

DOI: 10.5846/stxb202012043096

宛倩, 王杰, 王向涛, 刘国彬, 张超. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响. 生态学报, 2022, 42(5): 1716-1726.

Wan Q, Wang J, Wang X T, Liu G B, Zhang C. Effects of different meadow use types on the fractal characteristics of soil particle in the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1716-1726.

青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响

宛倩¹, 王杰¹, 王向涛², 刘国彬³, 张超^{1,*}

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

2 西藏农牧学院动物科学学院, 林芝 860000

3 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 研究青藏高原草地土壤粒径结构分形特征, 为该地区土壤质量评价和生态恢复提供科学依据。以青藏高原 4 种高寒草地 (放牧、围栏禁牧、围栏禁牧+补植、未干扰) 为对象, 采用分形理论, 研究不同利用方式对高寒草地土壤颗粒组成及分形特征的影响, 明确土壤粒径分形特征的影响因素。结果表明: 与放牧和围栏禁牧+补植相比, 围栏禁牧草地中黏粒和粉粒体积分数分别增加了 60%—91.1%、43.5%—80.1%, 禁牧能够促进土壤砂粒向黏粒和粉粒转变。不同草地利用方式对分形维数有显著影响, 单重分形维数 D 值依次为放牧草地 < 围栏禁牧+补植草地 < 未干扰草地 = 围栏禁牧草地, 多重分形维数, 包括信息维数 D_1 、信息维数/容量维数比值 D_1/D_0 和关联维数 D_2 依次为放牧草地 < 围栏禁牧+补植草地 < 围栏禁牧草地 < 未干扰草地。单重分形维数 D 与土壤黏粒、粉粒呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 砂粒、黏粒、粉粒、有机碳和全氮是多重分形维数的限制因素。信息维数 D_1 、信息维数/容量维数比值 D_1/D_0 与关联维数 D_2 和土壤有机碳、全氮、全磷和硝态氮呈显著正相关。综上, 多重分形维数可以作为衡量土壤质量特征的指标, 青藏高原禁牧封育能够改良土壤质地。

关键词: 草地类型; 土壤颗粒组成; 单重分形; 多重分形

Effects of different meadow use types on the fractal characteristics of soil particle in the Qinghai-Tibet Plateau

WAN Qian¹, WANG Jie¹, WANG Xiangtao², LIU Guobin³, ZHANG Chao^{1,*}

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

2 College of Animal Science, Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi 860000, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: This study investigated the effect of different meadow use on the fractal characteristics of soil particle to provide the scientific basis for soil quality evaluation and ecological restoration of alpine grassland in the Tibetan Plateau. The soil particle composition and fractal characteristics were examined by the fractal theory in four alpine meadows (grazed meadow, fenced meadow, fenced+reseeded meadow, and undisturbed meadow) in the Tibetan Plateau, and their driving forces were clarified. The results showed that the volume fraction of clay and silt particles in fenced grazing grassland increased by 60%—91.1% and 43.5%—80.1%, respectively, compared with those in grazed meadow and fenced+reseeded meadow; grazing prohibition promotes the transformation of soil sand to clay and silt. Changes in meadow use type had significant effects on the soil fractal dimension. Single fractal dimension (D -value) was in the order of grazed meadow < fenced +

基金项目: 国家自然科学基金 (41761008); 中国科学院战略性先导专项 (XDA20040200); 陕西省基础研究计划项目 (2019KJXX-081, 2021JM-605); 中央高校基本科研业务费专项 (2452018336)

收稿日期: 2020-12-04; 网络出版日期: 2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangchaolynn@163.com

reseeded meadow < fenced meadow = undisturbed meadow, and multifractal dimension parameters, including entropy dimension (D_1), entropy dimension/capacity dimension (D_1/D_0) and correlation dimension (D_2), were in the order of grazed meadow < fenced + reseeded meadow < fenced meadow < undisturbed meadow. D-value of the single fractal dimension was positively correlated with the contents of clay and silt ($P < 0.01$); the contents of sand, clay, silt, organic carbon and total nitrogen are the dominant factors affecting the multifractal parameters. D_1 , D_1/D_0 and D_2 were positively correlated with the contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and nitrate nitrogen. In conclusion, multifractal dimension parameters can be used as indicators to evaluate the characteristics of soil fertility, and grazing prohibition can improve the soil texture in Tibetan Plateau.

Key Words: meadow type; soil particle composition; single fractal; multifractal dimension

青藏高原是我国主要牧区之一,草地类型丰富,其面积占我国草地面积的 42%^[1]。近年来,由于环境变化以及人类生产活动的影响,青藏高原草地退化日趋严重,生产力急剧下降^[2]。过度放牧是导致草地退化的主要因素之一^[3],不仅抑制植被生长,并且降低土壤肥力^[4-7]。因此,必须采取有效的生态措施来恢复退化的草原生态系统,如围封禁牧、禁牧+补植和合理放牧^[8]等措施,目前,关于不同利用方式对退化草地生态系统恢复的影响研究越来越多,但并没有得出一致的结论。仲波^[9]对若尔盖草地土壤微生物的研究中发现,适度放牧提高了酶活性以及土壤碳氮矿化速率,促进退化草地的恢复。刘艳萍^[10]在研究不同恢复措施对退化草地土壤和植被的影响中发现,禁牧显著改变群落结构和增加土壤养分。

土壤粒径分布属于土壤物理性质,可以表征土壤结构,反映土壤的发育状况,对土壤水、肥等物理特性具有一定的影响。土壤是由形状与大小各异的土壤颗粒组成的多孔介质^[11],具有一定的分形特征。分形理论作为一种揭示物质局部结构和形态的工具在研究土壤结构中得到了广泛运用。例如,孙梅等^[12]研究长期不同施肥条件下红壤粒径分维,表明施用有机肥可以促进土壤细化改善土壤粒径分布格局。王德等^[13]对黄土丘陵区不同土地利用下土壤粒径分析中表明,多重分形维数与有机碳显著相关,可以为描述土壤基本性质提供科学参考。因此,利用分形模型研究土壤的粒径分布对于理解当地草地恢复的演变过程,以及评价当地土壤质量有着至关重要的作用。前人大都使用单重分形描述土壤粒径分布^[14],但其只能描述土壤结构的整体性特征^[15],不能表征具体粒径的分布范围。而多重分形维数能详细反映土壤粒径分布的均匀程度,并且表征土壤粒径分布的异质性和自相似性^[16],可以更准确的分析土壤结构特性。因此,二者的联合使用更能全面揭示土壤粒径的分布特征,但目前的研究多以单一分形或多重分形为主,将两种方法结合的研究较少,尤其是生态环境比较脆弱的青藏高原。鉴于此,本研究在青藏高原选取了 4 个不同利用方式的草地(放牧草地、围栏禁牧草地、围栏禁牧+补植草地和未干扰草地),结合单重分形和多重分形理论,研究不同草地利用对土壤粒径分布的影响,探讨土壤粒径分布与土壤结构、土壤理化性质、土壤质量的关系,以为退化草地的恢复提供理论依据。

1 研究区概况

试验区(91°40'E, 32°21'N)位于西藏自治区林芝市工布达江县邦杰塘草原野外试验场。该区属于高原温带半湿润气候,地势平坦,平均海拔 4672 m,年平均气温-3.1℃,最冷 1 月平均气温-15℃,最热月 7 月平均气温 9.3℃。年平均降雨量 409 mm,主要集中在夏季,风速 ≥ 17 m/s 的天数为 139 d。年积温 846℃,年均日照 2580 h,无绝对无霜期。该区土壤类型为高山草甸土,土壤质地为砂质土(图 1),植被类型为典型的高寒草地,主要植被有高山蒿草(*Kobresia pygmaea*)、紫花针茅(*Kobresia pygmaea*)、马先蒿(*Pedicularis reaupinanta*)、高山委陵菜(*Potentilla polychista*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)。

2 材料与方法

2.1 实验设计与土壤样品采集

采样区面积约为 200 hm²,在研究区内设置了 4 种草地管理类型:放牧草地、围栏禁牧草地、围栏禁牧+补植草地以及未干扰草地。试验区地势平坦,无水蚀现象发生,且地表无风蚀造成上凸下凹及地表粗化现象。所选各处理植被特征如表 1 所示。每种处理 5 个重复小区,共 20 个试验小区,每个小区占地 1 hm²。处理方法如下:(1)放牧草地:每公顷每年放牧 4 头牦牛,其放牧头数根据研究区的平均生物量、牦牛进食量、放牧面积以及放牧时间来确定。(2)围栏禁牧草地:2009 年,采用围栏禁牧方式防止食草动物进入,在围封之前该草地与放牧草地相同。(3)围栏禁牧+补植草地:2009 年,在禁牧草地的基础上,种植乡土优势植物披碱草(*Elymus nutans griseb*)、冷地早熟禾(*Poa cymphila*)和梭罗草(*Kengyilia thoroldiana*),播种密度分别为 3、5 和 8 g/m²的速率播种,播种穴深 3 cm,间距 20 cm。(4)未干扰草地:1999 年之前为放牧地,1999 年之后完全禁牧,至今无人干扰以及放牧活动的草地。

2018 年 9 月采集土壤样品,在各处理中的小区中沿对角线建立 9 个 10 m×10 m 的样方,相邻样方间隔为 10—20 m,在每个样地内中随机设置 5 个 1 m×1 m 的小样方,在样方内按“S”型采用土钻取 0—15 cm 土壤样品,混合。将 9 个样地的土壤混合形成一个土壤样品,即每个小区 1 个混合土样,将所有土壤带回实验室风干过筛。

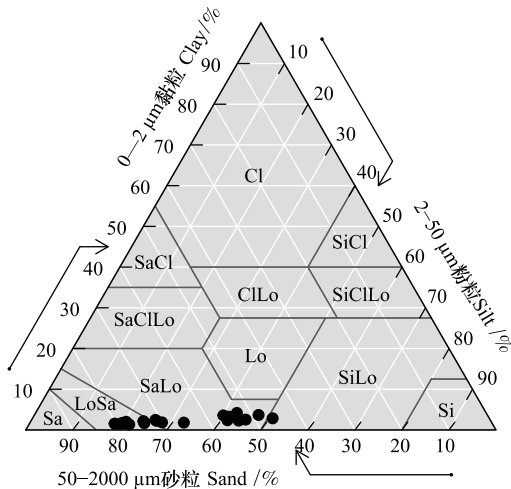


图 1 采样点土壤质地

Fig.1 Soil texture at sampling points

Cl: 黏粒 Clay; SaCl: 砂质粘土 Sandy clay; SiCl: 粉质粘土 Silty clay; ClLo: 粘壤土 Clay loam; SaClLo: 砂壤土 Sandy clay loam; SiClLo: 粉质黏壤土 Silty clay loam; Lo: 壤土 Loam; Sa: 砂粒 sand; LoSa: 壤质砂土 Loamy sand; SaLo: 砂壤土 Sandy loam; SiLo: 粉质壤土 Silty loam; Si: 粉粒 Silt

表 1 不同草地利用方式的植被特征

Table 1 Vegetation characteristics of soil under different meadow types

草地类型 Grassland types	地上生物量 Aboveground biomass/(g/m ²)	地下生物量 Belowground biomass/(g/m ²)	覆盖度 Coverage/%	丰富度 Richness
未干扰草地 Undisturbed meadow	16.58±0.84	250.01±21.73	92.80±2.11	9±3
围栏禁牧+补植草地 Fenced+reseeded meadow	15.29±1.99	72.36±12.35	58.80±3.43	10±2
围栏禁牧草地 Fenced meadow	16.31±1.69	129.18±10.95	85.40±3.33	10±2
放牧草地 Grazed meadow	4.33±0.67	24.50±4.39	27.80±1.77	7±1

2.2 样品处理与分析

土壤颗粒组成使用 MS2000 型激光粒度分析仪进行测定,仪器测量范围为 0.02—2000 μm,搅拌速度 2500 r/min,遮光范围 10%—20%。称取 0.5 g 过 2 mm 筛的风干土壤,加入 10 mL10%的 H₂O₂ 沙浴加热以去除土壤中的有机碳,随即加入 10 mL 10%的 HCl 煮沸使其反应完全。在上清液中加入六偏磷酸钠分散剂并使用超声波清洗机振荡,随即用 MS2000 粒度仪进行土壤颗粒分析。

土壤理化性质采用常规方法测定^[17]:土壤 pH 采用电位法测定;土壤有机碳含量用重铬酸外加热法测定;全氮含量用凯氏定氮法测定;全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;使用有机碳分析仪(Phoenix, 800TOC)测定浸提液来分析水溶性有机碳和水溶性有机氮;铵态氮和硝态氮含量采用 2 mol/L KCl 以 1:5 的比例提取新鲜土样,浸提液使用 3-AA3 连续流动自动分析仪测定;速效磷含量用 Olsen 方法测定。土壤理化性质见表 2。

表 2 不同草地利用方式下土壤理化性质^[18]

Table 2 Soil physicochemical properties under different meadow types

指标 Indicators	放牧草地 Grazed meadow	围栏禁牧草地 Fenced meadow	围栏禁牧+补植草地 Fenced+reseeded meadow	未干扰草地 Undisturbed meadow
pH	8.70±0.02	8.69±0.04	8.81±0.09	8.45±0.04
有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	4.04±0.15	5.58±0.28	4.25±0.06	12.91±1.35
全氮 Total nitrogen / (g/kg)	0.48±0.02	0.82±0.02	0.44±0	1.25±0.05
全磷 Total phosphorus / (g/kg)	0.20±0	0.21±0	0.20±0.01	0.29±0.01
水溶性有机碳 Dissolved organic carbon / (mg/kg)	365.5±1.79	566.7±6.01	515.82±1.47	771.78±8.21
水溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen / (mg/kg)	109.14±2.74	183.72±5.55	155.88±5.16	260.24±1.57
速效磷 Available phosphorus / (mg/kg)	0.74±0.08	0.95±0.01	1.30±0.04	1.49±0.10
硝态氮 Nitrate nitrogen / (mg/kg)	2.06±0.02	3.28±0.03	1.35±0.08	7.86±0.94
铵态氮 Ammonium nitrogen / (mg/kg)	2.68±0.10	4.33±0.28	2.07±0.01	2.48±0.08

2.3 土壤分形维数

2.3.1 单重分形维数

利用激光粒度仪获取土壤颗粒体积分布数据,采用土壤颗粒体积分形模型来计算单重分形维数^[19],计算公式如下:

$$3-D = \frac{\lg\left(\frac{V_{(r < R_i)} i}{V_r}\right)}{\lg\left[\frac{R_i}{R_{\max}}\right]} \quad (1)$$

式中, R_i 为某粒径区间上下限算术平均值, $R_{\max}$ 为最大粒径(本研究中 $R_{\max} = 2$), $V_{(r < R_i)}$ 为土壤粒径小于 R_i 的土壤颗粒累计体积, V_r 为土壤颗粒总体积, D 为土壤颗粒体积分形维数。

2.3.2 多重分形维数

多重分形是定义在分形结构上的有无穷多个标度指数所组成的一个集合,是通过一个谱函数来描述分形结构上不同的局域条件、或分形结构在演化过程中不同层次所导致的特殊的结构行为与特征,是从系统的局部出发来研究其整体的特征,并借助统计物理学的方法来讨论特征参量的概率测度的分布规律^[20]。取激光粒度仪测量范围为 $I = [0.02, 2000]$, 将其划分为对数等差递增的 100 个小区间 $I_i = [\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, 100$, 其中 $\lg(\varphi_{i+1}/\varphi_i)$ 为一个常数,这样划分区间即遵循了土壤粒径分布规律并且更加客观。利用多重分形方法分析区间 I 的土壤颗粒粒径分布特征,须使各子区间长度相同,令 $\phi_i = \lg(\varphi_i, \varphi_1)$, 构造一个新的无量纲区间 $J = [\lg(0.02/0.02), \lg(2000/0.02)] = [0, 5]$, 并且生成了 100 个新的等距离小区间 $J_i = [\phi_i, \phi_{i+1}]$, $i = 1, 2, \dots, 100$ 。用 v 表示 100 个区间粒径对应的体积分数,即 $v_1, v_2, \dots, v_{100}$ 。

对土壤粒径分布进行多重分形分析,用 N 个尺度为 ε 的相等的“盒子”划分整个土壤粒径分布跨度。在区间 J 中, $\varepsilon = 5 \times 2^{-k}$, $N = 2^k$, 本文 k 取值为 $[1, 6]$, ε 取值为 2.5、1.25、0.625、0.312、0.156 和 0.078^[21]。

$\mu_i(\varepsilon)$ 为每个子区间土壤粒径分布的概率密度,即子区间 J_i 内所有的测量值 V_i 的加和,其中 $V_i = v_i / \sum_{i=1}^{100} v_i$, $i = 1, 2, \dots, 100$ 。利用 $\mu_i \varepsilon$ 构建一个配分函数族为

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

式中 q 为实数; $\mu_i(q, \varepsilon)$ 为第 i 个子区间 q 阶概率,则粒径分布的多重分形广义维数谱为

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

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

利用式(2)可以得到广义维数谱 $D(q)$, 当 $q=0$ 时, D_0 为信息维数; $q=1$ 时, D_1 为信息维数; $q=2$ 时, D_2 为关联维数。

2.4 数据处理

采用 Pearson 相关分析和逐步回归分析评价土壤颗粒组成、土壤分形维数与土壤理化性质的关系。采用冗余分析(RDA)对分形维数变化的环境驱动因素进行分析。本研究中响应变量包含 D 、 D_0 、 D_1 、 D_1/D_0 、 D_2 , 解释变量为速效磷、铵态氮、硝态氮、有机碳、全氮、溶解性有机碳、溶解性有机氮、全磷、粉粒、黏粒、砂粒、pH, 包含共 12 个指标。所有统计分析和作图在 Rv.3.6.0 中进行, 图表中数据为平均值±标准误。

3 结果

3.1 不同草地利用方式下土壤颗粒分布特征

本研究中粒径分类采用美国制分类标准, 从图 2 可知, 不同草地利用方式的土壤颗粒体积分数差异显著 ($P<0.05$), 主要以粉粒、极细砂粒和细砂粒为主。其中, 砂粒的体积分数最高 (47.37%—76.95%), 其次为粉粒 (16.26%—40.81%), 黏粒的体积分数最低 (6.78%—12.98%)。黏粒体积分数表现为围栏禁牧草地和未干扰草地高于放牧草地和围栏禁牧+补植草地; 粉粒体积分数依次为放牧草地<围栏禁牧+补植草地<围栏禁牧草地<未干扰草地, 分别为 40.81%、29.28%、20.40%、16.26%。相较于放牧草地和围栏禁牧+补植草地, 围栏禁牧草地黏粒、粉粒含量显著增加 ($P<0.05$), 增幅分别为 60.0%—91.4%、43.5%—80.1%。极细砂粒体积分数未干扰草地最高, 放牧草地最低。细砂粒、中砂粒、粗砂粒体积分数依次为未干扰草地<围栏禁牧草地<围栏禁牧+补植草地<放牧草地。

土壤颗粒分布频率曲线可以反映土壤质地情况, 曲

线的变化幅度越小, 颗粒异质程度越大^[13]。图 3 为 4 种不同草地利用方式下土壤的颗粒分布频率曲线, 未干扰草地和禁牧草地曲线变化幅度较小, 各粒径段土壤体积含量分布相对均匀, 分布异质性较大, 细颗粒 ($<50 \mu\text{m}$) 含量较高; 禁牧+补植草地和放牧草地的曲线变化幅度较大, 颗粒主要集中在 $50\text{—}500 \mu\text{m}$ 粒径范围, 以粗颗粒为主, 异质性较小, 非均匀程度小。

3.2 不同草地利用方式下土壤单重分形维数

利用式 1, 通过最小二乘法拟合回归曲线, 计算出 4 种草地利用方式下土壤颗粒的单重分形维数, 如表 3 所示, 4 种草地拟合方程的决定系数均接近 1, 说明线性拟合效果较好。从不同草地利用方式来看, 体积分形维数依次为放牧草地<围栏禁牧+补植草地<未干扰草地=围栏禁牧草地, 其中, 围封禁牧草地单重分形维数 D 最高; 放牧的单重分形维数最小 (2.56), 质地较粗。

图 4 为土壤颗粒组成与单重分形维数 D 回归分析结果, 分形维数 D 与粉粒、黏粒体积含量呈极显著的正相关关系, 与砂粒相关性较差。从关系系数 R^2 来看, 黏粒含量与分形维数 D 的相关系数较大, 粉粒次之, 砂粒最小, 说明土壤分形维数和黏粒的体积含量之间相关性最大。

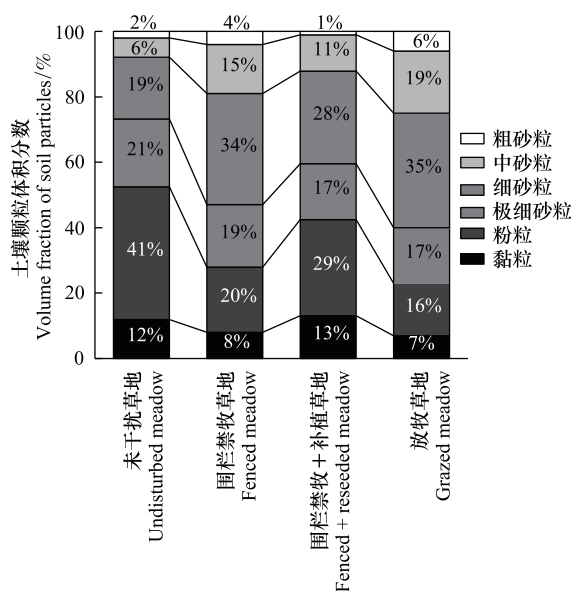


图2 不同草地利用方式下土壤颗粒组成

Fig.2 Soil particle composition under different meadow types

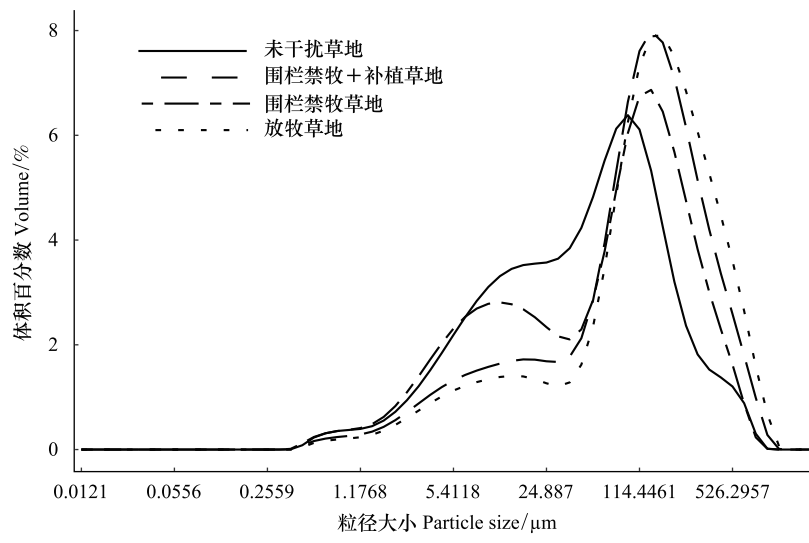


图3 不同草地利用方式下土壤颗粒分布频率曲线

Fig.3 Soil particle distribution frequency curve under different meadow types

表3 不同草地利用方式土壤颗粒分形维数

Table 3 Fractal dimensions of soil particles under different meadow types

草地类型 Grassland types	土壤颗粒单重分形维数 Fractal dimension of soil particles					决定系数 R^2
	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 St. Deviation	变异系数 CV	
未干扰草地 Undisturbed meadow	2.64	2.70	2.66	0.026	0.01	0.93
围栏禁牧+补植草地 Fenced+reseeded meadow	2.55	2.60	2.59	0.022	0.008	0.96
围栏禁牧草地 Fenced meadow	2.61	2.72	2.67	0.059	0.022	0.96
放牧草地 Grazed meadow	2.55	2.58	2.56	0.016	0.006	0.96

3.3 不同草地利用方式下土壤多重分形维数

取 q 值变化区间 $[-10,10]$,根据公式(2)、(3),计算出4种不同草地利用方式下广义维数谱 $D(q)$ 。由图5可知,4种不同草地利用方式 $D(q)-q$ 曲线呈现反“S”型单调递减,并且具有一定的宽度。土壤分形越均匀, $D(q)-q$ 越趋近一条直线;而在非均匀分形下, $D(q)$ 变化范围较大,土壤粒径呈现非均匀分布,因此进一步说明了对土壤粒径进行多重分形分析的重要性。 $q<0$ 时 $D(q)$ 的下降趋势比 $q>0$ 显著,说明 $D(q)$ 在稀疏区域更为敏感。

表4为不同草地利用方式下土壤广义维数谱维数。容量维数 D_0 可以反映土壤粒径分布范围, D_0 值越大表明粒径分布范围越广,4种草地下 D_0 值变化差异不显著。从信息维数 D_1 来看,不同草地利用方式的 D_1 值介于0.86—0.89之间,表现为放牧草地<围栏禁牧+补植草地<围栏禁牧草地<未退化草地。其中,未退化的 D_1 值为0.89,表明各粒径分布不规律,异质性较大;放牧草地最低,粒径分布异质性较小。 D_1/D_0 可以衡量土壤粒径分布的集中程度^[22],4种草地依次为放牧<围栏禁牧+补植草地<围栏禁牧草地<未退化草地,未退化草地土壤粒径分布最集中,放牧草地次之,放牧草地最分散。关联维数 D_2 反映土壤粒径的均匀性, D_2 值越大,分布越均匀,未退化草地、围栏禁牧+补植草地、围栏禁牧草地、放牧草地的值分别为0.88、0.82、0.85和0.82,其中,未退化草地和放牧草地的 D_2 值最高,土壤颗粒各分级百分比趋向一致;放牧最低,土壤颗粒分布均匀性最低。

3.4 土壤理化性质、土壤颗粒组成以及分形维数之间的关系

不同草地利用下土壤理化性质、土壤质地以及分形维数的相关分析如表5所示,黏粒与pH呈显著正相关($P<0.05$)。粉粒与信息维数 D_1 与有机碳、全氮和硝态氮表现极显著正相关($P<0.01$),与全磷表现显著相

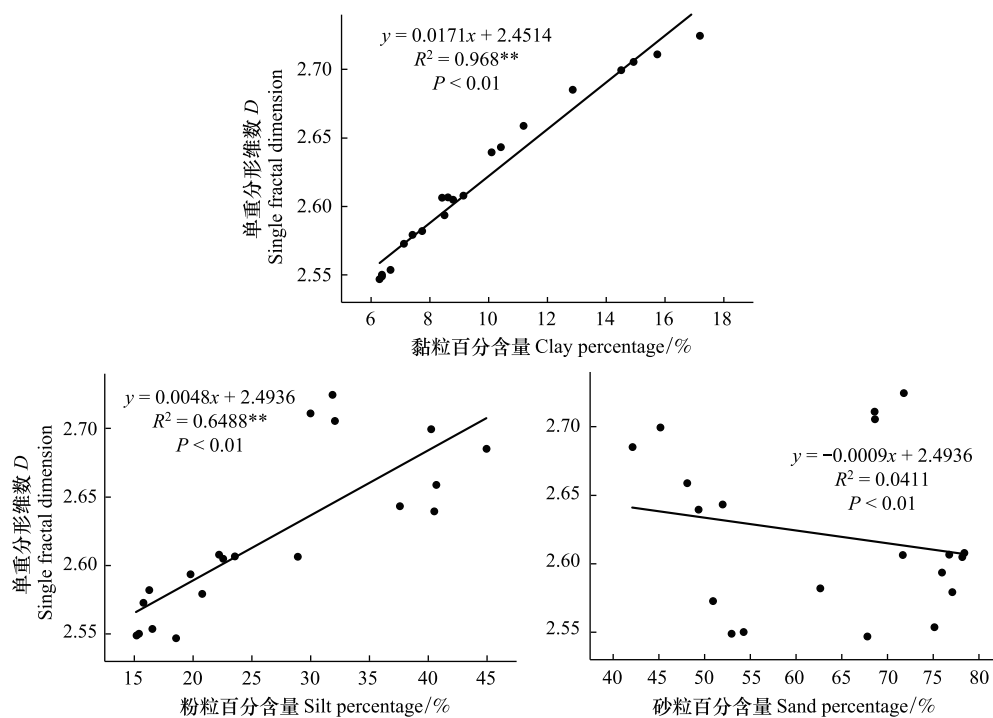


图4 粒径体积分数与土壤单重分形维数的相关关系

Fig.4 Correlation between particle size and fractal dimension of soil

图中 R^2 表示粒径体积分数与土壤单重分形维数的测定系数, $P < 0.01$ 表示此回归方程极其显著

关($P < 0.05$), 其中与有机碳相关性最大, 相关系数为 0.647。砂粒与土壤理化性质表现负相关关系, 其中与全氮呈现极显著负相关($P < 0.01$), 相关系数为 -0.707。单重分形维数 D 与土壤理化性质没有相关性, 多重分形维数(D_1 、 D_1/D_0 、 D_2)与有机碳、全氮、全磷和硝态氮呈显著正相关($P < 0.05$)。

从图 6 可知, 土壤基本性质共解释了 96.78% 分形维数的变异, 其中第一轴的解释率为 71.44%, 第二轴的解释率为 25.34%。砂粒、黏粒、SOC、TN 和粉粒对 D 、 D_0 和 D_2 解释率较大。砂粒对 D_0 的影响最大, SOC 对 D_2 的影响最大, 铵态氮对 D 的影响最大。逐步回归结果显示(表 6), 粉粒和黏粒能共同解释 D 值 99% 的变异, 表明黏粒和粉粒是不同草地利用方式下 D 值变化的主控因素; 粉粒能够独立解释 D_1 59.85% 的变异, 是 D_1 变化的主控因素; 砂粒能够分别解释 D_1/D_0 、 D_2 值 82.2% 和 79.5% 的变异, 表明黏粒和粉粒是不同草地利用方式下 D_1/D_0 、 D_2 值变化的主控因素。

4 讨论

4.1 不同草地利用方式对土壤颗粒分布特征的影响

土壤颗粒组成受母质特征以及环境变化的影响^[23], 在一定程度上可以决定土壤的基本性状。研究区位于青藏高原高寒气候带, 由于气候条件影响, 草地生态系统结构单一, 在环境以及人为活动干扰下草地退化日趋严重^[24]。草原气候干燥, 在风力侵蚀作用下, 细颗粒流失, 土壤逐渐粗粒化。在本研究中, 4 种草地土壤颗

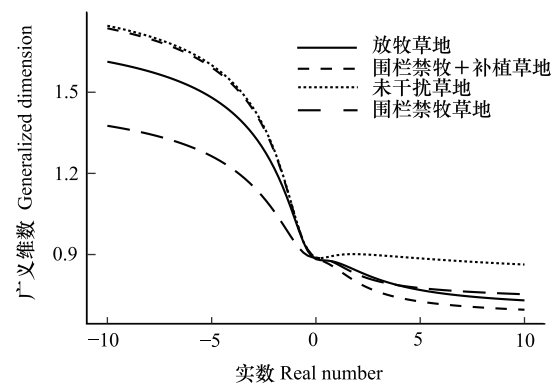


图5 不同草地利用方式下土壤粒径分布广义维数谱

Fig.5 Generalized dimensional spectrum of soil particle size distribution under different meadow types

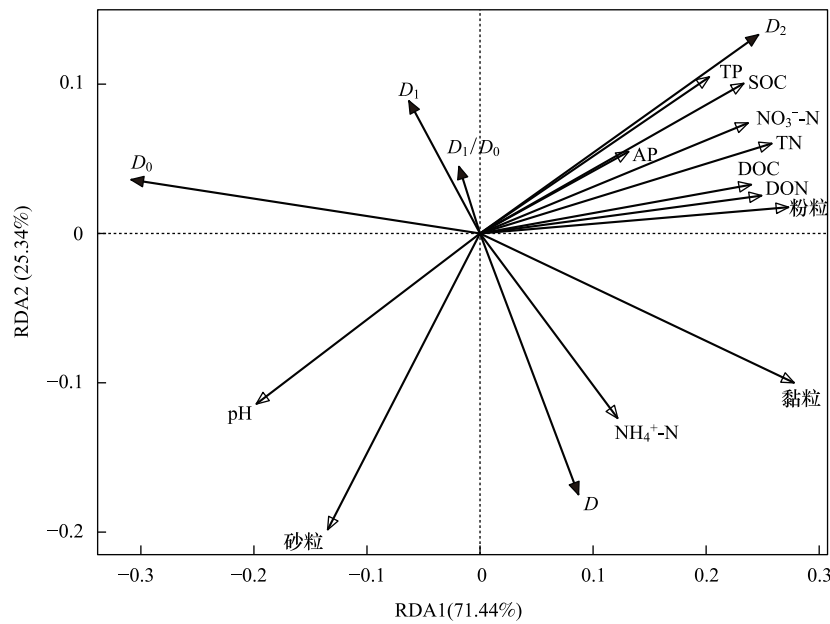


图 6 分形维数及土壤基本特性的冗余分析(RDA)

Fig.6 Redundancy Analysis of Fractal Parameters and Basic Soil Characteristics (RDA)

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;DOC:水溶性有机碳 Dissolved organic carbon;DON:水溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen;AP:速效磷 Available phosphorus; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝态氮 Nitrate nitrogen; D :单重分形维数 Fractal dimension; D_0 :容量维数 Capacity dimension; D_1 :信息维数 Entropy dimension; D_1/D_0 :信息维数/容量维数 Entropy dimension/ Capacity dimension; D_2 :关联维数 Correlation dimension

粒主要分布在 20—250 μm 之间,0—2 μm 和 500—2000 μm 范围内粒径含量较少,林永崇^[25]在对藏北高原土壤的研究中也发现了类似的结果,这是由于样地位于荒漠化地带,成土母质源于风尘沉积,土质疏松,以风沙土为主。有研究表明,围封禁牧可以有效促进土壤颗粒细化^[26]。本研究发现,放牧草地和围栏禁牧+补植草地的砂粒含量较多,细颗粒较少;围栏禁牧草地和未干扰草地的黏粒与粉粒含量相对较多。谢莉等^[27]研究发现,相较于放牧草地,围栏封育草地中土壤细颗粒含量显著增加。这可能是由于采取禁牧措施后,植被生长恢复,覆盖度提高,风蚀作用减弱,减少了细颗粒的流失,同时植被能够截存降尘^[26],外来的风蚀物质依附在植物表面随之沉积,成为土壤细颗粒重要组成部分。从土壤颗粒分布频率曲线(图 2)来看,未干扰草地变化幅度最小,质地较均匀,这说明未干扰草地由于植被覆盖以及矿物质含量的供应,土壤发育良好,且地下根系较多,须根发达,能够固结土体、改善土壤结构。

表 4 不同草地利用方式下土壤广义维数谱维数

Table 4 Soil generalized dimensional spectral parameters under different meadow types

草地类型 Grassland types	容量维数(D_0) Capacity dimension	信息维数(D_1) Entropy dimension	信息维数/ 容量维数(D_1/D_0) Entropy dimension/ Capacity dimension	关联维数(D_2) Correlation dimension
未干扰草地 Undisturbed meadow	0.89	0.89	1.00	0.88
围栏禁牧+补植草地 Fenced+reseeded meadow	0.89	0.87	0.97	0.82
围栏禁牧草地 Fenced meadow	0.89	0.87	0.99	0.85
放牧草地 Grazed meadow	0.89	0.86	0.96	0.82

表 5 土壤理化性质与分形维数及土壤质地的相关性

Table 5 Correlation between fractal parameters and soil physicochemical properties

	pH	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	水溶性 有机碳 DOC	水溶性 有机氮 DON	速效磷 AP	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N
黏粒 Clay	0.556 *	0.265	0.218	0.301	-0.030	-0.005	-0.237	0.301	-0.124
粉粒 Silt	0.501 *	0.795 **	0.721 **	0.791 **	0.523 *	0.561 *	0.272	0.772 **	-0.177
砂粒 Sand	-0.546 *	-0.700 **	-0.628 **	-0.707 **	-0.405	-0.442	-0.151	-0.703 **	0.173
单重分形维数 D	0.589 **	0.383	0.333	0.407	0.072	0.103	-0.162	0.445 *	-0.125
容量维数 D_0	-0.334	-0.129	-0.090	-0.266	0.082	0.004	0.146	-0.171	0.159
信息维数 D_1	0.328	0.647 **	0.572 **	0.553 *	0.445 *	0.433	0.227	0.633 **	-0.183
信息维数/容量维数 D_1/D_0	0.443	0.665 **	0.578 **	0.629 **	0.390	0.409	0.158	0.668 **	-0.237
关联维数 D_2	0.397	0.656 **	0.553 *	0.599 **	0.402	0.398	0.199	0.647 **	-0.269

* 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$) SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; DOC: 水溶性有机碳 Dissolved organic carbon; DON: 水溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; D : 单重分形维数 Fractal dimension; D_0 : 容量维数 Capacity dimension; D_1 : 信息维数 Entropy dimension; D_1/D_0 : 信息维数/容量维数 Entropy dimension/ Capacity dimension; D_2 : 关联维数 Correlation dimension

表 6 分形维数与土壤基本性质的逐步回归模型

Table 6 Linear regression models of fractal parameters and basic soil properties

回归模型 Regression model	R^2	P	回归模型 Regression model	R^2	P
$D = 0.001$ 粉粒 + 0.014 黏粒 + 2.444	0.991	<0.001	$D_1/D_0 = -0.001$ 砂粒 + 1.061	0.822	<0.001
$D_0 = -0.01$ 黏粒 + 0.899	0.207	0.044	$D_2 = -0.002$ 砂粒 + 0.990	0.795	<0.001
$D_1 = 0.001$ 粉粒 + 0.842	0.598	<0.001			

4.2 不同草地利用方式对分形维数的影响

单重分形维数可以反映土壤颗粒物质的损失状况,是表征土壤物理性质的重要工具^[28]。本研究发现,和未干扰草地相比,其他草地土壤质地都逐渐粗颗粒化,各草地间土壤粒径分布差异明显,分形维数也有所不同,说明不同草地利用方式是影响土壤质地的重要因素,这与罗楠^[29]的研究相似。文海燕等^[30]研究表明,围封禁牧后表层土壤单重分形维数显著增加;李国旗^[31]的研究结果显示围栏封育内的单重分形维数大于围栏外的单重分形维数。本研究也得到了相似的结论,4种草地利用方式下分形维数 D 的分布范围为 2.56—2.67,依次为放牧草地<围栏禁牧+补植草地<未干扰草地<围栏禁牧草地。放牧草地和围栏禁牧+补植草地分形维数明显低于围栏禁牧草地和未干扰草地。未干扰草地植被常年覆盖,土壤发育能力强,其土壤粒度组成越细;实行围封禁牧后的草地,人为活动少、干扰小,植被覆盖度逐渐提高,降低了风蚀的影响,促进细粒物质沉积;经过补植后的草地虽然放牧活动减少,但是草原环境恶劣,植物生长速度较慢,由于弥补损耗使得土壤结构不稳定。

本研究中4种草地利用方式下的土壤都具有多重分形特征, $D(q)-q$ 曲线呈现反“S”型单调递减, $q < 0$ 时 $D(q)$ 的下降趋势比 $q > 0$ 显著,说明 $D(q)$ 在稀疏区域更为敏感,这与王德^[13]研究结果相似。其中, $q < 0$ 时,放牧草地与其他草地利用方式相比其变化趋势最小,波普最窄,说明放牧草地的土壤分形结构的复杂程度较低; $q > 0$ 时,未干扰草地变化趋势较小,说明其土壤质地较均匀,这与本文单重分形结果一致。 D_0 可以作为土壤质地分类的维数^[21],本研究表明,4种草地利用方式下 D_0 变化不明显,孙梅^[12]研究中也得到了类似的结果表明4种草地利用方式并没有改变土壤质地组成。本研究表明,4种草地利用方式下 D_1 、 D_1/D_0 和 D_2 均遵循放牧草地<围栏禁牧+补植草地<围栏禁牧草地<未干扰草地这一规律,与围栏禁牧+补植草地和放牧草地相比,围栏禁牧显著提高土壤粒径集中程度,呈现不规则分布,异质性较大,土壤逐渐细颗粒化。原因可能是围栏禁牧后植被恢复、凋落物增加,提高了土壤有机质的含量,有机质利于土壤细颗粒的形成;青藏高原退化过程较为

复杂,除了人为活动的干扰还受自然环境的制约,同时由于实验处理的年限限制,围栏禁牧+补植草地植物凋落物长时间堆积,影响周转效率,不利于草地土壤稳定。

4.3 分形维数与土壤颗粒组成与理化性质的关系

土壤颗粒组成能够影响土壤养分的供应能力,对植被的生长也有一定的促进作用^[32]。本研究中,有机碳、全氮和全磷与粉粒呈显著正相关,罗雅曦^[33]研究中也得到了相似的结果,一方面随着植被演替的进行,地上生物量逐渐增多,凋落物在微生物的作用下不断分解,导致土壤碳、氮含量增加,另一方面,植被能有效减少土壤细颗粒的吹蚀,同时细颗粒具有粘结性,使得土壤中的碳、氮含量得到了保持。在荒漠化地带,黏粉粒的粘结作用能够促进土壤-植被系统的良性循环,这也说明土壤颗粒组成对有机碳的固持有至关重要的作用^[34]。

土壤颗粒组成是影响分形维数的重要因素之一。已有研究表明,土壤颗粒组成与单重分形维数有显著的相关关系^[19-35],本研究发现,单重分形维数 D 与黏粒体积含量呈极显著正相关,与粉粒呈显著正相关(图4)。魏茂宏^[36]在高寒草甸退化土壤粒径分布的研究中发现,单重分形维数与黏粒百分含量呈显著正相关,说明单重分形受土壤细颗粒含量的影响,能够表示土壤颗粒组成情况并且反映其变化特征,土壤颗粒越小,分形维数越高。以上表明利用单重分形维数描述高寒高原土壤的质地变化具有一定的可行性,可以用其来表征荒漠土壤随环境变化的趋势,并且能够作为土壤质量演变的评价指标。而王瑞东^[37]通过对希拉穆仁草地的土壤分形维数进行研究发现,该地区单重分形维数的大小主要与土壤粉粒含量有关,黏粒和砂粒含量对其影响较小。可能是由于研究区的环境和土壤的差异,同时,在采样过程中,取样的随机性也会对单重分形维数产生影响。

张毅^[38]在研究黄河三角洲地区土壤颗粒的分形特征中发现,单重分形维数 D 与有机质呈显著正相关;杜雅仙^[39]的研究表明单重分形维数与有机质和全氮含量呈显著负相关,与全磷和全钾含量关系不显著,而本研究发现,分形维数 D 与土壤理化性质显著关系不明显,这与单桂梅^[40]的研究结果一致,表明土壤单重分形在表征土壤质量上具有加强的空间特异性。相较于 D 值, D_1 、 D_1/D_0 和 D_2 与土壤理化性质具有较好的相关性,因此多重分形维数能更好的反映土壤质量特征^[41]。逐步回归分析表明(表6),粉粒是不同草地利用方式下 D 、 D_1 值变化的主控因素,这与白一茹^[19]的研究相似,说明随着粉粒含量增多,土壤颗粒分布呈现异质性和不规律性。而孙梅^[12]在研究红壤多重分形特征中发现,多重分形维数与粉粒呈负相关关系,这可能与研究区的土壤质地有关,该地为红壤土,而本研究土壤以砂质土为主,由于研究区质地不同,导致多重分形维数也因此不同。在本研究中,多重分形维数(D_1 、 D_1/D_0 与 D_2)和土壤理化性质表现极显著正相关,孙哲^[42]在高寒草甸退化的研究发现,多重分形维数与有机质含量呈显著相关。土壤有机质是土壤质量评价的重要指标^[43],有机质含量与 D_1 、 D_2 和 D_1/D_0 的相关关系使得这些分形维数可能作为反映土壤质量的潜在指标,说明多重分形维数可以为衡量土壤结构和质量提供参考。

5 结论

单重和多重分形结果表明,禁牧促使土壤粒径分布异质性更大,颗粒分布更加集中,质地更均匀,且提高了细颗粒含量,促进砂粒向黏粒和粉粒转变,改善了土壤质地和结构,可以作为草地恢复的参考,但是与未干扰草地相比,还有一定差距。单重分形维数与黏粒、粉粒呈极显著正相关($P<0.01$),与沙粒呈负相关($P<0.01$),可以用来反映土壤的物理性质,而多重分形维数与土壤有机碳、全磷、全氮表现极显著的正相关关系,可以作为衡量土壤养分的重要指标。

参考文献(References):

- [1] Tan K, Ciais P, Piao S, Wu X P, Tang Y H, Vuichard N, Liang S, Fang J Y. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(1): GB1013.
- [2] 郝爱华,薛娴,彭飞,尤全刚,廖杰,段翰晨,黄翠华,董斯扬.青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究[J].生态学报,2020,40(3): 964-975.

- [3] Dlamini P, Chivenge P, Chaplot V. Overgrazing decreases soil organic carbon stocks the most under dry climates and low soil pH: A meta-analysis shows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 258-269.
- [4] Díaz S, Purvis A, Cornelissen J H C, Mace G M, Donoghue M J, Ewers R M, Jordano P, Pearse W D. Functional traits, the phylogeny of function, and ecosystem service vulnerability. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(9): 2958-2975.
- [5] 滕星,王德利,程志茹,房健,王亚秋.不同放牧强度下绵羊采食方式的变化特征[J].草业学报,2004,13(2):67-72.
- [6] 高英志,韩兴国,汪诗平.放牧对草原土壤的影响[J].生态学报,2004,24(4):790-797.
- [7] 牛钰杰,杨思维,王贵珍,刘丽,杜国祯,花立民.放牧干扰下高寒草甸物种和生活型丰富度与地上及地下生物量的关系[J].生态学报,2018,38(8):2791-2801.
- [8] 于双,许冬梅,许爱云,刘金龙,陶利波.不同恢复措施对宁夏荒漠草原土壤碳氮储量的影响.草业学报,2019,28(3):12-19.
- [9] 仲波,孙庚,陈冬明,张楠楠.不同恢复措施对若尔盖沙化退化草地恢复过程中土壤微生物生物量碳氮及土壤酶的影响[J].生态环境学报,2017,26(3):392-399.
- [10] 刘艳萍,荣浩,邢恩德.不同措施对退化草地土壤和植被的影响[J].水土保持研究,2007(6):345-347.
- [11] 王东丽,刘阳,郭莹莹,谢伟,郭建军,汤国水,赵晓亮,连昭,于百和.半干旱矿区排土场苜蓿恢复过程中土壤颗粒分形的演变特征[J].生态学报,2020,40(13):4585-4593.
- [12] 孙梅,孙楠,黄运湘,徐明岗,王伯仁,张旭博.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.
- [13] 王德,傅伯杰,陈利顶,赵文武,汪亚峰.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(7):3081-3089.
- [14] 程杰,王欢元,解建仓,孟婷婷,石磊.不同配比下复配土的土壤颗粒组成、分形维数与质地变化特征[J].水土保持研究,2020,27(2):30-34.
- [15] Sun C, Liu G B, Xue S. Natural succession of grassland on the Loess Plateau of China affects multifractal characteristics of soil particle-size distribution and soil nutrients. *Ecological research*, 2016, 31(6): 891-902.
- [16] 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.科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000
- [18] Wang J, Wang X T, Liu G B, Wang G L, Wu Y, Zhang C. Fencing as an effective approach for restoration of alpine meadows: Evidence from nutrient limitation of soil microbes. *Geoderma*, 2020, 363: 114148.
- [19] 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.
- [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):43-48,42.
- [21] 管孝艳,杨培岭,吕焱.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.
- [22] Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, Vaz C M P, Flury M. Multifractal Characterization of Soil Particle-Size Distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1361-1367.
- [23] 拓飞,董治宝,南维鸽,杨树俊,武玉叶,李强.沙地柏人工林和天然林风沙土特性研究.水土保持研究,2021,28(2):80-87.
- [24] 魏卫东,刘育红,马辉,李积兰.基于冗余分析的高寒草原土壤与草地退化关系[J].草业科学,2018,35(3):472-481.
- [25] 林永崇,冯金良,张继峰,鞠建廷,胡兆国,高少鹏.藏北高原安多地区高山草甸土的母质成因及其成土模式[J].山地学报,2012,30(6):709-720.
- [26] 闫玉春,王旭,杨桂霞,辛晓平.退化草地封育后土壤细颗粒增加机理探讨及研究展望[J].中国沙漠,2011,31(5):1162-1166.
- [27] 谢莉,宋乃平,孟晨,吴婷,陈晓莹,李敏岚,岳健敏.不同封育年限对宁夏荒漠草原土壤粒径及碳氮储量的影响[J].草业学报,2020,29(2):1-10.
- [28] 赵文智,刘志民,程国栋.土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J].土壤学报,2002,39(6):877-881.
- [29] 罗楠,舒英格,陈梦军,肖盛杨.喀斯特山区不同草地土壤结构及分形特征[J].草业学报,2020,29(7):11-22.
- [30] 文海燕,傅华,赵哈林.退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J].应用生态学报,2006,17(1):55-59.
- [31] 李国旗,赵盼盼,邵文山,靳长青.封育对荒漠草原沙芦草群落土壤粒径分形维数及理化性质的影响[J].草地学报,2018,26(3):551-558.
- [32] 吕圣桥,高鹏,耿广坡,张杰,夏江宝.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.
- [33] 罗雅曦,刘任涛,张静,常海涛.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
- [34] 张继义,赵哈林.退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤-植被系统稳定性的影响[J].生态环境学报,2009,18(4):1395-1401.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 王瑞东,高永,党晓宏,蒙仲举.希拉穆仁天然草地不同群落土壤分形特征及其影响因素[J].水土保持研究,2020,27(3):51-56.
- [38] 张毅,由晗杨,马艳飞,冯雪冬,高佩玲.黄河三角洲地区典型土壤颗粒的分形特征[J].江苏农业科学,2019,47(19):280-284.
- [39] 杜雅仙,樊瑾,李诗瑶,牛玉斌,余海龙,黄菊莹.荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系[J].应用生态学报,2019,30(11):3716-3724.
- [40] 单桂梅,张春平,刘霞,吴迪,张光灿,姚孝友,杨韶洋,王静.沂蒙山区小流域坡耕地土壤颗粒结构与养分退化特征[J].中国水土保持科学,2013,11(5):76-82.
- [41] 张桢赫,丁建丽,王敬哲,穆艾塔尔·赛地,李艳菊.干旱区绿洲盐渍土粒径分布单重分形和多重分形特征[J].干旱区研究,2019,36(2):314-322.
- [42] 孙哲,王一博,刘国华,高泽永.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.
- [43] Dumanski J, Pieri C. Land quality indicators: research plan. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 81(2): 93-102.