量呈显著正相关关系, D_0/D_1 与粉粒呈显著正相关关系、与砂粒呈负相关关系, Δf 反之。管理方式对土壤中黏粒、粉粒、砂粒、多重分形参数 D_0 、 $\Delta\alpha$ 、 Δf 值有显著影响($P < 0.05$),对 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 、 α_0 无显著影响。

参考文献:

- [1] 丁延龙,高永,蒙仲举,等.拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J].土壤,2016,48(4):803-812
- [2] 郝亚栋,杨建军,孙华斌,等.不同管理模式干旱草地粒度特征[J].土壤,2017,49(6):1243-1253
- [3] Nadue E, Ventoe J D, Martinez M M, et al. Exploring particle size distribution and organic carbon pools mobilized by different erosion processes at the catchment scale[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(4): 667-678
- [4] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550
- [5] 王德,傅伯杰,陈利顶,等.不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2007,27(7):3081-3089
- [6] Sun C, Liu G, Xue S. Natural succession of grassland on the Loess Plateau of China affects multifractal characteristics of soil particle-size distribution and soil nutrients[J]. Ecological Research, 2016, 31(6): 1-12
- [7] 党亚爱,李世清,王国栋,等.黄土高原典型土壤剖而土壤颗粒组成分形特征[J].农业工程学报,2009,25(9):74-78
- [8] Chen X Y, Zhou J. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4): 1735-1746
- [9] 毛东雷,蔡富艳,方登先,等.新疆策勒绿洲-沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J].土壤学报,2018,55(1):88-99
- [10] 管清玉,桂洪杰,潘保田,等.黄河宁蒙河段沙样粒度与分形维数特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(1):1-6
- [11] 代豫杰,李锦荣,郭建英,等.乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J].环境科学研究,2017,30(7):1069-1078
- [12] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报,2012,28(5):120-125
- [13] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369
- [14] Brady N C. The Nature and Properties of Soils[M]. New York: Macmillan Publishing Co., 1990
- [15] Fryrear D W. Soil ridges clods and wind erosion[J]. Transactions of the ASAE(American Society of Agricultural Engineers), 1984, 27(2): 445-448

- [16] 许艳, 张仁陟. 陇中黄土高原不同耕作措施下土壤磷动态研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 670–681
- [17] 周炜星, 吴韬, 于遵宏. 多重分形奇异谱的几何特性 II. 配分函数法[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(4): 390–395
- [18] Caniego F J, Espejo R E, Marti N M A, et al. Multifractal scaling of soil spatial variability[J]. Ecological Modeling, 2005, 182(3/4): 291–303
- [19] Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1568–1574
- [20] 孙梅, 孙楠, 黄运湘, 等. 长期不同施肥红壤粒径分布的多重分形特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(11): 2173–2181
- [21] Paz Ferreiro J, Vidal Vazquez E. Multifractal analysis of Hg pore size distributions in soils with contrasting structural stability[J]. Geoderma, 2010, 160(1): 64–73
- [22] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 44–50
- [23] Posadas A N D, Gimenez D, Bitelli M, et al. Multifractal characterization of soil particle-size distributions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(5): 1361–1367
- [24] 丁敏, 庞奖励, 刘云霞, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 161–165
- [25] 臧英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 56–60
- [26] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 北京市农田风蚀的野外观测研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 400–406
- [27] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176–182
- [28] 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
- [29] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征[J]. 土壤, 2010, 42(2): 302–308
- [30] 白一茹, 汪有科. 黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 43–48, 42

Study on Particle Size Distribution Characteristics of Farmland Soil in Semi-arid Region Based on Multi-fractal

WANG Yan¹, MENG Zhongju^{1*}, Siqingbilige², DING Yanlong¹, WANG Zeyu¹,
WAN Fang¹, WU Xiaolong¹

(1 College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2 Ordos Forestry Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: 0–10 cm topsoils of the typical stubble field of hulless oat (SH), the ploughing and raking field (PR) and the ploughing field without raking (P) in the agro-pastoral transition zone of the north foot of Yinshan Mountain were taken as the targets, the characteristics and differences in soil particle size distributions (PSDs) under the three management patterns were analyzed by adopting the multifractal theory. The results showed that clay content is extremely low under all kinds of management patterns, P and SH patterns are dominated by silts and fine sands, while PR dominated by silts and very fine sands. The general dimension spectrum $D(q)$ is the inverse S-shape decreasing function, and $D_0 > D_1 > D_2$; the multifractal spectrum $f(q)$ is a unimodal curve like left hook-shape, with $\Delta\alpha$ values ranged in 2.405–2.596, indicating a high degree of homogeneity, therefore multifractality could be used to describe the characteristics of PSD. D_1 and D_2 , the multifractal parameters, are significantly positively correlated with clay content, D_0/D_1 is significantly positively correlated with silt content and negatively correlated with fine sand content, while Δf is on the contrary. Management pattern has significant effects on PSD and D_0 , $\Delta\alpha$ and Δf ($P < 0.05$), but has insignificant effect on D_1 , D_1/D_0 , D_2 and α_0 . According to these results, it is suggest that the stubble should be left in farmland or be used to cover the farmland, and appropriate plough style should be chosen according to the local prevailing wind direction.

Key words: Farmland; Multi-fractal; Soil particle size distribution; Management pattern; Semiarid area