

DOI: 10.20103/j.stxb.202404150828

赵凡, 钟欣艺, 谢平畅, 胡芮, 郝建锋, 姚雪. 不同植被维护措施对三星堆遗址城墙草本植物群落物种多样性与生物量的影响. 生态学报, 2024, 44(19): 8716-8725.

Zhao F, Zhong X Y, Xie P C, Hu R, Hao J F, Yao X. Impact of different vegetation maintenance measures on species diversity and biomass of herbaceous plant communities at Sanxingdui City Wall. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8716-8725.

不同植被维护措施对三星堆遗址城墙草本植物群落物种多样性与生物量的影响

赵 凡¹, 钟欣艺², 谢平畅³, 胡 芮¹, 郝建锋^{2,4}, 姚 雪^{5,*}

1 四川省文物考古研究院, 成都 610041

2 四川农业大学林学院, 成都 611130

3 德阳市广汉三星堆遗址管理委员会, 德阳 618300

4 四川农业大学水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130

5 西南民族大学旅游与历史文化学院, 成都 610041

摘要: 为了解三星堆遗址城墙植被分布和恢复现状, 本研究以三星堆遗址城墙草本植物群落为重点, 评估自然更新、种植、弃耕、灌木去除、修剪五种维护措施对其物种多样性和生物量的影响。结果显示, 研究区共记录草本植物 40 科 81 属 103 种, 各样地类型均以多年生草本植物为主, 重要值较大的科为菊科和禾本科。总体来看, 灌木去除样地的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、物种丰富度指数和 Pielou 均匀度指数最高, 而种植样地最低; 对照样地、弃耕样地、灌木去除样地、修剪样地的 4 种多样性指数无显著差异。种植样地的地上生物量、地下生物量和总生物量最大, 其次是对照样地, 弃耕样地最小。所有样地的根分层生物量均随土层深度的增加而减少, 在 0—20 cm 土层中, 种植样地的根生物量最大, 而修剪样地的根系生物量最低。在 20—40 cm 土层中, 弃耕样地的根系生物量显著高于其余样地 ($P < 0.05$), 在 10—20 cm、40—60 cm 土层中, 各类型样地的根生物量均无显著差异 ($P > 0.05$)。草本植物的地上、地下和总生物量与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 而与物种丰富度指数相关性不显著 ($P > 0.05$)。综上, 以自然更新为主并辅以针对性干预措施(如灌木去除和修剪)的原生境保护措施, 同时控制地上地下生物量的比例, 减缓其根系劈裂、生物风化等破坏作用, 促进物种多样性和生物量稳定在最有利于遗址保护展示的范围。

关键词: 三星堆遗址城墙; 原生境保护; 物种多样性; 生物量; 人工维护; 草本植物群落

Impact of different vegetation maintenance measures on species diversity and biomass of herbaceous plant communities at Sanxingdui City Wall

ZHAO Fan¹, ZHONG Xinyi², XIE Pingchang³, HU Rui¹, HAO Jianfeng^{2,4}, YAO Xue^{5,*}

1 Cultural Relics and Archaeology Institute of Sichuan, Chengdu 610041, China

2 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

3 Deyang City Guanghan Sanxingdui Site Management Committee, Deyang 618300, China

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

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

Abstract: In order to comprehend the distribution patterns and recovery status of the vegetation at Sanxingdui City Wall, this study focused on the herbaceous plant community to investigate the impacts of five maintenance measures. A field survey

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

收稿日期: 2024-04-15; 网络出版日期: 2024-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaozhibushixue0726@126.com

was carried out 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. The survey examined species diversity, biomass and their interrelationships. A total of 103 herbaceous plant species from 40 families and 81 genera were identified in the study area, with perennial herbaceous plants dominating each site type, and Asteraceae and Gramineae as the dominant families. The highest values for the Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index, species richness index, and Simpson dominance index were observed in the shrub removal plot, while the lowest values were in the planting plot; no significant differences were found among the four diversity indices in the control plot, abandoned field, shrub removal plot and pruning plot ($P>0.05$). The distribution of biomass, both above-ground and below-ground, varied significantly among the experimental plots. Notably, the control plot exhibited the highest biomass levels, followed by the planting plot, while the abandoned field showed the lowest biomass accumulation. Delving deeper into root stratification, it was observed that root biomass decreased as the soil depth increasing. In the topsoil layer (0—20 cm), the planting plot boasted the highest root biomass, contrasting with the pruning plot that had the lowest. Moving down to the 20—40 cm layer, it was intriguing to find that the abandoned field displayed a notably higher root biomass compared to other plots ($P<0.05$). However, no significant disparities were detected in root biomass among different plot types in both the 10—20 cm and 40—60 cm soil layers. The aboveground biomass of herbaceous plants exhibited significantly negative correlation with the Shannon-Wiener diversity index, Simpson dominance index, and Pielou evenness index ($P<0.01$), while showing no significant correlation with the species richness index ($P>0.05$). Both belowground biomass and total biomass did not demonstrate significant correlations with any of the four diversity indices. In summary, the original habitat protection measures mainly focused on natural regeneration and were supplemented by targeted interventions such as shrub removal and pruning. At the same time, the proportion of aboveground and underground biomass was controlled to slow down the destructive effects of root splitting and biological weathering, promote species diversity and biomass stability in the range most conducive to site protection and display.

Key Words: Sanxingdui City Wall; *in situ* conservation; species diversity; biomass; maintenance measures; herbaceous plant communities

植物物种多样性是群落结构和功能复杂性的重要指标,对其进行全面研究是理解群落物种组成、评估物种丰富度和维持生态系统稳定性的基础^[1]。一般认为物种多样性越高的群落,抵御环境波动的能力越强,随着时间的推移,其恢复力也可能增强^[2-3]。生物量代表生物体或群落在特定时间内积累的有机物总量,是生态系统过程的基础和重要的营养来源^[4-5]。在植物群落中,物种多样性水平与地上生物量和地下生物量的分配存在着重要的相互作用。多样性高的群落更有可能表现出资源的均衡分配,进而提高生产力和多功能性^[6-7]。研究植物多样性与生物量之间的关系有助于理解多样性对生态系统功能的贡献,并可为生产力维持及生态环境恢复提供科学依据^[8]。

不同植被维护措施可能影响植物群落动态和物种之间的相互作用,提高物种对周围环境的生态适应性,导致物种多样性的迅速变化,并通过调节生物量的生产以及光照和水资源的可用性来影响生态系统生产力和多样性^[2,9]。植草、清除灌木、覆盖等维护措施已被证明可以改善群落组成,增加水分和养分的供应,从而促进草本植物群落的恢复生长^[10-12]。反之,不合理的维护措施可能造成生境破碎化,进而降低物种多样性,导致生态系统功能下降^[13-14]。长期以来,维护措施的实施主要针对草原、高寒草甸、人工林下草本层等区域^[5,8,15-16],而对易遭受人类活动和环境压力双重破坏的露天大型土遗址的植被生态学研究则鲜少涉及。

我国土遗址多采用物理结构补强、化学防风化加固、保护性建筑覆盖等工程措施进行保护。Cao 等^[17]揭示了藻、藓生物结皮自然发育对中国夯土长城的保护机制,证实了基于自然的解决方案对于干旱区土遗址保护的重要前景,但生物结皮可能产生潜在的生物腐蚀与风化作用,破坏土遗址的原状和景观。植被具有较大的

生物量和多样性,能够更好的抑制侵蚀和剥蚀,尤其草本植物繁殖和再生速率快,受环境威胁更小,用其覆盖保护土遗址可作为传统工程措施的替代方案^[8,17-18]。该理念在秦始皇陵、汉魏洛阳城等土遗址有一定应用,但未曾深入探讨植物群落后续自然演替情况以及加固土壤、减缓侵蚀等保护效果,尚未针对植被覆盖问题最为严重的潮湿环境大型露天土遗址开展相关研究和工程实践^[19]。三星堆遗址城墙的墙体形态大致呈宽大的土垄或土台,主要由粘性土斜向和平行堆筑而成^[20]。数千年来在各种自然营力和人为活动的影响下,加之成都平原湿润多雨的环境,墙体植被覆盖问题严重,其中杂乱无序的草本群落完全遮蔽了墙体形态,导致其建筑形制不可辨识,严重影响城墙的保护展示^[21-22]。研究城墙表面植物群落物种多样性有助于整体评估植物群落对遗址本体的保护与破坏双重作用。通过对地上和地下生物量的调查,以及根分层生物量的分析,可以全面了解植被的生长状况和地下分布情况,据此为采取合理的干预措施满足遗址保护展示需求提供理论依据。然而,不同植被维护措施对草本植物物种多样性和生物量的具体影响,以及这些因素之间的相互关系尚不清楚。

研究三星堆遗址城墙上的草本植物群落,通过研究其物种多样性、生物量及其在 5 种不同植被维护措施(自然更新、种植、弃耕、灌木去除、修剪)下的相互关系,旨在科学评价维护后植被恢复状况及其对城墙的影响,实现文化遗产保护与生态景观恢复的和谐统一,研究结果也可为全国类似具有植被覆盖问题的潮湿环境大型露天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。该区属亚热带湿润气候,年均气温 16—17 °C,年均降水量 890.8 mm。年均日照时数 1229.2 h,年均相对湿度为 82%^[20]。研究区包括三星堆遗址的东城墙、西城墙、南城墙和祭祀区城墙(图 1),墙体宽约 30—50 m,高约 2—6 m,除祭祀区城墙外其余 3 段城墙墙体残存长度均在 400 m 以上^[20]。各段城墙早期遭受同等耕作破坏,2002 年设立核心保护区实行退耕禁种。草本植物群落以喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、大白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、积雪草(*Centella asiatica*)、马蹄金(*Dichondra micrantha*)等物种为主^[22]。

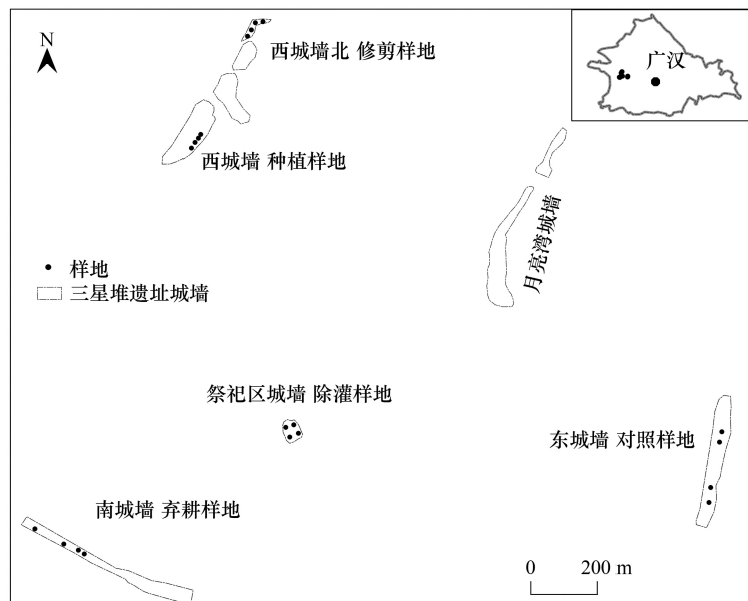


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study area

1.2 样地设置与群落调查

对三星堆遗址城墙的研究包括四个不同样地,反映不同的维护策略,同时以东城墙接近无干扰的植被地块为对照样地^[22]。(1)对照样地(control, CK):2002 年来未进行维护干预,以自然更新主导。(2)种植样地(planting, PL):因历代耕种导致土壤松动裸露,于 2002 年栽种大白茅,后未维护。(3)弃耕样地(abandoned field, AF):2002 年限制耕作后,偶有浅耕。(4)灌木去除样地(shrub removal, SR):位于祭祀区城墙,2012 年表层覆土,深度约 20—60 cm。每年秋季割除灌木和大型草本。(5)修剪样地(pruning, PR):2002 年种植多年生草本植物,每年秋季修剪。

依据方精云等^[23]的研究方法,各类型均设置 4 个 20 m × 30 m 的重复样地,共计 20 个。运用对角线法设置 12 个 1 m × 1 m 草本样方,共计 240 个。记录样方内草本的种名、高度、盖度、株数(丛数)。

1.3 生物量测定

在每个样地中,随机选取 3 个草本样方,采取“全株收获法”获取草本植物生物量,同时在各样方用环刀取 0—60 cm 土层土壤各一份带回实验室,后将草本植物地上、地下部分剪开,洗去地下部分所带的残余土渣,同时洗出各分层环刀内的根系,在 65℃ 烘箱中烘干至恒重,记录地上、地下生物量和根分层生物量^[6,24]。

1.4 物种多样性计算

用如下公式计算草本层 α 多样性指数^[25]:

草本层重要值: $IV = (\text{相对密度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3$

物种丰富度(S): $S = \text{出现在样方内的物种数}$ (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: $J_{sw} = \frac{- \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i}{\ln S}$ (4)

式中, S 为物种数, P_i 为第 i 种的个体数 n_i 占所有物种个体总数 n 的比例,即 $P_i = n_i / n; i = 1, 2, 3, \dots$ 。

1.5 数据处理

采用 SPSS 26 对数据进行统计处理。使用 Origin 2021、R 4.3.2 绘图。采用单因素方差分析法检验不同维护措施下三星堆遗址城墙草本植物群落物种多样性指数和生物量指标的显著差异,统计显著水平为 $P < 0.05$ 。运用 Pearson 相关性分析法分析草本植物多样性与生物量相关性。

2 结果

2.1 物种组成与重要值

研究记录草本植物 103 种,隶属 40 科 81 属(图 2)。其中灌木去除样地和修剪样地草本植物物种数最多,即 53 种(26 科 47 属)、49 种(26 科 44 属),其次是对照样地和弃耕样地,即 38 种(13 科 32 属)、36 种(17 科 31 属),种植样地草本植物物种数最少,即 26 种(14 科 24 属)。从生活型上看,种植样地多年生草本植物占比最高,达 73%,其次是对照样地和修剪样地,分别为 53%、52%,最后是灌木去除样地和弃耕样地,即

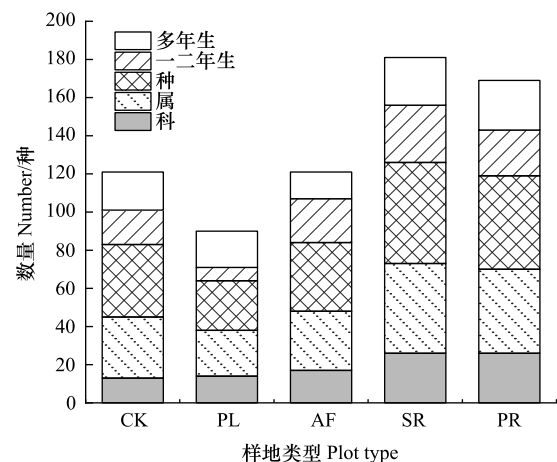


图 2 物种组成和生活型

Fig.2 Species composition and life type

F: 科; G: 属; S: 种; A: 一年生草本; P: 多年生草本; CK: 对照样地; PL: 种植样地; AF: 弃耕样地; SR: 灌木去除样地; PR: 修剪样地

45%、38%。弃耕样地的多年生草本植物显著少于其余样地类型($P<0.05$)。表 1 显示了各样地类型中重要值之和高于 0.9 的物种,禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)植物物种数较多,分别为 10 种和 8 种,且在各样地类型中均有分布。积雪草(*Centella asiatica*)、钻叶紫菀(*Symphotrichum subulatum*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)为对照样地草本群落主要优势种,大白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)在种植样地广布,重要值高达 0.938,繁殖力和适应力较强。喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、狗尾草(*Setaria viridis*)为弃耕样地草本群落主要优势种,五月艾(*Artemisia indica*)、苳草(*Arthraxon hispidus*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)为灌木去除样地草本群落主要优势种,而修剪样地草本群落主要优势种有双穗雀稗(*Paspalum distichum*)、马蹄金(*Dichondra micrantha*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)。

表 1 主要物种及重要值

Table 1 Main species and importance values

科 Family	种类 Species	各样地主要种类的重要值 Important values of main species in each plot				
		CK	PL	AF	SR	PR
菊科 Asteraceae	钻叶紫菀 <i>Symphotrichum subulatum</i>	0.101	0.002	0.011	0.023	
	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i>	0.070	0.006	0.016		
	刺儿菜 <i>Cirsium arvense</i> var. <i>integrifolium</i>	0.060	0.013	0.007	0.005	
	野菊 <i>Chrysanthemum indicum</i>	0.060	0.005	0.037	0.011	
	小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i>	0.058		0.005	0.010	0.004
	马兰 <i>Aster indicus</i>	0.050				0.002
	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	0.035	0.021	0.049	0.045	
	苣荬菜 <i>Sonchus wightianus</i>	0.030	0.001	0.023	0.008	
	五月艾 <i>Artemisia indica</i>			0.004	0.128	
	黄鹌菜 <i>Youngia japonica</i>					0.039
禾本科 Poaceae	大白茅 <i>Imperata cylindrica</i> var. <i>major</i>	0.038	0.938		0.007	
	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>			0.187	0.002	
	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	0.013		0.075	0.010	0.005
	苳草 <i>Arthraxon hispidus</i>	0.004			0.089	0.014
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	0.010		0.013	0.070	0.039
	斑茅 <i>Saccharum arundinaceum</i>				0.055	
	双穗雀稗 <i>Paspalum distichum</i>					0.223
	止血马唐 <i>Digitaria ischaemum</i>					0.063
伞形科 Apiaceae	天胡荽 <i>Hydrocotyle sibthorpioides</i>					0.027
	积雪草 <i>Centella asiatica</i>	0.158		0.005	0.026	0.014
苋科 Amaranthaceae	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	0.042		0.241	0.067	0.035
	小藜 <i>Chenopodium ficifolium</i>			0.019		
酢浆草科 Oxalidaceae	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	0.003		0.039	0.015	0.076
茄科 Solanaceae	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>		0.005	0.013	0.013	0.027
木贼科 Equisetaceae	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>		0.008	0.029	0.017	
爵床科 Acanthaceae	爵床 <i>Justicia procumbens</i>	0.069			0.011	0.006
葡萄科 Vitaceae	乌莓 <i>Causonis japonica</i>				0.044	0.029
旋花科 Convolvulaceae	马蹄金 <i>Dichondra micrantha</i>				0.002	0.209
桑科 Moraceae	葎草 <i>Humulus scandens</i>				0.051	
美人蕉科 Cannaceae	美人蕉 <i>Canna indica</i>				0.035	
牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>			0.059		

CK:对照样地 Control plot; PL:种植样地 Planting plot; AF:弃耕样地 Abandoned field; SR:灌木去除样地 Shrub removal plot; PR:修剪样地 Pruning plot.

2.2 草本群落物种多样性

由图 3 可以看出,灌木去除样地的多样性指数均最高,种植样地最低,其 H' 值、 D 值、 J_{sw} 值显著低于其余 4 种类型($P<0.05$)。对照样地、弃耕样地、灌木去除样地、修剪样地的 H' 值、 D 值、 S 值、 J_{sw} 值较接近,无显著差异。

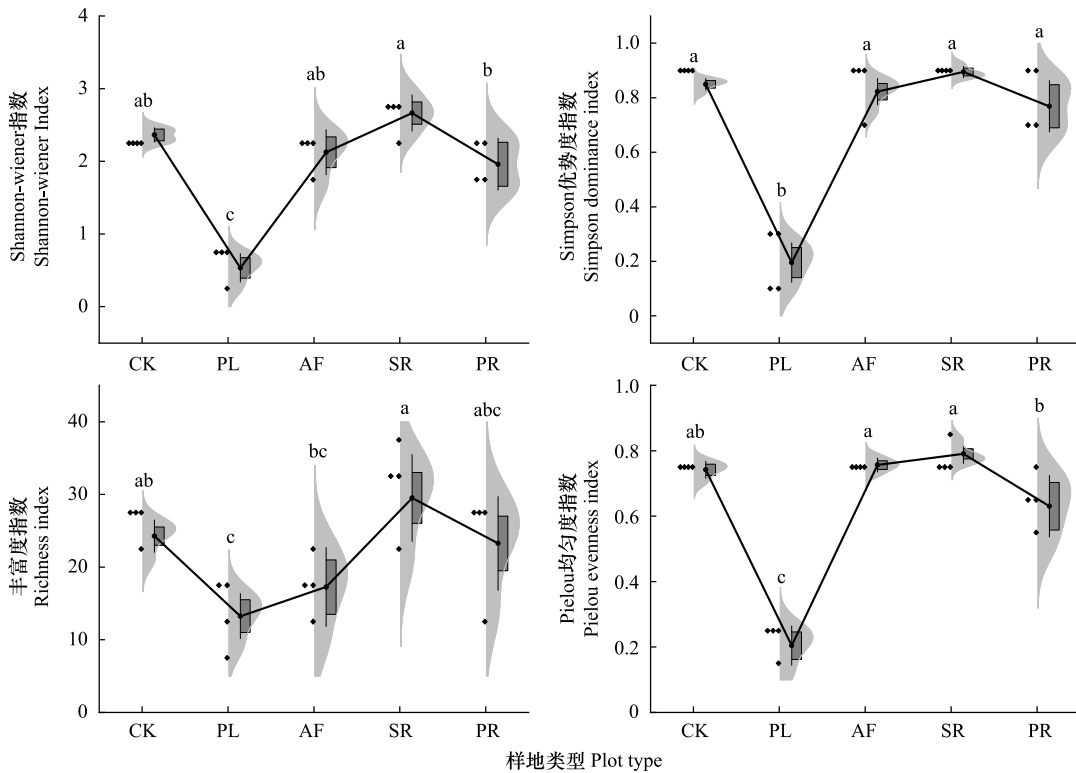


图 3 草本植物群落物种多样性

Fig.3 Species diversity of herbaceous plant communities

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 阴影部分代表 95% 的置信区间

2.3 草本植物群落生物量

不同维护措施下草本植物群落生物量见图 4, 结果表明, 各样地类型中, 种植样地草本植物总生物量最大, 这主要是大白茅茎秆粗壮, 高大丛生的作用。在各部分生物量中, 从地上生物量来看, 种植样地和对照样地的地上生物量显著高于其余类型样地 ($P < 0.05$), 其次是灌木去除样地、修剪样地, 最后是弃耕样地, 三者间差异不显著。从地下生物量来看, 种植样地 > 对照样地 > 灌木去除样地 > 修剪样地 > 弃耕样地, 种植样地和对照样地的地下生物量显著高于其余类型样地 ($P < 0.05$), 其次是灌木去除样地、修剪样地, 最后为弃耕样地。并且发现对照样地和种植样地, 弃耕样地和修剪样地的地下生物量均无显著差异 ($P > 0.05$)。除灌木去除样地外, 其余样地类型的草本植物地上地下生物量分配均表现地上生物量占比大于地下生物量。此外, 只有对照样地、种植样地的地上生物量与总生物量显著正相关 ($P < 0.05$), 即总生物量主要来源于地上生物量。

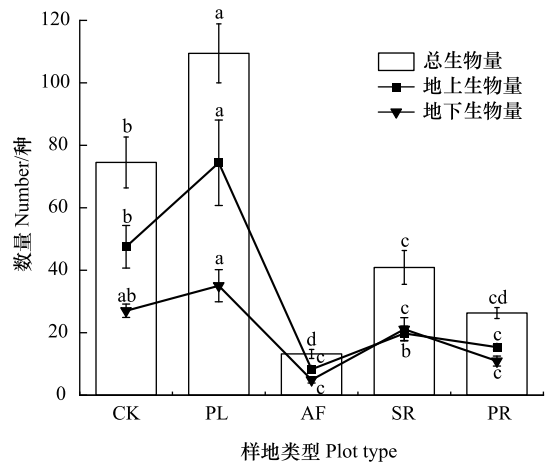


图 4 草本植物群落地上生物量、地下生物量及总生物量

Fig.4 Above ground biomass, below ground biomass and total biomass of herbaceous plant communities

各样地的根分层生物量均随土层深度增加而降低 (图 5), 0—10 cm、10—20 cm 土层根重由大到小表现为种植样地最高, 其次是对照样地和弃耕样地, 最后是灌木去除样地和修剪样地, 20—40 cm 土层中, 弃耕样地

的根重显著高于其余样地类型,在 10—20 cm、40—60 cm 土层中,各类型样地的根重均无显著差异。

2.4 草本植物群落物种多样性和生物量关系

由图 6 所示,草本植物地上、地下及总生物量与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均呈极显著负相关,而与物种丰富度指数相关性不显著。总体表现为草本层生物量随植物群落物种多样性增加而减少。

3 讨论

3.1 植被维护措施对三星堆遗址城墙草本植物群落物种组成、重要值及物种多样性的影响

植物群落物种组成可体现群落特征及其所在的生境条件^[14]。人为因素可能改变植物群落中的物种组成与相对丰度,影响物种多样性的空间分布^[26—27]。从物种组成上看,本研究各样地类型重要值较大的物种均为适应能力较强的菊科和禾本科植物^[28]。弃耕样地的一年生草本植物仍较多,其对生境变化的响应较多年生草本植物快,在相似环境下维持稳定的物种多样性的潜力更低^[13]。

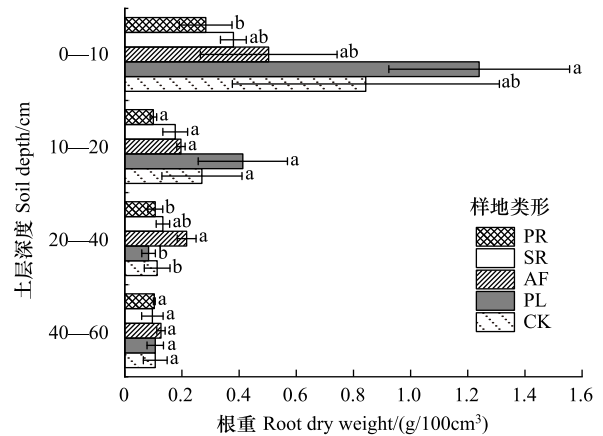


图 5 草本植物群落根分层生物量(0—60 cm)

Fig.5 Root stratified biomass (0—60 cm) of herbaceous plant communities

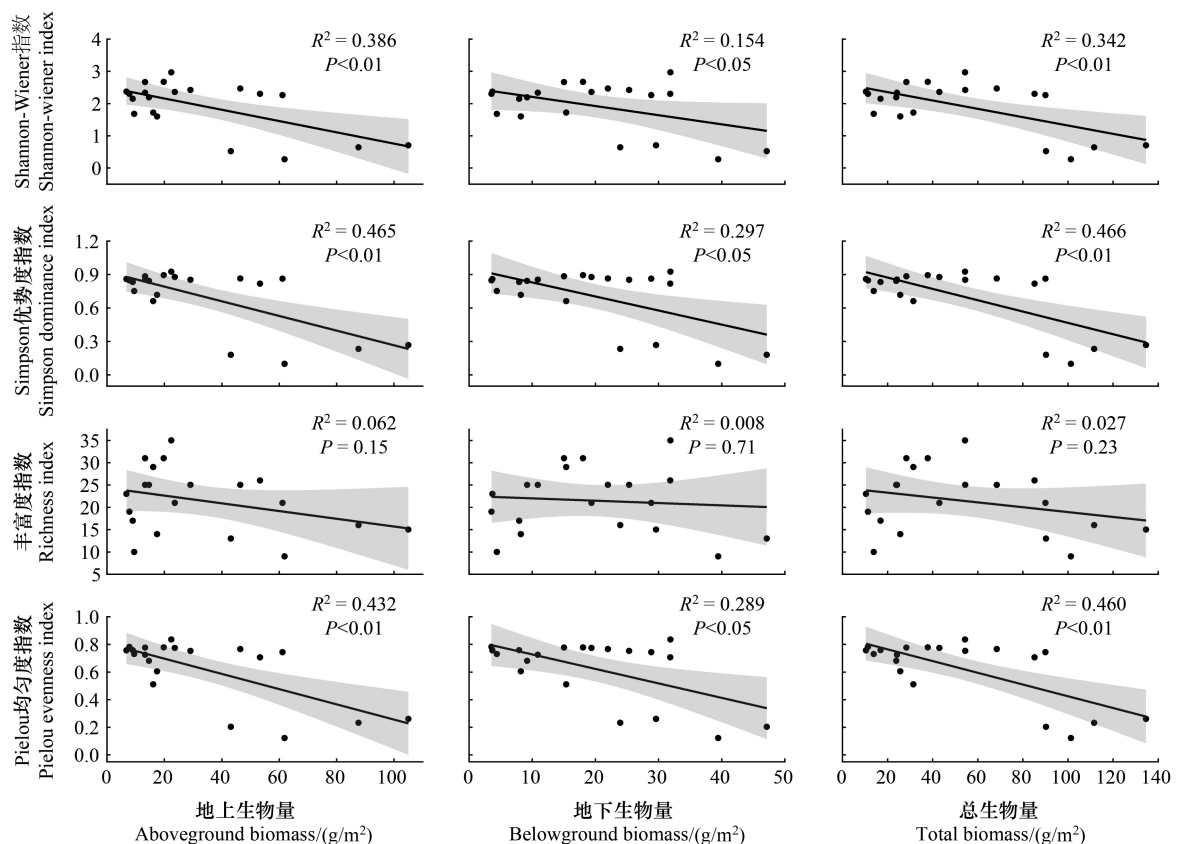


图 6 草本植物群落物种多样性与生物量关系

Fig.6 Relationship between species diversity and biomass of herbaceous plant communities

阴影部分代表拟合曲线的 95% 置信区间

植物群落中的物种多样性通常与生态系统多功能性呈正相关,是生态恢复的关键指标^[29]。本研究观察到灌木去除样地的物种丰富度 *S*、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均为最高,表明其具有丰富的生物多样性。多样性的增强可能归因于灌木层的移除导致的土壤养分的增加,这反过来又为竞争力较弱的草本物种的繁殖创造有利条件,从而增加了物种的丰富度。环境过滤和物种适应的动态相互作用导致植物类型逐渐多样化^[1,9,12]。这些发现与赵月丹等^[15]的结果一致,即灌木刈割后显著提高了邻近植物群落的均匀度和丰富度。而种植样地的草本植物物种数量和多样性指数最低,主要是由于种植后忽略了大白茅管理,确立其优势地位而阻碍其他物种的建立^[30],导致群落物种组成同质化,多样性降低。对照样地的物种多样性水平略低于灌木去除样地,但没有显著差异。表明草本植物具有强大的自然再生能力和稳步恢复的趋势。弃耕样地的物种多样性较低,这可能是由于当地居民在城墙附近种植活动造成的干扰^[22]。修剪样地的物种多样性水平相对较低,可能是由于修剪频率和强度不理想,对草本植物的生长与再生产生不利影响。

3.2 不同植被维护措施下三星堆遗址城墙草本植物群落生物量特征

与其他样地相比,种植样地在地上、地下及总生物量表现出显著优势,地上生物量与总生物量之间存在极显著的正相关关系。大白茅是种植样地的主要优势种,通过其在群落上层地位来获取充足的光资源,并排斥其下低矮草本植物,从而显著提高地上生产力^[16,30-32],最终导致地上生物量占总生物量的比例显著上升。与此一致的是,Rojas-Botero 等^[33]观察到以杂草为主的群落将更多的根系生物量分配给上层土壤。种植样地的根分层生物量出现波动,即随土层增加而先减后增,在 0—20 cm 和 40—60 cm 土壤中具有较高生物量,这表明随着时间推移,有可能形成密集而膨胀的根系网络,这可能会对遗址城墙稳定性和墙内文物保护产生影响。

对照样地在地上、地下及总生物量方面仅次于种植样地,显示出较强的自然再生能力和恢复的生产力。相比之下,弃耕样地的地上、地下及总生物量在所有样地类型中是最低的,这是长期耕种和降雨侵蚀的结果,导致大量裸露的地表和显著的生物量消耗。此外,现阶段弃耕样地目前的植物群主要是短命、低矮的一年生草本物种,光合面积有限,导致生物量变化较小^[9,18]。弃耕样地在 20—40 cm 土层内的根系生物量显著高于其他样地类型,这可能是过去种植的遗留影响,这使弃耕后未完全根除的地下根茎、土壤种子库等仍可继续影响群落。灌木去除样地的地下生物量比例相对较高,这可能是植物在维护后的适应策略。灌木和高大草本物种的去除使喜湿和耐阴植物暴露在外,促使其分配更多资源用于地下根系发育,以应对环境变化^[8],同时,地上植被的移除导致大量养分的损失,破坏了土壤养分动态的良性循环,导致地上生物量下降。修剪样地的地上、地下及总生物量较弃耕样地大但无显著差异,这表明适度修剪使生物量减少。然而,与灌木去除相比,修剪对植物群落的影响不那么明显,导致植物补偿性生长减少,地下生物量显著减少。

3.3 三星堆遗址城墙草本植物群落物种多样性与生物量的关系

生态系统中物种多样性与生物量之间的复杂关系是二者相互作用的结果,物种多样性属性通过改变叶面积指数,影响植物光合作用,进而对生物量产生影响。并且多样性水平的变化可以调节种间相互作用,间接影响植物生长。此外,地上和地下部分的能量分配以及土壤养分的吸收受植物自身生物量分配影响,从而对物种多样性产生反馈^[34]。在本研究中,观察到地上、地下及总生物量与 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数之间存在显著的负相关,然而,与物种丰富度没有显著相关性。如 4 种物种多样性指数均为最高的对照样地的地上、地下及总生物量小,这表明,在较少的人为干预以及温暖湿润气候的有利环境条件下,草本植物自然更新较好,物种数量的增加导致对有限资源的竞争更加激烈,这可能导致总生物量的减少^[5]。质量比假说认为,群落地上生物量的增加在很大程度上归因于优势物种的生产力,而不是多样性本身^[16],例如在种植样地中,高产大白茅物种的竞争优势导致其多样性水平较低,但地上、地下和总生物量水平较高。这与陈丽等^[16]研究结果一致,其发现以高养分利用效率为特征的禾本科植物生物量的增加,有助于高寒草地群落地上生物量的提高。

研究表明,生物量与物种丰富度之间没有显著的相关性,二者间未表现出强烈的相互依赖。此外,分析显

示,各样地类型的根分层生物量均在表层土壤含量最高,表明植物根系在表层分布密集,这有利于有机质的积累和营养资源的获取^[35]。这种根系分布模式符合三星堆遗址城墙目前的保护目标,旨在促进地表植被生长并调节根系向下延伸,在满足文物保护不改变原状和少干预原则的前提下,以平衡稳定和可持续的方式维持遗址的生态功能。

3.4 关于三星堆遗址城墙植被恢复的建议

三星堆遗址城墙保护展示的首要任务是对墙体表面植被进行合理干预,充分发挥其保护作用,尽量减弱其破坏作用。本次调查结果表明,对对照样地通过自然更新,已建立起较好的植被覆盖层。灌木去除和修剪等干预措施通过消除优势灌木和控制草本植物高度,在草本植物群落恢复中发挥关键作用。而存在的问题也需要注意,如种植样地存在优势禾本科植物占主导地位,导致其他草本植物被边缘化。此外,部分植物根系延伸深度可达 60—80 cm,尽管在一定程度上可通过深层锚固和浅层加筋作用提高土体强度,但由此产生的根系劈裂、生物风化等问题不容忽视。相比之下,以一年生草本植物为主的弃耕样地,物种丰富度和多样性较低,生物量显著减少,尚未完全转变为稳定的多年生草本群落。对于未来遗址城墙的植被维护,对对照样地可作为关键参考,其表现出草本植物的有效恢复、现有生物量的增加以及随着时间推移不断增长的多样性。不同草本植物的有效组合可以为植被恢复提出有价值的见解^[36]。针对城墙区域多样化的植被类型和生长条件,可以实施恰当的除灌、修剪等措施,通过抑制灌木和高大草本植物的生长,促进地下生物量分布与地上植物多样性之间的平衡,更好地满足遗址保护展示需求。今后可加强对土壤理化性质等检测、评估土壤养分动态变化情况,以及在必要时及时补充土壤养分,确保三星堆遗址城墙恢复植被群落的稳定性和可持续性。

4 结论

不同植被维护措施下草本植物群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数与地上、地下及总生物量之间负相关性显著。然而,没有观察到物种丰富度与生物量的相关性。表明物种数量本身可能不是这些关系的唯一决定因素。灌木去除样地对对照样地的草本植物物种多样性和生物量相对较高,这对于三星堆遗址城墙植物干预方式的选择具有重要参考性。建议优先考虑自然更新,并辅以针对性的干预措施(如灌木去除和修剪),以促进适应性强、根系浅的草本植物形成群落结构稳定的覆盖层,充分发挥其加固土壤、减缓侵蚀等保护作用,同时控制草本植物地下生物量主要分布于土壤表层,尽量减缓其根系劈裂、生物风化等破坏作用,维持物种多样性和生物量稳定在最有利于遗址保护展示的范围。

参考文献(References):

- [1] 胡风焯,赵锐锋,张丽华,王宏,杨尖拉毛,当知才让,蒋小玉.黄河首曲湿地植物群落生产力、物种多样性及其与生境的关系.生态学报,2023,43(24):10238-10249.
- [2] Hong P B, Schmid B, De Laender F, Eisenhauer N, Zhang X W, Chen H Z, Craven D, De Boeck H J, Hautier Y, Petchey O L, Reich P B, Steudel B, Striabel M, Thakur M P, Wang S P. Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change. Ecology Letters, 2022, 25(2): 555-569.
- [3] 邓婷婷,魏岩,任思远,祝燕.北京东灵山暖温带落叶阔叶林地形和林分结构对林下草本植物物种多样性的影响.生物多样性,2023,31(7):18-29.
- [4] 郭建兴,叶茂,殷锡凯,张凯丽.阿尔泰山两河源牧区草地群落生物量及物种多样性.西北植物学报,2022,42(11):1936-1944.
- [5] 马洁,薛建辉,吴永波,李东昌,高婷,钱刘兵.贵州省喀斯特山地3种人工林林下植物多样性和地上部生物量及其相关性.植物资源与环境学报,2021,30(1):17-26.
- [6] 郝建锋,余飞燕,姚小兰,陈聪琳,喻静,向琳,齐锦秋.放猪干扰对四川夹金山植物群落特征和生物量的影响.生态学报,2021,41(24):9645-9654.
- [7] Schmutz A, Schöb C. Crops grown in mixtures show niche partitioning in spatial water uptake. Journal of Ecology, 2023, 111(5): 1151-1165.
- [8] 王采娥,黄梅,王文银,李子好,张涛,马林,白彦福,王彦龙,施建军,龙瑞军,刘玉,王晓丽,马玉寿,尚占环.三江源区高寒坡地退化植物群落多样性和地上生物量沿海拔梯度的变化特征.生态学报,2022,42(9):3640-3655.
- [9] 孙宇,张峰,郑佳华,赵天启,赵萌莉,张彬.刈割留茬高度对大针茅草原物种多样性及地上生物量的影响.草地学报,2021,29(8):1859-1864.

- [10] Johnson D P, Catford J A, Driscoll D A, Gibbons P. Seed addition and biomass removal key to restoring native forbs in degraded temperate grassland. *Applied Vegetation Science*, 2018, 21(2): 219-228.
- [11] 田曼, 严成, 周静. 覆土厚度对受损河滩草地群落特征的影响. *草业科学*, 2019, 36(9): 2193-2200.
- [12] 李彩弟, 张春平, 俞旻, 杨晓霞, 杨增增, 冯斌, 张小芳, 刘玉祯, 魏琳娜, 孙彩彩, 董全民. 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*, 2023, 31(2): 471-478.
- [13] Evju M, Blumentrath S, Skarpaas O, Stabbeorp O E, Sverdrup-Thygeson A. Plant species occurrence in a fragmented grassland landscape: the importance of species traits. *Biodiversity and Conservation*, 2015, 24(3): 547-561.
- [14] 侯星辰, 鲁绍伟, 向昌林, 李少宁, 赵娜, 徐晓天. 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*, 2022, 33(8): 2153-2160.
- [15] 赵月丹, 何兴东, 丁新峰, 董轲, 郝广, 高玉葆. 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*, 2019, 27(4): 1022-1028.
- [16] 陈丽, 田新民, 任正炜, 董六文, 谢晨笛, 周小龙. 养分添加对天山高寒草地植物多样性和地上生物量的影响. *植物生态学报*, 2022, 46(3): 280-289.
- [17] Cao Y S, Bowker M A, Delgado-Baquerizo M, Xiao B. Biocrusts protect the Great Wall of China from erosion. *Science Advances*, 2023, 9(49): eadk5892.
- [18] 余飞燕, 王坤悦, 叶鑫, 董洪君, 黄凯, 罗志力, 郝建锋. 金马河温江段河岸带不同生境草本群落物种多样性和生物量变化研究. *草地学报*, 2020, 28(3): 793-800.
- [19] 王菲, 孙满利, 徐路, 刘炜. 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*, 2013, 25(1): 6-14.
- [20] 张跃辉, 杨洋, 鲜文凯. 三星堆遗址环境地质现状评估及问题防治. *四川文物*, 2005(1): 21-28.
- [21] 曲瑾, 马建林, 杨柏, 谢振斌. 三星堆月亮湾城墙剖面裂缝病害劣化特性. *安全与环境学报*, 2020, 20(3): 959-968.
- [22] 钟欣艺, 赵凡, 姚雪, 吴雨茹, 许银, 鱼舜尧, 林静芸, 郝建锋. 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*, 2023, 31(8): 14-23.
- [23] 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. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
- [24] Zeng W X, Xiang W H, Zhou B, Ouyang S, Zeng Y L, Chen L, Zhao L J, Valverde-Barrantes O J. Effects of tree species richness on fine root production varied with stand density and soil nutrients in subtropical forests. *Science of The Total Environment*, 2020, 733: 139344.
- [25] 刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法 V. 生物群落物种数目的估计方法. *生态学报*, 1997, 17(6): 601-610.
- [26] Arroyo A I, Pueyo Y, Saiz H, Alados C L. Plant-plant interactions and local patterns of diversity from semi-arid to subalpine Mediterranean plant communities. *Biodiversity and Conservation*, 2021, 30(12): 3481-3508.
- [27] Blowes S A, Daskalova G N, Dornelas M, Engel T, Gotelli N J, Magurran A E, Martins I S, McGill B, McGlenn D J, Sagouis A, Shimadzu H, Supp S R, Chase J M. Local biodiversity change reflects interactions among changing abundance, evenness, and richness. *Ecology*, 2022, 103(12): e3820.
- [28] 尹才佳, 马龙, 朱大海, 邹书珍, 康迪. 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*, 2022, 41(8): 1525-1534.
- [29] 李霞, 朱万泽, 孙守琴, 舒树森, 盛哲良, 张军, 刘亨, 张志才. 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*, 2020, 28(2): 117-127.
- [30] Parker S S, Harpole W S, Seabloom E W. Plant species natural abundances are determined by their growth and modification of soil resources in monoculture. *Plant and Soil*, 2019, 445(1): 273-287.
- [31] Zhou X L, Wang Y S, Zhang P F, Guo Z, Chu C J, Du G Z. The effects of fertilization on the trait-abundance relationships in a Tibetan alpine meadow community. *Journal of Plant Ecology*, 2016, 9(2): 144-152.
- [32] 杨倩, 王妮, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 430-441.
- [33] Rojas-Botero S, Teixeira L H, Prucker P, Kloska V, Kollmann J, LeStradic S. Root traits of grasslands rapidly respond to climate change, while community biomass mainly depends on functional composition. *Functional Ecology*, 2023, 37(7): 1841-1855.
- [34] 张柳桦, 齐锦秋, 李婷婷, 鱼舜尧, 张满月, 张荣, 郝建锋. 林分密度对天津文峰山马尾松人工林下物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2019, 39(15): 5709-5717.
- [35] 崔家宝, 魏晨, 王宁, 曹建军. 高寒草地不同径级根形态对围封年限的响应. *生态学报*, 2023, 43(8): 3327-3338.
- [36] 钟欣艺, 赵凡, 姚雪, 吴雨茹, 许银, 鱼舜尧, 林静芸, 郝建锋. 三星堆遗址城墙不同维护措施下草本植物群落组成、生态位及稳定性特征. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 2938-2946.