

黄土丘陵区退耕坡面草地恢复与土壤物理性质空间分异特征

雷斯越, 郭晋伟, 何亮, 贺洁, 许小明, 吕渡, 张晓萍

(西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了解地形对草地恢复与土壤物理性质的影响以及草地恢复与土壤物理性质之间的影响机制, 因地制宜为当地生态恢复提供科学依据。选择吴起县枣庄沟小流域为研究区, 对退耕坡面不同坡位草地恢复与土壤物理性质分异特征进行研究。从峁顶到沟底设置 8 个采样位置, 在 4 面坡共布设 128 个采样点进行植被调查和土样采集, 将 0—40 cm 土壤分 0—10, 10—20, 20—40 cm 3 层进行土壤物理性质测定, 并分析其与植被分布的相关关系。结果表明: 不同坡位植被分布与土壤物理性质均表现出沟缘线以上的下坡位较优, 沟缘线以下的陡沟坡较差的趋势; 植被恢复对土壤团聚体有明显改善作用, 但对其与土壤物理性质的改善主要集中在 0—20 cm 表层土壤, 对 20—40 cm 土壤影响较弱; 坡度对植被盖度与土壤容重、孔隙度和饱和持水量影响显著且具有极显著相关性, 但对团聚体与颗粒组成无显著影响; 植被恢复对土壤颗粒组成改善效果缓慢, 若土壤颗粒组成被破坏, 短期内很难恢复。

关键词: 草地恢复; 土壤物理性质; 坡位; 黄土高原

中图分类号: S152.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)01-0251-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.036

Spatial Differentiation Characteristics of Grassland Restoration and Soil Physical Properties of Slope in Hilly-gully Region of Loess Plateau

LEI Siyue, GUO Jinwei, HE Liang, HE Jie, XU Xiaoming, LÜ Du, ZHANG Xiaoping

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to understand the effect of microtopography on vegetation restoration and soil physical properties, exploring the influence mechanism between grassland restoration and soil physical properties and to provide scientific basis for local ecological restoration. This study choose the Zaozhuanggou basin in Wuqi county as the study area, vegetation restoration and soil physical properties differentiation characteristics on the different landscape positions were studied. We chose 4 slopes and set eight sampling positions on every slope from top to bottom, a total of 128 sampling points of vegetation investigation and soil samples collected in this study. The soil was divided into three layers 0—10, 10—20 and 20—40 cm for sampling and determining soil physical properties, analyzed the correlation between vegetation distribution and soil physical properties. The results showed that the vegetation distribution and soil physical properties on different landscape positions showed the tendency of lower slope better than others above the groove line, and the bottom slope is worst. The vegetation restoration has improvement effect on soil aggregate, the improvement of soil aggregate and soil physical properties caused by vegetation restoration was mainly concentrated on the surface soil of 0—20 cm, and weak in the soil of 20—40 cm. Gradient has a significant impact on vegetation coverage, soil bulk density, porosity and saturated water capacity. But it has no significant effect on the soil aggregate and soil particle composition. The effect of vegetation restoration on improving soil particle composition is slow. If the soil particle composition is destroyed, it will be difficult to recover in the short term.

Keywords: grassland restoration; soil physical properties; slope positions; Loess Plateau

黄土高原自 1999 年实施退耕还林(草)政策以来, 植被覆盖度从 2000 年的 56%, 增加到 2017 年 76.8%^[1], 土壤侵蚀量大大减少, 30 万 km² 核心区 2000—2015 年间平均输沙模数降至 800 t/(km² ·

收稿日期: 2020-10-30
资助项目: 国家自然科学基金项目(41877083)
第一作者: 雷斯越(1994—), 女, 硕士, 主要从事水土保持生态恢复研究。E-mail: sylei094@163.com
通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 博士, 主要从事区域水土流失规律与水土保持等研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

a)^[2]。水土流失情况的显著改善与植被恢复有密切关系。Xu 等^[3]研究表明,地形对土壤侵蚀影响极大,而受地形作用影响最大的是植被,了解地形与植被间作用关系有助于了解土壤侵蚀的影响机制。

草地恢复是生态环境改善的重要表现,水热条件差异使得草地恢复程度不同,地形对水热条件进行重新分配。有研究^[4]表明,微地形对于土壤水分的空间分布影响极大,随着坡度降低,土壤水分空间异质性也有所降低。陡坡对降水后 2 周的土壤水分产生影响,而平台、下沉坑则会影响降水后 4 周的土壤水分含量^[5]。0—30 cm 土层土壤水分含量受坡向影响较大,30—60 cm 土层的土壤水分含量主要影响因子是坡度^[6]。地形不仅对土壤水分空间分布有较大影响,对植被群落、土壤养分也有显著影响^[7]。Yu 等^[8]研究表明,地形与植被类型对土壤有机质碳含量有显著影响,不同坡度、坡位的土壤有机质碳含量存在显著差异,地形因子对土壤有机质碳含量的相对贡献率高于植被类型。草地恢复时间越长,土壤理化性质受地形影响越明显^[9]。吴起县位于黄土高原腹地北洛河流域上游。已有研究^[10]表明,吴起县的植被覆盖率由 1995 年的 20.2%,提高到 2017 年的 50.4%。赵文慧^[11]研究表明,植被覆盖度随着坡度、坡向发生变化。坡度 $>35^\circ$ 植被覆盖度会显著降低,阴坡植被覆盖度优于阳坡。土壤侵蚀模数从 $11.27 \times 10^3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降到 $0.20 \times 10^3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,较 1997 年减少 82.05%,区域生态环境得到显著改善^[12]。赵文慧等^[13]、闫瑞^[12]虽然在区域尺度上分析了吴起县等地植被恢复在不同地形上的趋势,但在不同坡度、坡向等地形特征下,植被恢复如何影响土壤理化性质,还需要深入探讨。

本研究以吴起县枣庄沟小流域为研究区,选取不同坡位的自然恢复草地,对地表植被进行植被调查,并采集不同深度土壤对其物理性质以及团聚体进行测定,分析不同坡位草地恢复与土壤物理性质的分异特征,以期了解地形条件对草地恢复与土壤物理性质的影响,以及草地恢复与土壤物理性质之间的影响机制,为后期研究区域范围内环境对生态恢复的影响的定量模拟研究提供重要支撑,因地制宜,为当地生态恢复提供科学指导。

1 研究区概况

枣庄沟($108^\circ 16' 02''$ — $108^\circ 16' 29''\text{E}$, $36^\circ 59' 00''$ — $36^\circ 59' 49''\text{N}$,海拔 1 345~1 582 m)小流域位于陕西省延安市吴起县,地处黄土高原丘陵沟壑区,流域面积 1.59 km^2 。该区气候为温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 478.3 mm,降雨主要集中在夏季,且多暴雨,生态环境较脆弱。该区土壤质地为粉质壤土,地带性植被以草本和灌木为主,灌木以柠条(*Caragana Korshinskii*

Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)为主,草本植被以禾本科、菊科、豆科为主,如长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)等。该区土地利用类型主要为草地、灌木林地,小流域边缘有少数人工林,草地皆为坡耕地与梯田退耕后的自然恢复草地,退耕年限为 15~20 年。该区地形以梁峁居多,沟缘线以上坡度 $<35^\circ$,沟缘线以下均在 $40^\circ \sim 47^\circ$ 。

2 材料与方法

2.1 样点布设

通过 Google Earth 卫星影像,在枣庄沟小流域内选取阴坡、阳坡、半阴坡、半阳坡 4 个方向 150~200 m 范围内的 4 个坡长上完整的自然恢复草地,每个坡面上从山顶到沟缘线以下陡沟坡连续均匀布设 8 个采样位置,1~2,3~4,5~6 号采样位置分别代表上坡位、中坡位、下坡位,其中 1 号采样位置位于山顶,7,8 号在沟缘线以下的陡沟坡上,7 号位置临近沟缘线,坡度较其他位置起伏更大,8 号邻近沟底。每个采样位置设置 4 个平行,每个平行设置 2 组重复,共布设 128 个采样点。在采样点进行植被调查,并挖取 40 cm 的土壤剖面,在 0—10,10—20,20—40 cm 取环刀与团聚体以及散状土带回室内进行土壤物理性质分析。

2.2 植被调查与群落物种多样性分析

采用样方法,选择 1 m $\times$ 1 m 的样方在采样点进行植被调查并记录样点坡度、坡向、海拔、经纬度等信息,记录样方内植被的种类、名称、株高、株数、覆盖度、优势种,并在样方内选取长势均匀、具有代表性的 0.5 m $\times$ 0.5 m 的地表植被,对其进行剪取用以估算地上生物量。采样时间为 2018 年 9 月,并于 2018 年 11 月进行测定分析。

选取 α 多样性指数对地表植被物种多样性进行评价,主要指数为表征优势种在样方内的分布的 Simpson 指数(D),Simpson 指数越小则优势种越突出。表示物种丰富度的 Margalef 指数和代表全部物种在样方内分布状况的 Shannon-Wiener 指数(H)以及说明群落中物种相对密度的均匀度 Pielou 指数(J_{sw}),种间个体数量差异越小,群落的均匀度越高。各项指数具体计算公式为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (1)$$

$$D_{ma} = \frac{S-1}{\ln S} \quad (2)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$J_{sw} = \frac{- \sum P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (4)$$

$$P_i=\frac{N_i}{N}$$

(5)

式中: S 为样方内物种数目; N 为样方内所有物种的个体总数; N_i 表示样方中第 i 个物种的个体数。

2.3 土壤物理性质测定

土壤基本物理性质选取土壤容重、孔隙度、自然含水量、饱和持水量进行分析测定。土壤颗粒组成用分形维数 D 评价,水稳性团聚体选取平均重量直径 MWD 表征。

土壤容重、孔隙度与饱和持水量通过环刀法进行计算。用烘干法测定土壤自然含水量。使用 MS2000 激光粒度仪测定土壤颗粒组成,再将团聚体用干湿筛法测定其水稳性团聚体含量,并计算其平均重量直径(MWD,mm),计算公式为:

$$MWD=\sum_{i=1}^nX_iW_i$$

(6)

式中: X_i 为每一级组团聚体的平均直径(mm); W_i 为第 X_i 级团聚体重量百分数(%)。

2.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2013 对数据进行预处理,用

SPSS 18.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 LSD 显著性检验,用 Pearson 法对群落特征与土壤物理性质的相关性进行双变量相关性分析,并对其相关性进行显著性检验。采用 Origin 9.0 作图。

3 结果与分析

3.1 坡面地表植被分布及多样性分析

本研究通过对植被 α 多样性指数计算,分析地表植被生长状况及其在不同地形条件下的分布变化特征,见表 1 和表 2。表 1 对不同采样位置地表植被特征进行分析。结果显示,不同坡位间植被以长芒草为主要优势物种,上坡位到下坡位出现从铁杆蒿、茵陈蒿到阿尔泰狗娃花、糙隐子草的物种分布变化,沟缘线以下的陡沟坡以铁杆蒿、苦苣菜及星毛委陵菜等浅根系草本为主。6,8 号采样位置地上生物量显著高于其他采样位置。1,5,6 号采样位置植被覆盖度显著高于 4,7 号位置,4,7 号位置地上生物量与植被覆盖度均较低。不同坡位间地上生物量与植被覆盖度均表现出下坡位最优的趋势。

表 1 坡面不同采样位置地表植被特征

采样位置	优势种	地上生物量/ (g · m ⁻²)	植被 盖度 %
1	长芒草(<i>Stipa bungeana</i> Trin.)	87.07±20.12a	56.88a
2	长芒草(<i>Stipa bungeana</i> Trin.)、铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	149.38±50.95a	44.38ab
3	长芒草(<i>Stipa bungeana</i> Trin.)、铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	124.50±23.68a	37.50ab
4	长芒草(<i>Stipa bungeana</i> Trin.)、茵陈蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	95.56±16.78a	35.63b
5	长芒草(<i>Stipa bungeana</i> Trin.)、阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i> (Willd.) Novopokr.)	148.85±19.09ab	48.75a
6	长芒草(<i>Stipa bungeana</i> Trin.)、糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i> (Trin.) Keng)	236.45±97.36c	55.00a
7	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	106.07±56.93a	27.50b
8	苦苣菜(<i>Ixeris denticulata</i>)、星毛委陵菜(<i>Potentilla acaulis</i> L.)	201.81±28.85bc	47.50ab

注:表中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 坡面不同采样位置物种多样性特征

采样位置	Simpson 指数 D	Margalef 指数 H	Shannon-Wiener 指数 D_{ma}	Pielou 指数 J_{sw}
1	0.69	1.41	1.42	0.78
2	0.66	1.36	1.35	0.79
3	0.68	1.73	1.47	0.73
4	0.67	1.46	1.42	0.77
5	0.73	1.70	1.61	0.80
6	0.73	1.46	1.53	0.82
7	0.60	1.18	1.24	0.75
8	0.70	1.55	1.47	0.78

表 2 为不同采样位置地表植被物种 α 多样性指数分布特征,通过单因素方差检验得出不同坡位的各项多样性指数之间不存在显著差异,整体表现出下坡位>中坡位>上坡位>陡沟坡的趋势。由表 2 可知,5,6 号采样位置各项指数略优于其他位置,说明下坡位地表植被物种丰富,优势种竞争力较强,各物种生长状况良好。上坡位和中坡位各项指数相近,其物种

丰富度较下坡位略低,优势种在群落内竞争力较强,长势良好,但中坡位物种丰富度略优于上坡位。陡沟坡 8 号采样位置各指数均优于 7 号,7 号采样位置各项指数最低。

3.2 土壤物理性质

3.2.1 土壤基本物理性质 图 1 为不同采样位置 0—40 cm 土层土壤容重、孔隙度、自然含水量和饱和持水量。由图 1 可知,陡沟坡位置基本物理性质较沟缘线以上各坡位略优,沟缘线以上下坡位各项基本物理性质略优于其他坡位,其余坡位各项基本物理无明显变化趋势。不同采样位置间,7 号位置土壤容重、孔隙度、饱和持水量与 1,2,3,4,6 号位置均存在显著性差异,8 号位置与 1,4 号位置存在显著性差异。8 号位置的自然含水量显著高于其他 7 个采样位置。

0—40 cm 不同土层的孔隙度、自然含水量和饱和持水量均呈现出由表层土壤到深层依次减小的趋势,容重则为由表层到深层逐渐增加。0—10 cm 土

层基本物理性质较 10—20,20—40 cm 土层变化更大,10—20,20—40 cm 不同坡位土壤的基本物理性质变化趋势较一致。对土壤基本物理性质进行分析可得,0—10 cm 土壤容重、孔隙度和饱和持水量与 10—20,20—40 cm 均存在极显著差异,10—20 cm

土层与 20—40 cm 土层之间存在显著差异。0—10 cm 与 10—20 cm 土壤自然含水量虽无显著性差异,但 0—10 cm 与 20—40 cm 存在显著差异。说明植被恢复对土壤的物理性质的改善作用在 0—10 cm 表层土壤表现最明显。

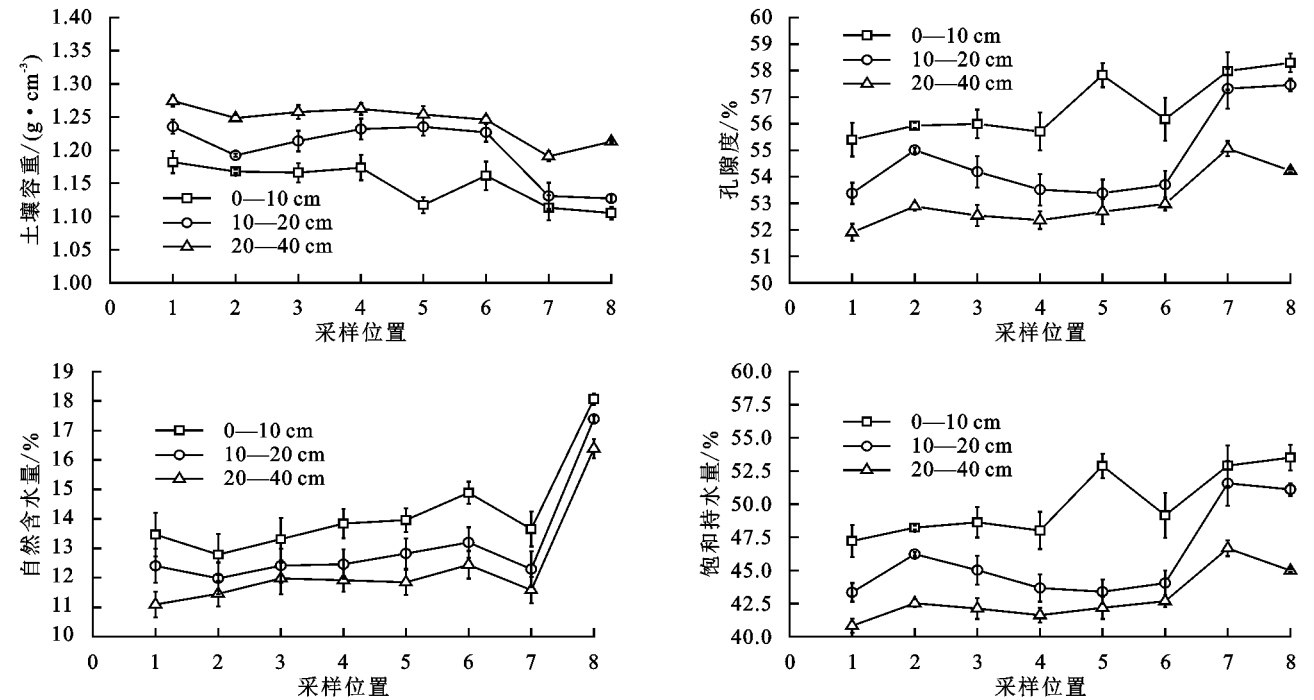


图 1 不同采样位置土壤容重、孔隙度、自然含水量和饱和持水量

3.2.2 土壤颗粒组成 表 3 是不同采样位置土壤颗粒组成及分形维数。由表 3 可知,8 号位置土壤颗粒组成最优,7 号位置最差,沟缘线以上 1 号位置颗粒组成较差,其他采样位置无明显差异。对其进行显著性分析可得,8 号位置黏粒、粉粒含量均为最高,砂粒含量最低,且其土壤颗粒组成显著优于其他所有位置。7 号位置黏粒含量显著低于其他采样位置,砂粒含量较高,与 3~6 号,8 号位置存在显著性差异,但与 1 号位置各土壤粒径百分比比较为接近。沟缘线以上 1 号位置黏粒、粉粒含量最低且黏粒含量显著低于 3 号位置,粉粒含量显著低于 3~6 号位置。10—20,20—40 cm 土层黏粒含量基本没有变化。沟缘线以上 3 号位置虽然与 2~5 号颗粒组成不存在显著性差异,但其黏粒、粉粒含量均为最高,砂粒含量最低。

分形维数是评价土壤颗粒组成的重要指标。图 2 为不同采样位置 0—40 cm 土层土壤颗粒组成分形维数,左轴为分形维数,右轴为各采样位置的坡度。由图 2 可知,不同采样位置间土壤颗粒组成的分形维数均在 2.52~2.72,8 号位置分形维数最大,且与其他坡位呈现出显著差异,7 号位置分形维数最小,但与 1~6 号位置无显著性差异,1~6 号位置土壤颗粒组成分形维数较为接近。1,2 号以及 6,7 号采样位置之间坡度表现出明显陡增,不同土层土壤颗粒组成分形维数均表

现出下降趋势。用单因素方差分析 0—40 cm 不同土层之间土壤颗粒组成分形维数发现,0—10,10—20,20—40 cm 土层之间均存在极显著差异,说明植被恢复对改善土壤颗粒组成有积极影响。

3.2.3 土壤水稳性团聚体 图 3 和图 4 为 0—10,10—20,20—40 cm 不同采样位置土壤团聚体组成及平均重量直径。由图 3 和图 4 可知,土壤水稳性团聚体组成中<0.25 mm 的团聚体含量最高,不同坡位及土层间团聚体组成变化主要集中在>5 mm 的团聚体数量上。在 0—20 cm 土层,土壤团聚体组成表现为下坡位>中坡位>上坡位>陡沟坡。0—10 cm 土层不同坡位间,下坡位土壤水稳性团聚体组成最优,MWD 值最大,显著高于其他坡位,陡沟坡位置水稳性团聚体组成较差,且 MWD 值与其他坡位均存在显著性差异。其中 6 号采样位置>5 mm 颗粒含量最高,MWD 值最大,为 1.46 mm。7 号位置最差,MWD 值仅为 0.73 mm。10—20 cm 土层 5,6 号采样位置土壤水稳性团聚体组成十分接近,MWD 值显著高于其他位置,5 号采样位置 MWD 值最大,为 1.18 mm。陡沟坡水稳性团聚体组成差于其他坡位,其 MWD 值与中坡位、下坡位均存在显著性差异,7 号位置水稳性团聚体组成仍为最差,MWD 值仅为 0.71 mm。20—40 cm 土层不同坡位水稳性团聚体组成较接近,MWD 值较稳定,各坡位之间虽

无显著性差异,但 8 号采样位置>5 mm 颗粒含量高于其他采样位置且 MWD 值最大,为 0.82 mm,1 号采样位置 MWD 值最小仅 0.51 mm。

表 3 不同采样位置土壤颗粒组成及分形维数

采样位置	土层深度/cm	土壤粒径百分比/%		
		黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (0.05~2 mm)
1	0—10	11.44a	53.56a	34.99a
	10—20	10.99a	53.92a	35.09a
	20—40	10.73a	53.42a	35.86a
	均值	11.05a	53.63a	35.31a
2	0—10	11.63ab	54.02ab	34.35ab
	10—20	11.57ab	54.08ab	34.36ab
	20—40	11.30ab	54.63ab	34.07ab
	均值	11.50ab	54.24ab	34.26ab
3	0—10	11.16b	54.06b	34.78b
	10—20	11.88b	55.44b	32.68b
	20—40	11.88b	55.41b	32.72b
	均值	11.64b	54.97b	33.39b
4	0—10	11.87b	54.86b	33.28b
	10—20	11.36ab	54.43b	34.21b
	20—40	11.17ab	55.07b	33.77b
	均值	11.46ab	54.78b	33.75b
5	0—10	11.76ab	54.50b	33.75b
	10—20	11.42ab	54.93b	33.65b
	20—40	11.23ab	55.19b	33.58b
	均值	11.47ab	54.87b	33.66b
6	0—10	11.07ab	54.59b	34.34b
	10—20	11.78ab	55.08b	33.14b
	20—40	11.42ab	55.07b	33.50b
	均值	11.43ab	54.91b	33.66b
7	0—10	10.55c	53.48b	35.96a
	10—20	10.21c	54.49b	35.30a
	20—40	10.37c	55.41b	34.21a
	均值	10.38c	54.46b	35.16a
8	0—10	11.35d	56.99c	31.66c
	10—20	12.59d	59.17c	28.24c
	20—40	12.85d	58.74c	28.41c
	均值	12.26d	58.30c	29.44c

注:同列不同小写字母表示相同土层不同采样位置间差异显著($P<0.05$)。

图 4 为不同采样位置 0—40 cm 土层土壤团聚体平均重量直径,右轴为各采样位置坡度。分析数据可得,0—10 cm 与 10—20 cm MWD 值较接近,不存在显著性差异,但二者皆与 20—40 cm 土层 MWD 值存在极

显著差异。0—20 cm 土层下坡位 MWD 值最大,并且较 20—40 cm 下坡位 MWD 值变化幅度也最大。而 0—40 cm 土层陡沟坡位置 7,8 号采样位置 MWD 值变化幅度很小,尤其是 8 号采样位置几乎没有变化。在 0—20 cm 土层,1,2 号采样位置与 6,7 号采样位置的 MWD 值均表现出下降趋势,尤其是 6,7 号位置之间。1,2 号位置与 6,7 号位置之间坡度也明显增加。

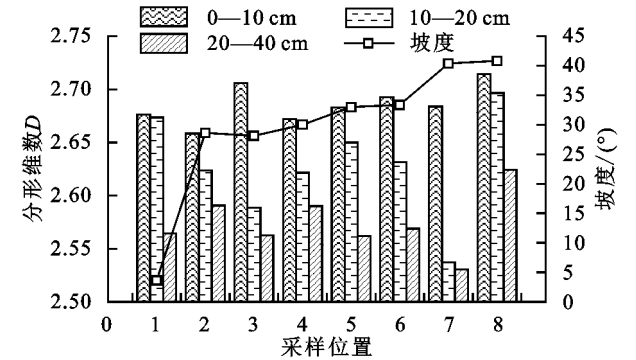


图 2 不同采样位置土壤颗粒组成分形维数

3.2.4 地表植被分布与土壤物理性质相关性分析
为研究地表植被分布与土壤物理性质之间的联系以及微地形对其产生的影响,对坡度、地表植被分布特征以及 α 多样性指数和 0—40 cm 土层土壤各项物理性质进行了 Pearson 相关性分析,分析结果见表 4。坡度与植被覆盖度呈显著负相关($P<0.05$),与容重、孔隙度和饱和持水量则呈现出极显著负相关($P<0.01$),说明随着坡度的增加,植被覆盖度降低,土壤孔性特征变差,持水能力减弱,地形的起伏变化对土壤物理性质以及植被恢复均存在显著的影响。地上生物量则与植被覆盖度呈极显著正相关。植被覆盖度与分形维数、平均重量直径表现出显著的相关性,相关系数分别为 0.399 和 0.416。说明植被覆盖度对土壤颗粒组成、水稳性团聚体产生正向影响,土壤颗粒组成的变化和水稳性团聚体的数量变化与地表植被恢复状况息息相关,土壤的黏粒含量与团聚体数量也在一定程度上反映了该地区植被的生长状况。如 8 号坡位土壤颗粒组成与团聚体改善幅度较小,说明该地区植被恢复进程较缓慢,对土壤的物理性质影响较弱。

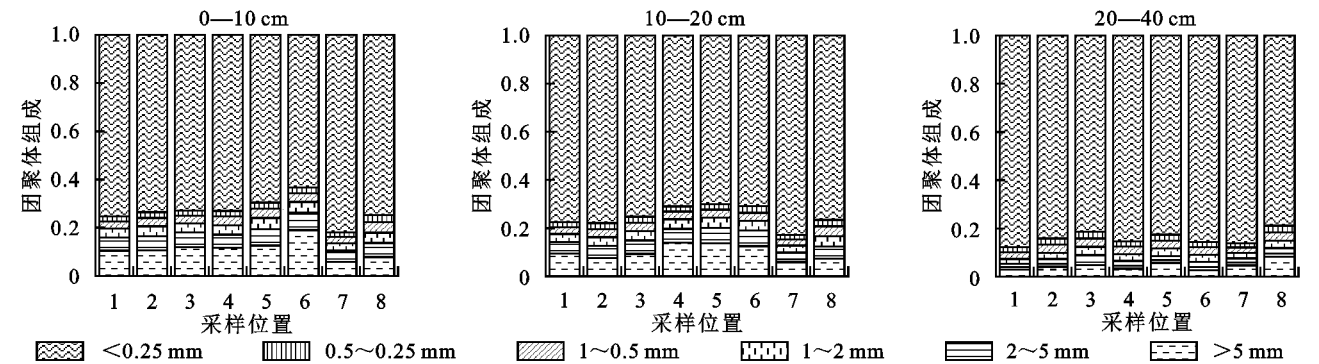


图 3 不同采样位置土壤团聚体组成

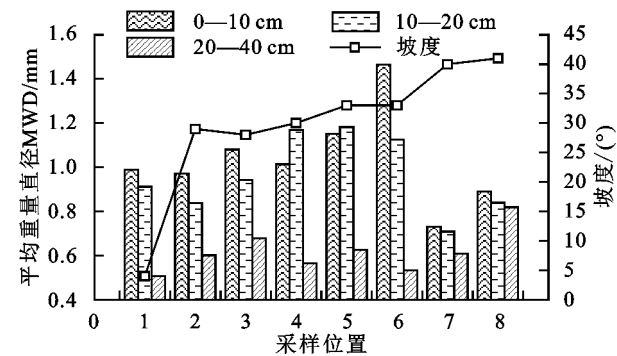


图 4 不同采样位置土壤团聚体平均重量直径

4 讨论

4.1 不同坡位植被生物量与覆盖度

从本研究结果可知,从崮顶到沟底无论是植被恢
复还是土壤物理性质皆表现出下坡位最优,陡沟坡最
差的趋势。分析认为,下坡位位置较低,水热条件较
好,且坡度起伏较小,为土壤水分养分汇集点,地表植
被物种丰富,生物量较大,分布较其他位置更优。上
坡位虽然地上生物量和覆盖度较高,但植被物种较单
一,以长芒草为主。王国梁等^[14]研究认为,长芒草、

白羊草根系发达,可以在土壤较薄、铁杆蒿等不适宜生
长的地方生长,且在群落内极具竞争力,是次生演替初
级阶段的代表性植物。研究认为上坡位虽然坡度平缓,
光照充足,但由于侵蚀严重,环境恶劣,土壤贫瘠导致水
分保持困难、多数植被无法生长,造成上坡位植被种类
单一。陡沟坡 7 号采样位置临近沟缘线,坡度陡峭,且
与相邻采样位置坡度变化大,土壤颗粒及养分易流失,
团聚体较少,造成该位置土壤贫瘠;又由于位于沟缘线
以下,光照水平较其他位置更差,整体植被生长环境较
差,许多植物无法在此生长,因而物种单一,植被覆盖度
低。而 8 号采样位置虽然同在沟缘线以下,坡度较大,
但与相邻位置坡度变化幅度较小,且临近沟底,植被
生长环境无人干扰,位置低洼,可富集部分水分养分,
利于植被生长,故其地上生物量及覆盖度优于 7 号采
样位置及中坡位,地表植被也出现一些除禾本科以及
蒿类外的浅根系草本植物,这与赵成章等^[15]研究结果
一致。本研究中部分坡位地上生物量标准差较大,分
析认为是由于采样时间为 9 月,部分作物已枯萎凋落,
对群落地上生物量影响较为明显。

表 4 地表植被分布与 0—40 cm 土壤物理性质相关性

变量	坡度	地上 生物量	植被 盖度	Simpson 指数 S	Maralef 指数 H	Shannon-Wiener 指数 Dma	Pielou 指数 Jsw	容重	孔隙度	自然 含水量	饱和 持水量	分形 维数	平均重量 直径
坡度	1.00												
地上生物量	0.12	1.00											
植被盖度	-0.39 *	0.50 **	1.00										
Simpson 指数 S	-0.08	-0.15	0.16	1.00									
Maralef 指数 H	-0.05	-0.16	0.25	0.61 **	1.00								
Shannon-Wiener 指数 Dma	-0.07	-0.18	0.18	0.95 **	0.80 **	1.00							
Pielou 指数 Jsw	-0.01	-0.20	-0.10	0.65 **	-0.06	0.46 **	1.00						
容重	-0.49 **	-0.00	0.11	0.03	-0.26	-0.02	0.09	1.00					
孔隙度	-0.49 **	0.02	-0.11	-0.05	0.25	0.00	-0.10	-1.00 **	1.00				
自然含水量	0.15	0.20	0.05	0.21	0.05	0.17	0.21	0.07	-0.05	1.00			
饱和持水量	0.50 **	-0.01	-0.14	-0.06	0.22	-0.02	-0.08	-0.99 **	1.00 **	-0.06	1.00		
分形维数	-0.09	0.09	0.40 *	-0.09	0.05	-0.06	-0.15	-0.07	0.08	-0.14	0.05	1.00	
平均重量直径	0.12	0.17	0.42 *	0.02	0.22	0.08	-0.24	-0.03	0.03	-0.03	0.03	0.08	1.00

注: * 表示相关性在 $P<0.05$ 上显著相关; ** 表示相关性在 $P<0.01$ 上极显著相关。

4.2 不同坡位土壤物理性质

本研究分析了坡度与植被恢复、土壤物理性质的
相关性,结果表明,坡度与植被覆盖度、容重、孔隙度
以及饱和持水量均存在显著、极显著的相关性。说明
坡位通过坡度等因素对草地恢复以及土壤性质产生
影响。黄平等^[16]研究表明,土壤有机质含量高低主
要受坡度影响,土壤有机质含量高的区域大多分布于
15°~35°范围。本研究 7 号采样位置无论是草地恢
复程度还是土壤性质均差于其他位置,而 8 号采样位
置虽位于沟底,却植被覆盖度、地上生物量以及基本
物理性质较好,造成其差异的主要原因也在于 7、8 号
位置虽然坡度陡峭,但 7 号位置坡度变化剧烈,而 8
号位置地形并无明显起伏。由此可见,地形变化对植
被生长以及土壤理化性质影响十分明显。朱志诚

等^[17]研究表明,在黄土高原草地群落中,各群落地上
生物量季节变化明显,其生物量的增长速度 and 高峰出
现与水热条件变化呈正相关,在此过程中水热条件的
综合作用起主导作用。已有研究^[18]表明,土壤含水
量剧烈变化时的土层深度以及土壤含水量上下趋于
稳定时的土层深度,均与植被演替有关。所以除坡度
外,水热条件以及土壤养分含量对草地群落植被恢复
有极大影响。而地表植被恢复对土壤颗粒组成以及
水稳性团聚体数量、稳定性都有积极且显著的影响,
使得土壤养分含量、地表植被恢复与土壤团粒结构相
互影响相互作用,相辅相成。1 号位置虽然地上生物
量与植被覆盖度较高,但其土壤物理性质以及团粒结
构较差,说明崮顶虽然植被覆盖度较高,土壤作为植
被生长的根本动力,其孔性特征、团粒结构较差,无法

为植被恢复提供充足的条件与良好的生长环境,使得崮顶植被恢复只是表象,无法根本改善土壤性质,形成良性循环,这与魏天兴等^[19]研究结果一致。本研究调查得到崮顶草地群落以长芒草为主,群落内物种类型单一,仅长芒草生长茂密,说明该群落尚处在次生演替的初级阶段,也证明该位置土壤条件较差,无法供更多种类植被生长。

4.3 不同深度土壤理化性质

本研究发现,0—20 cm 土层土壤物理性质均得到改善,但在 20—40 cm 受到植被恢复的影响甚微,在 20—40 cm 处,各坡位土壤物理性质多表现出差于陡沟坡位置的趋势,尤其是与 8 号位置相比。分析认为是由于沟坡位置虽然坡度陡峭,但临近沟底人迹罕至,受人为干扰破坏与土壤侵蚀较少,且采样草地均为退耕后自然恢复的草地,在早年耕作期间,耕作管理对土壤的各项性质影响较大,所以反而陡沟坡各基本物理性质较沟缘线以上各坡位略好。Li 等^[20]对黄土高原中部半干旱地区 150 年的弃耕地按年代顺序进行研究,土壤物理性质与弃耕年限和植被恢复阶段密切相关。表层 0—20 cm 土壤容重随时间的增加而显著降低,土壤孔隙度、持水能力、团聚体稳定性、饱和水导率显著增大。在弃耕初期(14 年),由于土壤有机质含量的显著增加,这些变化相对较快,但 20—40 cm 土层的土壤物理性质改善相对缓慢。且诸多研究^[21-22]表明,退耕还林后植被恢复对土壤理化性质的改善主要集中在 0—30 cm 表层土壤中,退耕 30 年的草地土壤有机质含量才能恢复到退耕前的水平,说明土壤侵蚀以及人为活动影响对土壤物理性质和团粒结构的破坏是剧烈的,需要数十年的时间来恢复。李裕元等^[23]对黄土高原水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响进行研究,发现植被恢复可以降低土壤容重,增加土壤总孔隙度、饱和导水率以及团聚体稳定性,改善土壤物理性质,但在短期内(<30 年)植被恢复对土壤颗粒组成并无显著影响,说明土壤一旦出现沙化将很难逆转。植被恢复也需要很漫长的过程才能对土壤物理性质有所改善。

由图 2 可知,0—10 cm 土壤颗粒分形维数从崮顶到沟底变化幅度较其他 2 层减小,10—20 cm 土层各坡位分形维数变化幅度最大,研究认为是植被恢复使得 0—10 cm 土壤的颗粒组成得到改善。10—20 cm 土层各采样位置分形维数波动强烈,较 20—40 cm 土层 1,5,6,8 号位置分形维数改善幅度较大,说明该位置植被恢复较好,对下层土壤影响较明显,这与地表覆盖度变化特征相符。本研究中,不同土层土壤颗粒组成的分形维数之间虽表现出显著性差异,但其土壤颗粒组成百分比之间却无明显差异。说明植被恢复对于土壤颗粒组成有改善作用,但其实际改善作用在短期内并不明显,这与李裕元等^[23]的研究结果相同。土壤颗粒组成的分形维数

的差异性较土壤颗粒组成百分比更为明显,说明土壤颗粒组成分形维数可以作为评价土壤颗粒组成的敏感指标,这与 Zhao 等^[24]研究结果一致。

4.4 植被覆盖度与土壤理化性质关系

本研究结果表明,土壤团聚体平均重量直径与植被覆盖度呈极显著正相关,这说明随着植被恢复程度提高,大团聚体数量增加,土壤团聚体组成更加合理,稳定性增加。这与吕渡等^[25]研究结果一致。Dou 等^[26]研究了不同植被恢复类型对土壤团聚体稳定性和土壤侵蚀性的影响表明,在 7 种植被恢复措施下,<0.25 mm 团聚体为主要组成部分(40.40%~77.86%),>5 mm 团聚体比例波动较大,在 1.87%~32.50%。本研究中,0—20 cm 土层下坡位土壤团聚体组成以及 MWD 值均为最优,沟坡最差,尤其是 7 号采样位置,植被恢复最差,群落结构简单,所以土壤团聚体平均重量直径也显著差于其他位置,这与植被分布结果相吻合;且 0—20 cm 土壤团聚体 MWD 值与 20—40 cm 存在极显著差异,说明植被恢复对土壤水稳性团聚体的改善主要作用于 0—20 cm 土层,在 20—40 cm 土层影响较弱,分析认为研究对象为草地,植物根系较浅,对于土壤的改善作用只能维持在表层,这也表明植被恢复对土壤团粒结构的影响十分显著。20—40 cm 土壤团聚体 MWD 值表现为陡沟坡位置最优,上坡位最差,分析认为由于早期沟缘线以上由于耕作放牧等人为干扰破坏以及土壤侵蚀严重,导致沟缘线以上各坡位土壤颗粒破碎,团粒结构差,水稳性团聚体含量较低,甚至劣于陡沟坡。说明人为破坏与土壤侵蚀对土壤团粒结构的破坏十分严重。同时也说明人为干扰破坏对土壤性质的影响较地形所产生的影响更大。8 号采样位置虽然各项土壤物理性质较好,但其在 0—40 cm 土层土壤团聚体 MWD 值均较为接近,无明显改善,说明陡沟坡位置土壤水稳性团聚体改善较慢,分析认为陡沟坡位置虽然人迹罕至,人为破坏少,侵蚀程度较上坡位轻,但坡度陡峭,光照不足,土壤养分积累不足,植被恢复速度慢,物种种类较单一,根系较浅,对土壤水稳性团聚体改善作用较弱。土壤团聚体的改善除了受植被影响外,还受土壤养分影响较大。已有研究^[8]表明,土壤有机质碳含量增加对团聚体数量也有显著影响,而植被类型与地形、土层深度的交互作用对土壤有机碳有显著影响。在整个土壤剖面中,地形因子对土壤有机碳含量的相对贡献大于植被类型。地形是控制小流域 SOC 空间分布的主导因素。0—20 cm 土层 2,7 号位置 MWD 值均呈下降趋势,是由于 1~2 号采样位置与 6~7 号位置之间坡度变化幅度较大,土层较其他坡位更薄,且不利于水分、养分积累,导致植被生长环境较差,不利于植被恢复,从而使得该坡位水稳性团聚体组成较差,其土壤颗粒组成也较差。

5 结论

(1)地形对植被生长分布以及土壤基本物理性质有显著影响,坡度与植被覆盖度之间存在显著相关性,与土壤容重、孔隙度、饱和持水量存在极显著相关性。地形对草地恢复的影响由微观到宏观,十分深远,研究地形对草地恢复的影响具有重要意义。

(2)下坡位坡度变化不大,利于水分养分的富集,植被恢复与土壤水稳性团聚体均表现出下坡位>中坡位>上坡位>陡沟坡的趋势。

(3)植被恢复对土壤物理性质的改善主要集中在 0—20 cm 土层,0—10 cm 土层改善最明显。这可能与植物根系的作用密切相关。

(4)地形对土壤颗粒组成并无较大影响,植被恢复对土壤颗粒组成虽然有改善作用,但实际改善效果十分缓慢,短期内并不明显。人为干扰与土壤侵蚀对土壤颗粒组成的破坏难以挽回。

参考文献:

- [1] Yang X H, Zhang X P, Lv D, et al. Remote sensing estimation of the soil erosion cover-management factor for China's Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(15): 1942-1955.
- [2] 刘宝元,唐克丽,焦菊英,等. 黄河水沙时空图谱 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2019: 618-619.
- [3] Xu E Q, Zhang H Q. Change pathway and intersection of rainfall, soil, and land use influencing water-related soil erosion [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: e106281.
- [4] Yang Y, Dou Y X, Liu D, et al. Spatial pattern and heterogeneity of soil moisture along a transect in a small catchment on the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 466-477.
- [5] Ma H, Zhu Q K, Zhao W J. Soil water response to precipitation in different micro-topographies on the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(1): 245-256.
- [6] Bi H J, Zhang J J, Zhu J Z, et al. Spatial dynamics of soil moisture in a complex terrain in the semi-arid Loess Plateau Region, China [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1121-1131.
- [7] 王子婷,杨磊,李广,等. 半干旱黄土区苜蓿退化对坡面草本植物分布及多样性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3720-3729.
- [8] Yu H Y, Zha T G, Zhang X X, et al. Spatial distribution of soil organic carbon may be predominantly regulated by topography in a small revegetated watershed [J]. *Catena*, 2020, 188: e104459.
- [9] Liu Y, Zhang L P, Lu J K, et al. Topography affects the soil conditions and bacterial communities along a restoration gradient on Loess-Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 150(C): e103471.
- [10] 闫瑞,张晓萍,闫胜军,等. 1995—2014 年北洛河流域植被恢复的地形分布特征[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(11): 1598-1603.
- [11] 赵文慧. 黄土高原典型流域的植被特征及土壤养分响应的空间差异[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [12] 闫瑞. 黄土高原北洛河上游流域退耕还林草的水文响应模拟[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [13] 赵文慧,陈妮,闫瑞,等. 近 20 年来北洛河流域植被覆盖度随地形因子变化特征探究[J]. *水土保持研究*, 2016, 20(4): 10-14.
- [14] 王国梁,刘国彬,侯喜禄. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究[J]. *山地学报*, 2002, 20(2): 182-187.
- [15] 赵成章,石福习,董小刚,等. 祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化[J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 115-122.
- [16] 黄平,李廷轩,张佳宝,等. 坡度和坡向对低山茶园土壤有机质空间变异的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(2): 264-268.
- [17] 朱志诚,贾东林,岳明. 黄土高原中部草地群落初级生产[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 1998, 28(6): 536-539.
- [18] Guillod B P, Orlowsky B, Miralles D G, et al. Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: DOI:10.1038/ncomms7443.
- [19] 魏天兴,赵健,朱文德,等. 退耕还林区水土保持植被恢复及物种多样性特征[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(1): 1-6.
- [20] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 64(1): 77-96.
- [21] Deng L, Wang K B, Tang Z S, et al. Soil organic carbon dynamics following natural vegetation restoration: Evidence from stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 221: 235-244.
- [22] Deng L, Shanguan Z P, Sweeney S. Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China [J]. *PLoS one*, 2013, 8(8): e71923.
- [23] 李裕元,邵明安,陈洪松,等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [24] Zhao D, Xu M X, Liu G B, et al. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 242: 1-8.
- [25] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等. 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [26] Dou Y X, Yang Y, An S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020, 185: e104294.