DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.023

杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系. 土壤, 2021, 53(3): 620–627.

砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系①

杨振奇[1], 秦富仓[2*], 李 龙[2], 郭建英[1], 王 燕[2]

(1 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 以砒砂岩区鲍家沟流域不同侵蚀程度的表层土壤(0 ~ 20 cm)为研究对象, 运用多重分形和典型相关分析相结合的方法, 研究土壤粒径分布特性与土壤持水能力的相互关系。结果表明: ①砒砂岩区不同侵蚀程度土壤粒径分布介于 2.13 ~ 2390 μm, 砂粒含量远高于粉粒和黏粒, 随着侵蚀程度的加剧, 土壤砂粒含量增加; ②广义维数谱 $D(q)$呈"Z 型"递减曲线, 且 $D_0>D_1>D_2$, 土壤颗粒分布存在明显的非均匀性, 可以通过多重分形对其进行描述; ③土壤总孔隙度介于 33.07% ~ 46.20%, 随着侵蚀程度加剧孔隙度和持水量呈下降趋势。土壤颗粒多重分形特征与持水能力存在正相关关系, 其中通气孔隙度和颗粒分布关联维数在交互影响过程中起引导作用。

关键词: 砒砂岩区; 土壤粒径分布; 土壤持水; 典型相关分析; 多重分形特征

中图分类号: S157 **文献标志码:** A

Relationship Between Soil Particle Multifractals and Water Holding Capacity Under Different Erosion Degrees in Feldspathic Sandstone Region

YANG Zhenqi[1], QIN Fucang[2*], LI Long[2], GUO Jianying [1], WANG Yan [2]

(1 *Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources of China*, *Hohhot* 0100208, *China*; 2 *College of Desert Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: In this study, the surface soils (0-20 cm) with different erosion degrees were selected in Baojiagou watershed of Feldspathic sandstone region through canonical correlation and multifractality, and then the relationship between soil PSD and soil WHC was studied. The results showed that: 1) Soil particle size was distributed in range of 2.13-2 390 μm, sands dominated soil particle composition, while silts and clays were little. Soil sands increased gradually with erosion intensified. 2) The general dimension spectrum $D(q)$ showed Z-shape decreasing function, and $D_0>D_1>D_2$, which indicated a high degree of homogeneity, therefore multifractality could be used to describe the characteristics of *PSD*. 3) Soil porosity ranged from 33.07% to 46.20%. Soil porosity and *WHC* decreased gradually with erosion intensified. In conclusion, soil particle multi-fractals is positively correlated with soil WHC, and soil aeration porosity and correlation dimension of PSD play a guiding role in the interaction process.

Key words: Feldspathic sandstone region; Soil particle size distribution; Soil water holding capacity; Canonical correlation analysis; Multifractality

土壤是由无数细小颗粒组成的疏松多孔介质,细小颗粒作为土壤的基本构成单元,其粒径分布特征是土壤的重要物理性质之一。土壤颗粒间的孔隙是水分的主要存储空间, 大量研究证实, 土壤粒径分布特征决定了土壤的理化性质和持水性能[1]。定量研究土壤粒径分布特征及其对于土壤性质的影响机制,是土壤物理学领域长期的重点研究任务之一。特别是在水土流失严重的地区,土壤中细颗粒极易在外营力作用下被剥蚀搬运,造成土壤水肥的流失和土地生产力的退化[2], 研究这些区域土壤粒径分布规律及其对区域环境生态修复的响应机理,更具有实际指导意义。目前, 土壤粒径分布特征的主要研究手段有比重计法、吸管法以及激光衍射法, 特别是激光粒度衍射法, 因其测量方法便捷且结果准确已成为近十年内较为常用的

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41967008)、国家自然科学基金青年基金项目(41807079)和内蒙古科技计划项目(201802106)资助。

* 通讯作者(qinfc@126.com)

作者简介: 杨振奇(1993—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: 843296578@qq.com

粒度分析方法[3-5]。应用分形理论研究土壤粒径分布的自相似特征是近年来较为通用的方法，比较有代表性的研究有：杨培岭等[6]通过粒径的数量分布确定了土壤分形特征模型；黄冠华等[7]应用分形维数与土壤质地和土壤水分特征曲线的关系进行了研究；杨金玲等[8]确定了土壤颗粒质量分形维数与体积分形维数的关系研究。当今，激光衍射测量法和分形理论已成为研究土壤粒度分布规律的有效工具。

黄河流域的晋陕蒙三省交界地区，分布着俗称“砒砂岩”的松散岩层，砒砂岩成岩程度低，极易侵蚀产沙[9]，该区也因此成为黄河粗泥沙的集中来源区。砒砂岩区天然植被稀疏，人工植被建设是该区生态环境修复的重要措施。砒砂岩区气候干旱，土壤持水能力对人工植被建设的成效极为关键。因此，研究砒砂岩区土壤颗粒分布规律及其对土壤持水性能的关系，对于提高人工植被成活率，促进该区生态环境恢复有重要现实意义。单重分形维数只能对土壤颗粒的整体结构进行描述，对于局部异质性的描述则存在一定的局限性[10]，部分专家学者选择运用多重分形方法对土壤颗粒分布的细节特征进行更为细致的研究，研究成果多集中在黄土丘陵区、沙地以及采煤塌陷区等区域[11-13]，运用多重分形方法对砒砂岩区土壤粒度的研究相对较少。为此，本研究选择内蒙古准格尔旗砒砂岩区为研究区，选取不同侵蚀程度下的土壤为研究对象，运用多重分形理论和典型相关分析方法，分析不同侵蚀强度土壤粒度的多重分形特征与土壤持水特性的关系，以期为砒砂岩区水土流失治理工作以及区域生态用水平衡的研究提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古准格尔旗暖水乡的鲍家沟流域，流域面积 12.67 km^2，地理坐标为 110′31′ ~ 110°35′E、39°46′ ~ 39°48′N，海拔 1 110 ~ 1 300 m，地形北高南低；温带大陆性气候，冬季漫长干燥，夏季短暂温热，年均气温 7.2 ℃，年降水量 400 mm；土壤类型以粗骨栗钙土为主，土壤侵蚀类型有水力侵蚀、风力侵蚀以及重力侵蚀等。流域内土壤侵蚀治理措施以营造人工植被和封育禁牧措施为主，主要人工植被有：油松(*Pinus tabuliformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)以及沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等；草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2　采样及测定方法

2017 年 7 月通过对研究流域内的土壤侵蚀程度[14]进行调查，研究流域侵蚀程度以轻度和中度侵蚀为主，轻度和中度侵蚀主要分布在植被覆盖度较高的坡面平缓坡地带，强度和剧烈侵蚀主要分布在沟道和梁峁顶部基岩出露的地带(表 1)。每类侵蚀程度下布设取样点 25 个，采集表层(0 ~ 20 cm)土样，并设置 3 个重复取样，带回实验室风干处理备用，土壤粒度测定采用马尔文 30000(测量区间 0.01 ~ 3 000 μm)激光粒度分析仪，颗粒分级采用 USDA 制(下同)。

表 1　样地基本情况表

Table 1　Basic information of sample plots

侵蚀程度	土地利用类型	覆土层厚度(cm)	植被覆盖度(%)	坡度(°)	地形	剖面特征
轻度侵蚀	乔木林地	>60	>50	5	坡下	A 层保留
中度侵蚀	灌木林地	40 ~ 60	30 ~ 50	10	坡中	A 层基本消失
强度侵蚀	草地	10 ~ 40	10 ~ 30	20	梁峁顶	B 层出露
剧烈侵蚀	裸地	<10	<10	30	沟坡	C 层出露

1.3　数据处理方法

1.3.1　粒度参数的计算　　采用 Folk-Ward 图解法计算标准偏差(σ_0)、偏度(SK)和峰度(K_g) [15]，计算公式如下：

$$\sigma_0=\left(\frac{\varphi_{84}-\varphi_{16}}{4}\right)+\left(\frac{\varphi_{95}-\varphi_5}{6.6}\right) \tag{1}$$

$$\mathrm{SK}=\frac{\varphi_{16}+\varphi_{84}-2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84}-\varphi_{16})}+\frac{\varphi_5+\varphi_{95}-2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95}-\varphi_5)} \tag{2}$$

$$K_g=\frac{\varphi_{95}-\varphi_5}{2.44(\varphi_{75}-\varphi_{25})} \tag{3}$$

式中：φ 值是土壤颗粒直径经过负对数变换后的值，φ_5、φ_{16}、φ_{25}、φ_{50}、φ_{75}、φ_{84}、φ_{95} 分别为累积频率为 5%、16%、25%、50%、75%、84% 和 95% 时所对应的 φ 值。

标准偏差是度量数据分布离散程度的指标，σ_0<0.35 分选性极好，0.35<σ_0≤0.50 分选性好，0.50<σ_0≤0.71 分选性较好，0.71<σ_0≤1.0 分选性中等，1.0<σ_0≤2.0 分选性较差，2.0<σ_0≤4.0 分选性差、σ_0>1.0 分选性极差。偏态系数反映了土壤颗粒相对于平均值的对称程度，–1.0≤SK<–0.3 极负偏，–0.3

≤SK<–0.1 负偏，–0.1≤*SK*<0.1 近于对称，0.1≤*SK*<0.3 正偏，0.3≤*SK*<1.0 极正偏。峰度衡量实数随机变量概率分布的峰态，K_g≤0.67 很宽平，0.67<K_g≤0.9 宽平，0.9<K_g≤1.11 中等，1.11<K_g≤1.56 尖窄，1.56<K_g≤3.00 很尖窄，K_g>3.00 极尖窄。

1.3.2 分形参数的计算 采用土壤粒径体积数据计算一维分形维数和多重分形维数[16]，一维分形维数计算公式如下：

$$\lg\frac{v(r<R_i)}{V_T}=3-D\lg(\frac{R_i}{R_{Max}}) \tag{4}$$

式中：v 为小于粒径 R 的土壤总体积，V_T 为土壤总体积，R_i 为某粒径，R_{Max} 为最大粒径，D 为分形维数。

多重分形参数计算前需构造配分函数，将激光粒度的测量区间按照对数等差递增的形式划分为 64 个小区间，区间大小为 $\varepsilon=5\times2^{-k}$($k$ 取值范围为 1 ~ 6 的整数)，$u(\varepsilon)$ 为每个子区间土壤粒径的分布概率密度，则配分函数组为[17]：

$$u_i(q,\varepsilon)=\frac{u_i(\varepsilon)^q}{\sum_{i=1}^{N}u_i(\varepsilon)^q} \tag{5}$$

由此可得粒径分布多重分形的广义维数谱为：

$$D(q)=\frac{1}{Q-1}\lim_{\varepsilon\to0}\frac{\lg(\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)}u_i(\varepsilon)^q)}{\lg(\varepsilon)} \tag{6}$$

多重分形奇异性指数可由下式计算：

$$\alpha(q)=\lim_{\varepsilon\to0}\frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)}u_i(q,\varepsilon)\lg p_i(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon)} \tag{7}$$

相应的多重分形谱函数计算公式如下：

$$f(\alpha(q))=\lim_{\varepsilon\to0}\frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)}u_i(q,\varepsilon)\lg u_i(q,\varepsilon)}{\lg(\varepsilon)} \tag{8}$$

式中：q 为实数，$u_i(q,\varepsilon)$为第 i 个区间的 q 阶概率。当 q = 0、1、2 时，计算的广义维数谱函数 $D(q)$ 分别为 D_0(容量维)、D_1(信息维)、D_2(关联维)。

1.3.3 数据处理分形维数和其余粒度参数的计算在 Microsoft Excel 2016 中完成，方差分析、典型相关分析在 DPS 7.5 中完成，数据可视化在 Orgin 9.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 不同侵蚀程度土壤颗粒分布特征

土壤颗粒体积频率曲线和累积频率曲线可以直观地反映土壤中各粒级颗粒含量情况。由累积频率曲线(图 1A)可知，砒砂岩区各侵蚀程度下土壤粒径为 2.13 ~ 2 390 μm，土壤颗粒整体较粗，黏粒(粒径<2 μm)体积比例不足 1%，粉粒(2 ~ 50 μm)体积比例依次为轻度侵蚀(11.69%)>中度侵蚀(11.04%)>强度侵蚀(6.02%)>剧烈侵蚀(5.63%)，砂粒(50 ~ 2 000 μm)体积比例在 88% 以上；按照土壤质地分类方法，研究区土壤质地均属砂土(USDA 制)。随着粒径的增加，累积频率曲线剧烈抬升，颗粒体积进入快速的积累阶段，土壤中 50 ~ 1 000 μm 范围内的颗粒含量大幅提升，说明了各侵蚀程度下的土壤机械组成以极细砂、细砂、中砂和粗砂(USDA 制)含量为主。从土壤颗粒的体积频率曲线(图 1B)来看，中度、强度和剧烈侵蚀土壤颗粒曲线呈单峰形式，表明中度、强度和剧烈侵蚀程度下的土壤粒径分布较为集中；而轻度侵蚀土壤颗粒曲线呈近似双峰形态，曲线起伏度较其他侵蚀

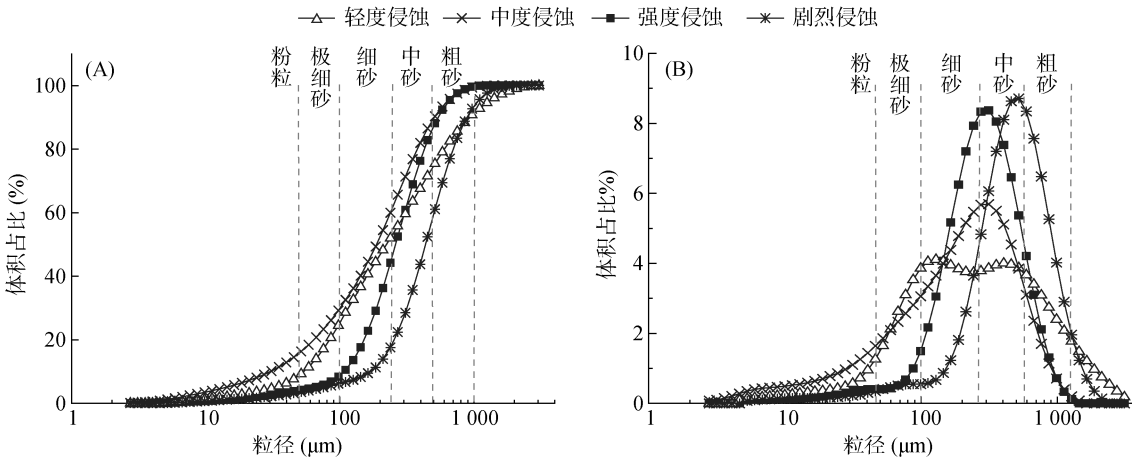


图 1 土壤粒径分布情况

Fig. 1 Distribution of soil particles size

类型较低，波峰的出现位置也相对较早，这表明轻度侵蚀土壤颗粒分布情况较为离散，同时其各径级土壤颗粒组成分布也较为均匀。

结合表 2 来看，不同侵蚀程度土壤颗粒的平均粒径大小依次为轻度侵蚀(159.98 μm)<中度侵蚀(233.54 μm)<强度侵蚀(249.47 μm)<剧烈侵蚀(374.65 μm)，随着侵蚀程度的增强，土壤中细颗粒流失量加剧，土壤粗粒化现象加重。标准偏差可以反映土壤粒径数据分布的离散程度，可以看出不同侵蚀程度频率曲线的标准偏差系数介于 1.04 ~ 1.60，颗粒的分选性均属中等水平。峰度则衡量了土壤粒径数据概率分布的峰态，不同侵蚀程度土壤颗粒的峰度系数为 1.12 ~ 1.47，曲线形态均属尖窄形，但轻度和中度侵蚀的曲线形态相对较为宽平。通过偏态系数的差异，可以比较各频率曲线的对称程度，其中轻度侵蚀(-0.04)土壤颗粒曲线接近对称分布，强度侵蚀(0.20)和中度侵蚀(0.30)颗粒曲线属正偏类型，而剧烈侵蚀(0.34)土壤颗粒曲线属极正偏类型，表明轻度侵蚀状态的土壤颗粒组成情况较为均匀，而其余侵蚀程度的土壤颗粒组成中粗颗粒占据主体地位。以上频率分布和粒度参数特征反映了不同侵蚀程度土壤颗粒的整体性和平均性情况，细节特征和局部变异规律则需要通过进一步的分析确定。

表 2　土壤粒度参数

Table 2　Soil grain-size parameters

侵蚀程度	平均粒径(μm)	标准偏差	峰度	偏度
轻度侵蚀	159.98 ± 4.44 c	1.50 ± 0.08	1.13 ± 0.11	–0.04 ± 0.01
中度侵蚀	233.54 ± 2.76 b	1.22 ± 0.07	1.12 ± 0.10	0.30 ± 0. 01
强度侵蚀	249.47 ± 3.11 b	1.04 ± 0.06	1.32 ± 0.07	0.20 ± 0.03
剧烈侵蚀	374.65 ± 3.15 a	1.60 ± 0.12	1.47 ± 0.06	0.34 ± 0.02

注：表中同一列数据小写字母不同表示不同侵蚀土壤粒度参数差异显著(P<0.05)。

2.2　不同侵蚀程度土壤颗粒的分形特征

多重分形是分形理论的进一步发展，通过计算土壤颗粒在不同径级单元内的概率分布构造多重分形谱，从而对土壤颗粒分布的局部变异和非均匀特征进行描述。图 2A 为不同侵蚀程度土壤颗粒分布的广义维数谱，Y 轴为广义维数谱，X 轴为权重，$D(q)$的值域范围为 1.56 ~ 0.20。随着 q 值的增大，曲线均呈“Z 型”递减形态，q<0 时曲线降幅较大，相反 q>0 时曲线降幅较小；强度和剧烈侵蚀程度的曲线接近重合，且可以与轻度和中度侵蚀程度曲线明显区分开来，充分说明了各侵蚀程度下土壤颗粒具有明显的非均匀分形特征；强度和剧烈侵蚀程度的土壤颗粒的分布形态接近，也说明强度和剧烈侵蚀程度土壤颗粒在局部特征的变异程度要高于轻度和中度。从图 2B 可以看出，各侵蚀程度的多重分形奇异谱函数呈易于区分的非对称的拱型曲线，说明在土壤的形成和演变过程中，在侵蚀的外营力作用下，造成了土壤颗粒含量的局部叠加，从而导致了土壤粒径分布的非均匀性变化。形状特征 Δf 均大于 0，函数形状均呈左勾状，表明土壤颗粒分布结构中大概率颗粒(砂粒)占据主要地位；谱宽 Δa 能够反映颗粒分布的不均匀程度，Δa 的大小依次为强度侵蚀(1.53)>剧烈侵蚀(1.48)>轻

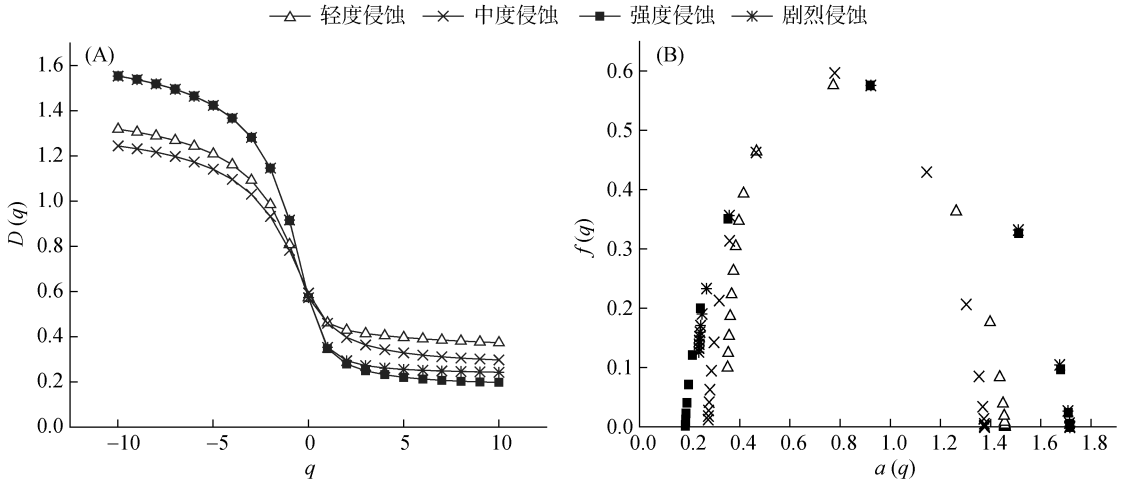


图 2　土壤颗粒分布多重分形谱函数

Fig. 2　Multifractal spectral function of soil particle distribution

度侵蚀(1.11)>中度侵蚀(1.10)，可以看出强度和剧烈侵蚀的谱宽较为接近，轻度和中度侵蚀的谱宽较为接近，表明随着侵蚀程度的加剧，不同层次和不同局部条件下，土壤颗粒分布的不均匀性增加，颗粒分配结构会发生显著的变异过程。

表 3 为土壤颗粒分布的分形参数，分形维数 D 可以反映土壤的基本质地情况，分形维数 D 呈轻度侵蚀>中度侵蚀>强度侵蚀>剧烈侵蚀的趋势，$D_{砂}$ 与 D 的变化趋势一致，而 $D_{粉}$ 与之趋势相反，表明随着侵蚀程度的加剧，土壤粗骨化现象严重。容量维 D_0 可以反映土壤颗粒的分布情况，D_0 值介于 0 ~ 1，表明土壤颗粒在指定的径级分组区间(粒径<2 μm)内存在含量为 0 的情况，D_0 值越大表明土壤粒径分布的范围越宽，轻度、中度和强度侵蚀的 D_0 值一致，说明其土壤颗粒分布范围相近。信息维 D_1 则反映了土壤的均匀性特征，D_1 值愈高表明土壤颗粒分布的均匀性愈强，土壤颗粒分布的均匀性排序依次为轻度>侵蚀中度>侵蚀剧烈>强度侵蚀。关联维数 D_2 值可以描述土壤颗粒分布过程中不确定性因素的影响作用，与 D_1 的变化趋势一致，土壤粒径分布的异质程度常通过 D_1/D_0 来进行描述，与 D_1 和 D_2 一致。充分说明了轻度侵蚀程度下土壤颗粒分布均匀性较强；同时影响土壤颗粒分布的不确定性因素也较多，土壤颗粒结构易被破坏，经过长期的侵蚀作用，当土壤中细颗粒流失殆尽，粗颗粒含量占据主体后，土壤颗粒分布的均匀性略有回升。

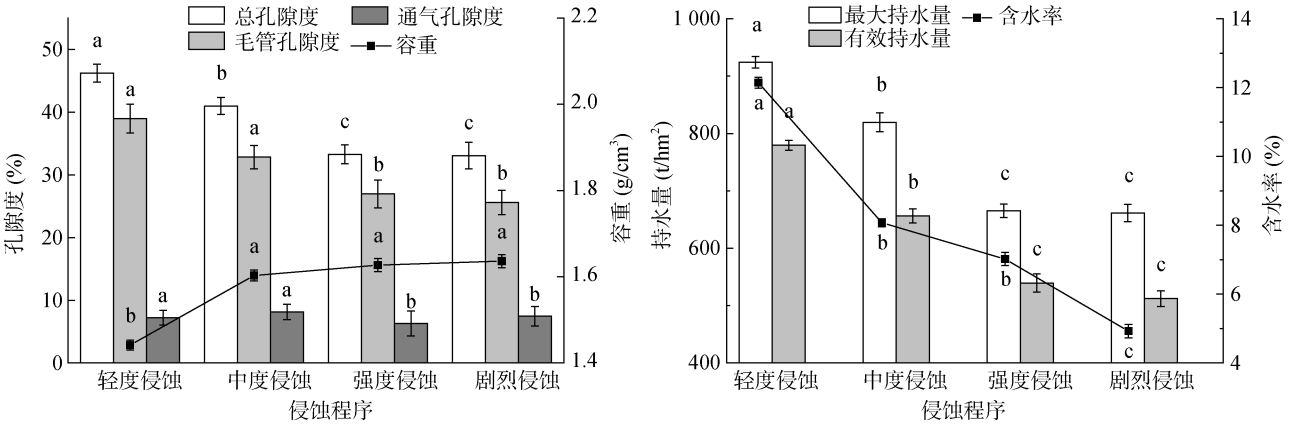
表 3 土壤颗粒分布多重分形参数

Table 3 Multifractal parameters of soil particle distribution

侵蚀程度	D	$D_{粉}$	$D_{砂}$	D_0	D_1	D_2	D_1/D_0
轻度侵蚀	2.348	1.571	2.811	0.577	0.465	0.433	0.807
中度侵蚀	2.104	1.698	2.707	0.597	0.463	0.401	0.775
强度侵蚀	2.001	1.773	2.734	0.577	0.352	0.283	0.61
剧烈侵蚀	1.990	1.877	2.326	0.577	0.357	0.298	0.619

2.3 不同侵蚀程度土壤持水特性

土壤层是自然降水拦蓄的主要场所之一，土壤孔隙度和土壤持水量是评价土壤通透结构和蓄水性能的常用指标。由图 3A 可知，不同侵蚀程度下土壤总孔隙度介于 33.07% ~ 46.20%，呈轻度侵蚀>中度侵蚀>强度侵蚀>剧烈侵蚀的趋势，但强度侵蚀与剧烈侵蚀程度间差异不显著(a=0.05)；轻度侵蚀程度下土壤的毛管孔隙度最高为 38.97%，显著高于强度侵蚀和剧烈侵蚀程度土壤(a=0.05)；中度侵蚀下的土壤通气孔隙度最高，为 8.15%。不同侵蚀程度的土壤容重为 1.44 ~ 1.63 g/cm^3，轻度侵蚀下的土壤容重显著低于其余侵蚀程度(a=0.05)。从土壤持水特性(图 3B)来看，不同侵蚀程度土壤含水率、最大持水量和有效持水量与总孔隙度的变化趋势一致，其中轻度侵蚀下的最大持水量和有效持水量分别为 924.05 t/hm^2 和 779.45 t/hm^2，是剧烈侵蚀程度下的 1.39 倍和 1.65 倍，表明随着侵蚀程度的加剧，砒砂岩区土壤的通透性和持水性能会随之下降。



(图中小写字母不同表示不同侵蚀程度指标间差异显著(P<0.05))

图 3 土壤物理性质及持水能力

Fig. 3 Soil physical properties and water holding capacity

2.4 不同侵蚀程度土壤颗粒的分形特征与持水性能典型相关关系

通过典型相关分析法可以对土壤颗粒与持水特性间的交互作用关系进行分析。以土壤总孔隙度等 8 个持水特性指标作为第一组变量，以分形维数 D 等 7 个分形特征指标作为第二组变量，进行典型相关分析。由表 4 可知，前两对典型变量 P<0.05，相关性达到显著性水平，其相关系数分别为 0.971 6 和 0.937

5，因此选取前两对典型变量进行研究。

表 4　典型相关系数显著性检验
Table 4　Significance test of typical correlation coefficient

编号	相关性	Wilk's	χ^2	*df*	*P*
1	0.971 6	0.000 4	118.036 7	56	0.000 1
2	0.937 5	0.006 8	74.801 8	42	0.001 4
3	0.810 1	0.056 4	43.138 4	30	0.057 0
4	0.763 9	0.164 0	27.118 1	20	0.132 0

第一对典型变量可以表示成：

持水特性：U_1=–0.118x_1–1.075x_2–4.104 9x_3+1.555 4x_4–0.096 7x_5+4.5833x_6–1.714 1x_7+0.937 4x_8

分形特性：V_1=0.324 5y_1–0.851 7y_2–0.6495y_3+0.3602y_4+1.4946y_5–0.2117y_6–0.8612y_7

第二对典型变量可以表示成：

持水特性：U_2=–0.110 6x_1–1.000 2x_2–2.921 9x_3+4.876 3x_4–0.643 7x_5–0.819 9x_6–3.454 4x_7+3.443 0x_8

分形特性：V_2=–0.435 1y_1–0.510 5y_2–0.135 5y_3+0.045 6y_4+0.588 7y_5+0.335 3y_6–0.671 3y_7

结合典型变量结构(表 5)可以看出，U_1 与 x_3(通气孔隙度)、x_6(最大持水量)、x_4(容重)和 x_7(有效持水量)呈显著正相关关系，其相关系数分别为 0.851 2、0.847 6、0.827 1 和 0.819 8；V_1 与 y_6(D_2)、y_5(D_1)和 y_7(平均粒径)呈显著正相关关系，其相关系数分别为 0.796 9、0.788 9 和 0.623 2。同理持水特性因子中 x_2(毛管孔隙度)和 x_8(最小持水量)在 U_2 的变化过程中起促进作用，y_2($D_{粉}$)在 V_2 的变化过程中起促进作用。由图 4 冗余分析结果可知，土壤持水特性的第一组和第二组典型变量分别解释了分形特征的 86.33% 和 27.45%，土壤分形特征的第一组和第二组典型变量分别解释了持水特性的 61.22% 和 31.81%，基本可以解释土壤持水特性与颗粒分形维数的相互关系。

表 5　典型变量构成
Table 5　Canonical variable composition

持水能力	系数	*x*1	*x*2	*x*3	*x*4	*x*5	*x*6	*x*7	*x*8
U_1	mi	–0.118 0	–1.075 0	–4.104 9	1.555 4	–0.096 7	4.583 3	–1.714 1	0.937 4
	rui	–0.666 3	–0.131 4	0.851 2	0.827 1	–0.090 9	0.847 6	0.819 8	0.532 7
U_2	mi	–0.110 6	–1.000 2	–2.921 9	4.876 3	0.643 7	–0.819 9	–3.454 4	3.443 0
	rui	–0.251 5	0.650 8	0.127 3	0.190 2	–0.445 0	0.131 4	0.189 7	0.614 9
分形特性		*y*1	*y*2	*y*3	*y*4	*y*5	*y*6	*y*7	
V_1	mi	0.324 5	–0.851 7	–0.649 5	0.360 2	1.494 6	–0.211 7	–0.861 2	
	rui	0.311 6	–0.441 4	0.190 5	0.480 2	0.788 9	0.796 9	0.623 2	
V_2	mi	–0.435 1	0.510 5	0.135 5	0.045 6	0.588 7	0.335 3	–0.671 3	
	rui	–0.587 7	0.721 6	–0.246 2	0.240 6	0.298 0	0.269 0	–0.197 6	

注：表中 x_1~x_8 分别为总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙、容重、含水率、最大持水量、有效持水量、最小持水量；y_1~y_7 分别为 D、$D_{粉}$、$D_{沙}$、D_0、D_1、D_2、平均粒径；mi 为典型变量系数，rui 为观察值与典型变量间相关系数。

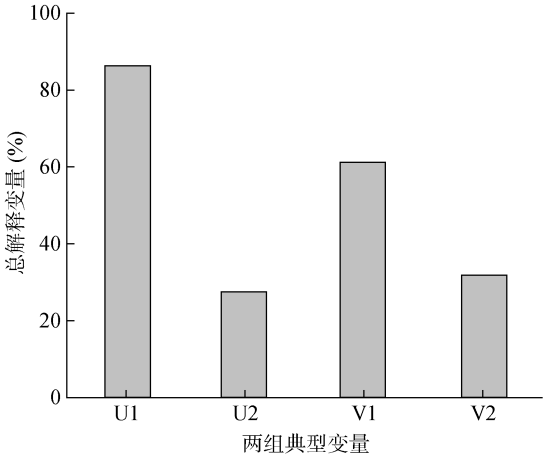


图 4　典型变量分析结果
Fig. 4　Results of canonical variable analysis

3　讨论

3.1　土壤侵蚀对砒砂岩区土壤颗粒分形特征的影响

土壤侵蚀是土壤颗粒在风力和水力等外营力作用下发生的剥蚀、搬运和堆积的过程，因此土壤的颗粒分布特征与风力和水力的侵蚀作用密切相关。黄土高原土壤颗粒多重分形特征研究结果的 $D(q)$ 值和 $f(q)$值等多重分形参数均高于本研究区[11,14,17]，本研究中砒砂岩区各侵蚀程度下土壤粒径介于 2.13 ~ 2 390 μm，砂粒(>50 μm)含量是黄土高原区的 2.6 倍左右，砒砂岩区土壤粒径相比黄土区较粗，这是由于砒砂岩矿物颗粒较粗且成岩程度低极易风化溃散[18]，

在长期而剧烈风水侵蚀作用下矿物颗粒进入土壤，造成了该区域土壤粗粒化现象严重。管孝艳等[19]认为，通过多重分形参数可以描述土壤粒径分布的局部变异和非均匀特征，本研究土壤多重分形的广义维数谱呈“Z 型”递减形态，奇异谱函数在局部区域的叠加分布现象，以及各侵蚀程度多重分性参数均呈 $D_0>D_1>D_2$ 的趋势，都证实了砒砂岩区土壤粒径分布存在非均匀的分形特征。相关研究[20-21]表明，不同侵蚀的发展阶段，土壤流失的颗粒径级存在着显著的差异。本研究中，剧烈侵蚀与轻度侵蚀程度的土壤虽然在质地分类上同属一类，但其土壤颗粒的多重分形谱函数却显示土壤颗粒分布的局部特征上有着明显的差异。因此可以认为土壤侵蚀对土壤颗粒分布的作用也具备局部性和不均匀性，即在侵蚀程度相对较轻的阶段，侵蚀环境中的不确定性因素较多(如植被等)[22]，土壤中的细颗粒是主要的侵蚀对象，随着侵蚀程度的加剧，侵蚀的对象变得更为多元化，土壤颗粒分布的不均匀性也会愈发明显，当侵蚀达到剧烈程度，侵蚀的对象则转向粗颗粒，土壤颗粒分布结构维持稳定，均匀性也随之稍有回升。

3.2 砒砂岩区土壤颗粒多重分形特征与持水特性的关系

土壤颗粒是土壤系统中最为基本的结构单元和功能单元，土壤颗粒的流失势必会伴随着土壤结构和功能的转变。长期而剧烈的风力和水力侵蚀作用会导致土壤的粗骨化和干旱化[23]，本研究得出，随着侵蚀程度的加剧，砒砂岩区土壤粉粒体积占比由 11.69% 下降至 5.63%，不同侵蚀程度下的土壤颗粒的平均粒径差异呈轻度侵蚀(159.98 μm)<中度侵蚀(233.54 μm)<强度侵蚀(249.47 μm)<剧烈侵蚀(374.65 μm)趋势，土壤的疏松性降低，土壤容重呈上升趋势，孔隙度由 46.20% 下降至 33.07%，土壤的持水能力减弱，最大持水量和有效持水量分别降低了 28 个百分点和 34 个百分点，与查小春等[24]的研究结果相近。结合典型相关的分析结果来看，土壤颗粒的分形特征与土壤持水特性存在着正相关关系，且通气孔隙度和关联维数在两组变量的交互作用关系中起主要的引导作用，说明了土壤颗粒含量变化会首要影响土壤颗粒分布的均匀性，引起土壤中通气孔隙的变化，进而导致土壤持水性能的改善。此外，本研究中强度侵蚀和剧烈侵蚀程度下的土壤粒径虽然较轻度侵蚀和中度侵蚀较粗，但其土壤孔隙度和持水性能却较差，原因与研究区的基岩特性有关，在野外调查过程中发现，研究区覆土层浅薄覆土下为相对松散的砒砂岩风化物，特别是剧烈侵蚀程度下的覆土层已流失殆尽，采集的土壤样品以出露的砒砂岩风化物为主。李长明的[25]研究表明，砒砂岩矿物成分中蒙脱石含量较高，砒砂岩的吸水性能要高于石英砂岩，而蒙脱石吸水后发生膨胀，水分蒸发后岩体内会出现孔隙，本研究前期的试验也表明砒砂岩会显著影响土壤的孔隙结构和持水能力[26]，因此裸露风化的砒砂岩虽然土壤粒径较粗但是仍存在大量的孔隙并具备一定的持水性能，同时这也是砒砂岩结构不稳定易于溃散侵蚀的重要原因之一。

4 结论

1)砒砂岩区各侵蚀程度下土壤粒径介于 2.13 ~ 2 390 μm，土壤颗粒构成以粉粒和砂粒为主，其中砂粒体积占比达 88% 以上。轻度侵蚀程度的各级土壤颗粒分配情况较为均衡，随着侵蚀程度的增强，土壤中细颗粒流失量加剧，粗粒化现象加重。

2)不同侵蚀程度下土壤多重分形参数 D_0、D_1 和 D_1/D_0 由大到小依次为轻度侵蚀>中度侵蚀>强度侵蚀>剧烈侵蚀，随着侵蚀程度的增加，土壤细颗粒流失殆尽，土壤颗粒组成以粗颗粒为主，土壤粒径分布的不均匀性降低。

3)不同侵蚀程度下土壤总孔隙度的大小介于 33.07% ~ 46.20%，最大持水量为 661.4 ~ 924.05 t/hm^2，土壤持水能力呈轻度侵蚀>中度侵蚀>强度侵蚀>剧烈侵蚀的下降规律。持水能力下降的主要原因在于随着侵蚀程度的加剧，颗粒分布的均匀性下降导致的土壤粗骨化。

参考文献：

[1] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4): 305–315.

[2] 李玉强, 尚雯, 赵哈林, 等. 农田沙漠化过程对土壤性质和作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 926–931.

[3] 陈仕涛, 王建, 朱正坤, 等. 激光衍射法与比重计沉降法所测粒度参数的对比研究——以海滩泥沙为例[J]. 泥沙研究, 2004(3): 64–68.

[4] 李学林, 李福春, 陈国岩, 等. 用沉降法和激光法测定土壤粒度的对比研究[J]. 土壤, 2011, 43(1): 130–134.

[5] 杨金玲, 张甘霖, 李德成, 等. 激光法与湿筛-吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 772–780.

[6] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896–1899.

[7] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 490–497.
[8] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 413–419.
[9] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14–18.
[10] Grout H, Tarquis A M, Wiesner M R. Multifractal analysis of particle size distributions in soil[J]. Environmental Science & Technology, 1998, 32(9): 1176–1182.
[11] 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.
[12] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘下风向降尘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 295–301.
[13] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 983–992.
[14] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
[15] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
[16] 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.
[17] 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.
[18] 石迎春, 叶浩, 侯宏冰, 等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报, 2004, 25(6): 659–664.
[19] 管孝艳, 杨培岭, 吕烨. 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.
[20] 刘淼, 吴媛媛, 杨明义, 等. 次降雨过程中侵蚀泥沙分形维数的变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 37–43.
[21] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1235–1240.
[22] 秦富仓, 余新晓, 张满良, 等. 小流域林草植被控制土壤侵蚀机理研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1618–1622.
[23] 闫玉春, 唐海萍, 张新时, 等. 基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1263–1268.
[24] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 20–23.
[25] 李长明, 王立久, 杨大令, 等. 黄河砒砂岩中蒙脱石的基本特征[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 11–14.
[26] 杨振奇, 秦富仓, 李晓琴, 等. 砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 118–122.