

黄土丘陵区森林草原带坡沟系统不同坡位植物群落的数量特征

杜华栋^{1,2,3}, 车旭曦¹, 孙浩¹, 聂文杰^{1,2}

(1.西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2.西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054; 3.陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 定量分析和探究黄土高原不同坡位自然条件下植物群落数量学特征及其影响因子, 为该地区坡沟系统植物群落构建机制的理论研究和人工恢复植物群落设计的实践指导提供科学参考。[方法] 本文在阐明黄土丘陵区森林草原带自然条件下阳沟坡、阳峁坡、峁顶、阴峁坡和阴沟坡 5 个坡位植物群落组成、多样性、稳定性和优势植物分布格局的基础上, 构建环境因子、土壤侵蚀强度与植物多样性、稳定性的结构方程模型, 探究不同坡位影响植物群落构建的主要生态因子。[结果] ①黄土丘陵区森林草原带阳沟坡和阳峁坡垂直结构均为 2 层构成, 以多年生草本和灌木为主, 优势植物分布格局呈分散分布; 峁顶垂直结构 1 层, 以一年生和多年生草本为主, 植物主要呈高强度聚集分布; 阴沟坡群落垂直结构 3 层, 植物呈聚集分布。②阴沟坡物种多样性、丰富度和稳定性最高, 阳峁坡的丰富度和多样性最低且其较阴沟坡分别显著下降了 18.4% 和 26.5%, 峁顶植物群落稳定性最小, 仅 29。③影响不同坡位群落特征的共同关键因子是土壤侵蚀强度和土壤水分, 而阳沟坡的土壤容重、阳峁坡和阴峁坡的有机质、峁顶和阴沟坡的光照强度分别为各坡位影响植物群落结构、稳定性和多样性的差异化生态因子。[结论] 黄土丘陵区森林草原带不同坡位应制定不同的植被恢复措施。阳沟坡利用多年生灌木形成的“肥岛”效应改善地表环境; 阳峁坡通过微地形改造减小土壤侵蚀; 峁顶通过添加耐旱性较高的植物改善植物群落结构; 阴峁坡和阴沟坡不过分要求复杂的植物群落结构, 以免造成人工林林下因光照不足而使得草本层退化。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 坡沟系统; 土壤侵蚀; 植物群落构建

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0184-10

中图分类号: Q948, S157.1

文献参数: 杜华栋, 车旭曦, 孙浩, 等. 黄土丘陵区森林草原带坡沟系统不同坡位植物群落的数量特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 184-193. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.020; Du Huadong, Che Xuxi, Sun Hao, et al. Quantitative characteristics of plant communities at different slope positions in slope-gully system on forest-steppe ecotone of loess hilly-gully region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 184-193.

Quantitative Characteristics of Plant Communities at Different Slope Positions in Slope-Gully System on Forest-Steppe Ecotone of Loess Hilly-Gully Region

Du Huadong^{1,2,3}, Che Xuxi¹, Sun Hao¹, Nie Wenjie^{1,2}

(1.College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2.Western Mine Ecological Environment Restoration Research Institute, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Guarantee Support for Coal Green Development, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] The quantitative characteristics of plant communities and their influencing factors under different slope positions in the Loess Plateau were investigated, so as to provide a scientific reference for the theoretical understanding of plant community construction mechanisms within the slope-gully system

收稿日期: 2024-04-24

修回日期: 2024-09-02

资助项目: 陕西省自然科学基金研究计划“半干旱采煤塌陷地光伏电站建设的生态修复效益评价”(2024JC-YBMS-234); 西安科技大学博士启动基金“黄河‘几字弯’光伏电站对植被—土壤系统耦合协调性影响机制”(8150124007)

第一作者: 杜华栋(1982—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 副教授, 主要从事矿山生态修复及生态效益评价方面的研究。Email: dddhhh-ddd@126.com, 15829729723。

and for the practical guidance on the design of artificially plant communities restoration. [Methods] The study examines the composition, diversity, stability, and distribution patterns of dominant plants across five slope positions-sunny gully, sunny hill, hilltop, shady hill, and shady gully-within the forest-steppe zone of the loess hilly region under natural conditions. The structural equation model of environmental factors, soil erosion intensity, and plant diversity and stability was constructed to explore the main ecological factors affecting the construction of plant communities in different slope positions. [Results] ① In the forest-steppe zone of the loess hilly region, the sunny gully and sunny hill slopes exhibit a two-layer vertical structure predominantly composed of perennial herbs and shrubs, with dominant plants showing a dispersed distribution pattern. The hilltop had a single-layer vertical structure, mainly comprising annual and perennial herbs, where plants demonstrate a highly clustered distribution. The shady gully slope community had a three-layer vertical structure, with plants also showing a clustered distribution pattern. ② The shady gully slope had the highest species diversity, richness, and stability, whereas the sunny hill slope exhibited the lowest richness and diversity, with significant reductions of 18.4% and 26.5%, respectively, compared to the shady gully slope. The hilltop plant community showed the least stability, with an index of only 29. ③ The common key factors influencing community characteristics across different slope positions were soil erosion intensity and soil moisture. However, soil bulk density on the sunny gully slope, organic matter on the sunny and shady hill slopes, and light intensity on the hilltop and shady gully slope were the distinguishing ecological factors affecting plant community structure, stability, and diversity. [Conclusion] Vegetation restoration strategies should be tailored to the specific slope positions in the forest-steppe zone of the loess hilly region. The “fertile island” effect formed by perennial shrubs on the sunny gully slope could improve surface conditions, while micro-topographic modifications on the sunny hill slope could reduce soil erosion. On the hilltop, the introduction of drought-tolerant plants could enhance plant community structure. The shady hill and gully slopes do not require the construction of an excessively complex plant community structure, so as not to cause the degradation of the herbaceous layer under the artificial forest owing to insufficient light.

Keywords: loess hilly region; slope channel system; soil erosion; plant community construction

黄土高原丘陵沟壑区严重的土壤侵蚀形成了梁峁起伏、千沟万壑的侵蚀地貌类型^[1],造成了地表温度、光照强度、土壤水分养分和侵蚀强度空间的异质性,因此地形起伏是控制黄土高原植被分布和组成的主要非地带性因子^[2]。

首先地形因子通过影响太阳辐射、降雨分配和热量传递等气象因子,进而在不同坡位形成了土壤养分及水分空间分异^[3],由此控制了自然条件下植物群落分布和群落结构,如在半干旱的黄土高原地区阴坡光照辐射强度小,土壤蒸发强度小使得水分条件较好^[4],因此阴坡植物群落覆盖度、均匀度和多样性相对阳坡较高,而阳坡由于光照强度大、土壤水分低导致植物幼苗定殖困难^[5],因此植物分布常呈现以多年生草本和灌木构成的斑块状分布。除去光照和水分条件外,黄土高原不同坡位土壤侵蚀强度不同^[6],常表现为下坡位土壤侵蚀强度较大而坡面中上部较小^[7],这种土壤侵蚀的分异性不但使得土壤水分、养分等生境条件的差异影响植物存活与建植^[8],而且土壤侵蚀也干扰了植物根系发育、幼苗成长等过程,使

得植物群落初级生产力发生改变^[9],同时对植物种子等繁殖体的存活、流失、迁移和扩散造成影响^[10]。土壤侵蚀对植物繁殖、建植和发育过程的干扰,进而引起植物群落结构改变^[11],如土壤侵蚀强度较高的坡面,虽然幼苗密度在坡面上部要显著大于坡面中、下部,但土壤侵蚀造成的恶劣生境致使幼苗发育受限^[12],土壤侵蚀强烈坡面植物群落物种丰富度和均匀度减小、各物种的生态位宽度差异性增加^[13]。但黄土高原丘陵区土壤侵蚀引起坡面尺度的土地贫瘠和干旱对植被组成及空间分布格局的影响及其机理仍然有待进一步深入研究^[14]。如多数研究发现植物多样性与立地资源可利用性呈显著正相关,但也有研究发现资源可利用性的增加并未引起植物群落多样性指数的增加^[15]。黄土高原侵蚀形成的坡沟系统,不同坡位具有异质性的地形特征、土壤性质和微气候因子,形成不同植被群落类型。但目前黄土高原坡沟系统不同坡位植物群落结构、分布格局和稳定性的空间异质性还有待进一步深入研究。同时影响不同坡位植物群落特征的主要生态因子仍不明晰。这些问题的探究,不但从理论上可回答黄土高原微地形局域

范围内植物群落的形成与维持机制,亦可对黄土高原依据地形差异进行精准的植被恢复措施的制定具有重要意义。

因此本文首先通过对比分析黄土丘陵区森林草原带坡沟系统不同坡位自然条件下植物群落的物种组成、群落数量特征和优势物种分布特征,再结合土壤和微气象因子监测结果,阐明影响不同坡位引起植物群落特征差异的主要因子,探究不同坡位植物群落的形成与维持机制,以期为黄土高原植被建设与质量优化提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选择典型黄土丘陵区延河流域森林草原带纸坊沟、陈家峁和张家河小流域(36°52′—37°05′N, 109°08′—109°22′E)(图 1),海拔高程为 1 200~1 300 m;气候区划上属暖温带、半湿润气候向温带、半干旱气候过渡的区域;年均气温约 8.8℃,年≥10℃

积温 3 113.9℃,无霜期 157~194 d;年平均降水量为 540 mm 左右,7—9 月平均降雨量占年降雨量的 61.1%,且多为暴雨,是造成该流域水土流失的主要原因;区内土壤大部分为黄绵土样地基本概况如表 1 所示。

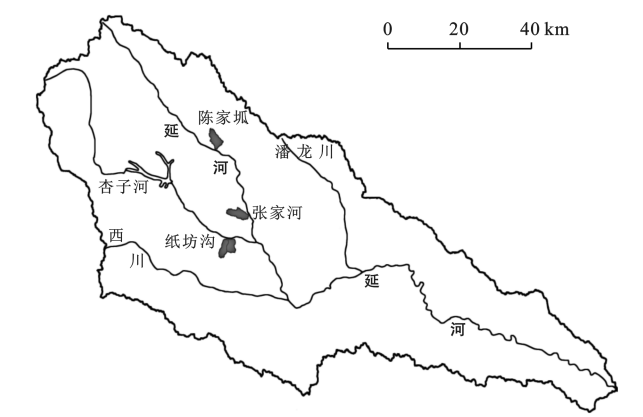


图 1 研究选取小流域在延河流域的位置
Fig.1 Location of selected small watershed in Yanhe River basin

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic overview of sample plots

项 目	阳沟坡	阳峁坡	峁 顶	阴峁坡	阴沟坡
坡度/(°)	29~48	21~35	5~14	18~28	18~35
海拔/m	1 179	1 212	1 268	1 221	1 188
土壤含水量/(0—60 cm,%)	10.55	10.28	9.43	10.63	11.54
退耕年限/a	荒坡	25	25	35	荒坡
植被盖度/%	20	35	26	42	84
光照强度/lx	70 347	73 214	79 400	68 432	58 164
pH 值	8.44±0.14 ^a	8.46±0.14 ^a	8.4±0.14 ^a	8.21±0.12 ^a	8.39±0.06 ^a
土壤主要侵蚀方式	浅沟、重力	细沟、浅沟	溅蚀	鳞片、细沟	细沟、浅沟
土壤侵蚀强度 ^[21] /(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	5 926.54	5 219.31	1 185.86	3 710.95	3 250.91
有机质/(g·kg ⁻¹)	5.15±0.13 ^a	5.48±0.18 ^a	6.21±0.64 ^a	6.76±0.54 ^a	8.43±0.48 ^a
土壤养分 (0—20 cm)	全氮/(g·kg ⁻¹)	0.52±0.04 ^{ab}	0.41±0.04 ^a	0.52±0.05 ^{ab}	0.61±0.07 ^b
	有效氮/(mg·kg ⁻¹)	7.52±0.89 ^a	7.78±0.78 ^a	8.84±0.79 ^a	10.20±0.89 ^a
	全磷/(g·kg ⁻¹)	0.54±0.03 ^a	0.55±0.05 ^a	0.58±0.06 ^a	0.56±0.02 ^a

注:pH 值及土壤养分数据为 Mean±SD;不同小写字母表示不同坡位间因子差异显著($p<0.05$),下同。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 以 3 个小流域自然恢复 25 a 以上坡面植物群落为研究对象,依据黄土丘陵沟壑区坡沟侵蚀类型和植被构成的不同,将坡沟系统划分为 5 个坡位,分别为阳沟坡、阳峁坡、峁顶、阴沟坡和阴峁坡(图 2)。每个小流域内每种坡位有 5 个样地重复,共调查 73 个样地(2 个阴峁坡断面由于坡度陡峭未能调查),每个样地设立 3 个样方重复。

1.2.2 植物群落调查及数量学特征计算

(1) 植物群落调查。调查样方大小草本为 2 m×2 m,灌木为 5 m×5 m。调查每个样方内出现

的物种及其数量、冠幅、盖度、高度和样方植被总盖度。

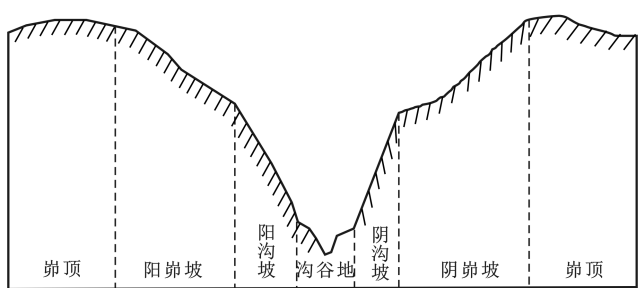


图 2 样地坡位示意图
Fig.2 Slope position diagram of sample plots

(2) 植物群落组成特征。在对样地物种进行调查与鉴定的基础上,依据 Kleyer M.等^[16]植物特性综述,将调查植物按其生长型划分为一年生草本植物、一二年生草本植物、多年生草本植物、小灌木、半灌木、大灌木、乔木、藤本植物,计算不同立地环境下不同生长型植物占群落物种总数比例。

(3) 植物群落多样性特征。选择以下指标来衡量群落物种多样性:群落丰富度指数(Margalef 指数)、群落多样性指数(Shannon-Wiener 指数)、群落均匀度指数(Pielou 指数),同时计算不同物种在群落的重要值。

物种重要值按以下公式计算^[17]:

$$\text{乔灌木: } IV = \frac{\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度}}{3} \quad (1)$$

$$\text{草本: } IV = \frac{\text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度}}{3} \quad (2)$$

植物 Margalef 丰富度指数,Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数计算公式为^[18]:

Margalef 丰富度指数(R)

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(E)

$$E = H / \ln S \quad (4)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H)

$$H = -\sum (P_i \ln P_i) \quad (5)$$

式中: S 为各样方物种数; N 为样方物种总个数; N_i 为 i 物种样方总个数; P_i 为第 i 个物种数占所在样方全部物种个数的比例。

(4) 植物群落稳定性特征。采用 Godron M.的植物群落稳定性的计算方法衡量不同坡位植物群落稳定性变化特征^[19],以群落物种累计倒数百分比和累积相对频度分别作为 x 轴与 y 轴,用方程($y = ax^2 + bx + c$)拟合,制作平滑曲线链接的散点图,使其与 $y = 100 - x$ 相交,交点坐标与点(20,80)的距离称为欧式距离,该距离越小说明植物群落越稳定,越大则越不稳定。

(5) 植物群落分布格局特征。为进一步从理论上探究不同坡位植物群落分布格局特征,为黄土高原植被恢复过程中植物群落结构设计提供理论依据。研究了种群在空间尺度上的分布格局。首先采用在 Poisson 分布的预期假设之上建立方差均值比率法,一个 Poisson 分布的总体性质有方差 V 和均值 m 相等的特征,即如果 $V/m = 1$,则种群呈随机分布;如果 $V/m > 1$,则偏离 Poisson 分布,呈聚集分布;反之 $V/m < 1$ 时,则呈均匀分布^[20]。 V 和计算公式为:

$$V = \sum_{i=1}^N (X_i - m)^2 / (N - 1) \quad (6)$$

$$m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N X_i \quad (7)$$

1.2.3 影响植物群落的土壤及光照因子监测 在植被调查的同时取样地内土壤样品测定土壤理化指标,用以分析不同立地环境下植被群落变化的机理。土壤理化性质测定:土壤容重采自 0—5 cm 土层,土壤养分采自 0—20 cm 土层,土壤样品风干后过 2 mm 筛,测定指标包括:有机质(OC)、全氮(TN)、有效氮(AN)、全磷(TP)。其中,土壤水分用土钻取样后烘干测定,土壤容重采用标准环刀法测定,重铬酸钾外加热法测定有机质,半微量开氏法测定全氮,有效氮采用碱解扩散法,用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提后采用钼锑抗比色法测定全磷。

1.3 统计分析

为分析植被群落数量特征,采用 SPSS 27.0 用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著法(LSD)对数据进行统计检验($p < 0.05$)。基于 AMOS21.0 软件进行结构方程模型构建(SEM),通过卡方值、拟合优度指数以及近似误差均方根等指标检验模型合理性,未达到合理值、通过模型修正使其合理,用于检验分析植物群落特征与土壤因子之间的关系并作图,用于直观观察分析各指标间关系。

2 结果与分析

2.1 不同坡位植物群落物种组成特征

通过对研究区不同坡位草地植物群落物种调查(图 3),研究样方中共统计出 108 种植物,主要由菊科、豆科以及禾本科组成,其中菊科植物有 24 种,豆科 15 种以及禾本科 11 种。从生长型构成上看,草本植物占坡沟系统植物的 83.2%;阳沟坡植被结构简单,主要以单个灌木及草本植物组成的群落结构,灌草植物占 96.6%;阳峁坡植被分布相比阳沟坡较为聚集,阳峁坡和阳沟坡均以灌木及草本 2 层植物群落结构为主;峁顶草本植物相较于其他坡位比例最高,占总构成的 87.43%,群落结构多以 1 层的草本植物为主;阴沟坡包含所统计的 8 种生长型植物,且阴沟坡藤本植物和乔木较阴峁坡高出 38.4%,群落结构以乔木(藤本植物)、灌木和草本 3 层植物群落结构为主。

2.2 不同坡位植物群落多样性与稳定性特征

研究区物种多样性如图 4 所示。在阴坡环境下植物群落 Margalef 丰富度较阳坡显著增加了 25.6%;Shannon-Wiener 多样性在阳沟坡、峁顶、阴峁坡无显著差异,但在阴坡条件下,物种多样性显著增加 15.4%($p < 0.05$),且阳峁坡和阴沟坡差异显著;Pielou 均匀度在不同坡位及坡向没有显著性差异。

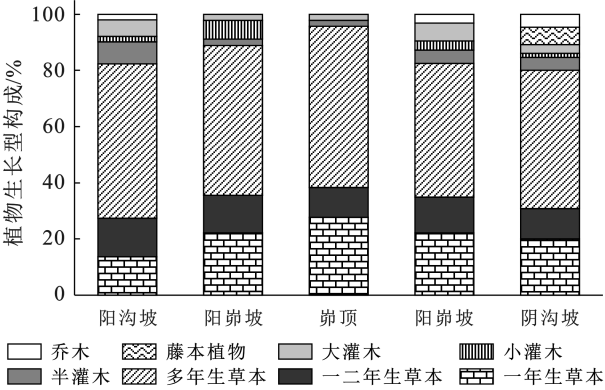


图 3 不同坡位植物群落生长型构成特征

Fig.3 Characteristics of plant communities growth forms at different slope positions

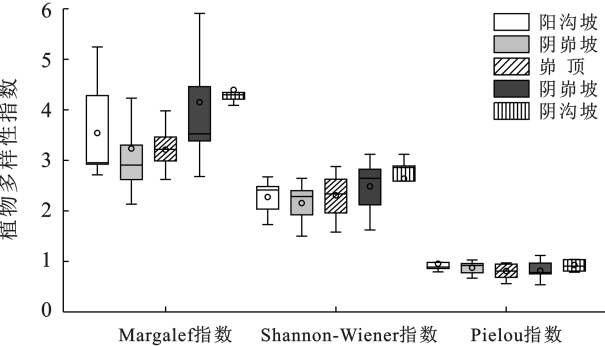


图 4 不同坡位植物群落多样性指数变化特征

Fig.4 Plant community diversity index at different slope positions

从植物群落稳定性来看(图 5),阴沟坡位的植物群落稳定性显著高于其他坡位,相比较于峁顶、阳沟坡、阳峁坡和阴峁坡分别高出 59.72%,48.61%,43.06%和 20.83%,生境较差的峁顶植物群落稳定性最低。

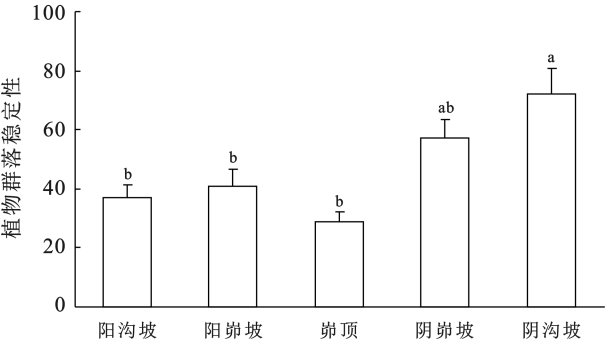


图 5 不同坡位植物群落物种稳定性

Fig.5 Plant communities stability at different slope positions

2.3 不同坡位优势植物分布格局

不同坡位优势植物分布格局分析结果(表 2),阳坡以茺蒿 (*Artemisia giraldii*)、狼牙刺 (*Sophora davidii*)和铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等半灌木和草本植物组成,相对重要值占 40%左右,这些灌木改善阳坡的物种丰富度。峁顶由猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、赖草(*Leymus secalinus*)和长芒草(*Stipa*

bungeana)等草本植物组成,这些草本植物相对重要值占 55%左右。而阴坡相对重要值较大的物种中,草本植物与灌木重要值差异较小。根据方差均值比较法的计算结果,多数植物种群的空间格局呈聚集型分布,且相同植物在不用坡位的聚集程度存在差异。从 V/m 值来看,峁顶的猪毛蒿和阴沟坡的黄刺玫分别高出其他植物物种 V/m 平均值的 82.07%和 81.91%,说明这两种植物在峁顶和阴沟坡内有高强度的聚集性,但随机出现的频率较小。阳沟坡和阳峁坡的优势植物中仅有一种均匀分布的植物,但是 V/m 平均值仅为 1.89 和 1.88,说明阳坡植物没有高强度的聚集性,随机出现频率较大。由此可见不同坡位的物种空间分布格局存在差异。

2.4 不同坡位植物群落特征影响因子分析

结构方程模型结果显示(图 6),坡位变化产生的环境差异导致植物群落结构发生变化,其中土壤侵蚀强度对峁顶和阴沟坡影响显著且对每个坡位均为正向影响。土壤水分在阳坡受土壤侵蚀的正向影响(0.40,0.67),进而对群落稳定性产生影响(0.47,0.53);而在阴坡虽然土壤水分对群落稳定性有正向影响(0.44,0.31),但是土壤侵蚀对土壤水分有逆向影响(−0.10,−0.23)。在峁顶和阳峁坡,土壤侵蚀对光照强度产生逆向影响,并且对阳峁坡影响高出峁顶 88.10%;而在阴坡和阳沟坡,土壤侵蚀对光照强度有正向影响,且对阴沟坡影响高出其他坡位 66.13%。在不同坡位土壤侵蚀对有机质、容重和 pH 值的平均影响为 0.19,0.04,0.14,对 pH 值的影响在阳坡比峁顶和阴坡高出 66.67%。

在不同坡位的土壤侵蚀对植物多样性指数的影响中,对 Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数的影响比 Shannon-Wiener 多样性指数高出 33.91%和 26.92%。且对 Margalef 丰富度指数在阳峁坡的正向影响比在阴沟坡的逆向影响高出 97.83%;对 Pielou 均匀度指数在阳沟坡的逆向影响比在阳沟坡的正向影响高出 95.45%。土壤侵蚀强度的对植物群落稳定性在不同坡位均为正向影响,且对阳沟坡和阳峁坡比峁顶的影响高出 68.57%和 63.33%。

3 讨论

黄土高原丘陵区森林草原带严重的土壤侵蚀形成了沟壑纵横的侵蚀地貌,造成水、热等生态因子的空间差异性,同时坡沟系统不同坡位侵蚀强度差异使得地表植被受到干扰强度不同,因此土壤侵蚀改变的地形因子和土壤因子是控制植被分布的主要非地带性因子^[22]。

表 2 不同坡位优势植物在群落中的分布格局

Table 2 Distribution pattern of dominant plants at different slope positions in community

坡位	植物名称	重要值	V	m	V/m	分布格局
阳沟坡	芨芨蒿(<i>Artemisia giraldii</i>)	0.25	344.02	100.00	3.44	聚集
	狼牙刺(<i>Sophora davidii</i>)	0.21	87.10	37.50	2.32	聚集
	达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)	0.19	74.75	50.00	1.90	聚集
	白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i>)	0.09	239.11	134.50	1.78	聚集
	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	0.09	74.75	50.00	1.50	聚集
	中华隐子草(<i>Cleistogenes chinensis</i>)	0.05	49.86	116.50	0.43	均匀
阳峁坡	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	0.26	221.23	82.00	2.70	聚集
	长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)	0.25	75.52	38.50	1.96	聚集
	达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)	0.19	63.10	32.50	1.94	聚集
	芨芨蒿(<i>Artemisia giraldii</i>)	0.08	396.81	219.50	1.81	聚集
	阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)	0.07	35.79	21.50	1.66	聚集
	白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i>)	0.04	33.11	27.50	1.20	聚集
阳顶	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	0.29	6 090.02	578.00	10.54	聚集
	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	0.20	162.916	80.00	2.04	聚集
	长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)	0.16	297.02	203.00	1.46	聚集
	白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i>)	0.06	258.75	195.00	1.33	聚集
	达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)	0.05	28.83	36.50	0.79	均匀
	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	0.05	4.25	25.00	0.17	均匀
阴峁坡	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	0.15	1 426.49	280.50	5.09	聚集
	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	0.14	117.10	32.50	3.60	聚集
	芨芨蒿(<i>Artemisia giraldii</i>)	0.11	55.00	36.00	1.53	聚集
	北京隐子草(<i>Cleistogenes hancei</i>)	0.11	15.81	13.00	1.22	聚集
	大针茅(<i>Stipa grandis</i>)	0.11	28.18	33.50	0.84	均匀
	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	0.10	14.98	92.50	0.16	均匀
阴沟坡	黄刺玫(<i>Rosa xanthina</i>)	0.13	598.46	99.00	6.05	聚集
	芨芨蒿(<i>Artemisia giraldii</i>)	0.13	109.63	45.50	2.41	聚集
	虎榛子(<i>Ostryopsis davidiana</i>)	0.12	72.53	45.50	1.59	聚集
	尖胡(<i>Peucedanum elegans</i>)	0.11	138.11	102.00	1.35	聚集
	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	0.10	17.11	18.00	0.95	均匀
	达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)	0.09	58.26	100.00	0.58	均匀

注:每个坡位仅选取物种重要值前 6 位的植物。

坡沟系统中阳沟坡坡度较大、径流速度快,强烈的面蚀和沟蚀作用使得该坡位有大面积地表裸露^[23],加之侵蚀引起土壤结构变差,因此分析表明容重与土壤侵蚀的极显著相关,该坡位植被受地表影响呈斑块状分布^[24],且不利于植物种子萌芽和根系生长。而阳沟坡具有高抗侵蚀干扰的灌木,且比例较其他坡位高达到 15.38%,这些灌木茎秆可拦截上坡位侵蚀形成的径流和泥沙、植冠可拦截降雨减小下部土体的溅蚀作用,在灌木下部形成富积营养的“肥岛”^[25],因此阳沟坡灌木对其草本植物而言作为“保育植物”(nurse plant)^[26],一二年生和多年生草本在灌木植物下部建植。因此在该坡位植被恢复时,可通过选择抗逆性较强的灌木,通过前期人工抚育促进灌木生长形成稳定的植物斑块,使微生物境改善后再恢复灌木林下草本植

物,以期得到稳定的植物群落。

阳峁坡的面蚀和细沟侵蚀使得土壤养分流失严重^[27],因此分析表明土壤有机质对阳峁坡植物群落具有显著影响。反映在植物群落组成上,根系发达、抗侵蚀干扰能力强的小灌木和多年生禾草成为该坡位的优势物种,如芨芨蒿、铁杆蒿和白羊草等,且这些小灌木和草本多以聚丛型植物构型生长,因此阳峁坡植物群落常高强度聚集且呈片状或带状分布^[28]。这种聚集性植被分布造成植被间地严重的径流冲刷和地表裸露,干扰了阳峁坡植物定植和生长发育^[29-30],使得此阳峁坡植物群落多样性在坡沟系统中较低。该坡位植被恢复过程中,可通过微地形改造减小坡面径流汇聚(如鱼鳞坑),选择抗逆性较强的小灌木植物作为植被恢复目标植物,同时通过土壤养分的添加加强植物群落的稳定性。

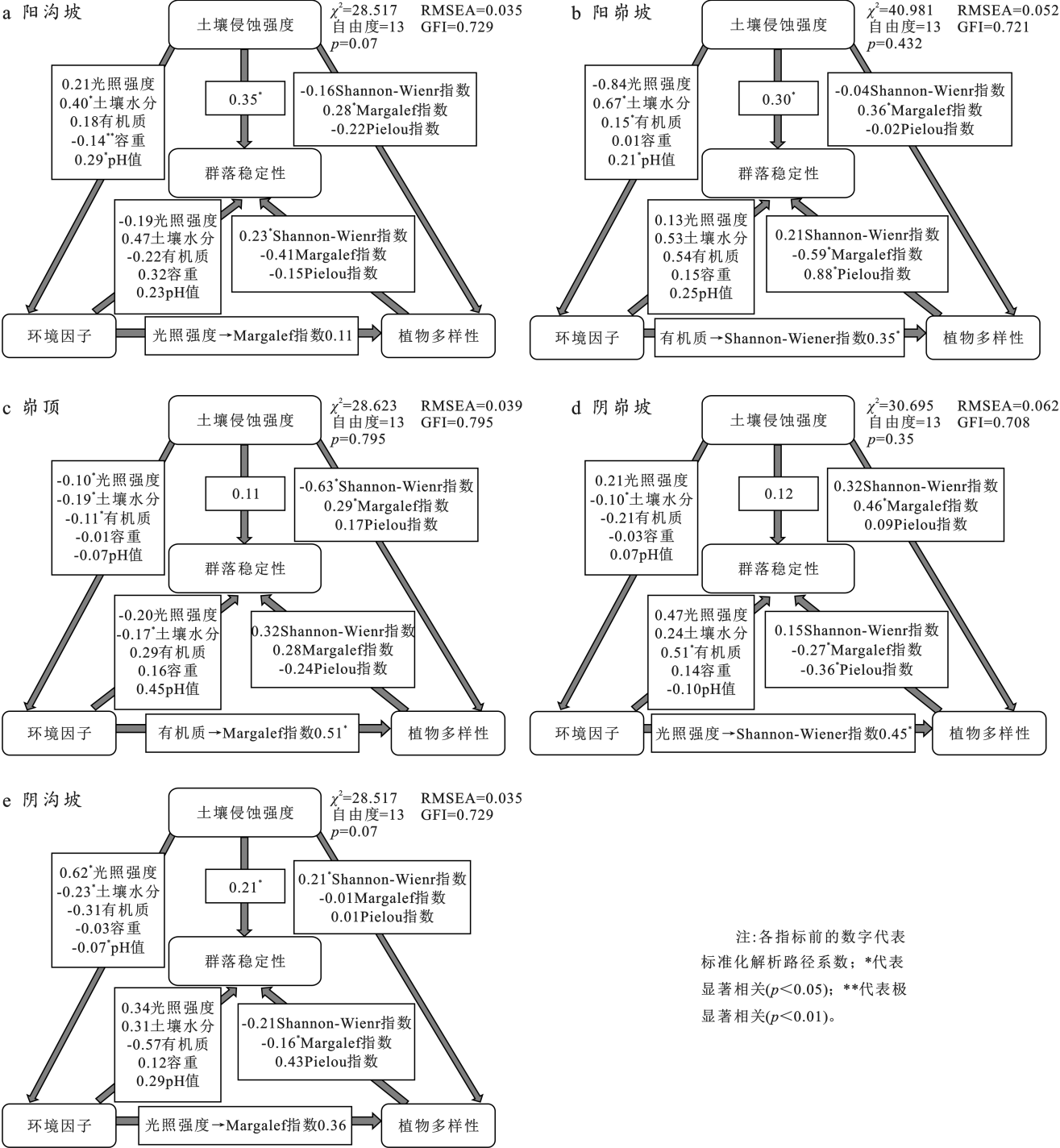


图 6 不同坡位土壤侵蚀、环境因子、植物多样性和群落稳定性结构方程模型分析

Fig.6 Structural equation model analysis of soil erosion, environmental factors, plant diversity and community stability at different slope positions

崩顶坡度虽然平缓,土壤侵蚀强度相对较小,但该坡位光照、风速对地表植被具有较强的干扰作用^[31],土壤水分和光照强度成为影响群落建植和稳定性的显著因子^[32]。一二年生及多年生草本植物由于生长周期短、耐旱性较高等特点,对崩顶强干扰的生境适应能力较强,因此崩顶一二年生植物占比较其他坡位高为 27.08%。虽然崩顶土壤侵蚀较低,但崩

顶强光强风等恶劣的生境也使得其生态承载力低,群落结构简单,优势植物高强度聚集分布。因此,崩顶植被恢复过程中,首先通过增加地表覆盖和土壤水分养分改善该立地微生境,然后选择小灌木和多年生植物种子或繁殖体的添加,改善植物群落结构,增加群落多样性和稳定性。

阴崩坡温度较低,土壤水分蒸发较阳坡少^[33],较

好的水分条件使得植被覆盖度较高,有效地降低了阴崩坡土壤侵蚀强度^[34],因此相较于阳坡和崩顶,植物群落生长型中乔灌木比例增加,尤其是灌木为 5 个坡位中灌木占比最高达到 15%。乔灌木也使阴崩坡植物群落结构较阳坡区域复杂,形成了相对稳定的生态系统,群落稳定性和生物量增加^[35]。因此阴崩坡呈现出较强的土壤肥力和适宜植被生长的生境条件^[36],土壤有机质成为影响该坡位群落稳定的显著因子。在阴崩坡受干扰后的生态恢复中,主要是维持原有的植被群落结构不受破坏,人工植被恢复中阴坡可增加大灌木与林下草本植物的构建,从而加强群落结构的稳定。

阴沟坡坡度较阳沟坡相比稍缓,较高的植被覆盖度使得坡面径流在此坡位入渗作用增加,加之光照辐射强度小减小了土壤水分蒸腾,致使水分承载力增加^[37],该坡位植物群落组成较坡沟系统其他坡位更为复杂,尤其体现在蛇葡萄(*Ampelopsis glandulosa*)等藤本植物比例较大,因此群落稳定性较高,多数物种未高强度聚集。阴沟坡大的植被覆盖度使得其径流冲刷程度小,水力侵蚀强度小,植被生长发育受侵蚀干扰程度亦较小^[38]。阴沟坡虽然水分条件较好但光照条件不足,光照强度成为该坡位的重要影响因素。在后续生态恢复中,应以自然群落结构如中生小灌木〔黄刺玫 *Rosa xanthina*, 虎榛子 *Ostryopsis davidiana*〕和草本植物〔野菊花 (*Dendranthema indicum*)〕为主,避免人工林下复杂的植物群落结构因光照不足而使草本层退化。

4 结 论

(1) 黄土丘陵区森林草原带坡沟系统中阳沟坡和阳崩坡以多年生草本和灌木为主,植物群落垂直结构均为 2 层,优势植物分布格局呈分散分布,其中阳崩坡的丰富度和多样性最低;崩顶以一年生和多年生草本为主,垂直结构 1 层,植物主要呈高强度聚集分布,群落稳定最低;阴沟坡群落垂直结构 3 层,植物呈聚集分布,群落物种多样性、丰富度和稳定性最高。

(2) 影响不同坡位植物群落结构的共同关键因子为土壤侵蚀强度和土壤水分,而阳沟坡的土壤容重、阳崩坡和阴崩坡的有机质、崩顶和阴沟坡的光照强度分别为各坡位影响植物群落结构、稳定性和多样性的差异化生态因子。

参考文献 (References)

[1] Cao Jianjun, Tang Guoan, Fang Xuán, et al. Identification of active gully erosion sites in the Loess Plateau of China

using MF-DFA [J]. Remote Sensing, 2020,12(3):589.

[2] He Zhilin, Yue Tianming, Chen Yanglong, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation cover and driving forces in the Yan River basin, Loess Plateau [J]. Remote Sensing, 2023,15(17):4240.

[3] 雷斯越,郭晋伟,何亮,等.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[J].水土保持学报,2021,35(1):251-258.

Lei Siyue, Guo Jinwei, He Liang, et al. Spatial differentiation characteristics of grassland restoration and soil physical properties of slope in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):251-258.

[4] 张缓,穆兴民,高鹏.黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征[J].水土保持研究,2021,28(3):45-52.

Zhang Huan, Mu Xingmin, Gao Peng. Variation of litter accumulation and water holding capacity at different site conditions in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):45-52.

[5] 罗梦娇,艾宁,刘长海,等.半干旱黄土区不同植被类型对土壤水分的影响[J].四川农业大学学报,2019,37(2):177-184.

Luo Mengjiao, Ai Ning, Liu Changhai, et al. Influence of different vegetation types on soil moisture in the semi-arid loess region [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019,37(2):177-184.

[6] 李锐.黄土高原水土保持工作 70 年回顾与启示[J].水土保持通报,2019,39(6):298-301.

Li Rui. Review and enlightenments of soil and water conservation on Loess Plateau in past 70 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(6):298-301.

[7] Fang Haiyan, Guo Min. Aspect-induced differences in soil erosion intensity in a gullied hilly region on the Chinese Loess Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(7):5677-5685.

[8] 马晓慧,张岩,唐杰,等.半干旱黄土区不同自然恢复时期坡面植被组成与分布特征[J].中国水土保持科学,2018,16(2):62-72.

Ma Xiaohui, Zhang Yan, Tang Jie, et al. Composition and distribution characteristics of vegetation in different natural restoration periods in semi-arid loess region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(2):62-72.

[9] Wang Bing, Zhang Guanghui. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017,81(6):1567-1576.

[10] Yu Weijie, Jiao Juying, Chen Yu, et al. Seed removal

- due to overland flow on abandoned slopes in the Chinese Hilly Gullied Loess Plateau region [J]. *Land Degradation & Development*, 2017,28(1):274-282.
- [11] 韩新生, 许浩, 蔡进军, 等. 立地因子和盖度对宁南黄土区中庄小流域玉米土壤水分的影响[J]. *水土保持研究*, 2023,30(6):112-122.
- Han Xinsheng, Xu Hao, Cai Jinjun, et al. Effects of site factor and coverage on soil moisture of maize field in Zhongzhuang small watershed in the loess area of Southern Ningxia [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(6):112-122.
- [12] Yu Weijie, Jiao Juying, Wang Dongli, et al. Seed population dynamics on abandoned slopes in the Hill and Gully Loess Plateau region of China [J]. *Ecological Engineering*, 2016,94:427-436.
- [13] Zhu Huoxing, Fu Bojie, Wang Shuai, et al. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015,52(4):1063-1072.
- [14] Hou Jian, Fu Bojie, Wang Shuai, et al. Comprehensive analysis of relationship between vegetation attributes and soil erosion on hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,72(5):1721-1731.
- [15] Yuan Ziqiang. Factors affecting lucerne-rich vegetation under revegetation in a semi-arid environment [J]. *Ecological Engineering*, 2017,108:249-254.
- [16] Kleyer M, Bekker R M, Knevel I C, et al. The LEDA Traitbase: A database of life-history traits of the Northwest European Flora [J]. *Journal of Ecology*, 2008,96(6):1266-1274.
- [17] 张金屯, 范丽宏. 物种功能多样性及其研究方法[J]. *山地学报*, 2011,29(5):513-519.
- Zhang J, Fan Lihong. Development of species functional diversity and its measurement methods [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011,29(5):513-519.
- [18] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述[J]. *生态学杂志*, 2001(4):55-60.
- Wang Dianbei, Ji Shuyi, Chen Feipeng. A review on the species diversity of plant community [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, (4): 55-60.
- [19] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. *林业科学*, 2000,36(5):28-32.
- Zheng Yuanrun. Comparison of methods for studying stability of forest community [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000,36(5):28-32.
- [20] 吴志毅, 王明玖, 李志强, 等. 2 种方法在荒漠草原植物种群分布格局中的适用性比较[J]. *草业科学*, 2008,25(4):145-147.
- Wu Zhiyi, Wang Mingjiu, Li Zhiqiang, et al. Suitability comparison of two methods for population distribution patterns measure in desert steppe [J]. *Pratacultural Science*, 2008,25(4):145-147.
- [21] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):157-163.
- Qin Wei, Zhu Qingke, Zhang Yan. Soil erosion assessment of small watershed in Loess Plateau based on GIS and RUSLE [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009,25(8):157-163.
- [22] Ma Rentian, Hu Feinan, Xu Chenyang, et al. Response of soil aggregate stability and splash erosion to different breakdown mechanisms along natural vegetation restoration [J]. *Catena*, 2022,208:105775.
- [23] 王国鹏, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2019,38(10):3050-3056.
- Wang Guopeng, Xiao Bo, Li Shenglong, et al. Surface roughness of biological soil crusts and its influencing factors in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019,38(10):3050-3056.
- [24] 朱启明, 刘俊娥, 周正朝. 黄土高原土壤可蚀性因子空间分布特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2023,37(6):50-56.
- Zhu Qiming, Liu June, Zhou Zhengchao. Research on the spatial distribution characteristics and influencing factors of soil erodibility factors of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(6):50-56.
- [25] Du Huadong, Jiao Juying, Zhao Xiaoguang. Significance and pedogenic variability of phytogenic mounds on the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2017,146:53-63.
- [26] Du Huadong, Ning Benyan, Jiao Juying, et al. Spatial heterogeneity of plant community composition and diversity on phytogenic mounds caused by water erosion [J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2020,13(5/6):425-436.
- [27] Li Chenrui, Yang Xin, Liu Hailong, et al. Spatial distribution characteristics of discontinuous hillslope gullies on the Loess Plateau of China: A special focus on spoon gullies [J]. *Catena*, 2022,215:106327.
- [28] 崔光帅, 罗天祥, 梁梁源, 等. 干旱半干旱区灌丛对草本植物的促进作用研究进展[J]. *植物生态学报*, 2022,46(11):1321-1333.
- Cui Guangshuai, Luo Tianxiang, Liang Eryuan, et al. Advances in the study of shrubland facilitation on herbs in arid and semi-arid regions [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022,46(11):1321-1333.

[29] Feng Tianjiao, Wei Tianxing, Keesstra S D, et al. Long-term effects of vegetation restoration on hydrological regulation functions and the implications to afforestation on the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023,330:109313.

[30] Li Zhongkai, Li Xiaoyan, Zhou Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. Science China Earth Sciences, 2022,65(11):2083-2114.

[31] Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2018,10(5):712-725.

[32] Dong Lingbo, Liu Yulin, Wu Jianzhao, et al. The distribution of soil C and N along the slope is regulated by vegetation type on the Loess Plateau [J]. Catena, 2023,226:107094.

[33] Liang Haibin, Li Yani, An Xiaoxu, et al. Soil moisture dynamics and its temporal stability under different-aged *Caragana korshinskii* shrubs in the loess hilly region of China [J]. Water, 2023,15(13):2334.

[34] 张龙齐,贾国栋,吕相融,等.黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J].水土保持学报, 2023,37(2):187-198.

Zhang Longqi, Jia Guodong, Lü Xiangrong, et al. Research of soil erosion thresholds on the lower slopes of different vegetation cover in typical areas of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):187-198.

[35] 罗鑫萍,张祖欣,陈大立,等.黄土高原人工灌草系统不同立地条件土壤种子库特征[J].草地学报,2020,28(4):940-946.

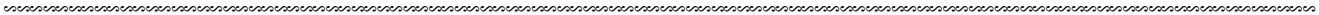
Luo Xinping, Zhang Zuxin, Chen Dali, et al. Soil seed bank characteristics across different stand condition of artificial shrub grass ecosystem on the Loess Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020,28(4):940-946.

[36] Zhang Xiaofang, Adamowski J F, Liu Chunfang,et al. Which slope aspect and gradient provides the best afforestation-driven soil carbon sequestration on the China's Loess Plateau? [J]. Ecological Engineering, 2020,147:105782.

[37] Zhao Yali, Wang Yunqiang, Wang Li, et al. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales [J]. Catena, 2019, 172:387-396.

[38] 林枫,王丽芳,文琦.黄土高原土壤有机碳固存对植被恢复的动态响应及其碳汇价值[J].水土保持研究,2021, 28(3):53-58.

Lin Feng, Wang Lifang, Wen Qi. Dynamic responses of sequestration of soil organic carbon to vegetation restoration and the values of carbon sink in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(3):53-58.



(上接第 165 页)

[17] 王建有,张曼曼,孙奔博,等.城市水库溃坝耦合极端降雨前后模拟对比分析[J].人民黄河,2024,46(5):68-73.

Wang Jianyou, Zhang Manman, Sun Benbo, et al. Comparative analysis of urban reservoir dam break simulation under extreme rainfall [J]. Yellow River, 2024,46(5):68-73.

[18] 葛巍,焦余铁,李宗坤,等.溃坝风险后果研究现状与发展趋势[J].水科学进展,2020,31(1):143-151.

Ge Wei, Jiao Yutie, Li Zongkun, et al. Status and development trend of research on risk consequences caused by dam breach [J]. Advances in Water Science, 2020,31(1):143-151.

[19] 张松松,张卫,国林,等.大新水库不同溃坝高度的洪水演进过程模拟研究[J].安全与环境工程,2021,28(6) 16-24.

Zhang Songsong, Zhang Wei, Guo Lin, et al. Simulation study on flood evolution process of Daxin Reservoir with different dam-break heights [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021,28(6):16-24.

[20] 龙志伟.基于 MIKE 21 和 Landsat TM 影像的鄱阳湖水动力模型及水位动态变化分析[D].江西 南昌:南昌工程学院,2020.

Long Zhiwei. Hydrodynamic model and water level dynamic analysis of Poyang Lake based on MIKE 21 and Landsat TM images [D]. Nanchang, Jiangxi: Nanchang Institute of Technology, 2020.

[21] 乔万里.数字高程模型三维可视化技术研究[D].江苏 南京:南京邮电大学,2023.

Qiao Wanli. Research on 3D Visualization technology of Digital Elevation Model [D]. Nanjiang, Jiangsu: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.

[22] 张效刚,胡良军,宋树祥,等.基于 LiDAR 点云的大型垃圾填埋场数字高程模型建模方法研究[J].环境工程,2024,42(5):192-198.

Zhang Xiaogang, Hu Liangjun, Song Shuxiang, et al. A modeling method of digital elevation model for a large garbage landfill based on LiDAR point cloud [J]. Environmental Engineering, 2024,42(5):192-198.