

红河干热河谷不同恢复模式下植被对干旱的抵抗力

谭莹莹^{1,2,3,4}, 沈婷^{1,2,3}, 周绍齐^{1,2,3}, 冯毅君^{1,2,3,4}, 桂恒^{1,2,3,4}, 许建初^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院昆明植物研究所资源植物与生物技术重点实验室, 云南昆明 650201;

2. 中国科学院昆明植物研究所山地未来研究中心, 云南昆明 650201; 3. 中国科学院昆明植物研究所红河山地未来研究中心, 云南红河 654400; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 探索不同生态恢复模式下旱季植被的时空变化规律及其对干旱抵抗力的响应, 为干热河谷区域植被生态恢复提供基础数据和理论依据。[方法] 以恢复了 3 a 的乔灌草立体恢复台地(ASH)、自然恢复地(NET)、自然恢复灌木草丛(SG)为研究对象, 重度干扰的退化地(DG)作为对照, 设置固定样地, 结合植物群落调查、无人机监测以及微气候记录, 比较不同样地在旱季初期与旱季末期在物种组成、物种多样性、覆盖度以及微气候特征等方面的差异。[结果] ①物种组成和多样性。旱季期间, ASH 的物种组成变化小, 物种多样性高, 优势物种不明显。NET 物种丰富度较低, 物种组成相对简单, 但现有物种的分布较为均匀。SG 物种组成变化较大, 旱季末期物种丰富度与均匀度均显著下降。②植被覆盖度。旱季初期总覆盖度(FVC)从大到小依次为: ASH>NET>SG>DG, 旱季末期与初期情况基本一致。旱季初末期, NET 变化幅度最大, 其次为 ASH, DG 变化幅度最低。ASH 在不同时期的覆盖度均显著高于其他样地。③微气候调节: 在旱季初期和末期相较于其他植被类型 ASH 的空气温度更低, 而空气湿度更高。[结论] 乔灌草立体植被结构在调节微气候和维持生态稳定性方面具有明显优势, 适合在干热河谷等气候条件极端的区域推广。

关键词: 干热河谷; 生态恢复; 旱季; 植被覆盖度; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0113-11

中图分类号: X171.4, Q948.1

文献参数: 谭莹莹, 沈婷, 周绍齐, 等. 红河干热河谷不同恢复模式下植被对干旱的抵抗力[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 113-123. Tan Yingying, Shen Ting, Zhou Shaoqi, et al. Drought resistance of vegetation under different ecological restoration patterns in Honghe dry-hot valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 113-123. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.002; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.002.

Drought resistance of vegetation under different ecological restoration patterns in Honghe dry-hot valley

Tan Yingying^{1,2,3,4}, Shen Ting^{1,2,3}, Zhou Shaoqi^{1,2,3}, Feng Yijun^{1,2,3,4}, Gui Heng^{1,2,3,4}, Xu Jianchu^{1,2,3,4}

(1. Department of Economic Plants and Biotechnology, Yunnan Key Laboratory for Wild Plant

Resources, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650201,

China; 2. Centre for Mountain Futures, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming,

Yunnan 650201, China; 3. Honghe Center for Mountain Futures, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of

Sciences, Honghe, Yunnan 654400, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation patterns of vegetation during the dry season and their response to drought resistance under different ecological restoration patterns were explored to provide fundamental data and theoretical support for vegetation ecological restoration in Honghe dry-hot valley. [Methods] Three types of restoration patterns were taken as study cases: an artificially constructed arbor-shrub-grass stereoscopic restoration terrace (ASH) that had been restored for three years, naturally restored land post artificial terrace

收稿日期: 2024-10-15

修回日期: 2025-03-17

采用日期: 2025-03-17

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“丛枝菌根真菌在稀树草原土壤多功能性维持中的关键作用和机制”(32371785); 云南省科技厅项目“红河干热河谷区生态修复及绿色发展模式关键技术集成应用”(202302AE090023); 云南省科技厅项目“云南省山地农业生态系统国际联合实验室”(202303AP140001); 云南省科技厅项目(202205AM070007)

第一作者: 谭莹莹(1999—), 女(瑶族), 广西壮族自治区桂林市人, 硕士研究生, 研究方向为干热河谷生态恢复。Email: tanyingying@mail.kib.ac.cn.

通信作者: 许建初(1964—), 男(汉族), 云南省昆明市人, 博士, 研究员, 主要从事全球山地生态系统研究与生态治理。Email: jxu@mail.kib.ac.cn.

development (NET), and naturally restored shrub-grassland (SG), with degraded land (DG) as the control. Fixed sample plots were established, and a combination of vegetation community surveys, drone monitoring and microclimate recording was used to compare species composition, species diversity, vegetation coverage and microclimate characteristics between different plots at the beginning and end of the dry season. [Results] ① Species diversity: During the dry season, ASH exhibited minimal changes in species composition, with high species diversity and no clear dominant species. NET exhibited high species evenness but relatively low species richness. SG experienced significant changes in species composition, with both species richness and evenness showing significant declines by the end of the season. ② Vegetation coverage: At the beginning of the dry season, the total fractional vegetation cover (FVC) ranked as $ASH > NET > SG > DG$, and this pattern remained consistent at the end of the dry season. The degree of change in FVC between the beginning and end of the dry season was greatest in NET, followed by ASH, with DG showing the least change. ASH had significantly higher coverage across all vegetation layers compared to other plots. ③ Microclimate regulation: During the early and late dry seasons, the ASH vegetation exhibits lower temperatures and higher humidity characteristics compared to other vegetation types. [Conclusion] The arbor-shrub-grass stereoscopic vegetation structure demonstrates significant advantages in regulating microclimate and maintaining ecological stability, and therefore making it suitable for promotion in regions with extreme climatic conditions, such as dry-hot valleys.

Keywords: dry-hot valley; ecological restoration; dry season; vegetation coverage; spatiotemporal changes

干热河谷是中国重要的生态屏障,但同时也是生态退化最为严重的脆弱区域之一^[1]。区域内土壤普遍面临干旱化、黏重化、有机质贫化等问题,其发生比率高达46.4%~100%,加之严重的土壤侵蚀和广泛的水土流失^[2],导致其生态系统退化日益加剧。此外,人类活动干扰进一步恶化了这一趋势,使河谷型萨王纳植被正逐渐演替为近似于荒漠的土地,从而严重制约了生态修复和特色农业产业的可持续发展。随着工业化进程的加快和人类对森林的破坏,全球气温持续上升^[3],极端气候频发,进一步加剧了植物生长面临的挑战^[4]。在全球气候变化背景下,该区域正面临更加干燥、炎热和频繁的极端气候事件等多重压力,因此,探索适应干热河谷生态恢复的有效模式已成为亟待解决的关键问题。

植被恢复构成了生态恢复的关键组成部分,是退化生态系统复原与再构工作的先决条件^[5]。植被恢复能够重建植被覆盖,改善土壤结构、养分条件以及微生物群落环境,从而推动整个生态系统结构与功能的全面恢复^[6-7]。植被恢复是生态系统重建的最佳方式,主要包括自然恢复、人工促进自然恢复和生态工程恢复等^[8]。

由于干热河谷地区环境恶劣,气候严酷以及土壤退化严重,生态恢复工作仍面临诸多挑战。当前的植被恢复技术尚不完善,难以有效维持当地的生态多样性^[9-10],尤其在长期干旱季节中,植被结构和功能受到了严重影响。此外,干热河谷旱季水分匮乏,生态系统承受的压力尤为显著。在这种逆境条件下,植被对生态恢复的响应(如生长动态和物种结

构的调整)特征尤为明显。因此,以旱季为研究重点,可以深入揭示不同生态恢复模式在极端环境下的适应性差异和恢复效果,以便提出更具针对性的评估方法。此外,干热河谷的生态退化问题在旱季尤为突出,是生态系统最为脆弱的阶段。因此,系统探索不同生态恢复模式在旱季条件下的表现及其优势,分析其抗旱能力的差异不仅能够有效应对区域生态退化问题,还能为生态修复策略优化提供科学依据。旱季研究由此成为判断生态恢复成效的关键窗口,对推动区域生态保护和可持续发展具有重要意义。

为此,本研究依托中国科学院红河农林复合生态系统观测研究站,以恢复了3 a的乔灌草立体恢复台地(ASH)、自然恢复台地(NET)和自然恢复灌木草丛(SG)为研究对象,并以重度干扰的退化地(DG)为对照,通过植物群落调查、无人机监测以及微气候记录,比较不同样地在旱季初期与末期的物种组成、物种多样性、覆盖度以及微气候特征等指标的时空变化规律,探究不同恢复模式下植物群落结构与组成对干旱抵抗力的响应,为干热河谷地区的生态恢复提供理论依据和数据支持。

1 研究区概况

本研究在中国西南部云南省红河农林复合生态系统野外科学观测研究站(简称“红河站”)开展。该台站位于红河县东南部,地处北纬23°05′—23°27′,东经102°49′—102°37′,海拔高度500~980 m。红河县隶属红河哈尼族彝族自治州,为横断山脉纵谷区的南缘和哀牢山余脉地区。

该区域地形复杂多样,海拔高度在270~2 699 m之间,属亚热带季风气候,全年平均气温20.9℃,年均降水量945.3 mm。由于强烈的地形效应和焚风效应,该县降水时空分布差异较大,呈现出明显的干湿季分明特征,湿季降水集中,旱季则极度干燥,年均干燥度高达1.7^[11]。全县96%以上的面积为山地,地形起伏剧烈,尤其在海拔高度1 100 m以下的河谷地带,植被稀疏,主要分布着荒草地、荒坡、灌丛及抛荒地,生态环境脆弱。根据红河站的监测数据(图1),旱季期间气温呈上升趋势,相对湿度下降,降雨量逐渐减少。

2 研究方法

2.1 样地设置与群落调查

基于野外调查,在红河站选取了4个具有相似环境条件的试验小区,并在每个小区内设置了60 m×60 m观测样地(图2),具体包括乔灌木立体恢复台

地(ASH)、自然恢复台地(NET)、自然恢复灌木草丛(SG),以及严重干扰退化地(DG),样地基本信息如表1所示。

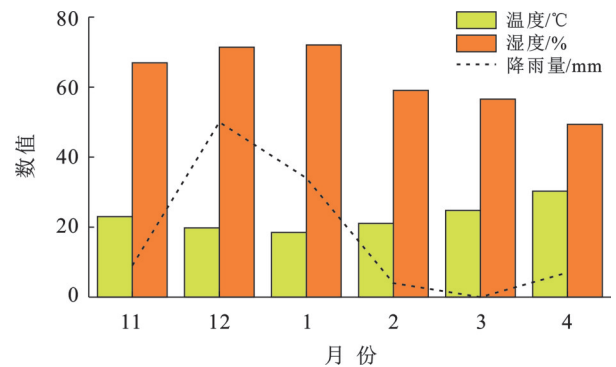
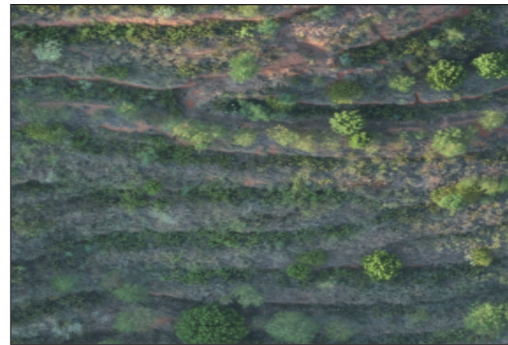


图1 试验区11月至次年4月月均温、月均相对湿度及降雨量

Fig.1 Average monthly temperature, relative humidity and rainfall conditions from November to April of following year in test area



a 乔灌木立体恢复台地(ASH)



b 自然恢复台地(NET)



c 自然恢复灌木草丛(SG)



d 重度干扰退化地(DG)

图2 红河干热河谷典型生态恢复模式

Fig.2 Typical ecological restoration patterns in Honghe dry-hot valley

在每个试验小区内,按“S”形布设3个20 m×20 m的标准样方,共计12块。在乔木层的调查中,以20 m×20 m为乔木调查单元,测量每个样方内所有胸径≥3.0 cm的乔木树种,记录其胸径、树高、枝下高、冠幅、坐标等基本数据。每个样方内沿对角线布设2个10 m×10 m的小样方,用于调查灌木层植物,共计24个灌木样方。灌木层的调查对象包括胸径<3.0 cm的乔木幼苗、幼树。草本层调查采用五点法,在每个

样方内布设5个2 m×2 m的小样方调查草本层植物,共计60个草本样方。调查记录灌木和草本植物的物种名、个体数量、平均高度以及盖度等数据(表1)。

2.2 物种多样性指数计算

为全面了解不同恢复模式下的植被特征,本研究对植物群落的物种多样性进行了多维度分析,具体包括以下多样性指数:Simpson优势度指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Margalef丰富度指

数(E)以及 Pielou 均匀度指数(J)^[12]。这些多样性指数从不同角度反映了物种的丰富度、均匀度及优势度等特征,能够更系统地评估群落结构和生态系统稳定性。物种多样性指数的计算公式如下:

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (1)$$

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$E = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

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

式中: S 为样方中的物种总数; N 为样方所有物种的个体总数; P_i 为第*i*个物种所占的比例。

表 1 红河干热河谷不同生态恢复模式样地的基本情况

Table 1 Basic overview of different ecological restoration patterns plots in Honghe dry-hot valley

样地类型	优势种	海拔高度/m	坡向	土壤类型
乔灌草立体恢复台地	爪哇木棉(<i>Ceiba pentandra</i>) 凤凰木(<i>Delonix regia</i>) 余甘子(<i>Phyllanthus emblica</i>) 孔颖草(<i>Bothriochloa pertusa</i>) 鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>)	530~600	东北	燥红土
自然恢复台地	银合欢(<i>Leucaena leucocephala</i>) 蛇婆子(<i>Waltheria indica</i>) 飞机草(<i>Chromolaena odorata</i>) 黄茅(<i>Heteropogon contortus</i>)	530~600	西北	燥红土
自然恢复灌木草丛	疏序黄荆(<i>Vitex negundo</i>) 火索麻(<i>Helicteres isora</i>) 狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>) 黄茅(<i>Heteropogon contortus</i>)	530~600	东北	燥红土
重度干扰退化地	狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>) 黄茅(<i>Heteropogon contortus</i>) 黄花稔(<i>Sida acuta</i>)	530~600	西北	燥红土

2.3 无人机图像采集与处理

2.3.1 无人机图像采集

本研究采用 DJI Mavic 3 多光谱版无人机进行图像采集。飞行前通过自动航线规划系统进行精确路径设置,航向重叠率 80%,旁向重叠率 70%,飞行高度 45 m,速度 10 m/s,同时使用反射率辐射校正板进行拍摄,以确保数据采集的精确性。无人机影像的采集时间分别在旱季初期和末期进行,采集时间点为天气晴朗无风的 12:00—14:00,以保证阳光充足且环境光线稳定,从而减少影像噪声。

2.3.2 无人机图像处理

采集的多光谱影像数据利用 Pix4Dmapper 软件进行辐射校正以消除光照条件差异对影像质量的影响,随后进行影像拼接处理,确保影像的完整性和连续性。拼接完成后,使用 ArcGIS 10.8 进行几何校正,生成研究区域的高精度影像。几何校正过程中,基于研究区的地理坐标系进行精准定位,确保影像与实际地理位置的准确匹配,为后续分析提供基础。

2.4 归一化植被指数(NDVI)

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)被广泛用于监测植被覆盖度及其季节性和年际变化^[13]。NDVI 与植被覆盖度呈现显著的线性

关系,因此能够反映植被的生长活力。其计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r} \quad (5)$$

式中: ρ_{nir} 和 ρ_r 分别表示近红外波段的反射率和红光波段的反射率。

2.5 植被覆盖度计算

植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)指单位面积内生长的植被(包括枝、茎、叶)在地面上垂直投影占总面积的百分比^[14],它是衡量生态系统健康状况的重要指标。探究 FVC 的响应特征有助于了解植被覆盖的时空变化及其与环境及生态系统之间的关系,为生态环境保护和恢复提供科学依据。FVC 的估算广泛采用像元二分模型(dimidiate pixel model, DPM),该模型假设影像中的每一个像元仅包含植被覆盖与无植被覆盖(即裸土)两种情况^[15]。像元二分模型公式^[16]如下:

$$FVC = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (6)$$

式中:FVC 为植被覆盖度,NDVI_{soil}为裸土或无植被覆盖区域的植被指数值,NDVI_{veg}代表完全被植被所覆盖的像元植被指数值,即纯植被像元植被指数值。通常取 95% 置信区间内最大值 NDVI_{max} 与最小值 NDVI_{min} 作为 NDVI_{veg} 和 NDVI_{soil}。

参考相关研究^[17],并结合研究区实际情况,将研究区FVC分为5个等级,即: $0 \leq FVC \leq 0.2$ (低植被覆盖度); $0.2 < FVC \leq 0.4$ (较低植被覆盖度); $0.4 < FVC \leq 0.6$ (中植被覆盖度); $0.6 < FVC \leq 0.8$ (较高植被覆盖度); $0.8 < FVC \leq 1$ (高植被覆盖度)。

2.6 变异系数法

采用变异系数(C_v)表示地理数据的波动程度,是植被研究中常用的方法^[18]。本研究借鉴前人^[19]变异系数值的分类方法,将其划分5个等级:低波动($C_v \leq 0.05$)、较低波动($0.05 < C_v \leq 0.10$)、中波动($0.10 < C_v \leq 0.15$)、较高波动($0.15 < C_v \leq 0.20$)、高波动($C_v > 0.20$)。计算公式如下:

$$C_v = \frac{1}{x} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中: C_v 为变异系数; i 为时间序列; n 为监测时期数; x_i 为第*i*时期的FVC值; \bar{x} 为研究时段内所有时期的FVC平均值。

2.7 微气候监测

为了更好地理解植被恢复与气候因素的关系,本研究采用Lora型温湿度变送器进行空气温度和湿度监测,传感器精度为湿度 $\pm 3\%$ RH(60% RH, 25°C)、温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25°C)。在每个样地采用五点取样法设置测量点^[20],安装微气候监测仪器,记录每块区域内旱季初期和末期每小时的空气温度和湿度数据。

3 结果与分析

3.1 物种组成

旱季初期样方调查结果(表2)显示,各样地内维管植物的种类组成存在差异。相较于初期,旱季末期ASH和NET样地物种均减少2种,SG样地减少了9种,DG样地减少了4种。其中乔木组成保持不变,灌木和草本种类有所减少。SG和DG样地的灌木均减少2种,ASH和NET样地草本均减少2种,SG和DG样地草本分别减少7种和2种。

3.2 生物多样性分析

Shannon-Wiener指数(图3a)显示,ASH与SG在旱季初期和末期均有显著性差异($p < 0.05$),其中ASH的多样性指数在旱季末期高于旱季初期,而SG则表现为相反的趋势;NET和DG在两个时期之间均没有显著差异($p > 0.05$)。在旱季初期,SG的多样性指数最高,且显著高于ASH,SG和DG($p < 0.05$);而在旱季末期,ASH最高,显著高于NET,SG和DG($p < 0.05$),且其余3块样地之间没有显著差异($p > 0.05$)。Pielou指数(图3b)显示,ASH和NET样地在旱季初期与末期之间存在显著差异($p < 0.05$),且旱

季末期高于初期,而其余样地之间无显著差异($p > 0.05$)。旱季初期,SG样地的均匀度显著高于ASH,SG和DG($p < 0.05$);旱季末期,4个样地的Pielou指数均无显著差异($p > 0.05$)。Simpson指数如图3c所示,ASH和SG的物种优势度两个时期之间存在显著差异($p < 0.05$),其余样地无差异($p > 0.05$)。其中在旱季初期,SG的优势度指数最低,且显著低于ASH,NET和DG($p < 0.05$);旱季末期,ASH的指数显著低于NET,SG和DG($p < 0.05$)。Margalef指数如图3d所示,4个样地在不同时期之间无显著差异($p > 0.05$)。在旱季初期,ASH与SG的丰富度指数均显著高于其他样地($p < 0.05$);在旱季末期,ASH的丰富度指数显著高于NET,SG和DG($p < 0.05$)。

表2 红河干热河谷旱季初期、末期乔灌草各层物种组成情况
Table 2 Species composition of tree, shrub and herb layers at beginning and end of dry season in dry-hot valley of Honghe

样地	类别	初期				末期			
		乔木	灌木	草本	合计	乔木	灌木	草本	合计
ASH	科	6	3	6	11	6	3	5	11
	属	6	3	5	24	6	3	13	22
	种	7	3	16	26	7	3	14	24
NET	科	2	2	4	7	2	2	3	6
	属	3	2	5	10	3	2	4	9
	种	3	2	6	11	3	2	4	9
SG	科	1	4	8	12	1	3	5	8
	属	1	6	13	20	1	4	7	12
	种	1	6	14	21	1	4	7	12
DG	科	2	5	6	11	2	3	4	7
	属	2	6	8	16	2	4	6	12
	种	2	6	8	16	2	4	6	12

注:ASH为乔灌草立体恢复台地;NET为自然恢复台地;SG为自然恢复灌木草丛;DG为重度干扰退化地。下同。

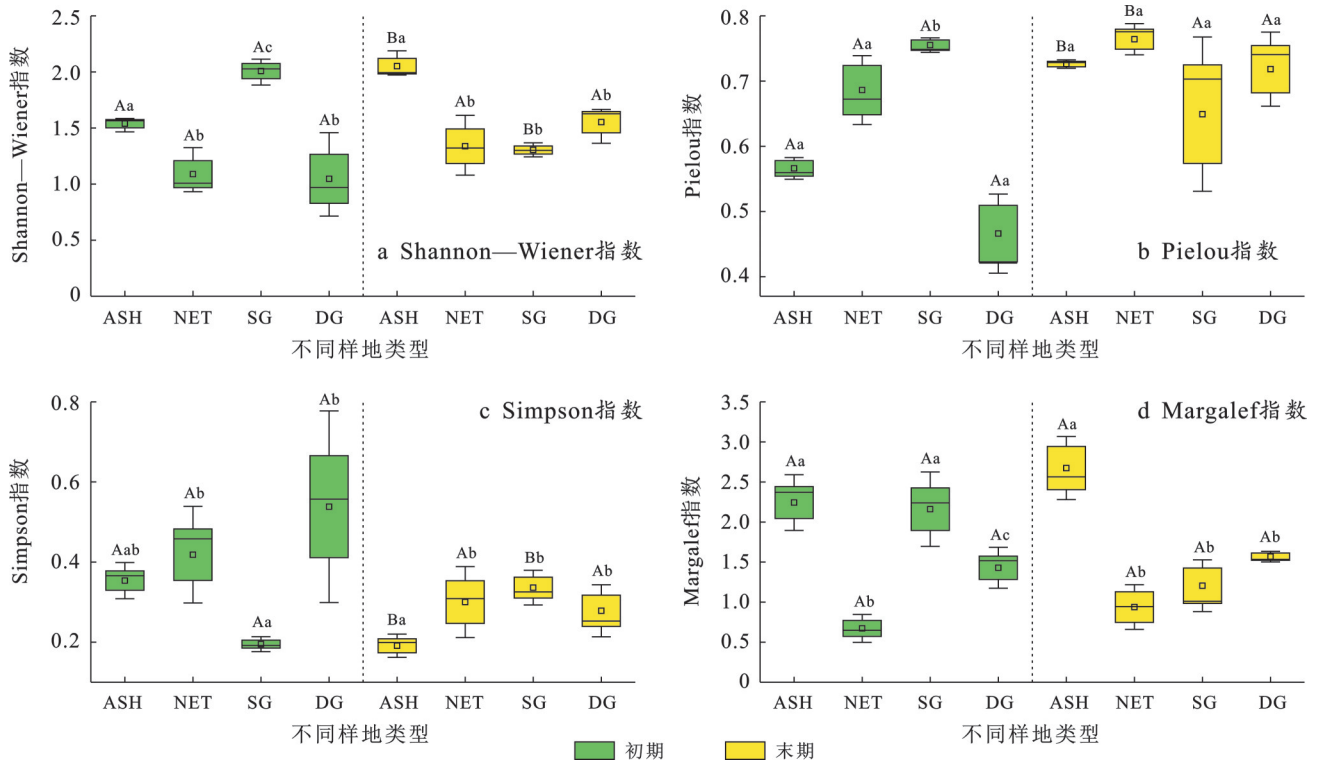
3.3 植被覆盖度空间分布及变化特征

各样地在不同时期的FVC具有显著性差异($p < 0.05$),且同一时期不同样地之间也表现出显著性差异($p < 0.05$)(表3)。在旱季初期,ASH的FVC最高,达到65.17%,其次是NET(52.52%),而DG最低(45.90%)。旱季末期,ASH的FVC依旧最高(53.86%),其次为SG(42.71%),DG最低(41.43%)。从植被覆盖度变化幅度看,NET变化幅度最大,其次为ASH,SG和DG的变化幅度相近,其中DG的变化幅度最小。

各样地在这两个时期的FVC均发生了明显变化,且呈现出空间上的差异(图4a)。^①旱季初期,ASH以高FVC和较高FVC为主,面积占比明显高于其他样地;NET以中FVC为主,且主要分布在台地

坡面;SG的中FVC占比最大;DG的较低FVC面积占比最大,而高FVC和较高FVC占比较少。②旱季末期,ASH以中FVC为主,部分零散区域为较高

FVC;NET较低FVC区域面积明显增加;SG的较低FVC面积占比最大,其次为中FVC;DG的较低FVC面积占比依旧最大,且面积明显增加。



注:不同大写字母代表同一样地类型下不同时期差异显著($p < 0.05$),不同小写字母代表同一时期不同样地类型下差异显著($p < 0.05$)。下同。

图3 红河干热河谷不同恢复模式植物群落 Alpha 多样性

Fig.3 Alpha diversity of plant communities in different restoration patterns in Honghe dry-hot valley

表3 红河干热河谷旱季初期、末期植被覆盖度(FVC)变化

Table 3 Changes in fractional vegetation cover (FVC) at beginning and end of dry season in Honghe dry-hot valley 单位: %

样地	旱季初期	旱季末期	变化值	变化幅度
ASH	65.17 ^{Aa}	53.86 ^{Ba}	11.31	-17.36
NET	52.52 ^{Ab}	41.56 ^{Bb}	10.96	-20.87
SG	48.24 ^{Ac}	42.71 ^{Bc}	5.53	-0.11
DG	45.90 ^{Ad}	41.43 ^{Bd}	4.47	-0.10

各样地的植被覆盖度变异系数呈现明显差异,ASH样地的乔木覆盖区域变异程度呈现为高波动,而NET的高波动区域主要分布在台地坡面。NET和ASH样地的植被覆盖波动程度主要以高波动为主;SG和DG样地则以低波动为主。从面积占比来看,NET的高波动面积占比最大(24.96%),而DG占比最小(14.24%);在低波动区域中,DG的低波动面积占比最大(26.97%),而ASH占比最小(17.55%)(图4b)。

旱季初期和末期的植被覆盖度在各个层次(乔木、灌木、草本)均有所变化(图5)。

(1) 在旱季初期,乔木覆盖度的排序为:ASH>NET>DG>SG;灌木的为:ASH>NET>SG>DG;草本的为:ASH>SG>NET>DG。①ASH的乔木和灌木覆盖度均显著高于其他3块样地($p < 0.05$),草本覆盖度显著高于DG($p < 0.05$)。②NET的乔木和灌木覆盖度高于SG和DG,其中灌木覆盖度之间无显著差异;此外,SG的草本覆盖度与DG之间无显著差异($p > 0.05$)。③SG的乔木和灌木覆盖度与DG无显著差异($p > 0.05$);草本覆盖度显著高于DG($p < 0.05$)。

(2) 在旱季末期,乔木覆盖度的排序为:ASH>NET>DG>SG;灌木、草本覆盖度排序均为:ASH>SG>NET>DG。①ASH的乔木覆盖度与NET无显著差异($p > 0.05$),但显著高于SG($p < 0.05$);灌木和草本覆盖度均显著高于其他样地($p < 0.05$)。②NET的乔木覆盖度显著高于SG($p < 0.05$);但其灌木覆盖度与SG和DG无显著差异($p > 0.05$);草本覆盖度显著低于ASH和SG,与DG无显著差异($p > 0.05$)。③SG的乔木和灌木覆盖度与DG无显著差异($p > 0.05$),但草本覆盖度显著高于DG($p < 0.05$),与旱季初期情况一致。

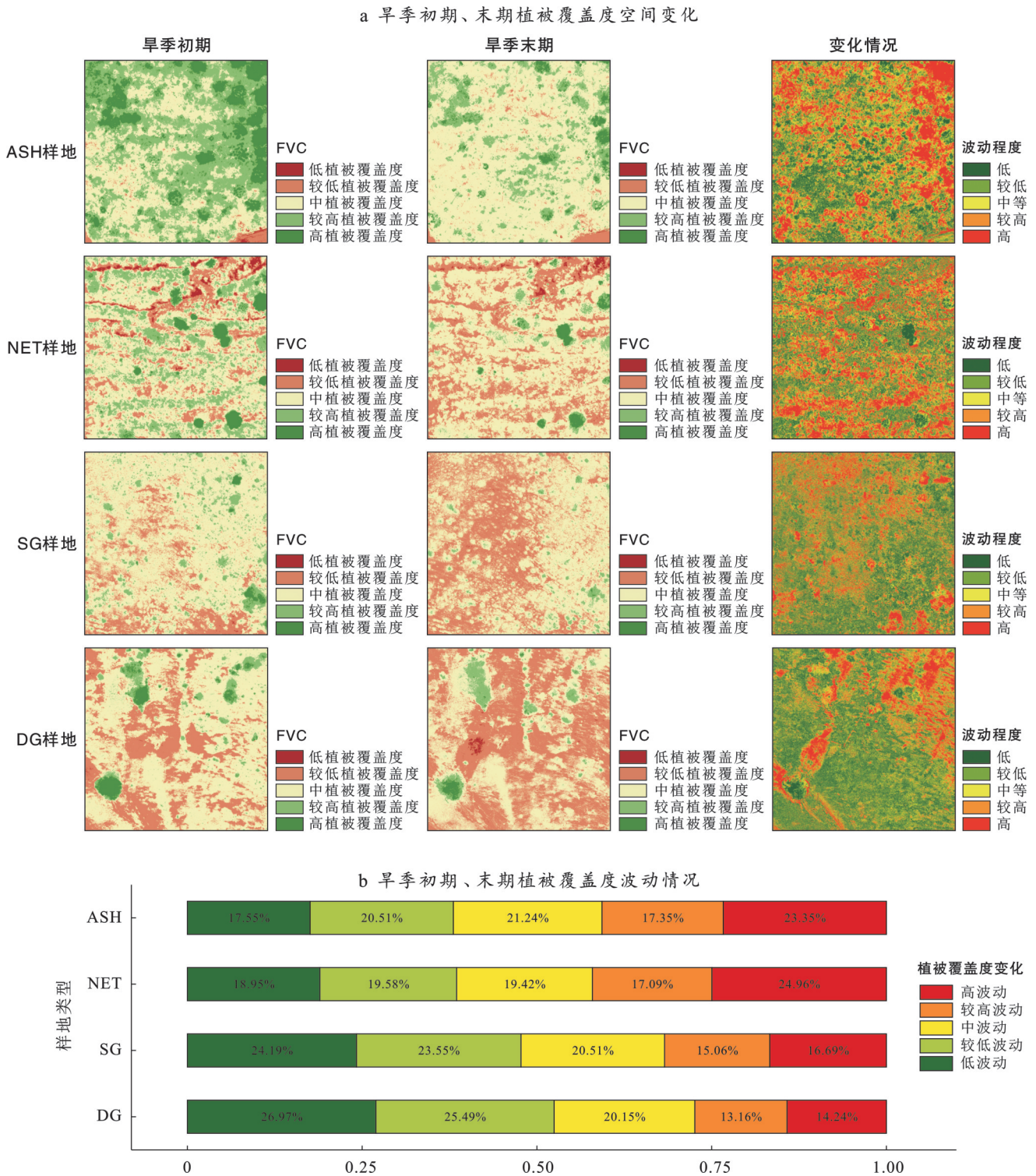


图4 红河干热河谷旱季不同生态恢复模式植被覆盖度(FVC)变化
Fig.4 Changes in fractional vegetation cover (FVC) under different ecological restoration patterns during dry season in Honghe dry-hot valley

3.4 微气候特征

旱季初期,ASH的月均温最低(18.46℃),月均湿度最高(69.10%);NET的月均温最高(19.58℃),湿度最低(64.93%)。旱季末期,SG的月均温最高(26.37℃),月均湿度最低(52.92%);ASH的月均温最低(26.03℃),湿度最高(54.08%)(表4—5)。在旱

季初期和末期,相较于其他样地类型,ASH的微气候均呈现为低温度、高温度的特征。

4 讨论

从物种组成上看,旱季初期和末期ASH的物种种类均最多,NET最少。在连续干旱过程中,ASH

物种变化最小,而DG和SG的变化较大。这可能是因为DG和SG的优势种以禾本科植物为主,群落结构较为简单,且连续干旱和冬季来临导致禾本科植物季节性死亡,加剧了物种组成的变化,从而导致其

对于干旱胁迫的抵御能力较弱。相比之下,NET在旱季初期与末期的物种变化不明显,可能与其蛇婆子、飞机草等入侵物种比例过高有关,这两个物种受季节影响较小。

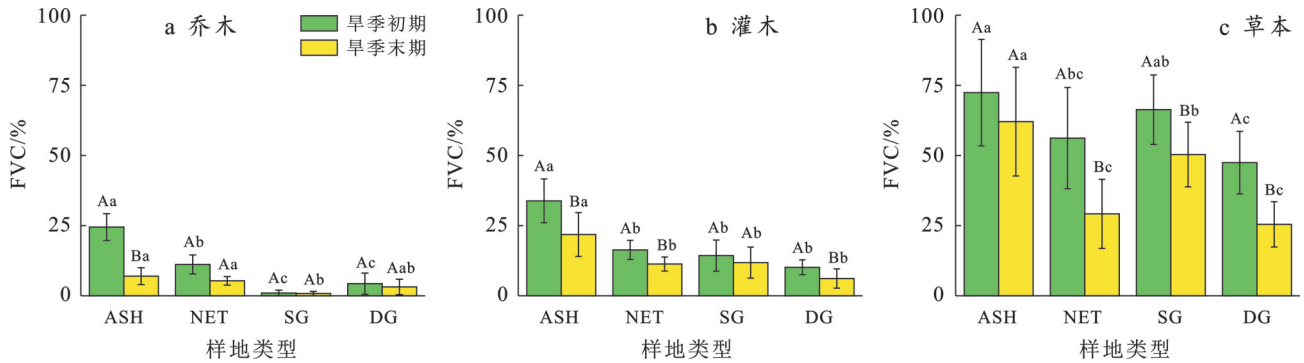


图5 红河干热河谷旱季初期、末期不同植被类型的覆盖度(FVC)变化

Fig.5 Manually surveyed changes in fractional vegetation coverage (FVC) across different layers during early and late stages of dry season Honghe in dry-hot valley

表4 红河干热河谷旱季初期、末期的月均温度情况

Table 4 Temperature conditions at beginning and end of dry season in Honghe dry-hot valley 单位: °C

样地	旱季初期温度			旱季末期温度		
	平均值±标准差	最大值	最小值	平均值±标准差	最大值	最小值
ASH	18.46±2.47	21.86	16.09	26.03±1.30	27.43	24.30
NET	19.58±2.50	23.03	17.48	26.07±1.39	28.20	24.98
SG	18.79±2.48	22.21	16.39	26.37±1.39	27.87	24.51
DG	18.63±2.55	22.14	16.20	26.14±1.43	27.62	24.21

表5 红河干热河谷旱季初期、末期的月均湿度情况

Table 5 Humidity conditions at beginning and end of dry season in Honghe dry-hot valley 单位: %

样地	旱季初期湿度			旱季末期湿度		
	平均值±标准差	最大值	最小值	平均值±标准差	最大值	最小值
ASH	69.10±2.53	71.50	65.60	54.08±4.36	57.81	47.97
NET	64.93±2.21	67.16	61.92	53.11±2.17	55.11	50.10
SG	67.16±2.69	69.77	63.45	52.92±4.69	56.60	46.30
DG	67.27±2.96	70.04	63.16	52.96±4.89	56.70	46.06

从物种多样性来看,旱季初期,不同样地的Simpson优势度指数从高到低依次为:DG>NET>ASH>SG,而Shannon-Wiener多样性指数规律与之相反,Pielou均匀度指数从高到低依次为:SG>NET>ASH>DG,Margalef丰富度指数依次为:ASH>SG>DG>NET。SG的物种分布相对均匀,物种丰富度较高,这主要是乔木层的缺失,使灌草层得到了充裕的光照条件,促进了灌草的茂盛生长,从而群落优势度较为分散,种间竞争不明显。就ASH样地而言,可能由于其凋落物较多,灌木层的覆盖较为密

集,促进了草本的生长。然而,这一变化削弱乔木、灌木、草本三者之间的优势度差异,导致群落整体的物种优势度更趋均衡,降低了群落整体的优势度指数^[22],但其具有较高的丰富度,无明显优势物种,易于维持群落的稳定^[23]。NET和DG的物种组成中以禾本科为主,而在植被恢复过程中,过高的物种优势度会带来竞争加剧和生态系统功能下降的风险^[24];ASH样地中本地物种与外来物种有机融合,从而维持了较高的物种多样性^[25]。旱季末期,不同样地的Simpson优势度指为:SG>NET>DG>SH,而Shannon-Wiener多样性指数为:ASH>DG>NET>SG,Pielou均匀度指数为:NET>DG>ASH>SG,Margalef丰富度指数为:ASH>DG>SG>NET。ASH的物种更为丰富,没有明显的优势物种,显示出良好的适应性与群落稳定性^[26]。NET样地物种在空间分布上较为均匀,同时,相较于其他模式,其优势度指数较高,群落主要由禾本科植物组成。DG及NET整体表现为物种组成相对均匀,但物种多样性较差;DG多样性在末期显著改变,表明其抵御干旱的能力尚且不足;该时期SG的物种优势度凸显,多样性显著下降。总的来说,从物种多样性来看,在连续干旱环境中,ASH抵御干旱的能力更显著,NET和DG均表现较弱,这可能是由于DG样地的植被结构相对简单,此外,NET样地恢复年限较短,加之外来入侵物种(蛇婆子、飞机草等)占比较高,从而抑制本地物种生长^[27]。

旱季初期的植被覆盖度均高于末期,随着气温的升高与湿度的下降,许多植物枯萎或死亡,尤其是落叶乔木,枝叶凋落导致其覆盖度下降,这与其他研究

结果一致^[28]。ASH样地的总覆盖度以及灌木、草本覆盖度在旱季初期和末期均显著高于其他样地,说明其在干旱等恶劣的环境条件下具有较强的抵抗力与恢复能力(抗逆性),其中灌木和草本植物由于根系发达,可以充分利用深层土壤中的水分,从而促进植被生长。而较高的覆盖度常伴随较高的物种多样性,ASH样地可能通过维持多样化的植物种类,促进生态系统功能的稳定性和抗干扰能力。NET的植被覆盖度高于对照组DG,表明人工结合自然恢复的方式也能有效改善当地的环境。此外,根据旱季末期与初期之间的变化来看,NET样地的变化幅度最高,其次为ASH,SG和对照组DG的变化最小。这是由于NET以及ASH初期的覆盖度高,且样地中落叶乔木较多,在旱季末期时乔木覆盖度急剧降低,导致其总覆盖度下降较大;另一方面,可能由于两个台地的坡面部分坡度较大,且多为禾本科植物,坡面部分植被较易受连续干旱与季节性干旱的影响,因此覆盖度变化幅度较大。此外,由于SG及对照DG在初期的覆盖度本身较低,且物种较少,加之占优势的禾本科在旱季初期就已开始转黄,因此覆盖度的变化区间相对较小。

植被是陆地生态系统的重要组成部分,其恢复与发育在提升生态系统整体稳定性和功能方面具有核心作用。本研究结果表明,不同恢复模式下的植被类型在生态恢复过程中的表现存在差异,这不仅取决于其自身的生物学特性,还受到环境条件和恢复模式的共同影响。例如,乔灌草立体植被台地模式(ASH)通过其多层次的覆盖特性展现出显著的微气候调节能力和生态适应性^[29],在降低温度,提升湿度以及维持物种多样性方面具有明显优势,展现出其在干热河谷等极端气候条件区域的推广价值。相比之下,人工开垦台地后自然恢复模式(NET)的植被多样性和物种组成相对简单,但其均匀的物种分布在一定程度上增强了群落的生态功能稳定性。自然恢复的灌木草丛(SG)在物种组成和覆盖度方面呈现出显著的季节性波动,表明其在旱季末期的生态抗性较低。退化地(DG)作为对照,覆盖度和多样性均最低,其功能的缺失进一步说明生态恢复措施的重要性。此外,本研究还发现,植被覆盖度的变化以及植被类型对微气候的调节能力,不仅受恢复年限的影响,还受到地形^[30]、土壤条件^[31]和人为活动等^[32]外界因素的综合作用。这些表明,植被类型、恢复模式与外界环境因素之间的动态关系,对区域生态系统的效率与稳定性具有重要影响。ASH模式在调节微气候、维持生物多样性以及提高旱季抗性方面的

显著优势,支持其作为干热河谷生态恢复的优先选择,同时本研究也为其他极端气候条件区域的生态恢复提供了参考。

本文针对植被恢复模式的生态学特性进行研究,仅限于物种组成与Alpha多样性、覆盖度的变化。然而,这种研究范围存在一定局限性,未来可通过纳入Beta多样性分析,进一步丰富研究内容。这将有助于揭示不同样地之间物种组成的相似性和差异性,从而更深入地理解研究区域内植被生态变迁的复杂性和空间异质性。此外,本研究的时间跨度相对较短,仅能反映植被旱季的生态特征,尚不足以全面评估长期恢复过程中的动态变化和潜在趋势。为克服这一局限,建议后续研究设计长期定位观测项目,通过多年的持续监测捕捉植被恢复的长期演替规律,并结合微气候与土壤理化性质等多维度指标,提供更加系统和全面的生态恢复评估。此外,应进一步结合遥感监测技术和生态模型,以实现更大尺度上的生态恢复特征分析。这些改进措施将为干热河谷及其他类似极端环境区域的生态恢复实践提供更加科学和全面的参考依据。

5 结论

(1) 乔灌草立体恢复台地模式(ASH)恢复模式表现出显著的植被修复效果,其生态系统具有更强的稳定性和抗干旱能力,体现了乔灌草立体结构在极端环境下的适应性优势。

(2) ASH的植被层次结构复杂,不仅有效提升了地表覆盖度,还显著促进了林下植被的恢复。这种多层次的植被群落结构有助于增强生态功能的整体性和多样性。

(3) ASH在调节微气候方面具有最佳表现,相较于其他恢复模式,能够更显著地降低温度,提高湿度,为生态恢复提供了更加适宜的生存条件。

参考文献(References)

- [1] 周跃. 元谋干热河谷植被的生态及其成因[J]. 生态学杂志, 1987, 6(5): 39-43.
Zhou Yue. Ecological features and cause of formation of dry-hot valley vegetation in Yuanmou [J]. Chinese Journal of Ecology, 1987, 6(5): 39-43.
- [2] Duan Hanchen, Qi Yuan, Kang Wenping, et al. Seasonal variation of vegetation and its spatiotemporal response to climatic factors in the Qilian Mountains, China [J]. Sustainability, 2022, 14(9): 4926.
- [3] Hartmann C L A D L, Tank A M G K, Rusticucci M, et al. Observations: atmosphere and surface Climate change 2013 the physical science basis: Working group I

- contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013:123-337.
- [4] Wang Jiamin, Guan Yuping, Wu Lixin, et al. Changing lengths of the four seasons by global warming [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021,48(6):e2020GL091753.
- [5] 韩煜,赵伟,张洪翔,等.不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究[J].*水土保持研究*,2018,25(1):120-125.
Han Yu, Zhao Wei, Zhang Qixiang, et al. Effects of different vegetation patterns on ecological restoration in mining wasteland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(1):120-125.
- [6] 杨满元,杨宁,欧阳美娟,等.紫色土丘陵坡地土壤水溶性有机碳对植被恢复的响应及其与土壤因子的关系[J].*草地学报*,2019,27(3):784-788.
Yang Manyuan, Yang Ning, Ouyang Meijuan, et al. Response of soil dissolved organic carbon to re-vegetation and the relationships between it and soil factors in hill-slope land with purple soils [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019,27(3):784-788.
- [7] 窦沛彤,贺思腾,高成杰,等.干热河谷不同恢复群落对林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].*浙江农林大学学报*,2022,39(3):616-624.
Dou Peitong, He Siteng, Gao Chengjie, et al. Effects of different restoration communities on understory species diversity and soil physical and chemical properties in dry-hot valley [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2022,39(3):616-624.
- [8] 杜华栋,曹祎晨,聂文杰,等.黄土沟壑区采煤塌陷地人工与自然植被恢复下土壤性质演变特征[J].*煤炭学报*,2021,46(5):1641-1649.
Du Huadong, Cao Yichen, Nie Wenjie, et al. Evolution of soil properties under artificial and natural revegetation in loess gully coal mining subsidence area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021,46(5):1641-1649.
- [9] 罗绍芹,徐凡迪,李帅锋,等.西南地区山地干热河谷困难立地生态修复措施[J].*绿色科技*,2019,21(14):11-13.
Luo Shaoqin, Xu Fandi, Li Shuaifeng, et al. Ecological restoration measures for difficult sites in mountainous dry-hot valleys in southwest China [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019,21(14):11-13.
- [10] 马焕成,伍建榕,郑艳玲,等.干热河谷的形成特征与植被恢复相关问题探析[J].*西南林业大学学报(自然科学)*,2020,40(3):1-8.
Ma Huancheng, Wu Jianrong, Zheng Yanling, et al. Discussion on the formation characteristics of dry-hot valley and related problems of revegetation [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2020,40(3):1-8.
- [11] 窦沛彤,刘方炎,高成杰,等.红河干热河谷不同植物光合作用及抗逆生理特性[J].*东北林业大学学报*,2021,49(7):56-60.
Dou Peitong, Liu Fangyan, Gao Chengjie, et al. Photosynthetic physiological characteristics and adaptation to dry and hot environment of different plants in the dry-hot valley of Honghe [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021,49(7):56-60.
- [12] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法: I. α 多样性的测度方法(下)[J].*生物多样性*,1994,2(4):231-239.
Ma Keping, Liu Yuming. Methods for measuring biodiversity of biological communities: I. Methods for measuring α -diversity (II) [J]. *Chinese Biodiversity*, 1994,2(4):231-239.
- [13] Rouse J W Jr, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [J]. *Nasa Special Publication*, 1974,351(1):309-317.
- [14] 朱源,彭光雄,王志,等.西藏林芝地区近30 a来的NDVI变化趋势研究[J].*西北林学院学报*,2011,26(4):69-74.
Zhu Yuan, Peng Guangxiong, Wang Zhi, et al. The trend of NDVI during the past 30 years in Linzhi area, Tibet Autonomous Region [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011,26(4):69-74.
- [15] 陈晋,陈云浩,何春阳,等.基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J].*遥感学报*,2001,5(6):416-422.
Chen Jin, Chen Yunhao, He Chunyang, et al. Sub-pixel model for vegetation fraction estimation based on land cover classification [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001,5(6):416-422.
- [16] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].*资源科学*,2004,26(4):153-159.
Li Miaomiao, Wu Bingfang, Yan Changzhen, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun Reservoir by remote sensing [J]. *Resources Science*, 2004,26(4):153-159.
- [17] 陆荫,张强,李晓红,等.黄河流域甘肃段植被覆盖度时空变化及对气候因子的响应[J].*水土保持通报*,2020,40(2):232-238.
Lu Yin, Zhang Qiang, Li Xiaohong, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its response to climate factors in Gansu section of Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(2):232-238.
- [18] 李超,李雪梅.2000—2018年中国植被生态质量时空变化特征[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(9):2154-2165.
Li Chao, Li Xuemei. Characteristics of spatio-temporal variation of ecological quality for vegetation in China

- from 2000—2018 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(9):2154-2165.
- [19] 陈登魁, 马超, 王夏冰, 等. 1982—2015年可可西里NDVI变化特征及其气候响应[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6):1410-1417.
Chen Dengkui, Ma Chao, Wang Xiabing, et al. Variation of NDVI and its response to climate change in Hoh Xil during the period of 1982—2015 [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6):1410-1417.
- [20] 邵天一, 周志翔, 王鹏程, 等. 宜昌城区绿地景观格局与大气污染的关系[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4):691-696.
Shao Tianyi, Zhou Zhixiang, Wang Pengcheng, et al. Relationship between urban green-land landscape patterns and air pollution in the central district of Yichang City [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(4):691-696.
- [21] 史文妍. 福建省建瓯市茶果园不同水土保持治理措施对水土流失的影响[J]. *亚热带水土保持*, 2024, 36(1):23-26.
Shi Wenyan. Impact on soil loss by different soil conservation measures in the tea garden and orchard of Jian'ou City of Fujian Province [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2024, 36(1):23-26.
- [22] Kumar A, Jhariya M K, Yadav D K, et al. Vegetation dynamics in bishrampur collieries of northern chhattisgarh, India: Eco-restoration and management perspectives [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(8):371.
- [23] 徐海鹏, 于成, 舒朝成, 等. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物群落多样性和稳定性的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(5):90-99.
Xu Haipeng, Yu Cheng, Shu Chaocheng, et al. The effect of plateau pika disturbance on plant community diversity and stability in an alpine meadow [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(5):90-99.
- [24] 潘玉梅, 唐赛春, 李象钦, 等. 氮添加对石漠化区飞机草与本地植物的生长和竞争的影响[J/OL] (2024-01-23). *广西科学*, 2024: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/45.1206.G3.20240122.1552.002>.
Pan Yumei, Tang Saichun, Li Xiangqin, et al. Effects of nitrogen addition on the growth and competition of chromolaena odoratum and native plants in rocky desertification area [J/OL] (2024-01-23). *Guangxi Sciences*, 2024: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/45.1206.G3.20240122.1552.002>.
- [25] 张永香. 祁连山青海云杉对20世纪50年代以来气候变化的响应分析[D]. 北京: 中国科学院青藏高原研究所, 2009.
Zhang Yongxiang. Response analysis of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains to climate change since 1950s [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [26] 孙泽, 何真敏, 高中腾, 等. 元谋干热河谷不同植被类型对生物多样性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2024, 52(2):37-42.
Sun Ze, He Zhenmin, Gao Zhongteng, et al. Effects of different vegetation types on biodiversity in the Yuanmou dry-hot valley [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(2):37-42.
- [27] 陆志星, 王智慧, 韦铄星, 等. 桂西北喀斯特地区不同植被恢复模式植物群落结构与多样性特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(9):115-126.
Lu Zhixing, Wang Zhihui, Wei Shuoxing, et al. Plant community structure and diversity characteristics of different vegetation restoration patterns in the karst region of northwest Guangxi, China [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(9):115-126.
- [28] 欧朝蓉, 朱清科, 孙永玉. 元谋干热河谷旱季植被覆盖度的时空异质性[J]. *林业科学*, 2017, 53(11):20-28.
Ou Zhaorong, Zhu Qingke, Sun Yongyu. Temporal and spatial heterogeneity of the vegetation coverage in the dry season in Yuanmou dry-hot valley [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(11):20-28.
- [29] 卢永飞, 喻理飞, 勾伟. 喀斯特高原峡谷区不同植被恢复阶段小气候变化特征[J]. *林业实用技术*, 2014(7):14-17.
Lu Yongfei, Yu Lifei, Gou Wei. Microclimate change characteristics in different vegetation restoration stages in karst plateau canyon area [J]. *Practical Forestry Technology*, 2014(7):14-17.
- [30] 丁成琴, 史海静, 高原, 等. 地形微生境对区域温度变化的缓冲作用[J]. *生态学报*, 2023, 43(12):5137-5149.
Ding Chengqin, Shi Haijing, Gao Yuan, et al. The buffering effect of topography induced microhabitat on regional temperature change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12):5137-5149.
- [31] 李宏宇, 符淙斌, 郭维栋, 等. 干旱区不同下垫面能量分配机理及对微气候反馈的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(5):438-451.
Li Hongyu, Fu Congbin, Guo Weidong, et al. Study of energy partitioning and its feedback on the microclimate over different surfaces in an arid zone [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(5):438-451.
- [32] 鄢伟. 武汉主城区人为排热对城市微气候的影响及其改善策略研究[D]. 湖北 武汉: 华中科技大学, 2021.
Yan Wei. Study on the influence of anthropogenic heat removal on urban microclimate and its improvement strategy in the main urban area of Wuhan [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2021.