

祁连山区主要下垫面土壤粒径分布特征

贺燕¹, 魏霞¹, 魏宁², 于文竹¹, 崔霞¹, 赵恒策¹

(1.兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2.西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为揭示祁连山区土壤结构异质性和粒径分布(PSD)的非均匀性,阐明主要下垫面土壤性质差异及土地退化趋势。以祁连山区荒漠、草原、草甸和灌丛等下垫面土壤为研究对象,运用分形理论和相关分析研究了土壤颗粒的粗糙度和非均匀性,分析了下垫面、土壤质地对分形参数的影响。结果表明:土壤单重分形维数(D_V)分布范围为 2.089~2.500,下垫面对 D_V 、多重分形参数(容量维数 D_0 ,信息维数 D_1 ,关联维数 D_2 , D_1/D_0)影响显著,荒漠土壤粗糙度显著($p<0.01$)高于草原、草甸、灌丛,其 PSD 测度的集中度、非均匀性显著($p<0.05$)高于草原、草甸,说明祁连山区整体土壤质地较粗,自东向西逐渐粗化且非均匀性增大。黏粒、粉粒体积分数与 D_V 极显著正相关,与多重分形参数显著正相关(D_0 除外),且 D_V 和多重分形参数分别受黏粒、细砂粒体积分数的主导作用。该研究通过对土壤颗粒微观结构详细分析,可为祁连山区不同下垫面土壤改良及实际生产提供理论基础,为生态环境治理提供科学依据。

关键词:粒径分布;单重分形;多重分形;土壤;祁连山

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0042-06

Characteristics of Soil Particle Size Distribution of Main Land Surfaces in Qilian Mountains

HE Yan¹, WEI Xia¹, WEI Ning², YU Wenzhu¹, CUI Xia¹, ZHAO Hengce¹

(1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the heterogeneity of soil particle size distribution (PSD) and reveal the soil property difference and land degradation trend of land surface in Qilian Mountains, four types of land use (desert, alpine steppe, alpine meadow, and shrub) in Qilian Mountains were selected as the research samples. The contents of soil particle sizes were measured using a laser particle analyzer, soil fractal model and correlation analysis were applied to study the coarseness and the heterogeneity of soil particle composition, and the effects of land-use and soil texture on fractal parameters were analyzed. The results show that the single fractal dimensions (D_V) of the four land surfaces range from 2.089 to 2.500, the land surface has significant influence on the D_V and multi-fractal parameters (capacity dimension D_0 , information dimension D_1 , correlation dimension D_2 , and D_1/D_0), that is, the ANOVA indicates that the coarseness of soil particles in desert is significantly higher ($p<0.01$) than those of alpine steppe, alpine meadow, and shrub, the local concentration rate and inhomogeneity of the soil PSD measurement of desert are significantly higher ($p<0.05$) than those of alpine steppe, and alpine meadow, indicating that the overall soil texture is coarse and presents a tendency of coarsening, and heterogeneity of soil texture increases from east to west in Qilian Mountains; the contents soil clay and silt are significantly positively correlated with D_V , and positively correlated with multi-fractal parameters, D_V and multi-fractal parameters are mainly affected by the content of clay and content of fine sand, respectively. This study analyzed the microstructure of soil particles in detail, which can provide the theoretical basis for soil improvement and actual production of different land surfaces in Qilian Mountains, and scientific basis for ecological environment management.

Keywords: soil particle size distribution; single fractal model; multi-fractal model; soil; Qilian Mountains

收稿日期:2019-05-10

修回日期:2019-05-30

资助项目:兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金“全球变暖背景下青藏高原多年冻土区主要下垫面土壤侵蚀过程与侵蚀强度空间分布特征研究”(lzujbky-2018-kb01)

第一作者:贺燕(1993—),女,湖北十堰人,在读硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与土壤可蚀性。E-mail: yhe2017@lzu.edu.cn

通信作者:魏霞(1980—),女,陕西扶风人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学等研究。E-mail: weix@lzu.edu.cn

土壤粒径分布(Particle size distribution, PSD)是决定许多化学、物理和生物特性的土壤基本物理参数之一,可预测土壤渗透率、土壤有机质和抗蚀性等物理性质^[1-2]。它不仅与成土母质^[3]、土壤质地^[4]、土壤理化性质^[4-6]、气候^[7]和地形^[8-9]等因素密切相关,而且也强烈影响土壤水分运移、土壤肥力、土壤侵蚀及土地退化等^[5,10-11]。下垫面类型、土壤质地和有机质是影响土壤粒径的关键因素^[12-14],不同下垫面能促进或阻碍土壤侵蚀,致使土壤细颗粒物流失或增加,进而影响土壤 PSD^[15]。因此,定量表征土壤 PSD 变化有助于分析土地利用对土壤结构、性能的影响,评价土壤是否存在退化趋势。

分形理论是量化表征土壤 PSD 的有效工具,主要有单重分形和多重分形分析^[16-18]。单重分形分析被广泛应用于定量描述土壤 PSD 整体的粗细程度^[8],但仅有黏粒含量低于 10% 的土壤表现为单重,其余土壤多用多重分形刻画^[19],多重分形可精细地量化土壤微观结构,提供其异质性和非均匀性信息。王德^[17]、白一茹^[20]和茹豪^[11]等采用单重和多重分析方法,分析了黄土高原土地利用对土壤 PSD、分形参数的影响,指出分形参数可作为判断土壤质量差异的指标。代豫杰^[21]、郭树江^[22]等研究了不同植被群落下土壤 PSD 的单重和多重分形特征及与土壤理化性质的关系。孙哲^[4]和魏茂宏^[23]等分别采用多重和单重分形方法,探讨了青藏高原高寒草甸退化序列的土壤 PSD 特征及土壤理化性质、土壤侵蚀模数和质地等对分形参数的影响,表明分形参数是定量表征自然演替过程中土壤性质、土壤侵蚀变化的潜在指标之一。

祁连山区是中国高寒区极强度生态脆弱区之一^[24],又是生态安全屏障和“固体水库”。近年来,受人为破坏和全球变暖的双重影响,该区生态环境出现冰川消融、土地退化、土壤侵蚀强度加剧、沙化扩张等问题^[25-27]。目前祁连山生态保护治理已成为国家当前工作的重点,由于自然环境恶劣,使该地区成为全球地学数据最缺乏的地区之一,同时,由于技术不完善等问题,修复治理工作进展缓慢^[26]。鉴于此,本文通过室内试验和分形理论,定量分析祁连山区不同下垫面下土壤 PSD 及其分形维数的变化特征,研究有助于认识祁连山区土壤性质差异和土地退化趋势,可为土壤改良和发展、水土保持研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

祁连山区(35°48′—40°05′N, 93°18′—103°54′E)位于青藏高原东北部,海拔 1 623~5 766 m,总面积 1.84×10⁵ km²,草原和草甸占总面积的 60% 以上^[28]。植

被分布受气温和降雨的影响,具有水平地带性规律,自东向西依次发育温性草原、落叶阔叶林、高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原、荒漠^[29]。祁连山成土母质主要是以粉粒为主的风积黄土和以砂粒为主的岩石风化物^[30]。2018 年 6—8 月沿祁连山外围进行野外考察,选取荒漠、草原、草甸和灌丛 4 种典型的下垫面作为研究样地,每个采样点重复 3 个土壤剖面,用土钻采集各土壤剖面 0—40 cm 深度的土样,将同剖面土层的原状土样混合均匀装袋并编号,同时记录经纬度、海拔和植被等基础信息。将原状土样带回实验室放置阴凉处自然风干,清除根系、石砾等。

1.2 土壤粒度测定及分形维数计算

1.2.1 土壤粒度测定 室内试验在兰州大学西部环境教育部重点实验室进行。采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定土壤粒径分布,即称取过 2 mm 筛的土样约 0.35 g 于烧杯中,加入 10 ml 的 10% 双氧水溶液去除有机质,用电热板加速充分反应,加入 10 ml 的 10% 盐酸溶液去除碳酸钙。注满蒸馏水并静置 12 h 后抽出上清液,加入 10 ml 的 0.06 mol/L 六偏磷酸钠溶液分散土粒,超声振荡 15 min,用粒度仪测得土壤粒径体积分数。

1.2.2 土壤 PSD 单重分形维数计算 土壤粒径体积分数由美国土壤质地分级标准被划分为 7 个等级见表 1,土壤 PSD 的单重分形维数(D_V)^[8]计算如下:

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{R_{\max}} \right)^{3-D_V} \quad (1)$$

式中: R 为土壤某特定粒径; $V(r < R)$ 为土粒的某粒径 $< R$ 的累积体积分数; V_T 为土粒总体积分数; R_{\max} 为最大粒径,公式(1)两边同时取对数,并对试验数据进行线性回归拟合,通过拟合曲线获得斜率 K 值,则 $3-K$ 得到 D_V (图 1)。

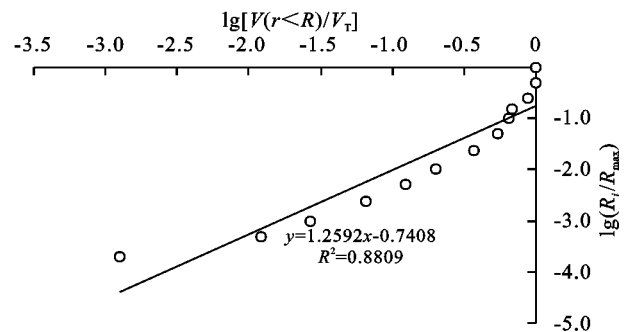


图 1 随机土壤样品粒径体积分数数据的线性拟合实例

1.2.3 土壤 PSD 多重分形维数计算 由激光粒度仪测得的连续分布的土壤 PSD 数据,采用对数等差递增法,将粒径测度区间 $I = [0.5, 1\ 000]$ 划分成 64 个小区域 $I_1 = [\Phi_i, \Phi_{i+1}]$,其中 $\lg(\Phi_{i+1}/\Phi_i) = 0.052$ 。通过对数转换构建一个无量纲区间 $J = [0, \lg(1000/0.5)] = [0, 3.301]$,采用二进制划分法,区间 J 分别

被 $N(\epsilon)=2^k$ ($k=1,2,3,4,5,6$) 划分为同尺度 ϵ 的子区间 J_i , 即分别被 2, 4, 8, 16, 32, 64 等分, 尺度 $\epsilon=3.301 \times 2^{-k}$ ($\epsilon=1.650, 0.825, 0.413, 0.206, 0.103, 0.052$)。土壤多重分形维数 $D(q)$ 的计算^[17] 如下:

$$D(q)=\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \cdot \frac{\lg \left[\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)^q \right]}{\lg \epsilon} \quad (q \neq 1) \quad (2)$$

$$D_1=\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon) \lg \mu_i(\epsilon)}{\lg \epsilon} \quad (q=1) \quad (3)$$

式中: D_1 为信息维数; $\mu_i(\epsilon)$ 为各等分子区间 J_i 内所有 V_i 之和; $V_i=v_i/\Sigma v_i$; v_i 为各区间内土粒体积分数; q 为实数。

由多重分形维数理论可知, $D(q)$ 是不同层次上分形测度的统计参量, 绘制的广义维谱曲线 $D(q) \sim q$ 用于量化土壤颗粒分形结构的复杂度和非均匀性^[6]。即 $q < 0$ 时 $D(q)$ 变化幅度 ($D_{-10} - D_0$) 越大, 反映了土壤 PSD 范围越宽, 土壤分形结构越复杂; $q > 0$ 时 $D(q)$ 变化幅度 ($D_0 - D_{10}$) 越大, 反映了土壤 PSD 越不均匀。由公式 (2) 和 (3) 计算可得, 当 q 取 0, 1, 2 时, $D(q)$ 分别是 D_0 , D_1 和 D_2 等多重分形参数, 即 D_0 是容量维数, 提供土壤 PSD 的最基本信息, 值越大表明土壤 PSD 范围越大或缺失粒径越少^[4, 17]。信息维数 D_1 和 D_1/D_0 主要反映土壤

PSD 测度的集中度, 值越大表明土壤 PSD 的集中度越低, D_1/D_0 还能反映土壤 PSD 的异质度, 其值越接近 0 或 1, 分别表明土壤 PSD 主要集中在稀疏区或密集区^[6]。 D_2 是关联维数, 反映土壤粒径在局域区间测度的均匀性, 值越大表明土壤 PSD 越均匀。

2 结果与分析

2.1 土壤 PSD 及其单重分形特征

选取了地理位置相近的各下垫面样地的代表性土壤样品做频率分布图 (图 2), 荒漠、草原、草甸和灌丛土壤粒径均集中分布在 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 范围内, 但在各粒径分布测度区间范围内土壤体积分数没有趋于一致, 出现几个小次峰, PSD 表现为非均匀分布。由表 1 可知, 祁连山区土壤颗粒机械组成以中细砂粒和粉粒为主, 黏粒体积分数均小于 10%, 土壤质地多为砂质壤土、粉壤土, 伴有壤质砂土、砂土, 且黏粒、粉粒、砂粒体积分数的变异系数分别为 38.39%, 40.94%, 43.46%, 均属于中等变异。不同下垫面间土壤黏粒、粉粒、砂粒体积分数差异显著 ($p < 0.05$), 与荒漠带相比, 草原、草甸和灌丛带的黏粒体积分数分别提高了 1.90, 2.02, 2.20 倍, 粉粒体积分数分别提高了 2.06, 1.96, 2.31 倍, 砂粒体积分数分别降低了 2.28, 2.04, 3.22 倍。

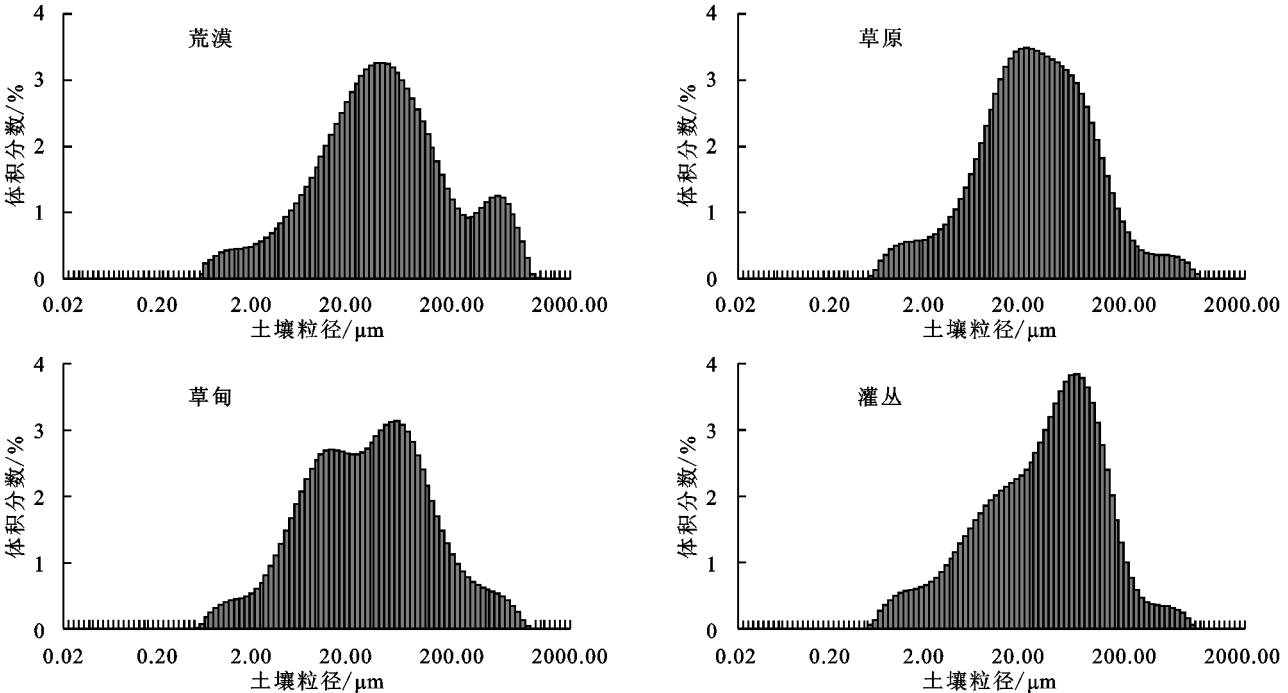


图 2 不同下垫面随机土壤样品粒径体积分数频率分布

研究区 D_v 分布范围为 2.089~2.500, 均值为 2.406, 变异系数为 3.37%, 属于弱变异。4 种下垫面中, 荒漠 D_v 分布范围为 2.089~2.474, 均值 2.327; 草原 D_v 分布范围为 2.372~2.500, 均值 2.439; 草甸 D_v 分布范围为 2.367~2.496, 均值 2.456; 灌丛 D_v 分布

范围为 2.417~2.497, 均值 2.461。即 D_v 均值依次为 荒漠 < 草原 < 草甸 < 灌丛, 荒漠土壤 D_v 显著低于草原、草甸和灌丛 ($p < 0.01$), 其余 3 种下垫面差异不显著。不同土壤质地下, 粉壤土 D_v 显著高于砂质壤土或砂土 ($p < 0.01$)。

表 1 祁连山区主要下垫面土壤颗粒组成及单重分形维数

| 下垫面 类型 | 土壤 质地 | 土壤粒级平均百分含量/% | | | | | | | | D_v | | |
|-----------|----------|--------------|------------------|--------|----------|----------|----------|-------|------|-------|-------|--------|
| | | 黏粒 <0.002 | 粉粒 0.002~0.05 | 砂粒 | | | | | | 最小值 | 最大值 | 均值 |
| | | | | 合计 | 细砂粒 | | 中砂粒 | 粗砂粒 | 极粗砂粒 | | | |
| | | | | 0.05~2 | 0.05~0.1 | 0.1~0.25 | 0.25~0.5 | 0.5~1 | 1~2 | | | |
| 荒漠 | 砂质壤土 | 3.81c | 32.04c | 62.22a | 19.12 | 29.32 | 12.38 | 3.27 | 0.06 | 2.089 | 2.474 | 2.327B |
| 草原 | 粉壤土 | 7.25b | 66.03ab | 27.34b | 14.79 | 7.19 | 2.88 | 1.26 | 0.59 | 2.372 | 2.500 | 2.439A |
| 草甸 | 粉壤土 | 7.68ab | 62.79b | 30.44b | 12.17 | 8.85 | 6.34 | 2.12 | 0.04 | 2.367 | 2.496 | 2.456A |
| 灌丛 | 粉壤土 | 8.39a | 74.07a | 19.33b | 11.34 | 3.53 | 2.07 | 0.59 | 0.00 | 2.417 | 2.497 | 2.461A |

注:小写、大写字母分别表示在 0.05,0.01 水平上显著。

2.2 土壤 PSD 多重分形特征

不同下垫面土壤 PSD 广义维谱曲线 $D(q) \sim q$ ($-10 \leq q \leq 10$) 见图 3, 所测土样 $D_0 > D_1 > D_2$, 即土壤粒径系统分布遵循多重维数, 说明该区土壤 PSD 是非均匀的。整体上, 广义维数 $D(q)$ 随 q 的增大呈反“S”递减趋势, $q < 0$ 时 $D(q)$ 的递减程度远大于 $q > 0$ 的。不同下垫面中(表 2), $q < 0$ 时, $D(q)$ 变化幅度($D_{-10} - D_0$)依次为荒漠(0.540) < 草原(0.779) < 草甸(0.991) < 灌丛(1.073), 说明荒漠、草原土壤分形结构的复杂程度显著低于草甸和灌丛($p < 0.05$); $q > 0$ 时, $D(q)$ 变化幅度($D_0 - D_{10}$)依次为荒漠(0.219) > 草原(0.165) > 草甸(0.152) > 灌丛(0.144), 说明荒漠土壤颗粒局域或整体的非均匀性显著大于草原、草甸和灌丛($p < 0.05$)。

不同下垫面土壤 PSD 多重分形参数见表 2, 容

量维数(D_0)依次为灌丛(0.958) < 草原(0.968) < 荒漠(0.978) < 草甸(0.984), $D_0 < 1$ 表明土壤粒径在 $0.10 \sim 2\,000\,\mu\text{m}$ 存在缺失, 灌丛、草原土壤 PSD 范围及颗粒群体数量显著低于草甸($p < 0.05$)。信息维数(D_1)依次为荒漠(0.876) < 灌丛(0.880) < 草原(0.888) < 草甸(0.912), 4 种下垫面间土壤 PSD 的集中度差异显著($p < 0.05$)。 D_1/D_0 依次为荒漠(0.895) < 草原(0.918) < 灌丛(0.920) < 草甸(0.927), D_1/D_0 值接近于 1, 说明土壤 PSD 主要集中在粒径范围为 $10 \sim 200\,\mu\text{m}$ 的密集区(图 2), 表现为非均匀分布, 进一步论证了祁连山区土壤 PSD 具有多重分形特征。关联维数(D_2)依次为荒漠(0.832) < 灌丛(0.853) < 草原(0.863) < 草甸(0.886), 荒漠地土壤 PSD 局域的非均匀性显著高于草原、草甸($p < 0.05$)。

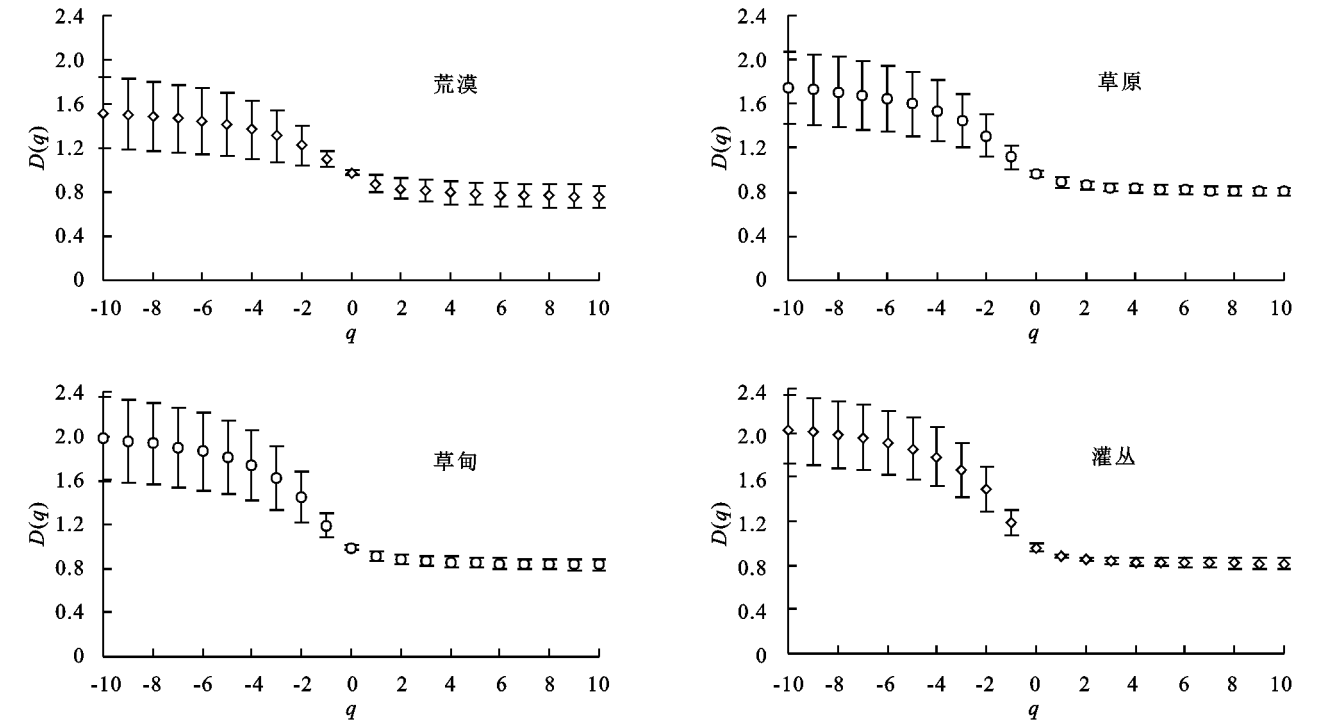


图 3 不同下垫面土壤粒径分布广义分形维数谱线 $D(q) \sim q$

2.3 分形参数与土壤质地之间的关系

土壤 D_v 与土壤质地的关系见表 3。 D_v 与黏粒、粉粒体积分数极显著正相关($p < 0.01$), 与砂粒体

积分数极显著负相关($p < 0.01$), 与多重分形参数($D_1, D_1/D_0, D_2$)极显著正相关($p < 0.01$)。对 D_v 和黏粒(x_1)、粉粒(x_2)、砂粒(x_3)体积分数进行多元

回归分析,方程为 $D_v = 2.185 + 0.034x_1 + 0.001x_3$, $R^2 = 0.875$,即黏粒体积分数对 D_v 的影响大于砂粒、粉粒,与 D_v 的相关性最高。

多重分形参数是由土壤粒径体积分数算得的,主要受土壤质地的直接影响。由表 3 可知, D_0 与粉粒体积分数显著负相关($p < 0.05$),与中砂、粗砂体积分数极显著正相关($p < 0.01$),即含细颗粒(< 0.05 mm)物质越少而粗颗粒(0.25~2 mm)越多的土壤 D_0 越大,土壤粒径分布范围和颗粒群体数目越大。 D_1 与黏粒、粗砂粒体积分数极显著正相关($p < 0.01$),与粉粒体积分数显著正相关($p < 0.05$),与细砂、极粗

砂粒体积分数极显著负相关($p < 0.01$),即研究区黏粒、粉粒含量高,细砂粒含量少的土壤 D_1 较大,土壤 PSD 离散。 D_1/D_0 、 D_2 与黏粒、粉粒体积分数极显著正相关($p < 0.01$),与细砂粒体积分数极显著负相关($p < 0.01$),即研究区随着土壤黏粒、粉粒体积分数增大和细砂粒体积分数减小,土壤 PSD 的集中度和非均匀性随之减小。综上,土壤中细砂粒体积分数对多重分形参数起主导作用,黏粒、粉粒体积分数与 D_1/D_0 、 D_2 显著正相关,说明细砂含量多而细颗粒物质(黏粒、粉粒)少是土壤粒径非均匀分布的主要原因。

表 2 不同下垫面下土壤粒径分布的分形参数

| 下垫面类型 | D_0 | D_1 | D_1/D_0 | D_2 | $D_{-10} - D_0$ | $D_0 - D_{10}$ |
|-------|--------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|----------------|
| 荒漠 | 0.978±0.027a | 0.876±0.075d | 0.895±0.063b | 0.832±0.095b | 0.540±0.321c | 0.219±0.093a |
| 草原 | 0.968±0.032b | 0.888±0.048b | 0.918±0.045ab | 0.863±0.036a | 0.779±0.317b | 0.165±0.048b |
| 草甸 | 0.984±0.022a | 0.912±0.039a | 0.927±0.026a | 0.886±0.045a | 0.991±0.379a | 0.152±0.044b |
| 灌丛 | 0.958±0.037b | 0.880±0.014c | 0.920±0.032a | 0.853±0.018ab | 1.073±0.309a | 0.144±0.076b |

注:小写字母表示在 0.05 水平上显著。

表 3 土壤粒径分形参数与土壤质地相关分析

| 项目 | 黏粒 | 粉粒 | 极细砂 | 细砂 | 中砂 | 粗砂 | 极粗砂 | 总砂粒 | D_v | D_0 | D_1 | D_1/D_0 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|-----------|
| 黏粒 | 1.000 | | | | | | | | | | | |
| 粉粒 | 0.885** | 1.000 | | | | | | | | | | |
| 极细砂 | -0.447** | -0.376** | 1.000 | | | | | | | | | |
| 细砂 | -0.849** | -0.932** | 0.331** | 1.000 | | | | | | | | |
| 中砂 | -0.619** | -0.758** | -0.199* | 0.606** | 1.000 | | | | | | | |
| 粗砂 | -0.321** | -0.442** | -0.118 | 0.136 | 0.726** | 1.000 | | | | | | |
| 极粗砂 | -0.015 | 0.014 | -0.144 | -0.069 | -0.059 | 0.075 | 1.000 | | | | | |
| 总砂粒 | -0.906** | -0.999** | 0.387** | 0.933** | 0.752** | 0.435** | -0.012 | 1.000 | | | | |
| D_v | 0.937** | 0.815** | -0.311** | -0.834** | -0.598** | -0.211* | 0.024 | -0.835** | 1.000 | | | |
| D_0 | -0.117 | -0.186* | 0.048 | -0.001 | 0.335** | 0.468** | -0.081 | 0.181* | 0.024 | 1.000 | | |
| D_1 | 0.318** | 0.192* | 0.043 | -0.428** | 0.052 | 0.450** | -0.332** | -0.206* | 0.483** | 0.587** | 1.000 | |
| D_1/D_0 | 0.461** | 0.348** | 0.023 | -0.529** | -0.132 | 0.274** | -0.365** | -0.363** | 0.577** | 0.137 | 0.882** | 1.000 |
| D_2 | 0.420** | 0.304** | -0.063 | -0.555** | -0.046 | 0.447** | 0.033 | -0.319** | 0.587** | 0.465** | 0.913** | 0.843** |

注: $n=145$, * 表示显著相关($p < 0.05$, 双侧), ** 表示极显著相关($p < 0.01$, 双侧)。

3 讨论

祁连山区土壤 D_v 分布范围 2.089~2.500,均值依次为荒漠<草原<草甸<灌丛,荒漠土壤 D_v 显著低于草原、草甸和灌丛($p < 0.01$)。已有研究发现,质地细的土壤 D_v 约为 2.60~2.80,质地粗的土壤 D_v 约为 1.83~2.64^[9],郭树江^[22]、Deng^[13]等研究荒漠过渡带、冲积扇土壤 D_v 分别为 2.144~2.389,2.639~2.779。说明该区整体土壤质地偏粗,自东向西呈粗化趋势。 D_v 与植被覆盖度、有机质呈极显著正相关关系可证明这一点^[8,21],是因为草原、草甸及灌丛植被覆盖较好,高降水量和土壤含水率可降低有机碳的矿化率,土壤有机碳累积增多,在植被保护和有机质胶结作用下表层土壤颗粒团聚度增强^[31],改善土壤结构和性能。

研究区土壤 PSD 具有多重分形特征,结果表明,下垫面对多重分形参数有显著影响,荒漠土壤 PSD 测度在局域区间内的集中度和非均匀性显著高于草原、草甸($p < 0.05$),灌丛、草原土壤 PSD 范围及颗粒群体数量显著低于荒漠、草甸($p < 0.05$)。这是由于不同土地管理、利用模式下土壤侵蚀、土地退化治理的效果不同^[21],荒漠带由于土壤风蚀作用使地表粗颗粒残留;灌丛土壤具有较高的细颗粒物质和较少的砂粒,表现为土壤粒径分布在 0.25~2 mm 范围存在缺失(表 1);草甸植被覆盖度高,可抵抗雨滴打击和地表径流运移的作用,使土壤细颗粒(黏粒、粉粒)保留下来,有机质累积多^[17],影响多重分形参数。

分形参数与土壤质地相关分析表明, D_v 与黏粒、粉粒体积分数极显著正相关,与砂粒体积分数极显著负相关,且黏粒与 D_v 相关系数最大。这与吕圣

桥^[5]、赵明月^[8]等研究得出粉粒或砂粒含量对 D_v 的影响大于黏粒的结论有所不同。吕圣桥^[5]、赵明月^[8]等研究土壤属于粉壤土、壤土和砂质壤土,赵明月等^[8]研究黏粒含量变异系数为 14.35%~19.32%,而本文土壤属于粉壤土、壤质砂土,黏粒含量变异系数较大,为 38.39%,故黏粒与 D_v 关系最密切。多重分形参数(D_0 除外)与黏粒、粉粒体积分数显著正相关,与砂粒体积分数负相关,与董莉丽^[18]、吕圣桥^[5]、白一茹^[20]等研究结论一致,是因为土壤质地均为粉壤土或砂壤土。研究区土壤细砂粒(0.05~0.25 mm)体积分数是影响多重分形参数的主导因素,可能因为成土母质对土壤颗粒组成的重要影响^[3],祁连山区在物理风化这种缓慢作用下,岩石风化物以粗颗粒为主^[30],细砂粒约占粗颗粒(总砂粒)的 77.85%(表 1),因此研究区影响土壤 PSD 的非均匀性主要是细砂粒是合理的。

4 结论

(1) 祁连山区土壤颗粒 PSD 主要集中在 10~200 μm 范围内,机械组成以中细砂粒和粉粒为主,黏粒、粉粒、砂粒体积分数变化范围分别为 3.81%~8.39%,32.04%~74.07%,19.33%~62.22%,均属中等变异,土壤质地主要为砂质壤土、粉壤土。 D_v 分布范围为 2.089~2.500,依次为灌丛>草甸>草原>荒漠,属弱变异,且土壤粒径呈现非均匀分布,下垫面对 D_v 、 D_0 、 D_1 、 D_2 和 D_1/D_0 影响显著,荒漠土壤粗糙度显著($p<0.01$)高于草原、草甸、灌丛,其 PSD 测度局域的集中度、非均匀性显著($p<0.05$)高于草原、草甸。说明祁连山区整体土壤质地较粗,自东向西逐渐粗化且非均匀性增大。

(2) D_v 与黏粒、粉粒体积分数极显著正相关($p<0.01$),与砂粒体积分数极显著负相关($p<0.01$),黏粒对 D_v 的影响大于粉粒、砂粒。多重分形参数主要受土壤质地的直接影响,与细颗粒物(黏粒、粉粒)体积分数、 D_v 显著正相关($p<0.05$),与细砂粒体积分数极显著负相关($p<0.01$, D_0 除外),土壤细砂粒(0.05~0.25 mm)含量是多重分形参数的主导因素。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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):891-902.
- [3] Rodríguez-Lado L, Lado M. Relation between soil forming factors and scaling properties of particle size distributions derived from multifractal analysis in top soils from Galicia (NW Spain)[J]. Geoderma, 2017,287:147-156.

- [4] 孙哲,王一博,刘国华,等.基于多重分形理论的多年冻土区高寒草甸退化过程中土壤粒径分析[J].冰川冻土,2015,37(4):980-990.
- [5] 吕圣桥,高鹏,耿广坡,等.黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J].水土保持学报,2011,25(6):134-138.
- [6] 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.
- [7] Zhang G H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of vegetation cover and rainfall intensity on sediment-bound nutrient loss, size composition and volume fractal dimension of sediment particles[J]. Pedosphere, 2011, 21(5):676-684.
- [8] 赵明月,赵文武,刘源鑫.不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2015,35(14):4625-4632.
- [9] Liu X, Zhang G, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009,154(1/2):123-130.
- [10] 张辉,李鹏,鲁克新,等.东柳沟流域表土粒度分布特征及可风蚀性研究[J].水土保持学报,2016,28(5):272-278.
- [11] 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.
- [12] Qi F, Zhang R, Liu X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 184:45-51.
- [13] Deng Y, Cai C, Xia D, et al. Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China[J]. Plos One, 2017,12(3).DOI:10.1371/journal.pone.0173555.
- [14] 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.
- [15] Wang D, Fu B, Zhao 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 董莉丽,马孝燕,胡丹,等.吴起县退耕还林样地土壤粒径分布的单一和多重分形特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(7):111-115.

层最为复杂。

综上所述,大果红杉林、丽江云杉林更有利横断山脉纵谷区碳素的利用、积累,该研究结果可为提高横断山脉纵谷区森林固碳能力提供参考。本文仅就横断山脉纵谷区 5 种主要林型腐殖质特征进行研究,具有一定的局限性。不同林型土壤固碳量有所差异,因此加强筛选相对维持高碳水平的树种对增汇减排具有重要意义。

参考文献:

- [1] 窦森,李凯,崔俊涛,等.土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J].土壤学报,2008,45(6):1148-1158.
- [2] 张晋京,窦森,土壤胡敏素研究进展[J].生态学报,2008,28(3):1229-1239.
- [3] 窦森.土壤有机质[M].北京:科学出版社,2010.
- [4] 李梓瑄,迟凤琴,张久明,等.长期定位施肥对黑土养分平衡和胡敏素分子结构动态变化的影响[J].光谱学与光谱分析,2018,38(12):3875-3882.
- [5] 朱姝,窦森,关松,等.秸秆深还对土壤团聚体中胡敏素结构特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):127-136.
- [6] 刘秋香,刘泉,张怡颖,等.川中丘陵区不同土地利用方式的石灰性紫色土土壤腐殖质特征[J].绵阳师范学院学报,2019,38(2):111-116.
- [7] 丛鑫,梅傲雪,朱含露.PCB138 在土壤中的吸附特征及土壤特性对其吸附的影响[J].生态环境学报,2018,27(1):137-143.
- [8] 范春莹,谢修鸿,燕爱春,等.土壤胡敏素结构特征及对铜离子的吸附特性[J].土壤学报,2018,55(6):1460-1471.
- [9] 王卫斌.滇西北地区的森林资源及其保护与发展对策[J].云南林业科技,2003(1):18-21.
- [10] 张燕妮,张志明,耿宇鹏,等.滇西北地区优先保护的植物群落类型[J].生物多样性,2013,21(3):296-305.
- [11] 李晋,张劲峰,景跃波,等.滇西北高山植被恢复中存在的问题及对策探讨[J].林业资源管理,2011(1):30-34.
- [12] 肖彦春.土壤胡敏素分组及特性的研究[D].长春:吉林农业大学,2004.
- [13] 党亚爱,李世清,王国栋.黄土高原典型区域土壤腐殖酸组分割面分布特征[J].生态学报,2012,32(6):1820-1829.
- [14] 王晶,何忠俊,王立东,等.高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J].土壤学报,2010,47(4):723-733.
- [15] 许炼烽,徐谔为,李志安.森林土壤固碳机理研究进展[J].生态环境学报,2013,22(6):1063-1067.
- [16] 李茜,王芳,曹扬,等.陕西省森林土壤固碳特征及其影响因素[J].植物生态学报,2017,41(9):953-963.
- [17] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等.土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J].中国生态农业学报,2018,26(2):222-230.
- [18] Jardine P M, Mayes M A, Mulholland P J, et al. Vadose zone flow and transport of dissolved organic carbon at multiple scales in humid regimes [J]. Vadose Zone Journal, 2006,5(1):140-152.
- [19] 张志春,张晋京,潘根兴,等.下拉秀剖面有机碳赋存特征[J].水土保持学报,2012,26(3):174-179.
- [20] 张志春,潘根兴,张晋京,等.下拉秀剖面胡敏素组分特征[J].水土保持研究,2013,20(3):295-298,304.
- [19] Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, et al. Multi-fractal characterization of soil particle-size distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001,65(5):1361-1367.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 郭树江,杨自辉,王多泽,等.民勤绿洲—荒漠过渡带土壤粒径分形特征研究[J].中国水土保持,2018,439(10):53-56.
- [23] 魏茂宏,林慧龙.江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J].应用生态学报,2014,25(3):679-686.
- [24] 李巍,毛文梁.青藏高原东北缘生态脆弱区城镇体系空间结构研究:以甘南藏族自治州为例[J].冰川冻土,2011,33(6):1427-1434.
- [25] 魏兰香.基于 USLE 模型的祁连山南坡土壤保持量评估[D].西宁:青海师范大学,2017.
- [26] 王涛,高峰,王宝,等.祁连山生态保护与修复的现状问题与建议[J].冰川冻土,2017,39(2):229-234.
- [27] 刘晓敏.祁连山青海云杉林土壤理化性质的空间变异性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2012.
- [28] Deng S F, Yang T B, Zeng B, et al. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000—2011[J]. Journal of Mountain Science, 2013,10(6):1050-1062.
- [29] 金博文,康尔泓,宋克超,等.黑河流域山区植被生态水文功能的研究[J].冰川冻土,2003,25(5):580-584.
- [30] 李璇,杨帆,李德成,等.祁连山区土壤砂粒含量剖面分布模式及其影响因素[J].土壤学报,2017,54(4):854-863.
- [31] 于海艳,宫汝宁,周娅,等.北京八达岭地区 4 种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].水土保持学报,2015,29(5):162-166.

(上接第 47 页)