



•研究报告•

# 三星堆遗址城墙不同维护措施下草本植物物种多样性与土壤抗冲性的关系

钟欣艺<sup>1</sup>, 赵凡<sup>3</sup>, 姚雪<sup>4</sup>, 吴雨茹<sup>1</sup>, 许银<sup>1</sup>, 鱼舜尧<sup>1</sup>, 林静芸<sup>1</sup>, 郝建锋<sup>1,2\*</sup>

1. 四川农业大学林学院, 成都 611130; 2. 四川农业大学水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130; 3. 四川省文物考古研究院, 成都 610041; 4. 西南民族大学旅游与历史文化学院, 成都 610041

**摘要:** 三星堆遗址城墙对中华文明探源工程具有重要意义。研究不同维护措施下草本植物物种多样性、根系与土壤抗冲性的关系对防止遗址城墙水土流失、发挥原生植被的水土保持作用意义重大。本研究基于样地调查, 以三星堆遗址城墙的草本植物群落为研究对象, 探讨了自然更新、种植、弃耕、灌木去除、修剪5种维护措施下草本植物物种多样性、根系和土壤抗冲性特征及其相关性。结果表明: (1)研究区共记录草本植物103种, 隶属40科81属, 以菊科及禾本科植物占优, 多年生草本植物居多。(2)灌木去除样地的物种多样性水平相对较高, 自然更新样地次之, 再次是修剪样地和种植样地, 弃耕样地物种多样性水平显著低于其余样地( $P < 0.05$ )。(3)灌木去除样地和自然更新样地的土壤抗冲系数(分别为138.86 L/g和118.31 L/g, 二者无显著差异( $P > 0.05$ ))显著高于其余类型( $P < 0.05$ )。除根长密度外, 灌木去除样地的根表面积密度、根体积密度和平均根径均显著高于其他类型( $P < 0.05$ )。(4) 4种多样性指数(Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、物种丰富度指数、Pielou均匀度指数)、根长密度、平均根径、分叉数均与土壤抗冲系数极显著正相关( $P < 0.01$ ); 根表面积密度、根体积密度与土壤抗冲系数亦显著正相关( $P < 0.05$ )。综上, 灌木去除样地与自然更新样地的草本植物物种多样性指数、根系参数与土壤抗冲性较好。结合城墙区域的植被特点和遗址保护的原真性, 建议实行以自然更新为主的原生境保护措施, 必要时辅以如灌木去除、修剪等维护措施, 有效提升物种多样性和土壤抗冲性, 促进三星堆遗址城墙植被的可持续发展和原生态展现。

**关键词:** 三星堆遗址城墙; 原生境保护; 物种多样性; 根系; 土壤抗冲性; 草本植物群落

钟欣艺, 赵凡, 姚雪, 吴雨茹, 许银, 鱼舜尧, 林静芸, 郝建锋 (2023) 三星堆遗址城墙不同维护措施下草本植物物种多样性与土壤抗冲性的关系. 生物多样性, 31, 23169. doi: 10.17520/biods.2023169.

Zhong XY, Zhao F, Yao X, Wu YR, Xu Y, Yu SY, Lin JY, Hao JF (2023) Relationship between herbaceous plant diversity and soil anti-scourability under different maintenance measures at Sanxingdui City Wall. Biodiversity Science, 31, 23169. doi: 10.17520/biods.2023169.

## Relationship between herbaceous plant diversity and soil anti-scourability under different maintenance measures at Sanxingdui City Wall

Xinyi Zhong<sup>1</sup>, Fan Zhao<sup>3</sup>, Xue Yao<sup>4</sup>, Yuru Wu<sup>1</sup>, Yin Xu<sup>1</sup>, Shunyao Yu<sup>1</sup>, Jingyun Lin<sup>1</sup>, Jianfeng Hao<sup>1,2\*</sup>

1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130

2 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130

3 Cultural Relics and Archaeology Institute of Sichuan, Chengdu 610041

4 Department of Tourism and History Cultural, Southwest Minzu University, Chengdu 610041

### ABSTRACT

**Aims:** The City Wall of Sanxingdui is a historical site of great significance to the exploration of the origins of Chinese civilization. It is important to study the relationships between herbaceous plant species diversity, root system and soil anti-scourability under different maintenance measures to protect this valuable cultural site from erosion damage and harness the water and soil conservation functions of native vegetation.

收稿日期: 2023-05-26; 接受日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(31370628)、三星堆遗址植被调查项目(003-2222339006)、四川省科技计划(2023YFS0463)和教育部人文社会科学研究项目(22YJCZH219)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: haojf2005@aliyun.com

**Methods:** In this study, we conducted a field survey focusing on five typical herbaceous plant communities associated with five common maintenance measures at Sanxingdui City Wall: natural regeneration, planting, abandoned field, shrub removal, and pruning. We investigated the species diversity, root characteristics, soil anti-scourability and their correlation.

**Results:** A total of 103 species of herbaceous plants belonging to 40 families and 81 genera were recorded in the study area, with Asteraceae and Gramineae being dominant families, and the majority of species being perennial herbs. Species diversity was highest in the shrub removal plots, followed by the natural regeneration plots, and then the pruning and planting plots, while the abandoned field plots had a significantly lower level of species diversity than the other types of plots ( $P < 0.05$ ). The soil anti-scourability coefficients of the shrub removal and natural regeneration plots (138.86 L/g and 118.31 L/g) were not significantly different ( $P > 0.05$ ), but both were significantly higher ( $P < 0.05$ ) than the other types of plots. Root characteristics demonstrated a more robust root network in shrub removal plots, with significantly higher values of root surface area density, root volume density and average root diameter than other types of plots ( $P < 0.05$ ). The four diversity indices (Shannon-Wiener diversity index, Simpson dominance index, species richness index, Pielou evenness index), root length density, average root diameter and number of root branches were very significantly positively correlated with the soil anti-scourability coefficient ( $P < 0.01$ ). Root surface area density and root volume density were also significantly positively correlated with soil anti-scourability coefficient ( $P < 0.05$ ).

**Conclusions:** In summary, the shrub removal and natural regeneration plots demonstrated higher herb diversity indices, denser root networks and greater soil anti-scourability coefficients. Considering the vegetation characteristics of the city walls and the importance of preserving this unique cultural heritage site, we recommend implementing *in situ* habitat protection measures with a focus on natural regeneration, supplemented by scientifically informed active maintenance measures such as shrub removal and pruning when necessary. This strategy holds promise to effectively enhance species diversity and soil anti-scourability, and promote sustainable development and historical preservation of the walled vegetation of the Sanxingdui site.

**Key words:** Sanxingdui City Wall; *in situ* conservation; species diversity; root system; soil anti-scourability; herbaceous plant communities

物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现形式,也是生态系统恢复与重建的重要特性之一(刘晓丽等, 2020)。较高的多样性水平能够增加地下生物量的比例,形成空间分布和形态特征多样化的根系网络,从而扩大植物根系与土壤的接触面积,减少土壤流失(李慧等, 2021; 李惠珍等, 2022; Lou et al, 2023)。而单一物种由于根系参数的局限性常难以充分利用土壤空间以形成稳定的根-土复合体,缓解土壤侵蚀的能力较弱(郭洋楠等, 2022)。土壤抗冲性是评价土壤结构稳定性的重要指标,表征其抵抗地表径流机械破坏的能力(沙小燕等, 2022)。丰富的物种多样性和良好的根系特征可以改善土壤性质并促进土壤团聚体形成,提高土壤抗侵蚀能力(Lou et al, 2023)。尤其是草本植物群落,其较高的密度与物种多样性以及较短的根系成型周期,在提高表土抗性和稳定性方面具有重要作用(郭洋楠等, 2022)。

干扰可能导致局部生境丧失或斑块化,改变植物群落物种的资源利用能力和相关种群的功能关系。人工维护措施会影响植被的发展与演替,促进

物种与环境之间的选择与适应,使群落内各物种在相互影响的情况下也有稳定共存的机遇(刘晓丽等, 2020; 尹才佳等, 2022)。物种多样性的改变进一步影响根系垂直分布差异和土壤抗冲性能的变化(李慧等, 2021)。已有研究表明,土壤抗冲性强弱受土地利用类型、根系特征、土壤性质等因素综合影响,根系和物种多样性对提高土壤抗冲性有积极作用(肖鹏等, 2019; 沙小燕等, 2022; Lou et al, 2023)。在植被恢复过程中,环境变化导致的生境资源异质性和人为干预在一定程度上可对植物群落的物种组成与多样性维持产生积极影响,加快植被恢复及生态环境改善(刘晓丽等, 2020)。人工植草、灌木去除、覆土等措施可改善群落结构和水养供应,促进草本植物的补充和根系发育(Johnson et al, 2018; 田曼等, 2019; Wang et al, 2022; 李彩弟等, 2023)。但不合理的维护措施可能形成较为单一的植被和脆弱的土壤结构,导致土壤抗冲性变差(肖鹏等, 2019; 侯星辰等, 2022; 资如毅等, 2022)。长期以来,维护措施在草本群落上的应用多集中在全球草地典型分布区及石灰岩山地、半干旱草原等生态较脆弱的区域

(Evju et al, 2015; Harpole et al, 2016; 赵月丹等, 2019; 刘晓丽等, 2020), 而对易遭受雨水冲刷和人为破坏的湿润地区土遗址的植被生态学研究则鲜少涉及。我国土遗址的生态恢复多通过博物馆式、防风化加固等工程措施进行维护, 采用植物保护土遗址的理念在秦始皇陵、寒窑遗址公园、汉魏洛阳城等地有不同程度的应用, 但仅简单提及植被可改善遗址环境, 未深究其加固土体、减缓雨水冲刷等的保护作用(王菲等, 2013)。三星堆遗址城墙多数呈倾斜状斜行夯层, 素土堆积的夯筑方式较为随意, 土体本身强度和稳定性差。再加上其位于暴雨多、雨期长的成都平原, 水土流失、边坡垮塌等问题难以避免(张跃辉等, 2005; 许丹阳, 2021)。研究草本植物物种多样性及其根系与土壤抗冲性的关系对防止遗址城墙水土流失、发挥原生植被的水土保持作用意义重大。

三星堆遗址城墙是中华文明探源工程的重要组成部分。不同维护措施下草本植物物种多样性与土壤抗冲性的关系是现阶段遗址城墙保护关注的焦点。鉴于此, 本研究以三星堆遗址城墙5种维护措施(自然更新、种植、弃耕、灌木去除、修剪)下形成的典型草本群落为研究对象, 探讨了不同措施下的草本植物多样性、根系和土壤抗冲性及其相关性, 以期科学评价不同维护措施下植被的恢复和重建状况, 为三星堆遗址城墙保护及申遗工作实施提供科学依据, 为全国具有类似植被覆盖的湿润地区土遗址保护提供经验。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

三星堆遗址城墙(30°42′–30°59′ N, 103°12′–103°51′ E)位于四川省广汉市三星堆遗址内(图1), 是5,000年古蜀文明的辉煌例证。该地海拔约500 m, 属亚热带湿润气候, 年均气温16–17℃, 年均降水量890.8 mm, 暴雨多。年均日照时数1,229.2 h, 年均相对湿度82%(张跃辉等, 2005)。研究区位于三星堆遗址东、西、南城墙和祭祀坑, 城墙宽40–50 m, 长约495–1,200 m(张跃辉等, 2005)。遗址城墙均遭受同等耕作破坏, 自2012年退耕禁种, 设立核心保护区。主要土壤类型为冲积土或水稻土。主要草本植物有丝茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、积雪草

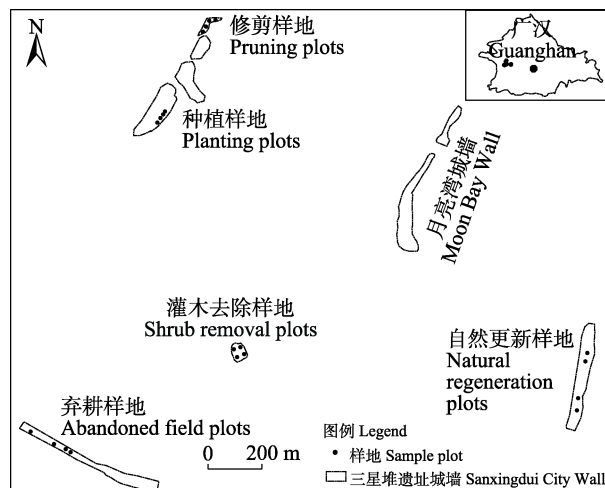


图1 三星堆遗址城墙地理位置

Fig. 1 Location of Sanxingdui City Wall

(*Centella asiatica*)、喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、钻叶紫菀(*Symphotrichum subulatum*)、马蹄金(*Geranium nepalense*)等。

### 1.2 样地设置与群落调查

在三星堆遗址城墙上选择生境相似的种植、弃耕、灌木去除、修剪4种人为干扰或人工维护措施处理后的典型样地, 同时以东城墙接近无干扰的自然更新样地作为对照。(1)自然更新样地(natural regeneration plots, NR): 东城墙, 2012年以来无任何维护措施, 以原生植被自然更新为主, 现已形成相对稳定的草本群落。(2)种植样地(planting plots, PL): 西城墙, 因历代耕种导致墙体松散、土体裸露, 于2012年栽种丝茅, 无维护, 现丝茅广布。(3)弃耕样地(abandoned field plots, AF): 南城墙, 2012年限制耕作后, 城墙附近仍有少量居民点未迁出, 偶有种植豆类、瓜类及少量蔬菜, 以浅耕为主。(4)灌木去除样地(shrub removal plots, SR): 祭祀坑城墙, 2012年覆素土, 土层厚度约20 cm, 每年秋季割除高度超过20 cm的灌木及大型草本。(5)修剪样地(pruning plots, PR): 西城墙北侧, 2012年人工种植结缕草(*Zoysia japonica*)、马蹄金、蛇莓(*Duchesnea indica*)等多年生草本, 每年秋季修剪。

依据方精云等(2009)的研究方法, 在全面踏查的基础上, 于2022年10月采用典型样地法选取三星堆遗址城墙5种样地类型, 各类型均设置4个20 m × 30 m的样地, 共计20个, 总面积12,000 m<sup>2</sup>。在各样地中运用对角线法设置12个1 m × 1 m草本样方, 共



计240个样方。记录样方内草本的种名、高度、盖度、株数(丛数)。

1.3 物种多样性计算

用如下公式计算草本层 $\alpha$ 多样性指数(马克平和刘玉明, 1994):

物种丰富度:  $S = \text{出现在样方内的物种数}$  (1)

Simpson优势度指数:  $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$  (2)

Shannon-Wiener多样性指数:  $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$  (3)

Pielou均匀度指数:  $J_{SW} = H' / \ln S$  (4)

式中,  $S$ 为物种数,  $P_i$ 为第 $i$ 种的个体数 $n_i$ 占有所有物种个体总数 $n$ 的比例, 即 $P_i = n_i/n$ 。

1.4 土壤取样及测定

土壤抗冲试验采用改进的原状土冲刷试验法(鱼舜尧等, 2022), 装置如图2所示。选取样地内植物生长均匀的地带, 用取样器(长10 cm、宽10 cm、高8 cm)取表层土(0–20 cm)及草本植物细根, 于上述每个典型样地中随机取4个重复, 共计80份土样。将取样器去掉上盖放入盆中, 加水至取样器上沿, 浸泡18 h后装入土样槽, 使土样表面和土样槽面齐平, 将冲刷槽坡度调节至样地平均坡度25°, 通过恒压水箱控制流量(2.84 L/min)为暴雨条件后放水冲刷。冲刷总时长15 min, 在0–5 min内以1 min为一个时段, 5–15 min内以2 min为一个时段, 各时段收集一

次泥沙量。冲刷结束后静置沉淀, 沉淀后的泥沙转入铝盒, 置于烘箱中烘干并称取泥沙质量(g)。

土壤抗冲系数( $AS$ )计算公式如下:

$AS = Q \cdot t / m$  (5)

式中,  $Q$ 为冲刷槽每分钟的水流量(L/min);  $t$ 为冲刷历时(min);  $m$ 为被冲刷土壤干重(g)。

1.5 根系测定

参照张荣等(2020)的研究方法, 在冲刷实验后将土样放置在筛孔100目(0.15 mm)的不锈钢网筛上以流水冲洗, 获取土壤中的草本植物细根, 将其置于65℃烘箱烘干至恒重。采用Epson数字化扫描仪(Expression 10000XL 1.0)和根系图像分析系统软件(Win RHIZO Pro2009c)对细根形态特征指标进行扫描和定量分析。细根之间无重叠堆积, 扫描出细根的根长、根径、根表面积、根体积、分叉数, 将各土样的根长度、根表面积、根体积除以土样体积, 获得根长密度(root length density, RLD)、根表面积密度(root surface area density, RSAD)和根体积密度(root volume density, RVD)。

1.6 数据处理

使用Microsoft Excel 2021、SPSS 26软件整理分析数据。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析不同维护措施下草本植物多样性指数、土壤抗冲性及细根特征之间的差异( $\alpha = 0.05$ )。运用Pearson相关性分析计算物种多样性

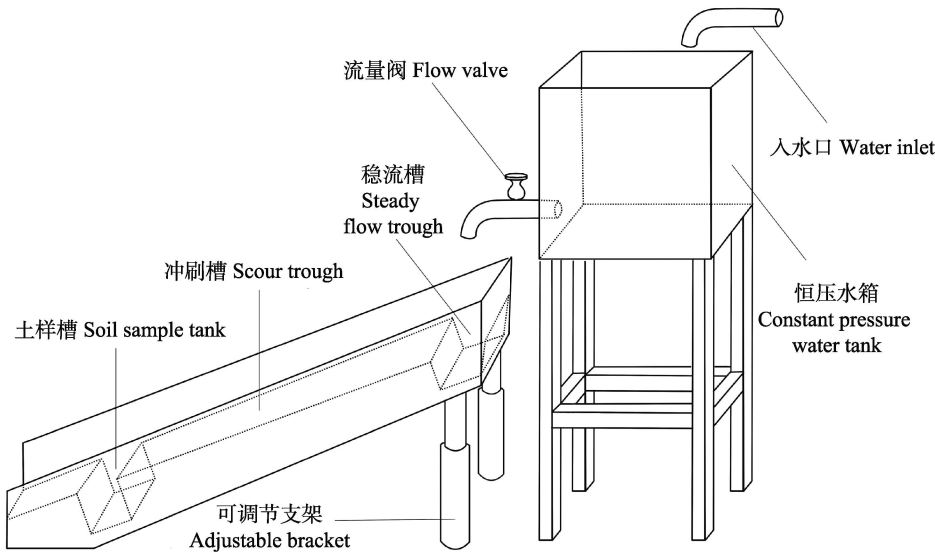


图2 土壤抗冲性试验装置  
Fig. 2 Soil anti-scourability experimental facility

和土壤抗冲性及细根指标之间的相关性。使用 Origin 2021完成绘图。

## 2 结果

### 2.1 草本植物群落物种组成

实际调查结果显示(图3), 研究区内共记录草本植物103种, 隶属40科81属, 以菊科及禾本科植物占优且在各类型样地中均有分布。自然更新样地、种植样地、弃耕样地、灌木去除样地、修剪样地中分别记录草本植物38种(13科32属)、26种(14科24属)、36种(17科31属)、53种(26科47属)、49种(26科44属)。从生活型上看, 除弃耕样地外, 其余样地以多年生草本植物占优且差异不显著( $P > 0.05$ ), 多年生草本的物种数占比依次为种植样地(73%) > 自然更新样地(53%) > 修剪样地(52%) > 灌木去除样地(45%) > 弃耕样地(38%), 其中弃耕样地多年生草本植物显著少于其余样地( $P < 0.05$ ), 仍以一年生草本为主。

### 2.2 草本植物群落物种多样性指数

不同维护措施对草本植物群落物种多样性的影响不同(图4)。各样地的Shannon-Wiener多样性指

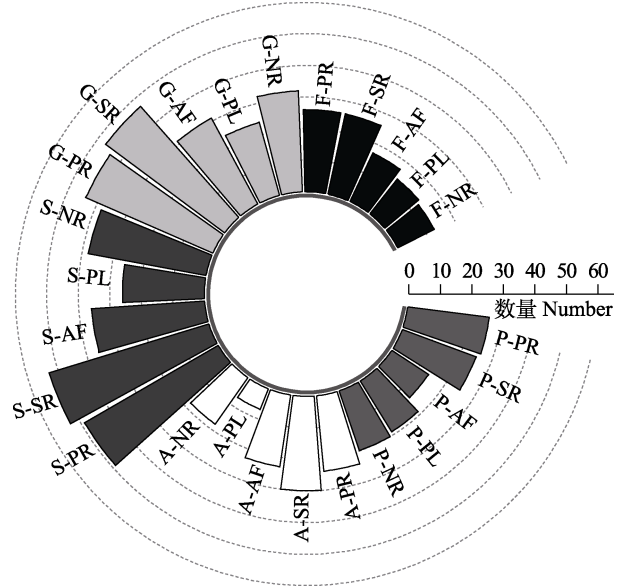


图3 三星堆遗址城墙不同维护措施下草本植物群落物种组成和生活型。F: 科; G: 属; S: 种; A: 一年生草本; P: 多年生草本; NR: 自然更新样地; PL: 种植样地; AF: 弃耕样地; SR: 灌木去除样地; PR: 修剪样地。

Fig. 3 Species composition and life form of herbaceous plant community under different maintenance measures at Sanxingdui City Wall. F, Family; G, Genus; S, Species; A, Annual herb; P, Perennial herb; NR, Natural regeneration plots; PL, Planting plots; AF, Abandoned field plots; SR, Shrub removal plots; PR, Pruning plots.

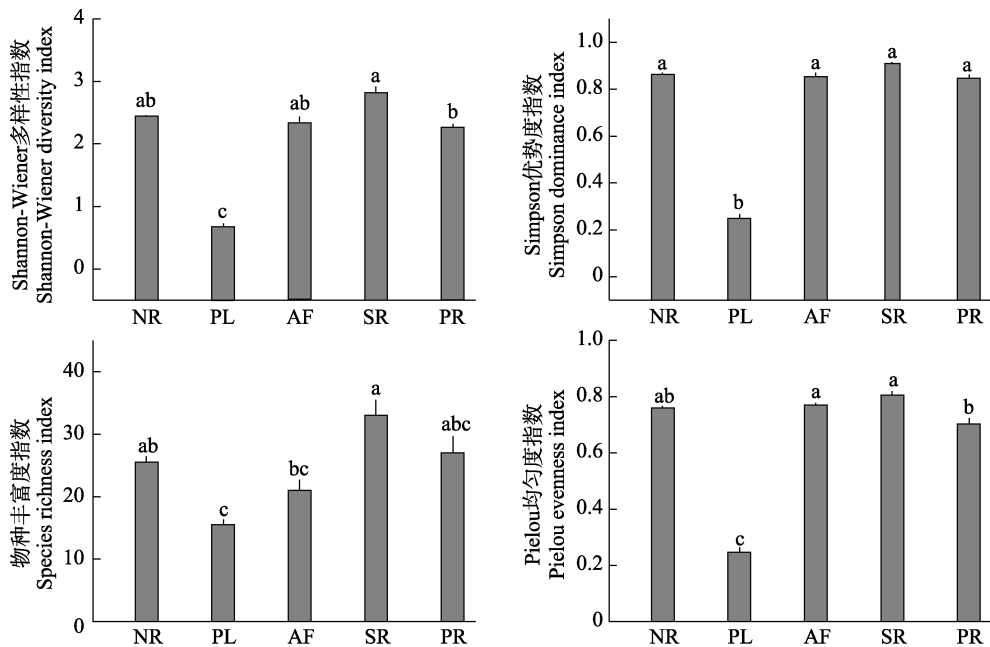


图4 三星堆遗址城墙不同维护措施下草本植物群落物种多样性比较。NR: 自然更新样地; PL: 种植样地; AF: 弃耕样地; SR: 灌木去除样地; PR: 修剪样地。不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Fig. 4 Comparison of species diversity of herbaceous plant communities under different maintenance measures at Sanxingdui City Wall. NR, Natural regeneration plots; PL, Planting plots; AF, Abandoned field plots; SR, Shrub removal plots; PR, Pruning plots. Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level.

数、Simpson优势度指数从大到小排序为灌木去除样地 > 自然更新样地 > 弃耕样地 > 修剪样地 > 种植样地, 物种丰富度指数和Pielou均匀度指数为灌木去除样地 > 弃耕样地 > 修剪样地 > 自然更新样地 > 种植样地。4种多样性指数均表现出灌木去除样地最大, 种植样地最小, 且种植样地的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数显著低于其余4种类型( $P < 0.05$ ), 物种丰富度指数与自然更新样地、灌木去除样地差异显著( $P < 0.05$ )。自然更新样地、弃耕样地、灌木去除样地、修剪样地的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数较接近, 无显著差异( $P > 0.05$ )。

2.3 不同维护措施下土壤抗冲性及细根特征

2.3.1 不同维护措施下冲刷过程中土壤抗冲系数变化特征

由图5可知, 各类型群落初始土壤抗冲系数均无显著差异( $P > 0.05$ )。前7 min内, 各类型群落土壤抗冲系数随时间延长呈上升趋势; 冲刷7 min后, 自然更新样地、灌木去除样地、修剪样地的土壤抗冲系数呈波动式增长, 其中自然更新样地的土壤抗冲系数增幅较大。弃耕样地、种植样地的土壤抗冲系数在7–9 min内陡降( $P < 0.05$ ), 随后又恢复缓慢上升态势。从整体上看, 各类型群落的土壤抗冲性随冲刷的进行而逐渐增强, 其中自然更新样地和修剪样地的土壤抗冲系数变化显著( $P < 0.05$ )。当15 min的冲刷结束时, 自然更新样地的土壤抗冲系数最大, 土壤抵抗径流冲刷优势明显, 其次是灌木去除样地、修剪样地, 而弃耕样地、种植样地土壤抗冲性系数较小且与自然更新样地差异显著( $P < 0.05$ )。

2.3.2 不同维护措施下土壤抗冲性及细根指标比较

由表1可知, 不同维护措施下土壤抗冲系数和细根指标差异显著( $P < 0.05$ )。5种样地类型根表面积密度为0.0749–0.4055  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ , 根长密度为0.3706–0.8659  $\text{cm}/\text{cm}^3$ , 根体积密度为0.0017–0.0164  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 平均根径介于0.73–1.63 mm。土壤抗冲系数和细根指标均在灌木去除样地达到峰值, 且灌木去除样地的根表面积密度、根体积密度、平均根径与其他样地类型差异显著( $P < 0.05$ )。此外, 土壤抗冲系数和根长密度在种植样地最小, 根表面积密度、根体积密度、平均根径、分叉数在弃耕样

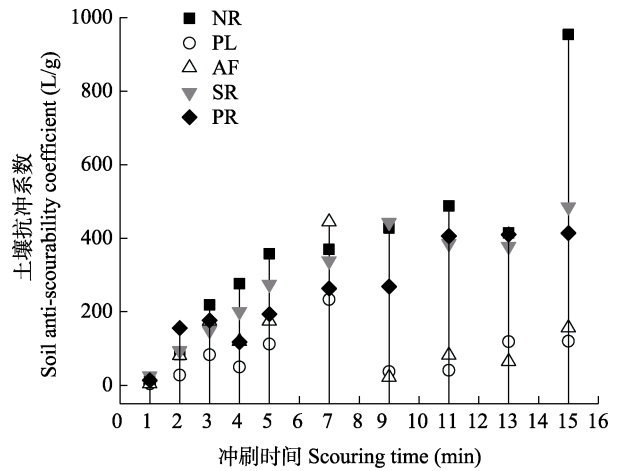


图5 三星堆遗址城墙不同维护措施下冲刷过程土壤抗冲性变化特征。NR: 自然更新样地; PL: 种植样地; AF: 弃耕样地; SR: 灌木去除样地; PR: 修剪样地。

Fig. 5 The variation characteristics of soil anti-scourability in the process of erosion under different maintenance measures at Sanxingdui City Wall. NR, Natural regeneration plots; PL, Planting plots; AF, Abandoned field plots; SR, Shrub removal plots; PR, Pruning plots.

表1 三星堆遗址城墙不同维护措施下土壤抗冲系数及细根指标。不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。  
Table 1 Soil anti-scourability coefficient and fine root index under different maintenance measures at Sanxingdui City Wall. Different small letters mean significant difference at the 0.05 level.

|                                      | 抗冲系数<br>Anti-scourability coefficient<br>(L/g) | 根表面积密度<br>Root surface area<br>density ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ) | 根长密度<br>Root length<br>density ( $\text{cm}/\text{cm}^3$ ) | 根体积密度<br>Root volume<br>density ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) | 平均根径<br>Average root<br>diameter (mm) | 分叉数<br>Root forks        |
|--------------------------------------|--|--|--|---|---------------------------------------|--------------------------|
| 自然更新样地<br>Natural regeneration plots | 118.31 ± 10.94 <sup>ab</sup>                   | 0.1577 ± 0.0183 <sup>c</sup>   | 0.6448 ± 0.0139 <sup>b</sup>                               | 0.0049 ± 0.0005 <sup>b</sup>                                  | 1.19 ± 0.11 <sup>b</sup>              | 1,238 ± 185 <sup>b</sup> |
| 种植样地<br>Planting plots               | 18.81 ± 2.09 <sup>e</sup>                      | 0.2350 ± 0.0119 <sup>b</sup>   | 0.3706 ± 0.0230 <sup>c</sup>                               | 0.0074 ± 0.0005 <sup>b</sup>                                  | 1.20 ± 0.04 <sup>b</sup>              | 583 ± 98 <sup>c</sup>    |
| 弃耕样地<br>Abandoned field plots        | 22.11 ± 2.41 <sup>c</sup>                      | 0.0749 ± 0.0116 <sup>d</sup>   | 0.4168 ± 0.0866 <sup>c</sup>                               | 0.0017 ± 0.0002 <sup>c</sup>                                  | 0.73 ± 0.06 <sup>c</sup>              | 394 ± 80 <sup>c</sup>    |
| 灌木去除样地<br>Shrub removal plots        | 138.86 ± 13.03 <sup>a</sup>                    | 0.4055 ± 0.0369 <sup>a</sup>   | 0.8659 ± 0.0490 <sup>ab</sup>                              | 0.0164 ± 0.002 <sup>a</sup>                                   | 1.63 ± 0.15 <sup>a</sup>              | 1,793 ± 129 <sup>a</sup> |
| 修剪样地<br>Pruning plots                | 99.26 ± 0.72 <sup>b</sup>                      | 0.2304 ± 0.0158 <sup>b</sup>   | 0.7745 ± 0.0386 <sup>ab</sup>                              | 0.0051 ± 0.0005 <sup>b</sup>                                  | 0.91 ± 0.04 <sup>bc</sup>             | 1,592 ± 65 <sup>ab</sup> |

地最小。种植样地与弃耕样地的土壤抗冲系数、根长密度、分叉数无显著差异( $P > 0.05$ ); 种植样地与修剪样地的根表面积密度、根体积密度及平均根径无显著差异( $P > 0.05$ )。

## 2.4 不同维护措施下物种多样性与抗冲系数及细根指标的关系

Pearson相关性分析结果表明(图6), 4种多样性指数均与土壤抗冲系数呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。可见随着物种多样性水平提高, 土壤抗冲能力增强。4种多样性指数之间正相关性极显著( $P < 0.01$ ), 相互影响程度高, 应综合考量。Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数分别与根长密度和分叉数显著正相关( $P < 0.05$ ), 物种丰富度指数与根长密度和分叉数极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与根表面积密度、根体积密度和平均根径呈显著正相关( $P < 0.05$ )。根长密度、平均根径、分叉数与土壤抗冲系数极显著正相关( $P < 0.01$ ), 根表面积密度、根体积密度与土壤抗冲系数亦显著正相关( $P < 0.05$ )。

| $H'$     |        |        |        |          |        |        |        |        |      |    |
|----------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|------|----|
| $D$      | 0.97** |        |        |          |        |        |        |        |      |    |
| $S$      | 0.78** | 0.66** |        |          |        |        |        |        |      |    |
| $J_{sw}$ | 0.97** | 0.99** | 0.61** |          |        |        |        |        |      |    |
| $AS$     | 0.69** | 0.63** | 0.75** | 0.58**   |        |        |        |        |      |    |
| RSAD     | 0.14   | 0.02   | 0.47*  | -0.01    | 0.52*  |        |        |        |      |    |
| RLD      | 0.63** | 0.59** | 0.75** | 0.50*    | 0.81** | 0.64** |        |        |      |    |
| RVD      | 0.23   | 0.08   | 0.49*  | 0.08     | 0.53*  | 0.94** | 0.53*  |        |      |    |
| AVD      | 0.22   | 0.03   | 0.52*  | 0.04     | 0.56*  | 0.74** | 0.36   | 0.88** |      |    |
| RF       | 0.48*  | 0.45*  | 0.61** | 0.37     | 0.87** | 0.65** | 0.85** | 0.56*  | 0.43 |    |
|          | $H'$   | $D$    | $S$    | $J_{sw}$ | $AS$   | RSAD   | RLD    | RVD    | ARD  | RF |

图6 三星堆遗址城墙草本植物群落物种多样性指数与抗冲系数及细根指标的相关性。 $H'$ : Shannon-Wiener多样性指数;  $D$ : Simpson优势度指数;  $S$ : 物种丰富度指数;  $J_{sw}$ : Pielou均匀度指数;  $AS$ : 土壤抗冲系数;  $RSAD$ : 根表面积密度;  $RLD$ : 根长密度;  $RVD$ : 根体积密度;  $ARD$ : 平均根径;  $RF$ : 分叉数。\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ 。

Fig. 6 Correlation of species diversity index, soil anti-scourability coefficient and fine root index of herbaceous plant communities at Sanxingdui City Wall.  $H'$ , Shannon-Wiener diversity index;  $D$ , Simpson dominance index;  $S$ , species richness index;  $J_{sw}$ , Pielou evenness index;  $AS$ , Soil anti-scourability coefficient;  $RSAD$ , Root surface area density;  $RLD$ , Root length density;  $RVD$ , Root volume density;  $ARD$ , Average root diameter;  $RF$ , Root forks. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

## 3 讨论

### 3.1 不同维护措施对三星堆草本植物群落物种组成及多样性的影响

人为因素可能改变群落中的植物组成与相对丰度, 产生积极的植物相互作用, 进而影响物种多样性的空间分布(Arroyo et al, 2021; Blowes et al, 2022)。本研究是在三星堆遗址城墙设置核心保护区10年后进行的实地调查, 发现不同维护措施下草本植物群落的物种组成与多样性存在分异。各样地类型物种组成不同但均以菊科及禾本科等先锋植物占优势, 这可能与较强的繁殖速率和适应能力有关(尹才佳等, 2022)。除弃耕样地外, 其余样地均以多年生草本为主, 在相似环境下维持稳定的物种多样性、减弱土壤侵蚀的潜力更大(Wang et al, 2022)。Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数、物种丰富度指数和Pielou均匀度指数在灌木去除样地最高, 在种植样地最低, 物种组成也表现出同样的规律。这可能是因为灌木去除样地覆土后使土壤养分增加, 灌木及高大草本的去除为低矮草本接受光照提供机遇, 利于原生草本的补充。经过环境与物种的双向选择和适应, 植物类型渐趋多样化(李彩弟等, 2023)。这与赵月丹等(2019)在内蒙古灌丛化草原的平茬实验结果类似。他们发现灌丛平茬后显著提高了相邻植物群落的多样性和均匀度。与之相反, 种植样地大面积栽植丝茅后无进一步维护措施, 再加上丝茅耐受性强和繁殖速度快的特性, 其重要值达93.84%, 可在群落中迅速获取竞争优势以促进自身生长, 从而限制了其他物种的定殖(Parker et al, 2019), 使群落物种组成单一化, 多样性水平较低。

植物群落物种多样性反映了群落物种组成的结构水平, 能够直接或间接体现群落和生态系统的稳定程度和生境差异。更高的物种多样性通常与更高的群落生产力、抗入侵能力和生态系统多功能性相关联(李霞等, 2020; 侯星辰等, 2022)。本研究发现自然更新样地的多样性指数和物种组成次于灌木去除样地, 但差异均不显著。说明原生植被经过长期调整优化, 自然恢复较好。弃耕样地的多样性水平较低, 主要归因于城墙附近居民的耕作活动对遗址环境的破坏, 豆类、瓜类等植物因其传播特征



和蔓生性延缓了邻近草本的恢复。修剪样地经过长期修剪维护,物种组成与自然更新样地无显著差异,但多样性水平较低,可能是不适宜的修剪频率和强度影响了植物生长与更新,导致了物种多样性水平的分异(孙玉真等, 2023)。

### 3.2 不同维护措施对三星堆草本植物群落土壤抗冲性的影响

不同维护措施影响草本植物物种多样性水平。相对多元化的植被可以提高群落的稳定性和持续性,挖掘植物资源高效利用的潜力(张建贵等, 2019);此外,具有更高物种多样性和复杂根系特征的植物群落也有利于形成更稳定的团聚体以增强土壤抗冲性(李霞等, 2020; 李慧等, 2021; 李惠珍等, 2022)。本研究中,灌木去除样地的土壤抗冲性较大且与自然更新样地无显著差异,可能是削弱了上层灌木的竞争优势,利于草本植物的生长与根系的发育。弃耕样地限制耕作后,城墙附近仍有部分居民未迁出,偶有耕作等人为干扰,导致某些结构松散的土块易被冲刷移动,表现出较差的抗冲性能。这与已有研究发现的耕作等扰动减弱土壤抗冲能力的结果类似(肖鹏等, 2019; 资如毅等, 2022)。种植样地的土壤抗冲性较差,同样与种植单一植被导致多样性水平降低及根系指标排序靠后有关。

本研究中土壤抗冲性与根系指标正相关性明显,各指标能很好地描述根系与土壤颗粒间接触的紧密程度。已有研究表明,根长、根表面积和根体积分越大,根系与土壤的结合效果越好,内聚力和加固力越强,土壤抗冲性也有所增强(Zegeye et al, 2018; 肖鹏等, 2019; 张扬等, 2021; Wang et al, 2022)。分叉数包含植物所有主根和侧根,表征根系在土壤中的发育状况及空间分布范围,是植物固土保水能力的体现,且与其总根长、总表面积和总体积关联性强(李思诗等, 2018)。叶鑫等(2020)对河岸带不同生境草本植物群落特征的研究发现物种多样性和土壤抗冲性呈负相关,本研究结果与之相反,可能是本研究区的特殊生境、地表覆盖差异和人为干扰等复杂因素所致。

### 3.3 关于三星堆遗址城墙植被恢复的建议

三星堆遗址城墙的保护是推动中华文明探源工程的关键,城墙表面的植被状况对遗址区风貌展现的重要性不言而喻。根据物种多样性调查结果,

原生草本自然更新状况较好,多样性水平有随时间延长而增加的趋势且对土壤抗冲性提升有积极作用,其物种多样性的配置组合可为遗址城墙表面原生植被恢复提供参考。实地调查中发现部分草本植物具有花果等物候变化规律(如野菊(*Chrysanthemum indicum*)、马蹄金等),建议重点保护以增强遗址城墙的景观价值。此外,覆土能填平遗址城墙表面沟壑且为草本植物重新定殖提供生长空间,后期适度去除灌木可提高草本植物多样性和土壤抗冲性,并能控制其根系在覆土厚度范围内,良好的根系指标与地上植被多样性的相互协调有利于维持遗址城墙的稳态。某些生根性强、生长迅速的草本植物,如种植样地的丝茅广布,导致观察到的物种多样性较低,且在实地调查中发现较多根系已延伸至60–80 cm,必须及时去除以减轻根系对遗址的破坏和对原生植被的排挤。

综上,不同维护措施下草本植物物种多样性与根系特征可显著影响土壤抗冲性,灌木去除样地与自然更新样地的草本植物物种多样性指数、根系特征与土壤抗冲性较好。结合三星堆遗址城墙的文化属性与发展要求,建议实行原生境保护措施,促进适应性强、根系浅的原生草本植物自然更新以形成良好的植被覆盖。必要时辅以灌木去除、修剪等维护措施,有效提升物种多样性和土壤抗冲性。由于植被生长与当地气候及土壤养分条件密切相关,本研究的理念和实践还需深入探讨。但在当下土遗址保护的探索阶段,仍可为原有植被较多的湿润地区土遗址保护提供新思路。

**致谢:** 感谢四川农业大学林学院曾洪老师在植物分类及鉴定上提供的宝贵建议,感谢四川省文物考古研究院在野外工作及文章撰写中的支持与帮助!

### 参考文献

- Arroyo AI, Pueyo Y, Saiz H, Alados CL (2021) Plant-plant interactions and local patterns of diversity from semi-arid to subalpine Mediterranean plant communities. *Biodiversity and Conservation*, 30, 3481–3508.
- Blowes SA, Daskalova GN, Dornelas M, Engel T, Gotelli NJ, Magurran AE, Martins IS, McGill B, McGlinn DJ, Sagouis A, Shimadzu H, Supp SR, Chase JM (2022) Local biodiversity change reflects interactions among changing abundance, evenness, and richness. *Ecology*, 103, e3820.



- Evju M, Blumentrath S, Skarpaas O, Stabbetorp OE, Sverdrup-Thygeson A (2015) Plant species occurrence in a fragmented grassland landscape: The importance of species traits. *Biodiversity and Conservation*, 24, 547–561.
- Fang JY, Wang XP, Shen ZH, Tang ZY, He JS, Yu D, Jiang Y, Wang ZH, Zheng CY, Zhu JL, Guo ZD (2009) Methods and protocols for plant community inventory. *Biodiversity Science*, 17, 533–548. (in Chinese with English abstract) [方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪 (2009) 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 17, 533–548.]
- Guo YN, Gong CG, Yang J, Zhu GQ (2022) Research progress on influence of herbaceous vegetation on slope stability. *Acta Agrestia Sinica*, 30, 841–849. (in Chinese with English abstract) [郭洋楠, 宫传刚, 杨剑, 朱国庆 (2022) 草本植物对边坡稳定性影响研究进展. *草地学报*, 30, 841–849.]
- Harpole WS, Sullivan LL, Lind EM, Firn J, Adler PB, Borer ET, Chase J, Fay PA, Hautier Y, Hillebrand H, Macdougall AS, Seabloom EW, Williams R, Bakker JD, Cadotte MW, Chaneton EJ, Chu CJ, Cleland EE, D'Antonio C, Davies KF, Gruner DS, Hagenah N, Kirkman K, Knops JMH, La Pierre KJ, McCulley RL, Moore JL, Morgan JW, Prober SM, Risch AC, Schuetz M, Stevens CJ, Wragg PD (2016) Addition of multiple limiting resources reduces grassland diversity. *Nature*, 537, 93–96.
- Hou XC, Lu SW, Xiang CL, Li SN, Zhao N, Xu XT (2022) Responses of plant community diversity to human disturbance in temperate grassland with different soil parent materials. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33, 2153–2160. (in Chinese with English abstract) [侯星辰, 鲁绍伟, 向昌林, 李少宁, 赵娜, 徐晓天 (2022) 不同母质温带草地植物群落多样性对人为干扰的响应. *应用生态学报*, 33, 2153–2160.]
- Johnson DP, Catford JA, Driscoll DA, Gibbons P (2018) Seed addition and biomass removal key to restoring native forbs in degraded temperate grassland. *Applied Vegetation Science*, 21, 219–228.
- Li CD, Zhang CP, Yu Y, Yang XX, Yang ZZ, Feng B, Zhang XF, Liu YZ, Wei LN, Sun CC, Dong QM (2023) Effects of planting patterns on vegetation and soil characteristics of artificial pasture in the Qinghai Lake Basin. *Acta Agrestia Sinica*, 31, 471–478. (in Chinese with English abstract) [李彩弟, 张春平, 俞旸, 杨晓霞, 杨增增, 冯斌, 张小芳, 刘玉祯, 魏琳娜, 孙彩彩, 董全民 (2023) 种植方式对青海湖流域人工草地植被和土壤养分特征的影响. *草地学报*, 31, 471–478.]
- Li H, He YX, Sirimuji, Wang BJ, Liu KS (2021) Research progress on the effects of root niche differences on ecosystems. *Pratacultural Science*, 38, 501–513. (in Chinese with English abstract) [李慧, 何宜璇, 斯日本极, 王宝杰, 刘克思 (2021) 根系生态位差异对生态系统的影响. *草业科学*, 38, 501–513.]
- Li HZ, Wang TQ, Baoyintaogetao, Zhang TY, Yan WB, Huang N, Luo YQ, Huang ZX, Liu ZY (2022) Effects of plant diversity on root morphology and leaf area index of legume-grass mixture community. *Chinese Journal of Grassland*, 44, 50–57. (in Chinese with English abstract) [李惠珍, 王天琦, 宝音陶格涛, 张天宇, 闫文彬, 黄楠, 罗雅琴, 黄子轩, 刘志英 (2022) 植物多样性水平对豆禾混播群落根系形态及叶面积指数的影响. *中国草地学报*, 44, 50–57.]
- Li SS, Si XJ, Jiang FS, Lin JS, Cai XZ, Wu Y, Huang YH (2018) Root architecture of eight Gramineae plant species in the Benggang Area of Changting County. *Acta Pratacultural Sinica*, 27, 215–222. (in Chinese with English abstract) [李思诗, 司晓静, 蒋芳市, 林金石, 蔡学智, 吴俟, 黄炎和 (2018) 长汀县崩岗区8种禾本科植物根系构型特征. *草业学报*, 27, 215–222.]
- Li X, Zhu WZ, Sun SQ, Shu SM, Sheng ZL, Zhang J, Liu T, Zhang ZC (2020) Influence of habitat on the distribution pattern and diversity of plant community in dry and warm valleys of the middle reaches of the Dadu River, China. *Biodiversity Science*, 28, 117–127. (in Chinese with English abstract) [李霞, 朱万泽, 孙守琴, 舒树淼, 盛哲良, 张军, 刘亭, 张志才 (2020) 大渡河中游干暖河谷区生境对植物群落分布格局和多样性的影响. *生物多样性*, 28, 117–127.]
- Liu XL, Zhang XC, Liu YS, Zhang WR, Sun T (2020) Effects of vegetation restoration on the species composition and diversity of plant communities in the limestone mountains in northern Anhui Province. *Pratacultural Science*, 37, 845–852. (in Chinese with English abstract) [刘晓丽, 张孝春, 刘艺衫, 张蔚然, 孙涛 (2020) 皖北石灰岩山地不同植被恢复模式对植物群落物种组成及多样性的影响. *草业科学*, 37, 845–852.]
- Lou YB, Kang HL, Wang WL, Guo MM, Guo WZ, Xiao H (2023) Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance along gully headwalls in the gullied Loess Plateau. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 1265–1280.
- Ma KP, Liu YM (1994) Measurement of biotic community diversity. I.  $\alpha$  diversity (Part 2). *Chinese Biodiversity*, 2, 231–239. (in Chinese) [马克平, 刘玉明 (1994) 生物群落多样性的测度方法. I.  $\alpha$ 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 2, 231–239.]
- Parker SS, Harpole WS, Seabloom EW (2019) Plant species natural abundances are determined by their growth and modification of soil resources in monoculture. *Plant and Soil*, 445, 273–287.
- Sha XY, Li K, Wang WL, Lou YB, Kang HL, Feng LQ, Nie HY (2022) Characteristics of soil anti-scourability in gully head wall of grass-covering on the gullied Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33, 133–140. (in Chinese with English abstract) [沙小燕, 李魁, 王文龙, 姜义宝, 康宏亮, 冯兰茜, 聂慧莹 (2022) 黄土高塬沟壑区草地沟头立壁土壤抗冲性特征. *应用生态学报*, 33, 133–140.]
- Sun YZ, Wang ZT, Bao Y, Wei WF, Yang XY (2023) Response of plant community characteristics of urban

- remnant mountains to different ways and intensity of artificial disturbance. *Acta Ecologica Sinica*, 43, 4632–4650. (in Chinese with English abstract) [孙玉真, 王志泰, 包玉, 魏文飞, 杨兴艺 (2023) 城市遗存山体植被群落特征对不同人为干扰方式及强度的响应. *生态学报*, 43, 4632–4650.]
- Tian M, Yan C, Zhou J (2019) Influence of varying cover-soil thickness on the restoration of degraded riparian grassland. *Pratacultural Science*, 36, 2193–2200. (in Chinese with English abstract) [田曼, 严成, 周静 (2019) 覆土厚度对受损河滩草地群落特征的影响. *草业科学*, 36, 2193–2200.]
- Wang F, Sun ML, Xu L, Liu W (2013) Preliminary study of the protective effects of plants on earthen sites—The earthen sites in eastern Inner Mongolia as examples. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 25(1), 6–14. (in Chinese with English abstract) [王菲, 孙满利, 徐路, 刘炜 (2013) 植物对土遗址的保护作用初探——以内蒙古东部地区土遗址为例. *文物保护与考古科学*, 25(1), 6–14.]
- Wang XS, Guo MM, Liu JL, Kong XL, Peng DQ, Zhang Q (2022) Soil anti-scourabilities of four typical herbaceous plants and their responses to soil properties, root traits and slope position in Northeast China. *Sustainability*, 14, 16807.
- Xiao P, Lü G, Wang HL, Zhai JX (2019) Effects of different vegetation restoration models on soil scour resistance in dump of open-pit coal mine. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(6), 18–24, 31. (in Chinese with English abstract) [肖鹏, 吕刚, 王洪禄, 翟景轩 (2019) 不同植被恢复模式对露天煤矿排土场土壤抗冲性的影响. *水土保持研究*, 26(6), 18–24, 31.]
- Xu DY (2021) A review of the research on Sanxingdui culture in the past forty years. *Chinese Culture Research*, (2), 51–62. (in Chinese with English abstract) [许丹阳 (2021) 三星堆文化研究四十年. *中国文化研究*, (2), 51–62.]
- Ye X, Yu FY, Zhou RH, Wang KY, Wang M, Dong HJ, Hao JF (2020) Differences of species diversity of herbaceous vegetation and soil anti-scourability in different habitats of riparian zone along Wenjiang Section of Jinma River, Science of Soil and Water Conservation, 18(5), 119–126. (in Chinese with English abstract) [叶鑫, 余飞燕, 周润惠, 王坤悦, 王敏, 董洪君, 郝建锋 (2020) 金马河温江段河岸带不同生境草本植物多样性和土壤抗冲性差异. *中国水土保持科学*, 18(5), 119–126.]
- Yin CJ, Ma L, Zhu DH, Zou SZ, Kang D (2022) Species composition and niche characteristics of secondary plant communities on regenerated landslides after earthquake. *Chinese Journal of Ecology*, 41, 1525–1534. (in Chinese with English abstract) [尹才佳, 马龙, 朱大海, 邹书珍, 康迪 (2022) 地震滑坡体自然恢复后次生植物群落物种组成及生态位特征. *生态学杂志*, 41, 1525–1534.]
- Yu SY, Xiang L, Yu J, Chen CL, Su TC, Wang YY, Zhang HW, Li J, Hao JF (2022) Effects of stand density on understory species diversity and soil anti-scourability of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 28, 1594–1600. (in Chinese with English abstract) [鱼舜尧, 向琳, 喻静, 陈聪琳, 苏天成, 王姚瑶, 张瀚文, 李婧, 郝建锋 (2022) 林分密度对四川云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤抗冲性的影响. *应用与环境生物学报*, 28, 1594–1600.]
- Zegeye AD, Langendoen EJ, Tilahun SA, Mekuria W, Poesen J, Steenhuis TS (2018) Root reinforcement to soils provided by common Ethiopian highland plants for gully erosion control. *Ecohydrology*, 11, e1940.
- Zhang JG, Wang LD, Yao T, Li HY, Gao YM, Yang XM, Li CN, Li Q, Feng Y, Hu YT (2019) Plant community structure and species diversity differences in alpine grassland in the Qilian Mountains with different levels of degradation. *Acta Pratacultural Sinica*, 28(5), 15–25. (in Chinese with English abstract) [张建贵, 王理德, 姚拓, 李海云, 高亚敏, 杨晓玫, 李昌宁, 李琦, 冯影, 胡彦婷 (2019) 祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究. *草业学报*, 28(5), 15–25.]
- Zhang R, Dong HJ, Zhou RH, Yu FY, Wang M, Chen CL, Yu J, Hao JF (2020) Effects of root characteristics of shrub community on soil anti-scourability in the Jiabin Mountains, Sichuan Province. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 3558–3566. (in Chinese with English abstract) [张荣, 董洪君, 周润惠, 余飞燕, 王敏, 陈聪琳, 喻静, 郝建锋 (2020) 四川夹金山灌丛群落根系特征对土壤抗冲性的影响. *生态学杂志*, 39, 3558–3566.]
- Zhang Y, Li CY, Han SJ, Chen XW (2021) Root architecture of main tree species and the effects on soil reinforcement in typical black soil region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 1726–1734. (in Chinese with English abstract) [张杨, 李程远, 韩少杰, 陈祥伟 (2021) 典型黑土区主要树种根系构型特征及其对固土能力的影响. *应用生态学报*, 32, 1726–1734.]
- Zhang YH, Yang Y, Xian WK (2005) Assessment to the geo-environmental status and problem prevention of Sanxingdui Ruins. *Sichuan Cultural Relics*, 22(1), 21–28. (in Chinese with English abstract) [张跃辉, 杨洋, 鲜文凯 (2005) 三星堆遗址环境地质现状评估及问题防治. *四川文物*, 22(1), 21–28.]
- Zhao YD, He XD, Ding XF, Dong K, Hao G, Gao YB (2019) Effects of pruning treatment on plants of *Caragana microphylla* community in typical steppe of Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 27, 1022–1028. (in Chinese with English abstract) [赵月丹, 何兴东, 丁新峰, 董轲, 郝广, 高玉葆 (2019) 平茬对内蒙古典型草原小叶锦鸡儿群落植物的影响. *草地学报*, 27, 1022–1028.]
- Zi RY, Zhao LS, Qian XH, Chen J (2022) Relationship between soil anti-scourability and soil physical properties in karst mountain areas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(3), 23–29. (in Chinese with English abstract) [资如毅, 赵龙山, 钱晓鹤, 陈娟 (2022) 喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系. *水土保持学报*, 36(3), 23–29.]

(责任编辑: 潘庆民 责任编辑: 黄祥忠)