

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.015

引用格式:李佳,张宁,朱牛,等.陇中黄土丘陵区滑坡体在不同生态恢复措施下的土壤特征[J].草地学报,2026,34(4):1302—1312

LI Jia, ZHANG Ning, ZHU Niu, et al. Soil Physical-chemical Properties of Loess Hilly Area in Central Gansu under Different Ecological Restoration Measures[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1302—1312

陇中黄土丘陵区滑坡体在不同生态恢复措施下的土壤特征

李 佳^{1,2}, 张 宁^{1,2}, 朱 牛³, 张 林⁴, 宿 星⁵, 王金牛^{1,2*}

(1. 中国科学院成都生物研究所, 四川 成都 610041; 2. 西藏生态安全屏障监测站网芒康生物多样性与生态站, 西藏 昌都 854500; 3. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 5. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:黄土丘陵滑坡迹地植被恢复对土壤特征的影响机制尚不明确,本研究选取黄河上游陇中黄土丘陵沟壑区典型滑坡区域为试验样地,通过野外采样与室内分析,结合分形理论,对比自然恢复、金银花种植、玉米种植3种生态恢复措施下土壤粒径特征及理化性质差异。结果表明:(1)不同生态恢复措施下土壤颗粒组成主要以砂粒(34%~37%),细砂粒(27%~28%)为主;(2)与自然恢复相比,金银花区pH显著下降,玉米区含水率显著升高,人工恢复土壤有机质、全氮、全磷含量均高于自然恢复;(3)单重分形维数范围2.44~2.72,具体为玉米(2.72)>金银花(2.65)>自然恢复(2.44),玉米恢复使得土壤质量更好。不同生态恢复下土壤单重分形维数随土壤质地由粗变细,土壤单重分形维数呈增加趋势。人工恢复的土壤养分含量、土壤含水率高于自然恢复,即人工恢复措施更有利于提升土壤保水能力与养分固定能力。因此,在滑坡治理过程中,适当采取人工恢复的辅助措施能有效改善土壤结构、提升滑坡迹地的植被盖度、减少水土流失。

关键词:生态恢复措施;土壤理化性质;粒径分布;单重分形维数;滑坡

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1302-11

Soil Physical-chemical Properties of Loess Hilly Area in Central Gansu under Different Ecological Restoration Measures

LI Jia^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}, ZHU Niu³, ZHANG Lin⁴, SU Xing⁵, WANG Jin-niu^{1,2*}

(1. Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan Province 610041, China; 2. Mangkang Biodiversity and Ecological Station, Tibet Ecological Safety Monitor Network, Changdu, Xizang 854000, China; 3. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. Institute of Geological Hazards Prevention, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu Province 730000, China)

Abstract: The mechanism of the influence of vegetation restoration on soil characteristics in the loess hilly land-slide area is unclear, in this study we selected the typical landslide area in the loess hilly and gully region of central Gansu in the upper reaches of the Yellow River as the experimental site. Through field sampling and indoor analysis, combined with fractal theory, the differences in soil particle size characteristics and physical and chemical properties under three ecological restoration measures, namely natural restoration, honeysuckle planting, and corn planting, were compared. The results showed that: (1) Under different ecological restoration measures, the composition of soil particles was mainly composed of sand grains (34%~37%), fine sand grains

收稿日期:2025-05-29;修回日期:2025-11-11

基金项目:甘肃省科学院应用研发项目(2021JK-08)“黄河上游陇中地区滑坡灾损土地优化利用评价及生态修复研究”;中国科学院西部之光西部青年学者项目(2021XBZG-XBQNXZ-A-007)资助

作者简介:李佳(2000-),女,汉族,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事退化生态系统修复与土壤动物群落变化研究, E-mail: 2503978048@qq.com; * 通信作者 Author for correspondence, E-mail: wangjn@cib.ac.cn

(27%-28%)。 (2) Compared with natural restoration, the pH in the honeysuckle area decreased significantly, and the moisture content in the corn area increased significantly. The contents of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus in artificial restoration were all higher than those in natural restoration. (3) The range of the single fractal dimension was 2.44 to 2.72, specifically corn (2.72) > honeysuckle (2.65) > natural recovery (2.44), and the recovery of corn leads to better soil quality. Under different ecological restorations, the single fractal dimension of soil showed an increasing trend as the soil texture changes from coarse to fine. The nutrient content and moisture content of soil restored artificially were higher than those restored naturally, that was, artificial restoration measures were more conducive to enhancing the soil's water retention capacity and nutrient fixation capacity. The study shows that in the process of landslide control, appropriately adopting auxiliary measures of artificial restoration can effectively improve soil structure, increase vegetation coverage of the landslide site, and reduce soil erosion.

Key words: Ecological restoration measures; Soil physicochemical properties; Particle size distribution; Fractal dimension; Landslides

陇中黄土丘陵区位于黄河中上游地区,在气候变化和人类活动干扰加剧的背景下,土壤侵蚀严重,属于极易受到干扰的脆弱生态系统,因此成为我国生态工程重点实施区域之一^[1,2]。黄土高原由于气候沉积循环在工程性质上突出表现为欠固结性、轻度超固结性与易侵蚀性,在气候、沉积以及环境的影响下造成黄土滑坡^[3]。地震和降雨是引发黄土滑坡的关键因素^[4]。此外,人类活动干扰(过度放牧、坡地耕种等)可加剧植被破坏、水土流失、耕地面积锐减等^[5-7]。我国滑坡事件频发,对流域人民生命财产和工程设施安全形成威胁,造成了重大的负面社会影响和经济损失^[8,9]。因此,深入研究滑坡防治措施,对于保障人民生命财产安全、维护区域生态平衡具有极为重要的现实意义。目前滑坡防治措施主要分自然恢复和人工恢复两大类^[10,11],人工恢复是在人类主导下的恢复演替,通过人工措施,如拦挡、阻截、边坡防护与护墙、削坡、排水等^[12]工程措施稳定坡体,阻断侵蚀恶性循环,加快受损或退化生态系统的恢复。人工恢复中,因为玉米和金银花的强适应性且作为经济作物而受欢迎,有利于提高居民生态修复参与的积极性与推广。而常用的土木工程防治措施会对生态系统造成永久破坏^[13],自然恢复方式则依靠自然演替恢复受损或退化的生态系统,提高植被覆盖度以减少水土流失、增强固土固坡等^[14]作用。植物根系与土壤有机质的胶结作用能提高根土界面的摩擦作用,强化土壤通透入渗性能,提高土壤结构及孔隙的稳定性^[15,16]的同时有效抑制坡体表面土壤侵蚀^[17,18]。自然恢复可作为一种较为经济的防治措施,但恢复周期较长,适用区域具有一定的局限性。由此可见,科学合理地选择人为或自然恢复手段,并综合运用生态措施,对于滑坡迹地的恢复至关重要^[19]。

土壤质地显著影响着土壤的结构和孔隙度,从而影响土壤中空气和水分的流动,乃至其生物地化循环^[20-22]。良好的土壤结构有助于根系扩展和呼吸,提高作物的光合作用效率。土壤分形维数一方面反映了土壤粒度分布的整体性特征、另一方面表达了土壤质地和土壤肥力等土壤属性之间的相关性^[23]。土壤粒径分布(Particle size distribution, PSD)综合反映了土壤的结构、性质及土壤颗粒的组成状况,间接反映土壤侵蚀、土壤肥力、土壤持水和保水能力等^[24],是衡量土壤质量的一种有效手段^[25]。1992年分形理论作为一种揭示物质局部结构和形态的工具被 Tyler 等^[26]首次引入土壤学中,后广泛运用于土壤结构的研究。孙方虎等^[27]通过对长江下游沿江湖泊湿地的土壤分形维数和土壤有机碳的研究,为促进湿地生态恢复,提升湿地土壤碳汇能力和碳库稳定性提供科学参考;Deng 等^[28]在沙漠中研究林分密度梯度下土壤的变化规律,发现土壤分形维数作为一个敏感指数,可量化土壤养分等特性的变化。因此,利用土壤粒径分布模型揭示当地土壤颗粒组成、评价土壤质量和植被恢复的演变过程是至关重要的^[29]。近年来,主要研究集中于土壤理化性质的变化^[30]、土壤粒径分布的变化^[31,32]、土壤含水率与土壤粒径分布之间的联系^[33],对于土壤粒径、土壤单重分形维数、土壤养分之间的联系尚不完善,我们拟通过在黄土丘陵区滑坡地段对比人工恢复和自然恢复间土壤颗粒将几者结合在一起填补黄土丘陵区土壤粒径的数据空白。结合单重分形与土壤粒径、土壤养分可更全面地揭示土壤 PSD 信息,反映土壤物理性质的变化特征^[34]。因此,本研究选择位于黄土高原西段陇中黄土丘陵区,探究不同生态恢复措施(金银花、玉米、自然恢复)下土壤粒径及土壤理化性质与单重分形

维数的动态变化特征,旨在:(1)揭示土壤理化性质、土壤粒径对单重分形维数的影响;(2)阐明不同生态恢复下土壤粒径组成情况、土壤单重分形维数变化特征;(3)评估金银花和玉米与其他植被恢复对比优势点。本研究以期为黄土高原区域滑坡治理和生态修复提供基础数据与科学依据。

1 材料与方法

1.1 滑坡研究点位置

滑坡点位于黄河上游的陇中黄土丘陵沟壑区(简称陇中黄土丘陵区),地处黄土高原西段($34^{\circ}59'39.72''\text{N}$, $105^{\circ}12'22.01''\text{E}$, 海拔 1500 m),属于半干旱温带大陆性季风气候,年降水量 300~

600 mm,年均气温 6.6°C ^[35],区域内植被主要以苦苣菜(*Sonchus brachyotus*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、二色补血草(*Limonium bicolor*)、扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)为主。2019年,因受强降雨影响,通渭县常家河镇发生特大滑坡群灾害,滑坡体东西长约 1000 m,南北宽约 500 m,滑坡高差约 50 m,滑坡体体积约 1300 万 m^3 ,对当地经济、建筑造成巨大损失。近年来随着社会防治力度投入加大,间有人工种植的一年一茬玉米(*Zea mays*)和一年三茬的金银花(*Lonicera japonicae*),玉米一般于 4 月播种,9 月收获,金银花采收时间为 6 月至 8 月。为该区域滑坡的理论研究和技术修复手段在生态恢复研究与实践领域提供了一定的进展。

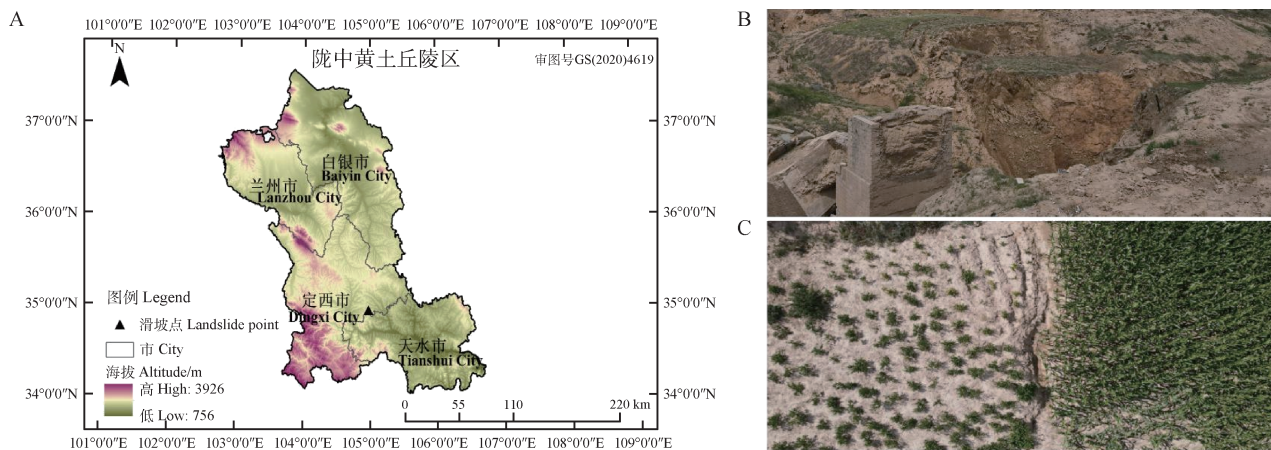


图1 研究区位置

Fig. 1 The location of the study area

注:A,研究区所在地;B,裸露对照滑坡;C,人工恢复 左为金银花,右为玉米

Note: A, Location of the study area. B, Exposed control landslide. C, Artificial restoration. The left picture is *Lonicerae Japonicae* and right is *Zea mays*

1.2 样品采集和指标测定

金银花为一年三茬,采用每亩 400~500 的种植密度,行距 1.2~1.5 m,株距 1.0 m 进行挖穴种植,采收时间为 6 月至 8 月。玉米的种植密度为每亩 3000 株,一年一茬,一般于 4 月底播种,9 月收获。恢复实验于 2020 年开始,持续 3 年,采样时间为 2023 年 7 月至 2023 年 8 月,实验设置 2 个人工恢复(金银花、玉米)和一个自然恢复。为便于后期管理与监测,所有采样点均选在滑坡后缘稳定平台及中部缓坡带,避开潜在滑动的边缘区域。选取对照时,在人工恢复样地外,选裸地斑块作“自然恢复对照”,确保与人工恢复样地直线距离 ≤ 20 m,微气候一致。取相同处理相同土层下两套土样分别用于土壤粒径分析和理化性质分析,每个处理下设置 5 个重复,取 0~10 cm 和 10~20 cm 两层土样,共计 3(处理) $\times$ 5(重复) $\times$ 2

(土层) $\times$ 2(分析类型) = 60 个土样。

将土壤样品带回实验室风干,去除杂质,用干筛法对样品颗粒进行分级,之后以美国制土壤粒径分级标准进行整理将土壤质地划分为 4 组 12 级^[36],美国制的质地分类标准亦用等边三角形(图 2B)所示。采用电位测定法(水土比 2.5:1)测量土壤 pH 值,使用烘干法测定土壤含水率,用半微量凯氏法测量土壤全氮(Soil total nitrogen)含量,使用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮后用钼锑抗比色法测定土壤全磷(Soil total phosphorus)含量,使用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质(Soil organic matter)^[37]。

1.3 数据分析

根据美国农业部制定的土壤质地分级标准,土壤各级粒径划分为:极粗砂粒(1000~2000 μm)、粗

砂粒(500~1000 μm)、中砂粒(250~500 μm)、细砂粒(100~250 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)共7个等级^[36],根据砂粒(2000~50 μm)、粉粒(50~2 μm)和黏粒(<2 μm)的比例划定了砂土、壤砂土、砂壤土、粉壤土、壤土、粉土、砂黏壤土、粉黏壤土、黏壤土、砂黏土、粉黏土、黏土12个土壤质地类型。

采用 SPSS 22、Origin 2022 和 R. 4.3 中 ggplot2、ggdist 包对数据进行统计分析并作图。对土壤理化性质数据进行正态性检验,若不符合正态分布,经过数据转换符合正态分布后采用单因素(ANOVA)方差分析,并用最小显著差法(LSD)进行多重比较($P < 0.05$)。

1.4 土壤单重分形维数计算

根据 Tyler 和王国梁等^[26, 38]对土壤颗粒体积分形维数的概念及其计算公式推导,得到如下体积分形维数计算公式:

$$\frac{V_{(r < R)}}{V_T} = \left(\frac{R}{R_{\max}} \right)^{3-D}$$

式中: V 为小于粒径 R 的土壤总体积(%); V_T 为测定的土壤总体积(%); R 为两筛分粒级 R_i 与 R_{i+1} 间粒径的平均值(mm); $R_{\max}$ 为土壤粒径分级中最大粒径,本研究中土壤最大粒径为2 mm; D 为土壤颗粒的体积分形维数,对上式两边取对数,分别以 $\log \frac{V_{(r < R)}}{V_T}$ 和 $\log \left(\frac{R}{R_{\max}} \right)^{3-D}$ 为纵、横坐标进行线性拟合,3-D为斜率, D 即为土壤分形维数。

1.5 土壤水分曲线拟合

土壤水分曲线拟合是采用 RETC(RETention Curve)软件中(Van Genuchten-Mualem 模型)拟合得出^[39]。根据不同土壤粒径在土壤中所占比例,将数据输入得出以下参数, θ_r (残余含水量)、 θ_s (饱和含水量)、 α (与进气吸力相关的参数)、 n (孔隙分布指数)和 K_s (饱和导水率)。根据参数拟合得出水分特征曲线。用这些参数可以用来构建 Van Genuchten 方程,该方程如下所示: $\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha|h|)^n]^{-m}$,其中, $m = (1-n)/1$ 。

2 结果与分析

2.1 不同生态恢复下土壤粒径组成

研究区内不同生态恢复下的土壤属于砂土、壤质砂土(图2B)。不同粒级土壤颗粒的体积占比波动范围分别为:粉粒为12.18%~26.04%,砂粒为73.95%~87.81%,平均粒径在4.99~9.69 μm 范围内波动。不同生态恢复(图2A)样地内土壤主要为粗砂粒和细砂粒,含量最高的粗砂粒在34%~37%,细砂粒含量为27%~28%,此外,还出现了一部分极粗砂粒(19%~20%)以及少量的极细砂粒(11%~15%)和中砂粒(4%~5%)。

不同生态恢复下粒度频率曲线呈明显双峰态(图2C),土壤粒度频率分布曲线形态相似,高峰范围相近,主峰介于1~1.5 mm,次主峰介于0~0.5 mm。总体上看,自然恢复的粒度频率分布曲线较金银花修复和玉米修复均匀程度增加,土壤颗粒分布的异质程度增大。

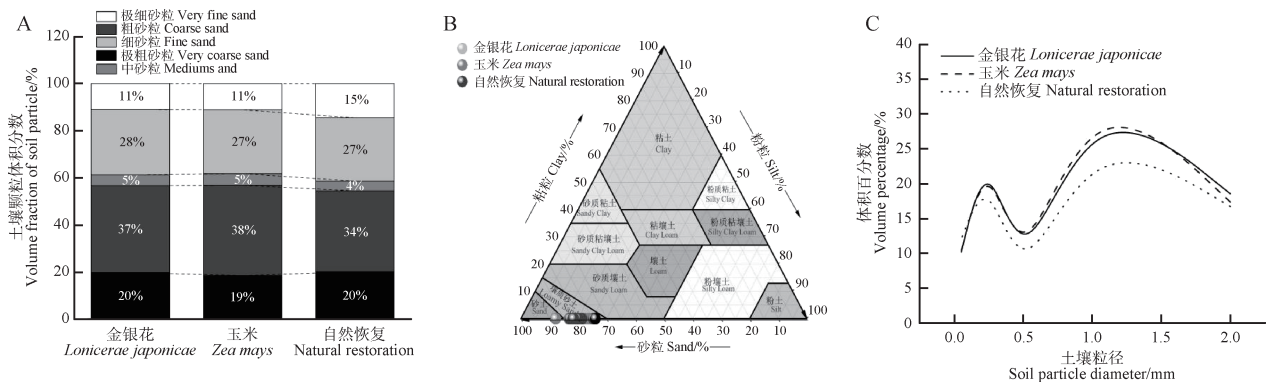


图2 不同修复模式下土壤颗粒组成(A)、质地分布(B)、与频率曲线(C)

Fig. 2 Soil particle composition under different ecological restorations (A), Texture distribution (B), and frequency curve (C)

2.2 不同生态恢复下土壤理化性质

在不同土层下,土壤理化性质无显著差异,随着土层加深,养分含量降低。自然恢复下的pH值显著大于金银花恢复,金银花恢复下土壤含水率显著大于自然恢复土壤含水率($P<0.05$),土壤有机质、土壤总氮、土壤总磷在不同生态修复下无显著差异。

0~10 cm土层中,土壤有机质最高是在金银花($7.100\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),玉米恢复下土壤总氮含量($0.2867\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和土壤总磷含量($0.9833\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)均最高。在10~20 cm土层,玉米恢复下的土壤有机质($6.8667\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和土壤总氮($0.1233\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)最高,土壤总磷则是在金银花恢复下最高($0.9433\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

表1 不同生态恢复措施下土壤理化性质

Table 1 Physical-chemical properties under different ecological restoration measures

恢复模式 Recovery measure	土壤深度 Deep/cm	土壤酸碱度 Soil pH	土壤有机质 SOM/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤总氮 STN/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤总磷 STP/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤含水率 SWC/%
金银花 <i>Lonicerae Japonicae</i>	0-10	$8.5333\pm0.0882^{\text{Ba}}$	$7.1000\pm0.0586^{\text{Aa}}$	$0.1200\pm0.0058^{\text{Aa}}$	$0.9133\pm0.0219^{\text{Aa}}$	$11.1300\pm0.0060^{\text{Aa}}$
	10-20	$8.5000\pm0^{\text{Ba}}$	$6.3000\pm0.0929^{\text{Aa}}$	$0.1167\pm0.0167^{\text{Aa}}$	$0.9433\pm0.0120^{\text{Aa}}$	$10.400\pm0.0039^{\text{Aa}}$
玉米 <i>Zea mays</i>	0-10	$8.8000\pm0.1528^{\text{ABa}}$	$6.7333\pm0.0867^{\text{Aa}}$	$0.2867\pm0.1617^{\text{Aa}}$	$0.9833\pm0.0033^{\text{Aa}}$	$8.4800\pm0.0106^{\text{ABa}}$
	10-20	$8.6333\pm0.0882^{\text{ABa}}$	$6.8667\pm0.0367^{\text{Aa}}$	$0.1233\pm0.0067^{\text{Aa}}$	$0.8800\pm0.0854^{\text{Aa}}$	$8.9100\pm0.0241^{\text{ABa}}$
自然恢复 Natural restoration	0-10	$8.9667\pm0.0333^{\text{Aa}}$	$5.3000\pm0.1079^{\text{Aa}}$	$0.0900\pm0.0058^{\text{Aa}}$	$0.9367\pm0.0233^{\text{Aa}}$	$5.9000\pm0.0022^{\text{Ba}}$
	10-20	$8.8333\pm0.2186^{\text{Aa}}$	$4.5000\pm0.1704^{\text{Aa}}$	$0.0800\pm0.0116^{\text{Aa}}$	$0.9000\pm0.0116^{\text{Aa}}$	$7.1900\pm0.0062^{\text{Ba}}$

注:大写字母表示在不同恢复措施下存在显著差异,小写字母表明不同土壤深度存在显著差异($P<0.05$)

Note: Capital letters indicate significant differences under different ecological restoration measures, while lowercase letters suggest significant differences at different soil depths ($P<0.05$)

2.3 不同生态恢复下土壤单重分形维数

在三种生态恢复下,土壤单重分形维数介于2.44~2.72间(图3A),在不同生态恢复下,土壤单重分形维数无显著差异,但玉米恢复下的土壤单重分形维数最高,其次为金银花,具体数值为玉米>金银花>自然恢复($2.6185>2.6157>2.5542$)。

图3B、3C、3D展示了不同恢复措施下基于Van Genuchten模型拟合的土壤水分拟合曲线。这些曲线反映了土壤在不同压力头下的水分含量变化,可用于评估土壤的持水能力和水分释放特性。曲线的形状和位置可用于评估土壤水分的有效范围和植物可利用水分。金银花处理下的曲线在低压力头区域(接近0 cm)显示出较高的水分含量,并且在高压力头区域水分含量下降较慢,这表明金银花处理下土壤的保水性能较好。

2.4 土壤单重分形维数与土壤理化性质的相关性

金银花恢复下,样地中土壤总氮与土壤含水率间显著正相关(图4, $P<0.05$),土壤总磷与土壤单重分形维数呈现显著正相关($P<0.05$);在玉米恢

复样地中,仅存在土壤总磷与土壤pH间存在显著负相关($P<0.05$),其他土壤理化性质间无显著关系;在自然恢复中,土壤有机质与土壤总氮间显著正相关($P<0.05$),其他土壤理化性质间无显著关系。

2.5 金银花和玉米种植、自然恢复与黄土丘陵区其他恢复措施效果对比

表2展示了本研究中金银花和玉米人工恢复措施与黄土丘陵区其他植被土壤理化性质的对比。前两行数据为本研究结果,后五行数据来源于其他文献。本研究中金银花和玉米样地的土壤有机质(SOM)含量分别为 $6.700\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.705\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷(STP)含量分别为 $0.928\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.931\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均高于其他植被样地的平均值,表明这两种恢复措施有效提高了土壤养分含量。金银花和玉米样地的土壤分形维数(D)分别为2.618和2.615,略高于柠条和沙棘样地,说明金银花和玉米有助于改善土壤结构,增强土壤团聚体稳定性。

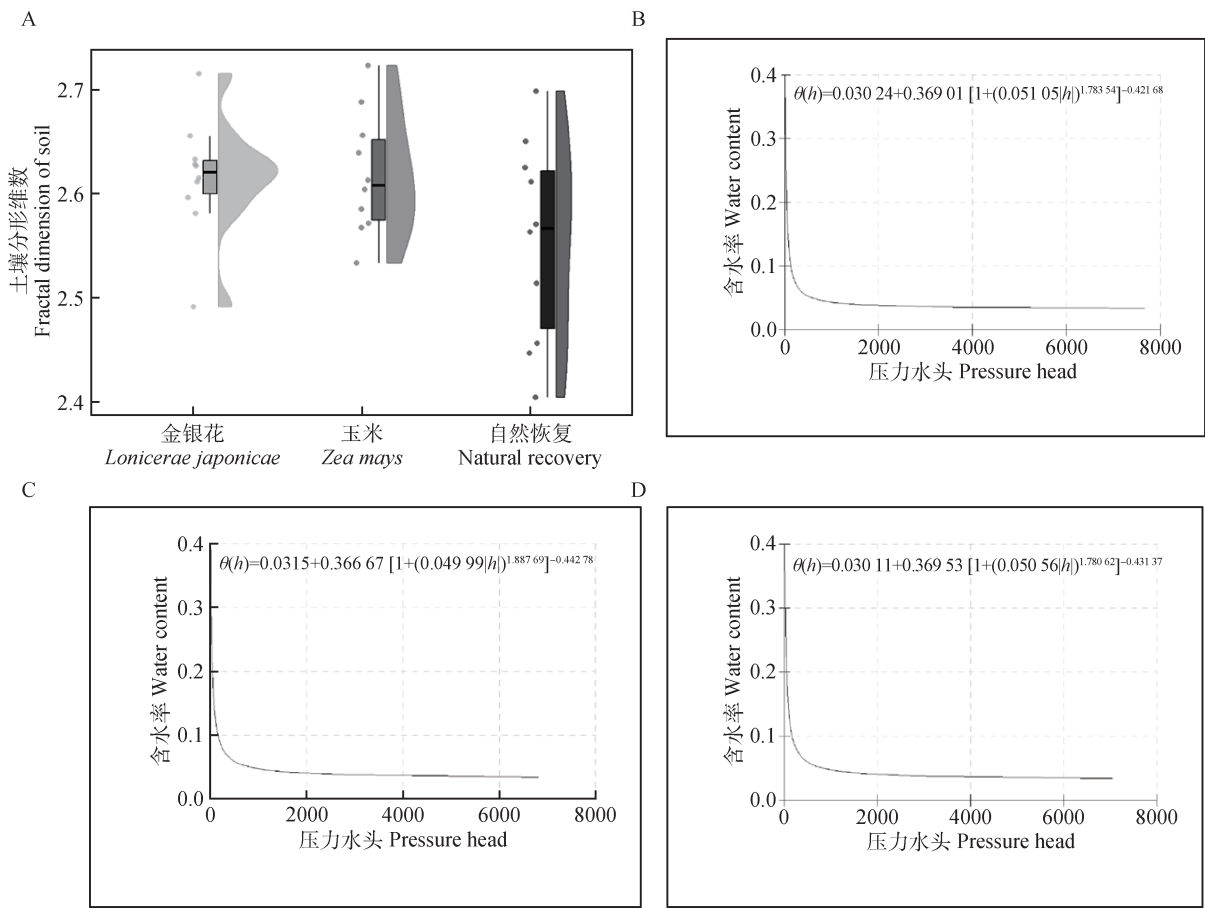


图 3 不同生态恢复下土壤单重分形维数(A)、水分拟合曲线(B玉米、C金银花、D自然恢复)

Fig. 3 Soil single weight fractal dimension under different ecological restorations (A), Moisture fitting curves. (B *Zea mays*, C *Lonicerae japonicae*, D Natural recovery)

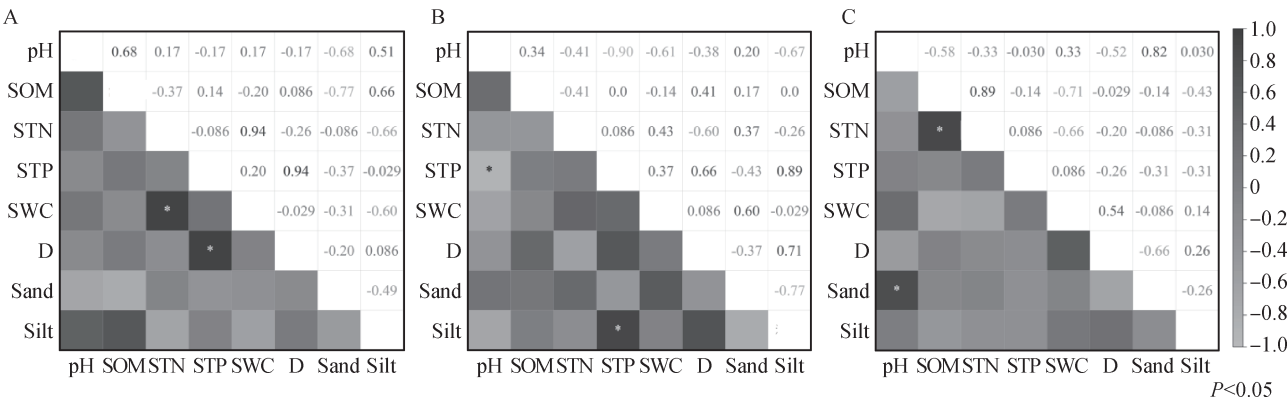


图 4 不同生态恢复下土壤单重分形维数与土壤理化性质的相关性分析(A金银花、B玉米、C自然恢复)

Fig. 4 Correlation analysis between soil single weight fractal dimension and soil physical and chemical properties under different ecological restorations(A, *Lonicerae japonicae*, B, *Zea mays*, C, Natural recovery)

注:pH为土壤酸碱度;SOM为土壤有机质;STN为土壤总氮;STP为土壤总磷;SWC为土壤含水率;D为土壤分形维数;Sand为砂粒;Silt为粉粒。*表示 $P<0.05$

Note:pH,Soil acidity and alkalinity; SOM,Soil organic matter; STN,Soil total nitrogen; STP,Soil total phosphorus; SWC,Soil water content; D,Soil fractal dimension. * indicates $P<0.05$

表 2 本研究恢复措施与黄土丘陵区其他植被土壤理化性质对比

Table 2 Comparison of soil physical and chemical properties with other vegetation in loess hilly area

地点 Location	恢复模式 Recovery measure	土壤总氮 STN/(g·kg ⁻¹)	土壤总磷 STP/(g·kg ⁻¹)	土壤有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	分形维数 D	土壤酸碱度 pH	容重 BD/(g·cm ⁻³)
通渭	金银花 <i>Lonicera japonicae</i>	0.118	0.928	6.700	2.618	8.51	
通渭	玉米 <i>Zea mays</i>	0.204	0.931	6.705	2.615	8.71	
延安 ^[40]	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.092	0.054	3.070	2.760		1.028
延安 ^[40]	辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i>	0.149	0.060	4.770	2.733		1.042
安塞 ^[41]	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	0.140	0.470		2.550	8.81	1.320
安塞 ^[41]	沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	0.330	0.510		2.570	8.76	1.270
定西 ^[42]	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.318	0.585	5.920		8.69	
定西 ^[42]	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.515	0.575	8.150		8.68	
安塞 ^[43]	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	0.500		6.500		8.40	1.200
安塞 ^[43]	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.300		4.300		8.45	1.240

3 讨论

土壤质地和环境等多种因素共同作用影响土壤颗粒分布情况^[38], 决定土壤的基本情况。本研究区位于黄土丘陵沟壑区, 降水量少且植被覆盖度低, 在环境和人类活动的影响下, 滑坡灾害高发、易发^[44]。研究区中不同生态恢复下土壤颗粒组成主要是以壤质砂土为主、伴有砂土, 原因在于黄土丘陵区植被覆盖度低和土壤持水性差, 土壤砂化现象较为严重^[44]。土壤含水量也是影响土壤结构的一个重要因素^[45]。人工恢复下(玉米、金银花)的土壤含水率显著高于自然恢复下土壤含水率, 在土壤中, 砂粒含量越少, 土壤颗粒比表面积越大, 水分更容易被吸收和固定住, 土壤含水率越大; 反之砂粒含量越多的土壤, 比表面积越小, 对水分的吸收和固定能力较弱, 土壤含水率越小, 土壤结构越不稳定^[46, 47]。研究区土壤颗粒组成均以粗砂粒和细砂粒为主, 不同生态恢复下土壤粘粒含量均很低, 可能是在耕种时, 翻耕会扰动土壤结构, 导致土壤不易形成大颗粒, 耕地也难以通过秸秆还田等方式增加土壤有机质, 会降低有机物质对土壤颗粒的黏结作用^[41, 48]。人工恢复下植被覆盖度较高, 能截留部分雨水, 有效降低雨水对地表的冲刷, 提高土壤抗风蚀能力, 进一步减少滑坡发生; 金银花根系主要集中在土壤表层, 其吸收根的分布对土壤水分的分布有一定影响, 改善土壤的通气性和透水性, 从而提高土壤的水分保持能力。另外, 极细沙粒含量在自然恢复下高于玉米和金银花恢复下, 可能是由于在自然恢复下土壤的免耕处理减少了对土壤表层土的干扰, 动植物残体主要集中在土壤表层土中, 提高土壤微食物网中养分与原料, 从而使表层土中

微生物生长代谢活动活跃, 促进土壤中大颗粒矿化分解, 增加土壤中细小颗粒^[49]。

单重分形维数解释了土壤颗粒物质的损失状况, 可用于揭示土壤粒径的分布特征和反映其基本物理性质^[23, 50], 分形维数越小结构稳定性越强^[31, 51]。根据前人的研究表明, 质地粗的土壤分形维数范围为 1.830~2.640, 质地细的土壤分形维数范围为 2.60~2.80, 土壤质地和性能较好时土壤分形维数(D)应在 2.75 左右^[52, 53]。研究区内土壤颗粒分形维数(D)主要在 2.44~2.72 之间, 土壤颗粒分形维数均较低, 说明土壤保水保肥能力较差。玉米恢复下土壤分形维数更接近 2.75, 表明玉米研究区内的土壤结构较好, 结构性更强, 研究区玉米样地植被盖度更高, 玉米的浅根系及匍匐茎系统更有效固结表层土壤, 较好植被群落结构和复杂的根系系统加速了土壤结构体的形成, 根系表面的分泌物、根毛等物质也促进了土壤颗粒的粘结, 提高了结构体的稳定性^[54]。此外, 研究还发现土壤质地越粗糙, 土壤单重分形维数越小, 这也与前人得研究达成一致^[55-57], 这是由于土壤细颗粒越多, 质地越细, 内部的微小空隙越多, 土壤内部结构越复杂, 土壤颗粒之间更紧密^[58]。玉米和金银花恢复下土壤分形维数高于柠条和沙棘植被, 一方面得益于金银花和玉米生长周期较短, 能够快速形成地表覆盖层, 减少风蚀水蚀, 改善土壤养分及结构见效更快, 另一方面, 玉米可作为粮食产物、金银花作为药材经济效益更高, 应在选择种植作物时综合考虑。玉米和金银花恢复与自然恢复对比同样改善了土壤条件, 从土壤颗粒频率分布曲线来看, 自然恢复与人工恢复相比土壤异质性更大, 土壤质地分布均匀程度降低, 其原因可能为, 相较于人工恢复, 自然恢

复下植被盖度更低,土壤发育较差,地下根系无法有效固结土壤和改善土壤结构^[29, 59]。

土壤养分是衡量土壤质量的重要参数之一,影响植被生长发育状况,进而影响土壤防风固沙能力^[60, 61]。在与黄土丘陵区其他植被恢复措施土壤理化性质相比,玉米和金银花恢复下土壤全氮含量均较低,这主要归结于滑坡体形成的土壤中氮含量本底值较低且其种植周期尚且不长。一年生植物玉米通常具有较高的生物量和较快的生长周期,这可能导致土壤中氮素的快速循环。金银花作为一种多年生植物,可能在长期内更有效地积累和保持土壤中的氮素。样地土壤全磷含量则较高(表2)并且有机质含量也高于其他植被恢复,地上生物量的输入提高土壤的碳储存和养分循环;土壤分形维数相较于侧柏和辽东栎较低,但高于柠条和沙棘植被,这表明金银花和玉米可能在短期内促进土壤团聚体形成方面较弱,但相较于某些灌木(柠条)它们在改善土壤结构方面仍然具有独特的优势。柠条生长过程种会形成固氮菌和菌根提升固氮能力,相较于种植金银花和玉米的土壤总氮含量较高。土壤有机质、土壤全氮、土壤全磷随着土层深度的增加呈现下降的趋势,说明土壤养分具有明显的“表聚”效应^[61, 62]。金银花和玉米恢复下土壤单重分形维数与土壤总磷呈正相关,与孙彩彩等^[30]研究结果一致,人工恢复下的植被覆盖提升增加了土壤中生物量碳输入,造成土壤单重分形维数变大^[48, 58];发达的根系系统能提供较多的根系分泌物,而地上高密度的覆盖不仅能产生大量凋落物,还能削弱降水对土壤的淋蚀作用^[63],促进了土壤孔隙的形成,从而防止养分流失^[64];。其他土壤养分(土壤总磷、土壤总氮、土壤有机质)在人工恢复下含量同样高于自然恢复,增强了微生物活性,促进微生物分泌胞外酶分解土壤中的有机质,进一步改善土壤养分条件^[65];根系残体和根系分泌物是土壤有机质的重要来源之一,这些有机质经过土壤微生物分解后增加了土壤有机质含量^[66]。

4 结论

在黄土丘陵区滑坡区,人工恢复措施相较于自然恢复展现出了更优的恢复效果。人工恢复措施通过调控土壤颗粒组成(砂粒占比提升至62.38%±3.15%)与分形维数(D值达2.72±0.04),改善

土壤的物理结构且提高了滑坡区土壤结构稳定性及养分保持能力。有助于减少水土流失,增强土壤的抗侵蚀能力,从而促进植被的恢复和生长,实现生态效益和经济收益的双赢。因此,在针对黄土丘陵区滑坡体修复时,我们可以优先考虑耗时更短效果更好的人工恢复(金银花、玉米)并且注意采用玉米恢复时,可与豆科轮作防止连作障碍并且提高土壤固氮和抗蚀能力;金银花恢复时,可喷施生物菌剂防止病虫害发生。

参考文献

- [1] 柴春山,王子婷,张洋东,等. 陇中半干旱黄土丘陵区土壤养分空间分布特征[J]. 林业资源管理, 2021(4): 114-120
CHAI C S, WANG Z T, ZHANG Y D, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients in semi-arid loess hilly area of longzhong [J]. Forest Resources Management, 2021(4): 114-120
- [2] 赵安周,田新乐. 基于GEE平台的1986—2021年黄土高原植被覆盖度时空演变及影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2124-2133
ZHAO A Z, TIAN X L. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation coverage in the Loess Plateau from 1986 to 2021 based on GEE platform[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(11): 2124-2133
- [3] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312
XU Z J, LIN Z G, ZHANG M S. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312
- [4] PU X W, WAN L M, WANG P. Initiation mechanism of mud-flow-like loess landslide induced by the combined effect of earthquakes and rainfall[J]. Natural Hazards, 2021, 105(3): 3079-3097
- [5] ZHANG S, PEI X J, WANG S Y, et al. Centrifuge model testing of loess landslides induced by excavation in northwest China[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020022
- [6] ZHANG S, PEI X J, WANG S Y, et al. Centrifuge model testing of a loess landslide induced by rising groundwater in Northwest China[J]. Engineering Geology, 2019, 259: 105170
- [7] 杨振,牛叔文,吴文恒. 陇中黄土高原水土流失的人文因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 124-128
YANG Z, NIU S W, WU W H. Partitional management modes and responding of soil erosion to human activity in longzhong Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2005, 19(6): 124-128
- [8] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-13
TANG H M. Advance and prospects of major landslides prediction and forecasting [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 1-13
- [9] 许强,郑光,李为乐,等. 2018年10月和11月金沙江白格两次

- 滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551
- XU Q, ZHENG G, LI W L, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha river in baige village on october 11 and November 3, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534-1551
- [10] 段晨松, 张全建, 龚旭, 等. 地震滑坡迹地的植物群落与土壤恢复效果评价[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6584-6596
- DUAN C S, ZHANG Q J, GONG X, et al. Evaluation of plant community and soil recovery in earthquake landslide [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6584-6596
- [11] 王雅飞, 杨敏, 林琦, 等. 日本山体治理技术在四川灾后植被恢复中的应用[J]. 林业科技开发, 2013, 27(2): 105-108
- WANG Y F, YANG M, LIN Q, et al. The application of Japanese mountain-repair techniques in the post-earthquake forests reconstruction [J]. China Forestry Science and Technology, 2013, 27(2): 105-108
- [12] 顾磊, 黄河. 滑坡地质灾害防治研究进展[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 786-795
- GU L, HUANG H. Research progress on prevention and control of landslide geological hazards [J]. Advances in Geosciences, 2021, 11(6): 786-795
- [13] 周跃. 植被与侵蚀控制: 坡面生态工程基本原理探索[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 297-300
- ZHOU Y. Vegetation and erosion control: exploration on basic principle of slope engineering [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 297-300
- [14] 陈丽华, 余新晓, 宋维峰, 等. 林木根系固土力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 5-20
- CHEN L H, YU X X, SONG W F, et al. Mechanical mechanism of soil fixation by forest tree roots [M]. Beijing: China science publishing, 2008: 5-20
- [15] HERKELRATH W N, MILLER E E, GARDNER W R. Water uptake by plants: I. divided root experiments [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(6): 1033-1038
- [16] NIMAH M N, HANKS R J. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. description and sensitivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37(4): 522-527
- [17] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65
- CHENG H, YAN C S, LI J Q, et al. An experimental study on mechanic performance and mechanism of soil-reinforcement by herb root system [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 62-65
- [18] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 250-252
- WANG K. Effects of plant roots on soil anti-erosion [J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(3): 250-252
- [19] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1171-1177
- ZHOU Y Y, CHEN J P, WANG X M. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(6): 1171-1177
- [20] LIU Y D, WU X D, WU T H, et al. Soil texture and its relationship with environmental factors on the Qinghai-Tibet plateau [J]. SSRN Electronic Journal, 2021: 14(15): 3797
- [21] RÜGER L, FENG K, CHEN Y, et al. Responses of root architecture and the rhizosphere microbiome assembly of maize (*Zea mays* L.) to a soil texture gradient [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 181: 109026
- [22] TRAN C T K, WATTS-WILLIAMS S J, SMERNIK R J, et al. Root and arbuscular mycorrhizal effects on soil nutrient loss are modulated by soil texture [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 167: 104097
- [23] 沙国良, 魏天兴, 陈宇轩, 等. 黄土高原丘陵区典型植物群落土壤粒径分布特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1224-1234
- SHA G L, WEI T X, CHEN Y X, et al. Characteristics of soil particle size distribution of typical plant communities on the hilly areas of Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1224-1234
- [24] QIU Y, FU B J, WANG J, et al. Spatiotemporal prediction of soil moisture content using multiple-linear regression in a small catchment of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2003, 54(1/2): 173-195
- [25] 刁二龙, 曹广超, 刘英, 等. 黑河源区不同植被类型土壤粒径分形特征研究[J]. 草地学报, 2024, 32(5): 1459-1470
- DIAO E L, CAO G C, LIU Y, et al. Fractal characteristics of soil particle size on different vegetation types in the source area of the Heihe River [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1459-1470
- [26] 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
- [27] 孙方虎, 苗雨青, 汪勇, 等. 长江下游沿江湖泊湿地土壤粒径分形特征与有机碳分布——以菜子湖湿地为例[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(8): 1728-1740
- SUN F H, MIAO Y Q, WANG Y, et al. Fractal characteristics of soil particle size and organic carbon distribution in the wetlands of the Lower Yangtze River: a case study of caizi lake wetland [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(8): 1728-1740
- [28] DENG J F, LI J H, DENG G, et al. Fractal scaling of particle-size distribution and associations with soil properties of Mongolian pine plantations in the Mu Us Desert, China [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6742
- [29] 宛倩, 王杰, 王向涛, 等. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1716-1726
- WAN Q, WANG J, WANG X T, et al. Effects of different meadow use types on the fractal characteristics of soil particle in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1716-1726
- [30] 孙彩彩, 安海涛, 董全民, 等. 放牧强度对环青海湖地区高寒草地土壤理化性质及土壤粒径分形特征的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(8): 88-96
- SUN C C, AN H T, DONG Q M, et al. Effects of grazing

- intensity on soil physicochemical properties and soil particle size fractal characteristics of alpine grassland in the Qinghai Lake area[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(8): 88-96
- [31] 王鸿霞, 宋明丹, 塔林葛娃, 等. 青海省3种地带性土壤粒径分形特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(6): 1108-1114
WANG H X, SONG M D, TA L, et al. Fractal characteristics of particle size in three zonal soils of Qinghai Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(6): 1108-1114
- [32] 张令光, 成龙, 孙迎涛, 等. 毛乌素沙地典型下垫面土壤粒度特征[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(12): 3571-3579
ZHANG L G, CHENG L, SUN Y T, et al. Grain size characteristics of soil on typical underlying surfaces in Mu Us Sandy Land[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(12): 3571-3579
- [33] ZHANG X, ZHAO W W, WANG L X, et al. Relationship between soil water content and soil particle size on typical slopes of the Loess Plateau during a drought year[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 943-954
- [34] 戴磊, 王贵玲, 何雨江. 基于分形理论研究土壤结构及其水分特征关系[J]. *地球科学*, 2021, 46(9): 3410-3420
DAI L, WANG G L, HE Y J. The relationship between soil structure and water characteristics based on fractal theory[J]. *Earth Science*, 2021, 46(9): 3410-3420
- [35] 贾静, 宿星, 张军, 等. 1985—2020年甘肃省通渭县滑坡区土地利用变化及驱动力[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2833-2841
JIA J, SU X, ZHANG J, et al. Land use changes and driving forces of landslide area in Tongwei County, Gansu Province, Northwest China from 1985 to 2020[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10): 2833-2841
- [36] 潘瑞, 刘树庆, 宁国辉, 等. 土壤质地定名法及吸湿水与土壤粒级含量关系的研究[J]. *北方园艺*, 2010(16): 25-29
PAN R, LIU S Q, NING G H, et al. Study on the method for defining the soil texture and the relation between hygroscopic water and soil particle[J]. *Northern Horticulture*, 2010(16): 25-29
- [37] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 5-20
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 5-20
- [38] 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
WANG G L, ZHOU S L, ZHAO Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545-550
- [39] 李爽, 赵相杰, 谢云, 等. 基于土壤理化性质估计土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型参数[J]. *地理科学*, 2018, 38(7): 1189-1197
LI S, ZHAO X J, XIE Y, et al. Parameter estimation of soil water retention curve based on soil physical and chemical properties of van genuchten model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1189-1197
- [40] 杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 1-5, 24
YANG T, JING H, YAO X, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in Loess Hilly Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 1-5, 24
- [41] 张超, 刘国彬, 薛蕊, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(3): 507-515
ZHANG C, LIU G B, XUE S, et al. Fractal features of rhizosphere soil microaggregate and particle-size distribution under different vegetation types in the hilly-gully region of Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 507-515
- [42] 王铜林, 柴春山, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区典型植被土壤养分含量及其分布特征[J]. *甘肃林业科技*, 2024, 49(3): 67-72, 78
WANG T L, CHAI C S, MO B R, et al. Content and distribution characteristics of soil nutrients under typical vegetations in semiarid hilly loess area[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2024, 49(3): 67-72, 78
- [43] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 等. 黄土丘陵区植被恢复对土壤可溶性氮组分的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3533-3542
ZHAO L H, LI C Z, KANG D, et al. Effects of vegetation restoration on soil soluble nitrogen in the Loess Hilly Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3533-3542
- [44] 朱牛, 刘桦, 王金牛, 等. 黄土高原典型丘陵沟壑区的滑坡灾损土地生态修复研究进展[J]. *草业科学*, 2024, 41(6): 1306-1323
ZHU N, LIU H, WANG J N, et al. Research progress on ecological restoration of land damaged by landslides in typical Loess Hilly Regions of the Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(6): 1306-1323
- [45] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 31-35
WANG G L, LIU G B, DANG X H. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and Gully Region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2): 31-35
- [46] 李卓, 冯浩, 吴普特, 等. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 204-208
LI Z, FENG H, WU P T, et al. Simulated experiment on effects of soil clay particle content on soil water holding capacity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3): 204-208
- [47] 苏丽曼, 陈建, 叶宏萌, 等. 南平市不同地势土壤含水率与土壤粒径分布的关系[J]. *北部湾大学学报*, 2024, 39(2): 80-84
SU L M, CHEN J, YE H M, et al. Relationship between soil moisture content and soil particle size distribution in different terrains of Nanping city[J]. *Journal of Beibu Gulf University*, 2024, 39(2): 80-84
- [48] 朱瑞东, 肖世兰, 张国. 喀斯特石漠化区不同植被恢复下土壤颗粒分形特征[J]. *江西农业大学学报*, 2024, 46(2): 516-529
ZHU R D, XIAO S L, ZHANG G. Fractal characteristics of soil particle under different vegetation cover restoration in Karst

- rocky desertification area[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(2):516-529
- [49] 王少博,曹亚倩,冯倩倩,等. 保护性耕作对棕壤粒径分形特征及碳氮比分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5):792-804
- WANG S B, CAO Y Q, FENG Q Q, et al. Impacts of conservation tillage on soil particulate composition and distribution of soil carbon and nitrogen in brown soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5):792-804
- [50] 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
- ZHAO W Z, LIU Z M, CHENG G D. Fractal dimension of soil particle for sand desertification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6):877-881
- [51] 孙龙,张光辉,王兵,等. 黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10):191-197
- SUN L, ZHANG G H, WANG B, et al. Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10):191-197
- [52] LIU X, ZHANG G C, 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
- [53] 刘云鹏,王国栋,张社奇,等. 陕西4种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(2):92-94
- LIU Y P, WANG G D, ZHANG S Q, et al. Fractal characteristics of particle-size distribution for four kinds of soil samples in Shaanxi[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31(2):92-94
- [54] 王晶,赵文武,刘月,等. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J]. *生态学报*, 2019(9):3355-3364
- WANG J, ZHAO W W, LIU Y, et al. Effects of plant functional traits on soil conservation: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019(9):3355-3364
- [55] GAO G L, DING G D, ZHAO Y Y, et al. Characterization of soil particle size distribution with a fractal model in the desertified regions of northern China[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(1):1-14
- [56] QI F, ZHANG R H, LIU X, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184:45-51
- [57] 贾重建,卢瑛,吴刚,等. 广东罗浮山土壤颗粒分形维数分布特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(5):1049-1055
- JIA C J, LU Y, WU G, et al. Fractal features of particle-size distribution of soil profiles in luofu mountain, Guangdong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(5):1049-1055
- [58] 缪驰远,汪亚峰,魏欣,等. 黑土表层土壤颗粒的分形特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(9):1987-1993
- MIAO C Y, WANG Y F, WEI X, et al. Fractal characteristics of soil particles in surface layer of black soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9):1987-1993
- [59] 南富森,李宗省,张小平,等. 黄河北岸兰州段荒漠-草原过渡带土壤粒径分形特征[J]. *地球科学*, 2023, 48(3):1195-1204
- NAN F S, LI Z X, ZHANG X P, et al. Particle size fractal characteristics of soils in desert-steppe transition zone along the northern bank of Yellow River Basin in Lanzhou[J]. *Earth Science*, 2023, 48(3):1195-1204
- [60] 陈桂香,高灯州,曾从盛,等. 福州市农田土壤养分空间变异特征[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(2):216-224
- CHEN G X, GAO D Z, ZENG C S, et al. Characteristics of the spatial variation of soil nutrients in farmland of Fuzhou City[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(2):216-224
- [61] 牧仁,朱亮,王丹阳,等. 乌兰布和沙漠不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分和粒径的变化特征[J]. *草地学报*, 2024, 32(3):818-826
- MU R, ZHU L, WANG D Y, et al. Variation characteristics of soil nutrient and grain size in sand pile of *Nitraria tangutorum* shrub at different succession stages in ulanbuhe desert[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3):818-826
- [62] 王月玲,许浩,安钰,等. 宁南黄土区典型人工林下土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J]. *北方园艺*, 2023(24):81-88
- WANG Y L, XU H, AN Y, et al. Relationship between fractal characteristics of soil particle size distribution and soil nutrients under typical plantations in loess region of southern Ningxia[J]. *Northern Horticulture*, 2023(24):81-88
- [63] 张穗粒,盛茂银,王霖娇,等. 西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(20):8476-8492
- ZHANG S L, SHENG M Y, WANG L J, et al. Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20):8476-8492
- [64] 阮长明,马绍东,王必海,等. 金沙江干热河谷不同区段植被恢复对水土保持特征的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(1):90-101
- RUAN C M, MA S D, WANG B H, et al. Effects of vegetation restoration on soil and water conservation characteristics in different zones of the Dry-Hot Valley of the Jinsha River[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1):90-101
- [65] 高连炜,张红丽,查同刚. 晋西黄土区不同植被恢复阶段土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1):30-38, 47
- GAO L W, ZHANG H L, ZHA T G. Ecological stoichiometric characteristics of soil in different vegetation restoration stages in loess region of western Shanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):30-38, 47
- [66] 李艳玲,宋阿琳,卢玉秋,等. 不同土壤玉米根际挥发性有机物组成和微生物群落特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10):1633-1645
- LI Y L, SONG A L, LU Y Q, et al. Volatile organic compound compositions and microbial community properties in maize rhizosphere among different soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10):1633-1645