

# 黄土高原中部沟壑区典型聚淤流域植物群落组成特征

张杰林<sup>1,2,3</sup>, 王夏青<sup>1,3,4</sup>, 吕飞亚<sup>1</sup>, 邓都<sup>5</sup>, 唐湘玲<sup>3</sup>, 张航瑜<sup>1,3</sup>

(1.湖南文理学院 地理科学与旅游学院, 湖南 常德 415000; 2.青海省地震局, 青海 西宁 810000; 3.桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541000; 4.中国科学院 地球环境研究所, 陕西 西安 710061; 5.湖南文理学院 生命与环境科学学院, 湖南 常德 415000)

**摘要:** [目的] 分析典型流域的植物组成, 评价黄土高原生态修复状况, 为进一步采用植被恢复措施巩固水土治理效果提供科学指导。[方法] 基于黄土高原中南部高塬沟壑区合水(HS)聚淤流域和中北部丘陵沟壑区靖边(JB)聚淤流域, 详细调查两个流域的现有的植被类型, 鉴定表土孢粉组成, 并分析表土的含水量、粒度、550 °C 烧失量等物理特征。[结果] HS 聚淤流域存在 84 科 230 属植物, 而 JB 聚淤流域则存在 78 科 223 属植物。但 HS 聚淤流域多见木本植物、喜湿型草本植物、禾本科植物, 总比例为 51.74%, 而 JB 聚淤流域的旱生型灌木和草本植物更丰富, 总比例高达 56.50%, 这是两地气候特征、土壤属性和土地利用方式等因素共同作用的结果。自“退耕还林(草)”工程实施以来, HS 和 JB 聚淤流域高植被覆盖度面积比例分别提升至 82.61% 和 37.80%, 但也存在外来植物入侵、本地植物比例不高、人工栽种植物常见等问题。[结论] 黄土高原小流域生态修复需充分考虑当地气候环境和林草植物特性, 进而形成可持续的植被恢复和演替。

**关键词:** 植被调查; 孢粉; 生态修复; 聚淤; 黄土高原

**文献标识码:** A **文章编号:** 1000-288X(2025)01-0094-11 **中图分类号:** Q948, P951, X171.4

**文献参数:** 张杰林, 王夏青, 吕飞亚, 等. 黄土高原中部沟壑区典型聚淤流域植物群落组成特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 94-104. Zhang Jielin, Wang Xiaqing, Lü Feiya, et al. Characteristics of plant community composition in typical catchments of landslide-dammed reservoirs in gully regions on Central Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 94-104. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.011; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.011.

## Characteristics of plant community composition in typical catchments of landslide-dammed reservoirs in gully regions on Central Loess Plateau

Zhang Jielin<sup>1,2,3</sup>, Wang Xiaqing<sup>1,3,4</sup>, Lü Feiya<sup>1</sup>, Deng Du<sup>5</sup>, Tang Xiangling<sup>3</sup>, Zhang Hangyu<sup>1,3</sup>

(1.College of Geography and Tourism, Hunan University of Arts and Science,

Changde, Hunan 415000, China; 2.Qinghai Earthquake Agency, Xining, Qinghai 810000,

China; 3.College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541000,

China; 4.Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710061, China;

5.College of Life and Environmental Science, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China)

**Abstract:** [Objective] The plant composition of typical catchment area of the Loess Plateau was analyzed to evaluate its ecological restoration status and provide scientific guidance for further implementation of vegetation restoration measures to improve the effectiveness of soil and water conservation. [Methods] Based on the Heshui (HS) and Jingbian (JB) landslide-dammed reservoir catchments located in the plateau-gully region of the southern central area and the hill-gully region of the northern central area of the Loess Plateau, respectively, comprehensive surveys were conducted to document the existing vegetation types, identify the pollen composition in the topsoil, and analyze the physical properties of the topsoil, including water content, grain size, and loss on ignition at 550 °C. [Results] In total, 230 genera from 84 families were identified in

收稿日期: 2024-01-29

修回日期: 2024-11-19

采用日期: 2024-11-21

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“黄土高原淤沟沉积物 DNA 记录的近 500 年农牧活动与环境间交互胁迫和适应”(42167062); 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目“冻融作用下黄土高原聚淤沉积关键层的地球化学示踪及机理研究”(22B0697); 青海省自然科学基金项目(2022-ZJ-920); 地理学应用特色学科资金(湘教通[2022]351号)

**第一作者:** 张杰林(1998—), 男(汉族), 青海省海东市人, 硕士研究生, 研究方向为流域生态环境演变。Email: zhangjielin98@163.com。

**通信作者:** 王夏青(1986—), 男(汉族), 山西省昔阳县人, 博士, 教授, 主要从事流域生态环境演变及人地关系等方面的研究。Email: wangxq@huas.edu.cn。

the HS catchment, and 223 genera from 78 families were identified in the JB catchment. Nevertheless, there was a higher abundance of woody plants, moisture-loving grasses, and herbs around the HS catchment (51.74%), whereas xerophytic shrubs and herbs dominated around the JB catchment (56.50%). These patterns reflected a combination of climatic conditions, soil properties, land use conditions, and agricultural and economic development. In addition, the current high vegetation coverage area under the ‘Grain for Green’ project accounted for 82.61% and 37.80% of the area around the HS and JB catchments, respectively. However, certain adverse phenomena, including invasive non-native plant species, a low proportion of indigenous flora, and a noticeable presence of artificial plants, have been observed. [Conclusion] To ensure sustainable vegetation regeneration, ecological restoration of small catchments in the Loess Plateau should fully consider the local climate and plant characteristics.

**Keywords: vegetation investigation; pollen; ecological restoration; landslide-dammed reservoir; Loess Plateau**

作为典型生态脆弱区和水土流失最严重区域之一<sup>[1]</sup>,黄土高原一直面临着水土流失剧烈、面源污染严重、水资源短缺等问题<sup>[2]</sup>。而且,黄土高原是连接中国农牧经济活动的核心区域,其环境—人口—资源间的尖锐矛盾直接威胁当地的社会经济水平<sup>[3]</sup>。自中华人民共和国成立起,先后在黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区、农灌区、河谷平原区、沙地和沙漠区、土石山区等 6 个生态功能区推行了坡面治理、沟坡联合治理、小流域综合治理、退耕还林(草)等多项举措<sup>[4-5]</sup>,区域生态状况得到了显著改善。黄土高原水土流失范围明显缩小,黄河泥沙量下降约 90%<sup>[4]</sup>;植被覆盖增加,生态系统固碳能力得到提升<sup>[6]</sup>;居民生活水平有效提升。特别是 20 世纪末期退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原 2020 年植被覆盖率较未开展工程的 1999 年增加了约 35%,是全国“变绿”的主要区域<sup>[6]</sup>。然而,黄土高原仍未彻底改善其生态脆弱性和高负载的资源环境,制约着区域生态安全和社会经济发展<sup>[3]</sup>。

2021 年,由中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中明确指出:“突出抓好黄土高原水土保持,全面保护天然林,持续巩固退耕还林(草)、退牧还草成果,改善中游地区生态面貌”。然而,黄土高原局部地区目前仍面临着人工植被可持续差、植被单一、树木成活率低、“小老头树”、局地侵蚀加剧和深层土壤干燥等生态问题<sup>[7-9]</sup>。深刻认识黄土高原多样地貌区内不同生态修复工程的植物组成是达成上述要求并进一步改善生态状况的必要途径之一<sup>[10]</sup>。前期相关研究主要利用遥感影像解译的归一化植被指数(NDVI)分析和评估不同流域范围各时期的植被覆盖度(FVC)及影响因素<sup>[11-14]</sup>。例如,Zhang 等<sup>[15]</sup>基于 2000—2020 年黄土高原遥感数据解译了该区域每年最大 NDVI 和生长季节平均 NDVI 的变化及其与气候和人类活动间的关系,指出退耕还林(草)工程以来黄土高原中部的植被覆盖程度显著上升,降水是该区域植被变化的主要驱动因

子。但是,上述类似研究大多集中于宏观尺度的整个黄土高原或某一地貌区,对农户主要依存的小流域农耕区的植物组成及土地利用开展的实地调查较少,限制了对黄土高原小流域生态修复状况的深入认识。黄土高原农业经济问题和人地矛盾表象在行政区划和地貌区,其根本在流域。流域是物质、能量和信息交互作用的复杂系统,具有极大的适应性和协调性,是黄土高原居民社会经济活动的主要场所<sup>[3]</sup>。因此,亟需开展小流域内植物组成及生态修复状况的分析评估,为理解不同修复措施下小流域的治理效果提供参考。

黄土高原沟壑区小流域内因山体滑坡拦截沟谷而生成了众多保存数百年的天然淤地坝,当地人称之为“聚淤”<sup>[16]</sup>。自 20 世纪 60 年代以来该地区广泛建设的人工淤地坝即为具有保水高产功效的聚淤的仿造和拓展<sup>[17]</sup>,被认为是治理黄土高原水土流失最为有效的措施之一<sup>[4]</sup>。历史上认为这些聚淤“易于收获高田”,淤地粮食单产为坡耕地的 6~10 倍,是缓解黄土高原人地矛盾的主要农牧活动场所<sup>[18]</sup>。这些聚淤坝库多为“闷葫芦”状,将坝体形成以来的流域侵蚀泥沙截留在坝库中,是黄土高原高标准农田建设的主要方式之一<sup>[19]</sup>。前期对黄土高原聚淤的相关研究主要侧重于利用截留的泥沙沉积识别土壤侵蚀过程和固碳效应<sup>[20]</sup>,重建侵蚀历史及驱动因素<sup>[21]</sup>,分析小流域人地关系演变及区域差异等<sup>[16]</sup>,而对聚淤流域植物组成及生态状况的分析则较为少见。黄土高原特有的聚淤流域是开展植被调查并评估生态修复状况的理想场所,本文基于对黄土高原高原沟壑区合水聚淤和丘陵沟壑区靖边聚淤的形成过程及土地利用方式的充分认识,利用野外植被调查和表土孢粉组成相结合的方式查明各个流域的植被类型及差异。结合两个流域气候、表土理化特征、治理策略等,探明产生上述差异的自然和人文原因。最后,基于 2000 年和 2021 年两个流域的 NDVI 差异和现有植物组成,评估各地区的 FVC 变化和生态修复状况,为进一步巩固小流域生态修复效果并实现高质量发展提供科学依据。

# 1 材料与方

## 1.1 研究区概况

合水(HS)聚淤位于甘肃省庆阳市合水县老城镇小沟谷内(图 1a),系公元 1811 年右侧坡体自然滑坡拦截沟谷而成<sup>[21]</sup>。HS 聚淤的地理位置、海拔、形成过程、流域特征、地形地貌、气候和土壤类型、植被情况和土地利用等自然特征信息详见表 1。HS 聚淤流域内山顶至谷底的相对高程差约为 200 m,目前已淤积而成约 14 hm<sup>2</sup>的农耕地<sup>[21]</sup>。HS 流域年平均气温约为 9.4 °C(1981—2010 年),年平均降水量约为 557.7 mm,

且降雨主要集中于 6—9 月,年均蒸发量 1 470.1 mm,是降水量的 2.6 倍。前期研究表明<sup>[22]</sup>,HS 流域在气候(ENSO)和人类活动(人口、战争、政策等)共同影响下水土流失较为严重,过去 150 a 间的年均产沙模数为  $1.13 \times 10^4$  t/(km<sup>2</sup> · a)。自 20 世纪 60 年代以来,HS 流域主要实施“坡地改梯”和“植树造林”等生态修复措施,当前的年际产沙模数下降至  $3.10 \times 10^3$  t/(km<sup>2</sup> · a)。根据《甘肃省国土空间生态修复规划(2021—2035 年)》的要求,属陇东生态安全屏障区的 HS 流域将继续推行坡地改梯政策,对 25°以下的缓坡耕地修建水平梯田,大于 25°的坡耕地退耕还林(草)。

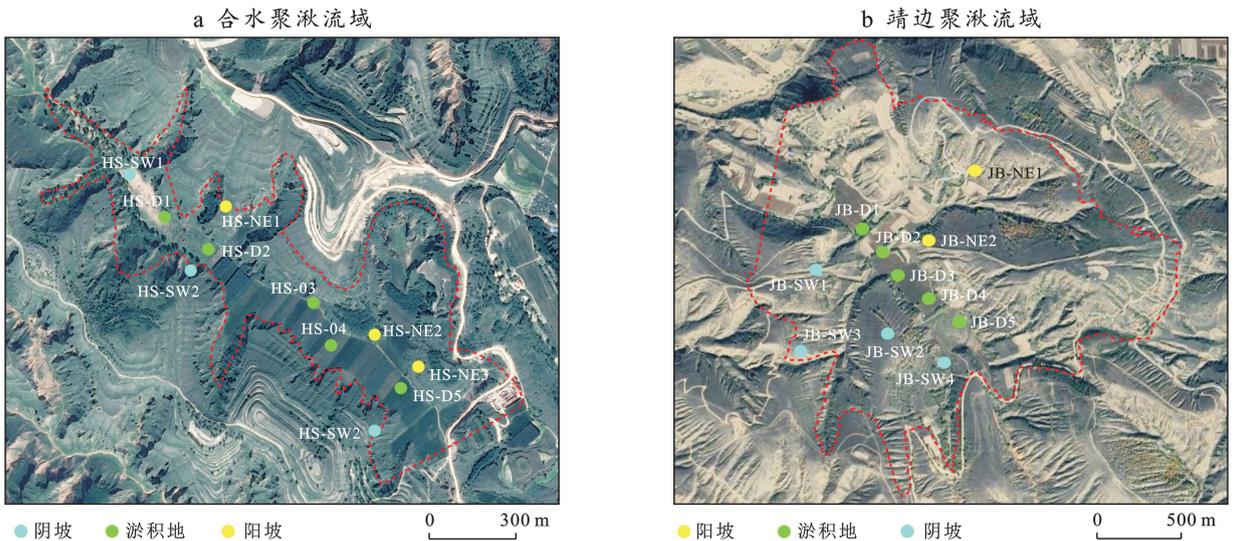


图 1 合水和靖边聚淤流域影像图及采样点分布

Fig.1 Heshui and Jingbian landslide-dammed reservoirs, as well as distribution sampling sites for topsoils

靖边(JB)聚淤地处陕西省榆林市靖边县花豹湾村(图 1b),于清朝咸丰年间(公元 1855 年)沟谷坡面天然滑坡而成,坝库至今保存完整<sup>[16]</sup>。JB 聚淤的地理位置、海拔、形成过程、流域特征、地形地貌、气候和土壤类型、植被情况和土地利用等自然特征信息详见表 1。JB 流域内山顶至谷底的相对高程差约为 200 m,目前已淤积 19 hm<sup>2</sup>的农耕地。JB 流域年平均气温约为 7.8 °C(1981—2010 年),年平均降水量约为 384.5 mm,且降雨主要集中于 6—9 月,年均蒸发量 891.7 mm,是降水量的 2.3 倍。前期研究表明<sup>[16]</sup>,JB 流域在气候和人类活动共同影响下水土流失极为严重,过去 150 a 间的年均产沙模数为  $1.17 \times 10^4$  t/(km<sup>2</sup> · a)。自 20 世纪末以来,JB 流域严格实施“封山育林”的生态修复措施,有效控制了该地区的水土流失。按照《陕西省国土空间规划(2021—2035 年)》的规定,属陕北长城沿线生态修复区的 JB 流域将继续严守生态保护红线,整治修复退化草原植被,实施生态保护建设。

## 1.2 野外植被调查及表土采集

在对两个流域进行详细考察的基础上,于 2021 年 8 月采用样线和典型样方相结合的调查方法开展植被调查。

野外调查的样线沿聚淤的两侧坡面和淤积地面设计,用手持 GPS 仪记录调查位置。随后,根据样线的可达性、生长植物的空间差异性、样地间距等因素的综合考虑,坡面上的每条样线设置 2 块样地,淤积地面样线设置 5 块样地,详细识别样地内生长植物的科、属、种。具体而言,样地内野外植物鉴定采用“看、摸、嗅、尝”的方法,结合中国生物智库及识图软件等多种方式综合判断植物类别。此外,通过倒查索引表,查看该植物的形态特征及插图,仔细对照图片描述和物种特征进一步反向验证鉴定的植物类别。对于野外无法鉴定的物种,拍照记录植物整株特征,并采集植物的叶、花、果实等带回实验室鉴定,进而较全面识别各个聚淤流域生长的植物种类<sup>[22]</sup>。基于上述植物鉴别步骤,各聚淤流域的植物种类统计方法为:

①逐一记录植物特征,物种名、株树、平均高、优势种等信息,并将所有的物种数据(包括物种名称、位置、时间等信息)通过植物科学数据中心网站进行全面核查;②将所有核对后的信息进行汇总和分类,生成各

流域植物调查统计表。需指出的是,限于聚淤流域坡面部分位置难以到达,坡面样地较少,今后的野外调查需进一步增加样地设置密度,进而提高流域范围植物调查的全面性。

表 1 合水和靖边聚淤自然特征概况

Table 1 Overview of natural characters of Heshui and Jingbian landslide-dammed reservoirs

自然特征	合水聚淤	靖边聚淤
地理位置	36°1'N, 108°7'E	37°18' N, 108°36' E
海拔高度	1 206 m	1 560 m
形成过程	公元 1811 年,坡体滑坡拦截沟谷而成	公元 1855 年,沟谷坡面天然滑坡而成
流域特征	坝高 43 m,纵长 1.25 km,面积 1.98 km <sup>2</sup>	坝高 67 m,纵长 1.15 km,面积 2.87 km <sup>2</sup>
地形地貌	黄土高原沟壑地貌	黄土丘壑沟壑地貌
气候	温带大陆性季风气候	温带大陆性季风气候
土壤类型	以黄绵土为主	以砂黄土为主
植被情况	植被覆盖度较高,树木和禾本科类作物随处可见	植被覆盖度仍较低,沟谷坡面上仅可见稀疏灌木和草本植物
土地利用	农业用地、林地、草地和荒地为主	草地为主

基于 HS 和 JB 聚淤的地貌环境和植被分布状况,分别沿各个聚淤阴坡和阳坡的山顶到谷底、淤积地面的沟头至大坝方向共 3 条路径采集地表土壤。考虑到两个聚淤内大多数草本植物的根系长度、表土孢粉的扰动程度、聚淤内泥沙淤积速率等因素,利用带刻度的表土采样器(精度为 0.1 cm)采集地表 0—3 cm 深的土壤混合样,共采集 22 个表土样品,每个聚淤 11 个土样。具体而言,合水地区采集阴坡样品 3 个,阳坡样品 3 个,淤积地样品 5 个;靖边地区采集阴坡样品 4 个,阳坡样品 2 个,淤积地样品 5 个(图 1)。采集的土样及时装入无菌的样品盒中,封口并做好标记,采样器用纯净水清洗以避免样品间污染,所有样品采集后立即保存在 4 °C 的恒温冷藏柜中。

### 1.3 表土含水量、粒度、烧失量和孢粉组成分析

将所有表土样品过 0.850 mm 筛去除草根等可见杂质,利用中国力辰科技公司生产的 1/10 000 电子分析天平精确称量 15 g 过筛土壤放置到烘箱中,在 60 °C 的恒温条件下烘干 72 h,取出后称重并计算样品的含水量,标准误差范围在 0.5%~1%<sup>[23]</sup>。随后,每个样品称取 0.5 g 并依次加入浓度为 10% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 10% 的稀 HCl,用以去除土壤中的有机质和碳酸盐,静置 48 h 后加入 (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 分散剂,利用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定各个表土样品的粒度组成,测试误差小于 2%<sup>[23]</sup>。聚淤表土的烧失量 (LOD) 利用煅烧法测定,称取研磨至 200 目的 1 g 样品放置在瓷舟中,利用马弗炉在 550 °C 恒温下煅烧 4 h,在干燥皿中冷却后称重(精确度为 0.000 1 g)并计算该温度下的损失重量比例,标准误差在 1.5%~2.0%<sup>[24]</sup>。

聚淤表土的孢粉类型和浓度利用氢氟酸(HF)筛

选法测定<sup>[25]</sup>。取烘干后样品 5~10 g(精确度为 0.01 g),并加入一片石松孢子(25 600 粒/片)便于计算孢粉浓度。然后,依次加入 10% 稀 HCl, 10% KOH, 39% HF 进行浸泡,分别离心和水洗去除碳酸盐、有机质和硅酸盐。最后,利用浓硫酸和乙酸酐混合液洗涤 2 次并离心富集,用 10 μm 细筛将孢粉滤取到 2 ml 试管内。所有样品的孢粉组成利用 Olympus BX43 光学显微镜下放大 400 倍鉴定,每个样品至少统计 300 粒。在此基础上,根据各科属与总科属的孢粉总量计算孢粉百分比,利用 Tilia 软件输出孢粉图谱,孢粉浓度利用公式(1)计算<sup>[25]</sup>:

$$P_c = \frac{L \cdot N}{M \cdot S} \quad (1)$$

式中: $P_c$  代表土壤样品中的孢粉浓度(粒/g);  $L$  代表加入样品的石松孢子数;  $M$  为鉴定样品中的石松孢子数;  $N$  代表样品中的科属孢粉数量;  $S$  代表样品重量。

### 1.4 空间数据来源及处理方法

HS 和 JB 聚淤流域 2000 和 2021 年遥感影像 Landsat 数据源于国家地球系统科学数据中心和地理空间数据云,其空间分辨率均为 30 m,并利用 ENVI 5.3 软件解译其植被覆盖度和土地利用方式。具体地,在对遥感影像进行辐射定标、大气校正、波段选取后,基于公式(2)计算各流域的 NDVI<sup>[13]</sup>:

$$NDVI = \frac{(DN_{NIR} - DN_R)}{(DN_{NIR} + DN_R)} \quad (2)$$

式中: $DN_{NIR}$  代表近红外波段;  $DN_R$  代表可见光红波段; NDVI 的范围介于 0~1,在此基础上利用公式(3)求算各流域的 FVC<sup>[13]</sup>:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (3)$$

式中:  $NDVI_{soil}$  为土壤部分的 NDVI 值;  $NDVI_{veg}$  为植被部分的 NDVI 值, 基于 FVC 结果共划分为 5 类: 极低 ( $FVC < 0.1$ )、低 ( $0.1 \leq FVC < 0.3$ )、中 ( $0.3 \leq FVC < 0.5$ )、中高 ( $0.5 \leq FVC < 0.7$ )、高 ( $FVC \geq 0.7$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 聚湫流域野外植被调查结果

通过野外详细调查、实验室内鉴定和复核, HS 聚湫流域内共识别 71 科, 195 属, 248 种现存植物, 主要植被类别详见附件表 1。其中, 以草本植物中豆科、菊科、禾本科的属种类别最为丰富, 分别为 25 种, 19 种, 15 种; 木本植物中蔷薇科的属种类别最多, 为 9 种; 蕨类植物仅识别木贼科 2 种。经对比中国外来入侵物种名单并通过中国植物、植物科学数据中心等网站对所有植物种类逐一核查, HS 流域内共识别 24 个非甘肃省自然环境生长的物种并将其视为外来物种, 均为草本植物且以大戟科、菊科、苋科、商陆科为代表, 分别是绿穗苋 (*Amaranthus hybridus*)、凹头苋 (*Amaranthus lividus*)、垂序商陆 (*Phytolacca americana*)、紫苜蓿 (*Medicago sativa*)、葛 (*Pueraria lobata*)、铁苋菜 (*Acalypha australis*)、泽漆 (*Euphorbia helioscopia*)、乳浆大戟 (*Euphorbia esula*)、斑地锦 (*Euphorbia maculata*)、苘麻 (*Abutilon theophrasti*)、野西瓜苗 (*Hibiscus trionum*)、野胡萝卜 (*Daucus carota*)、金灯藤 (*Cuscuta japonica*)、圆叶牵牛 (*Pharbitis purpurea*)、曼陀罗 (*Datura stramonium*)、阿拉伯婆婆纳 (*Veronica persica*)、小蓬草 (*Conyza canadensis*)、牛膝菊 (*Galinsoga parviflora*)、一年蓬 (*Erigeron annuus*)、鳢肠 (*Eclipta prostrata*)、苦苣菜 (*Sonchus oleraceus*)、牛筋草 (*Eleusine indica*)、野燕麦 (*Avena fatua*) 等。HS 流域坡耕地和淤积地中主要栽种玉蜀黍 (*Zea mays*) 等粮食作物和油松苗 (*Pinus tabulaeformis*) 等经济作物。JB 聚湫流域内共识别 63 科, 186 属, 251 种现存植物。其中也以草本植物中豆科、菊科、禾本科的属种类别最多, 分别为 27 种、20 种、18 种; 木本植物中蔷薇科的属种类别最多, 为 6 种; 蕨类植物仅识别木贼科 1 种。相较于 HS 聚湫流域, JB 流域内植物科属总类别略少但多了 3 种植物, 草本植物属种增多而木本减少。JB 流域内也鉴定出 21 个非陕西省自然环境生长的物种并将其视为外来物种, 均为草本植物且以大戟科、菊科、苋科、旋花科为代表, 分别是绿穗苋、凹头苋、葛、铁苋菜、泽漆、乳浆大戟、斑地锦、野西瓜苗、曼陀罗、

龙葵 (*Solanum nigrum*)、小蓬草、牛膝菊、一年蓬、苍耳 (*Xanthium sibiricum*)、鳢肠、金盏银盘 (*Bidens biternata*)、牛筋草、野燕麦、雀麦 (*Bromus japonicus*)、双穗雀稗 (*Paspalum paspaloides*)、牛鞭草 (*Hemarthria altissima*)。JB 流域坡面上未见耕地, 主要生长的优势种为百里香 (*Thymus mongolicus*)、淤积地内种植玉蜀黍和一些药用作物, 荒地上生长着杨树 (*Populus*)、榆树 (*Ulmus pumila*) 等木本植物。

### 2.2 聚湫流域表土孢粉组成

HS 聚湫流域表土孢粉共鉴定 6 328 粒, 每个样品均超过 500 粒, 共 42 科, 62 属。基于各样品重量和鉴定的石松孢子数, 表土的平均孢粉浓度为 1 830.7 粒/g (图 2)。其中, 草本植物的孢粉含量最高, 约占 65.7%, 主要源于禾本科 (Gramineae)、蒿属 (*Artemisia*)、藜科等 (Chenopodiaceae); 木本植物含量次之, 为 33.9%, 来自于松属 (*Pinus*)、栎属 (*Quercus*) 等树木; 蕨类植物含量最少, 仅占 0.4%, 含有少量的卷柏属 (*Selaginella*)、铁线蕨属 (*Adiantum*) 等 (图 2)。就空间分布而言, 聚湫坡面表土平均孢粉浓度为 2 254 粒/g, 阳坡和阴坡分别为 3 359.4 和 1 148.5 粒/g。HS 流域坡面的孢粉类型主要源于木本植物和草本植物, 少量来自于蕨类植物 (低于 1%)。其中, 阳坡 80% 的孢粉来源于草本植物, 以蒿属 (49.3%)、禾本科 (12.0%) 为主, 而木本植物主要是松属 (16.6%); 阴坡则木本和草本贡献各为 1/2, 主要来自于松属 (47.4%)、蒿属 (31.8%)、禾本科 (14.4%) 等物种。另一方面, HS 聚湫内淤积地表的平均孢粉浓度介于阳坡和阴坡之间, 为 1 323 粒/g。草本植物的孢粉含量约占总孢粉浓度的 2/3, 剩余 1/3 是木本植物。其中, 草本植物类别主要为蒿属 (38.4%) 和禾本科 (21.9%), 木本植物主要是松属 (28.4%)。

JB 聚湫流域表土中共鉴定 5 902 粒, 每个样品平均约 536 粒, 也鉴定出 42 科、62 属, 但类别和 HS 聚湫流域不同。坡面表土平均孢粉浓度为 2 324.7 粒/g, 阳坡和阴坡分别为 3 956.7 和 1 664.1 粒/g, 均高于 HS 流域坡面表土的孢粉含量 (图 2)。其中, JB 坡面表土孢粉类型也主要来自于木本植物和草本植物, 蕨类植物的贡献极少 (0.1%)。不同于 HS 流域阳坡和阴坡孢粉来源的显著差异, JB 流域阳坡和阴坡的孢粉均主要来源于草本植物, 平均比例分别为 92.9% 和 75.9%, 其中大多数来自于蒿属 (分别为 82.7% 和 57.6%), 禾本科比例不及 HS 流域表土孢粉的 1/4; 阳坡和阴坡的木本植物孢粉来源主要以松属为主, 分别为 5.0% 和 18.4%。另一方面, JB 聚湫内淤积地表

的平均孢粉浓度也介于阳坡和阴坡之间,为 2 200.4 粒/g,均高于 HS 聚淤积地的孢粉含量(图 2)。草本植物的孢粉含量占总孢粉浓度的 81.9%,

木本植物占 18.0%。其中,草本植物类别主要为蒿属(43.0%)、禾本科(18.8%)、藜草属(11.2%),木本植物主要是松属(12.5%)和沙棘属(2.2%)。

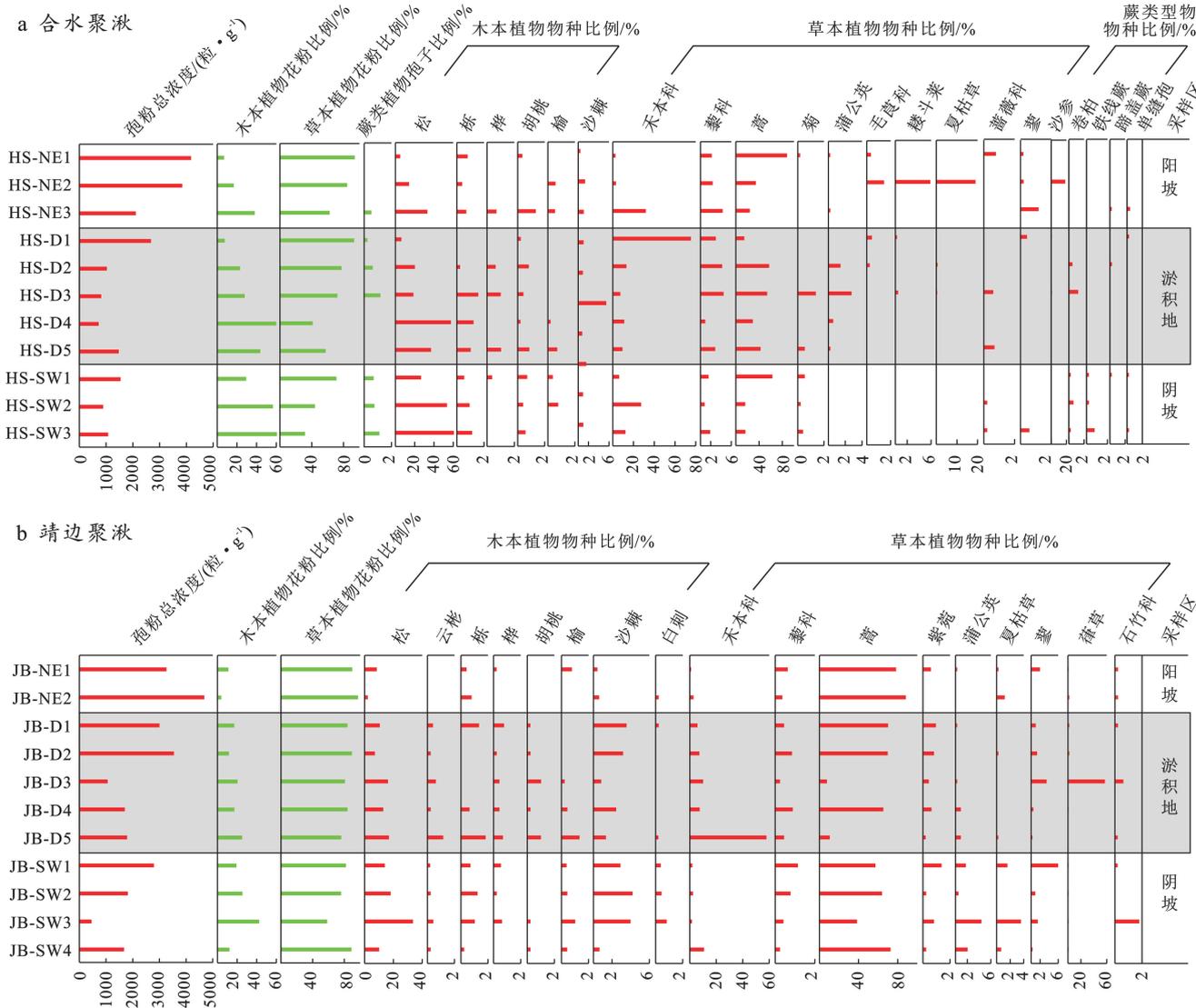


图 2 合水聚淤(a)和靖边聚淤(b)流域表土孢粉图谱

Fig.2 Palynogram of topsoils at Heshui (a) and Jingbian (b) catchments

### 2.3 粒度、含水量、烧失量

HS 聚淤流域表土共 11 个样品的颗粒粒径分布如图 3a 所示。HS 流域表土主要由粉砂和黏土组成,平均含量分别为 76.7%和 16.4%,砂含量为 6.9%。大多数表土的粒径分布均表现出明显的单峰型,峰值范围在 21.69~45.75 μm。其中,HS 聚淤坡面表土粒径分布基本相似,表明该区域土壤物源较为一致且在流域两侧均匀分布。而淤积地表土的粒度组成虽也以粉砂为主,但沿沟头向大坝方向逐渐变细,这是被暴雨侵蚀的坡面表土在聚淤内再次分布的结果。相较于 HS 聚淤,JB 聚淤流域表土则以粗粉砂和细砂为主,平均含量分别为 58.6%和 39.2%,黏土含量

仅为 5.5%,比 HS 聚淤表土颗粒更粗(图 3b)。所有 11 个表土的粒径分布也均表现为单峰型,峰值范围为 50.23~87.90 μm。具体而言,JB 流域坡面表土以细砂为主且分布类似,这也说明该区域土壤物源一致。而淤积地表土则以粗粉砂为主,但沿沟谷内变化不明显,可能是水动力不强而导致侵蚀泥沙在沟谷内流动不足的结果。

HS 聚淤流域表土含水量分布如图 4c 所示,平均为 4.6%。其中以聚淤内淤积地面平均含水量最高,为 6.0%;阴坡次之,为 5.5%;阳坡表土的含水量最低,仅 1.2%,这是水分迁移和太阳辐射分布的结果。相较而言,JB 流域表土含水量比 HS 流域低,平均为

3.1% (图 4d)。该流域平均含水量最高区域也分布在淤积地中(5.2%),阴坡平均含水量(1.6%)略高于阳坡(0.8%)。另一方面,HS 聚湫流域表土 550 °C 表土的烧失量(LOI)平均为 5.4% (图 4a),而且阳坡、阴坡和淤积地的平均值基本相同,但淤积地面表土基本呈

现沟头向大坝方向累积,与颗粒变化基本一致(图 3a)。JB 流域表土 550 °C LOI 平均为 2.4% (图 4b),只有 HS 流域的 45%。淤积地的平均 550 °C LOI 为流域内最高(2.6%),但在沟谷内变化不明显,与粒度结果也一致(图 3b)。

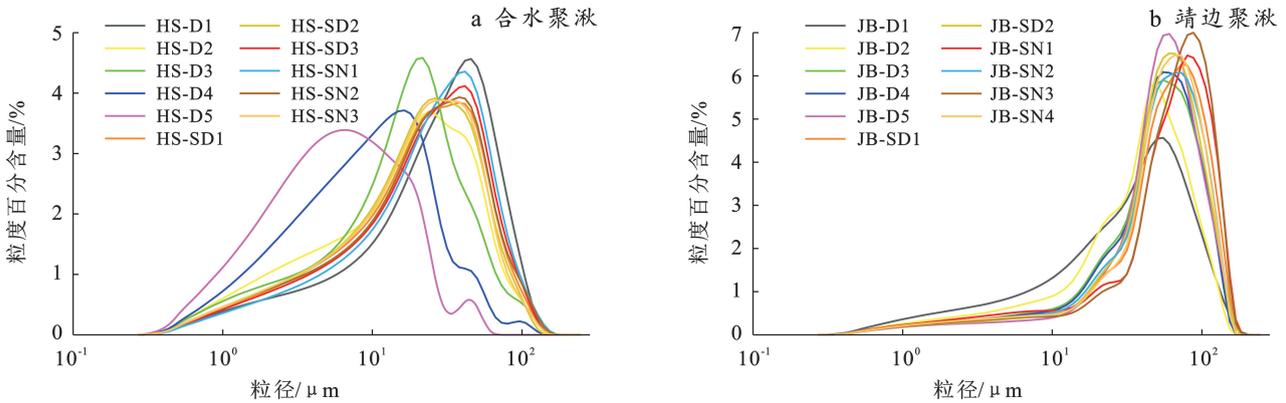


图 3 合水(a)和靖边(b)聚湫流域表土粒径分布

Fig.3 Distributions of grain size of all topsoils at Heshui (a) and Jingbian (b) catchments

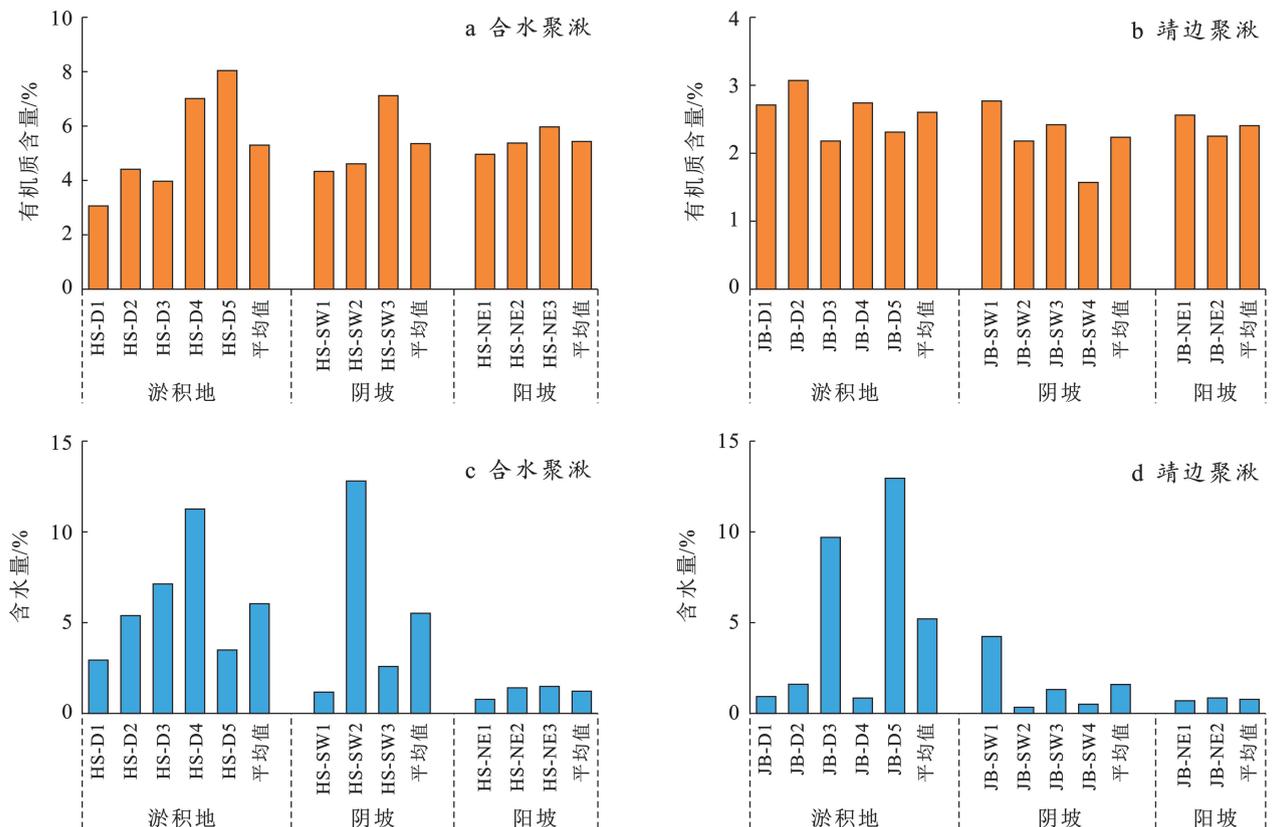


图 4 合水和靖边聚湫流域表土有机质含量(a和b)和含水量(c和d)分布

Fig.4 Distributions of organic matter content (a and b) and water content (c and d) at Heshui and Jingbian catchments

### 3 讨论

#### 3.1 HS 和 JB 聚湫流域植物组成及差异

前期通常利用区域范围的 NDVI 指数及计算的 FVC 程度识别其植被状况,但因分辨率不高而难以

“微观”认识居民依赖生存的坝库小流域内植被种类<sup>[11-15]</sup>。相较而言,野外地面调查可识别流域范围内生存植物的科、属、种,但受样线选择和样方鉴定的影响可能忽略部分零散生长或出现频度低的植物<sup>[26]</sup>。在 HS 和 JB 聚湫流域,采用以野外调查为主、辅以土

壤孢粉组成相结合的方式,进而更全面识别两个流域的植物组成。结果表明,HS 和 JB 流域野外植被调查和孢粉组成重合的数目分别为 28 科 24 属和 26 科 23 属(图 5)。此外,通过仔细识别孢粉组成中不重合科属的植物特征和生存范围,表明 HS 和 JB 流域表土孢粉中分别有 1 科 3 属和 1 科 2 属可能是随风力扩散沉降到该区域,故不被纳入到各流域的植被库中。相较而言,HS 和 JB 聚湫流域野外植被调查分别识别表土孢粉未能鉴定的 43 科 171 属和 37 科 163 属,而表土孢粉分别鉴别了野外调查未发现的 13 科 35 属和 15 科 37 属(图 5)。产生上述结果差异的原因可能为:①野外植被调查受样线选择和样方设置的空间限制,可能无法全面识别流域的植被状况;②孢粉鉴定过程中受鉴定技术的影响,更易识别丰度较高的孢子和花粉,而对丰度较低或形态相似的属种难以精准辨别<sup>[27]</sup>;③野外调查因受季节的影响,可能已错过某些植物的生长期,而表土孢粉则保留了全年或多年的植物类别信息,从而影响结果的全面性<sup>[27]</sup>。因此,HS 和 JB 聚湫流域的表土孢粉分析较好地补充了野外调查结果,两个聚湫流域均展现出丰富多样的植物种类,分别为 84 科 230 属和 78 科 223 属。

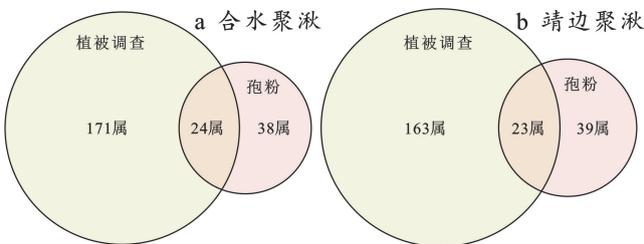


图 5 合水和靖边聚湫流域植被调查与孢粉组成的属分类重合结果  
Fig.5 Concordance between genus distributions derived from field vegetation investigation and pollen composition in Heshui and Jingbian catchment

基于野外调查和表土孢粉组成相互补充构建的本地植被库,通过对比发现绝大多数植物种类在 HS 和 JB 聚湫流域内都有生长,但各个流域也存在部分独有的科属。HS 聚湫流域生存着 JB 流域没有的紫茉莉科、商陆科、五味子科、金缕梅科、卫矛科、槭树科、无患子科、鼠李科、五加科、鸭跖草科、百合科、薯蓣科等植物,而 JB 聚湫流域却有番杏科、景天科、白花丹科等。此外,HS 聚湫流域内木本植物、喜湿型草本植物、禾本科等植物类别更丰富,共有 119 属且占总植物类别的 51.74%,而 JB 聚湫流域内旱生型灌木及草本植物则较多,共有 126 属,占总植物类别的 56.5%。另一方面,HS 聚湫流域阴坡和淤积地的木本植物对表土孢粉贡献量较大,而 JB 流域则以草本植物为主;阳坡表土孢粉主要源于草本植物,但 JB 流

域的比例高达 92.9%(图 2)。

通过解译 HS 和 JB 聚湫流域的土地利用方式(图 6),HS 流域林地面积比例是 JB 流域的 3 倍且主要分布在阴坡和淤积地,而 JB 流域的沟壑坡面比例和草地面积比例分别是 HS 流域的 2.5 和 6 倍(图 6)。相较于 JB 流域的农业活动主要分布在淤积地,HS 流域的阳坡和淤积地均广泛用于农业栽种,禾本科类型和孢粉浓度均明显增高(图 2),这与上述两个流域的植物组成和分布基本一致。而上述植被类型的差异可能是两个流域气候特征、土壤属性、土地利用方式共同作用的结果。

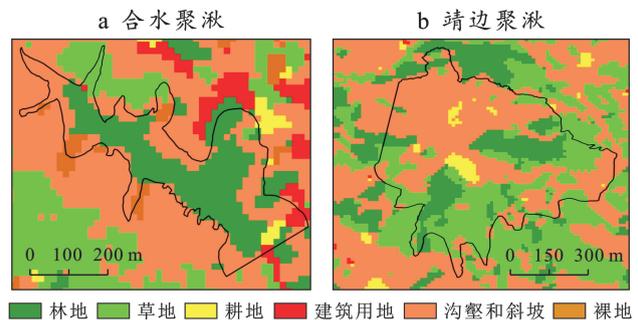


图 6 合水和靖边聚湫流域土地利用现状  
Fig.6 Land-use status of Heshui and Jingbian catchment

HS 聚湫流域地处黄土高原中南部子午岭西侧 600 mm 等降水量线附近,流域内土壤物源一致且分布均匀,以粉砂为主(平均比例为 76.7%,图 3)。较多的光热和降水等气候环境和肥力较高的土壤(图 4)有助于木本植物、喜湿性草本植物的生长,该类植物占总植物类别的 51.74%。相较于 HS 流域,位于黄土高原中北部毛乌素沙地南端 400 mm 等降水量线附近的 JB 聚湫流域,表土以粗粉砂和砂为主,比 HS 流域更粗。相对冷干的环境和贫瘠的土壤(图 4)仅适宜生长旱生型草本和灌木,该类植物占总植物类别的 56.5%。此外,两个聚湫流域近年来的生态修复措施导致了当前植物组成的差异。HS 流域主要实施“植树造林”和“坡地改梯”措施,木本植物和禾本科类型多样且比例较高;当地大力推广育苗产业,在水土条件更好的淤积地广泛种植松苗。而 JB 流域则实施严格的“封山育林”和“退耕还林(草)”政策,在相对干旱的环境中草本植物和少数灌木自然生长;当地推行中药材种植扶贫项目,故在耕种的淤积地中可见药用植物(如葎草)的生长。

### 3.2 两个流域的生态修复状况评价

为了宏观认识黄土高原沟壑区的 HS 聚湫流域和丘陵沟壑区的 JB 聚湫流域自“退耕还林(草)”工程以来的生态修复状况,选取两个流域 2000 与 2021 年的植被覆盖度变化对比分析(图 7)。结果表明,相较

于 2000 年以中、低植被覆盖度为特征(比例达 58.99%)的 HS 流域,该区域在 2021 年显著“变绿”,高覆盖度面积比例达 82.61%,仅在山路周边分布一些植被覆盖度较低的区域。类似地,JB 流域在 2000 年的植被覆盖度也呈现出低、极低水平,共占总面积的 56.67%。但该流域经近 20 a 的治理后高覆盖度水平的面积比例达 37.80%、中高覆盖度达 50.17%，“变绿”状况明显。因此,黄土高原中南部 HS 流域和中北部 JB 流域的植被覆盖状况在不同生态修复措施下均取得了明显改善。然而,通过具体分析两个流域“变绿”后的植物类别并对比植物科学中心等网站罗列的植物名录,HS 和 JB 聚淤现有的植物组成存在以下问题。首先,两地均存在外来植物入侵现象。经调查,HS 聚淤流域共有 24 种植物为外来种入侵到该地生长,占植被调查物种的 10.1%,其中以大戟科、菊科、苋科、商陆科等草本植物为代表;而 JB 流域也有 21 种植物入侵到该地,占植被调查物种的 8.8%,以大戟科、菊科、苋科、旋花科为代表。这些外来植物的入侵可能会对流域本地植物群落演替、传粉网络、营养结构等造成影响<sup>[28]</sup>,如 HS 流域内的筋草、地锦草、垂序商陆等植物会占据本地物种生态位,导致其他物种生长不良或死亡,而 JB 流域内的泽漆、一年蓬、鳢肠等植物会危害麦类和豆类等作物的生长及产量。因此,需长期跟踪监测流域的植被结构和生物多样性状况,确保流域的生态修复进程不被改变。其次,两个流域内本地植物自然恢复和人工栽种并存。HS 聚淤流域内属陇东地区自然生长的原生植物比例为 45.16%,其余的植物类别基本属适合甘肃省生长的植物,通过人工造林等方式栽种到该流域。相较而言,JB 聚淤流域生长的陕北地区原生植物比例更小,仅为 35.86%,其他也是属陕西省范围内生长的植物,可能是当地广泛开展的“飞播造林”带来的物种<sup>[29]</sup>。此外,两个流域人工栽种的植物多为成活率和保存率较高的物种(如杨树、油松、柠条等),通过发达的根系可对土壤水分过渡消耗,虽在短期内快速提高植被覆盖程度,但可能打破流域生态环境的土—水平衡,造成土壤干层并导致“小老头树”等现象<sup>[8-9]</sup>,从而引起流域内植被群落生长衰退。然而,凤紫棋等<sup>[30]</sup>通过调查甘肃陇东地区两个小流域植被自然恢复和人工造林两种方式下的土壤水分特征,指出人工造林的长期种植有助于改变土壤理化特征,提高土壤蓄水持水能力。总之,对于小流域内引入人工植物,需充分考虑当地的气候水文环境和林草植物特征,选取适宜的种植密度,以长期稳定的生态系统为目标实现黄土高原不同地貌区内小流域的生态保护和高质量发展。

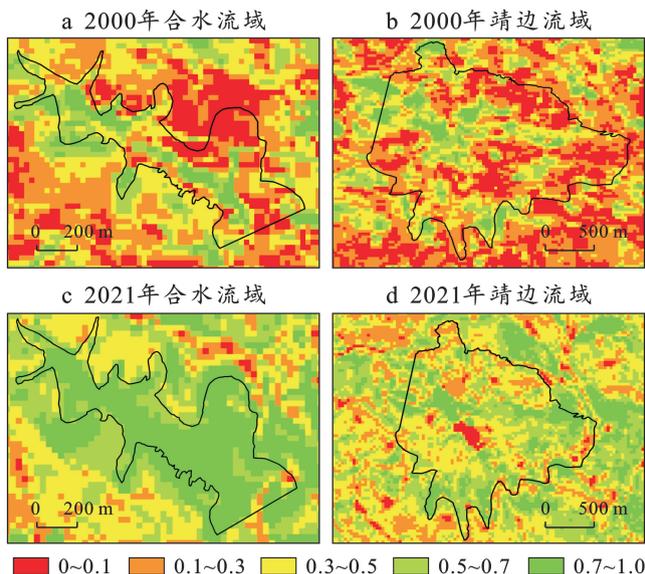


图 7 基于 NVDI 分布的合水和靖边流域 2000—2021 年植被覆盖度对比

Fig.7 Comparison of vegetation coverage over 2000—2021 at Heshui and Jingbian catchments based to NVDI distributions

## 4 结论

(1) 野外植被调查和表土孢粉组成鉴定相结合,是较全面地识别黄土高原不同地貌区聚淤流域植物群落组成的有效手段。

(2) HS 聚淤流域多见木本植物、喜湿型草本植物、禾本科植物;JB 聚淤流域旱生型灌木和草本植物更丰富。气候环境是两个流域植物组成差异的决定性因素,而土地利用方式和生态治理措施的不同进一步分异了植物类别。

(3) 自“退耕还林(草)”措施实施以来,HS 和 JB 聚淤流域植被覆盖度显著提升,高覆盖度面积比例分别为 82.61%和 37.80%,生态修复成效明显,但也存在外来植物入侵、本地原生植物比例不高、人工栽种植物常见等现象。因此,黄土高原小流域生态修复需充分考虑引入林草特征与当地气候环境的匹配性,进而形成可持续的恢复植被。

**致谢:**感谢中国科学院地球环境研究所金章东研究员、湖南文理学院地理科学与旅游学院张鹏钾老师对论文构思和修改的建议;特别感谢评审专家和编辑部老师的建设性意见!

## 参考文献 (References)

- [1] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45(1): 223-243.

- [2] Chen Liding, Wei Wei, Fu Bojie, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007,31(4):389-403.
- [3] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等.黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J].*中国科学院院刊*,2023,38(8):1110-1117.  
Fu Bojie, Liu Yansui, Cao Zhi, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023,38(8):1110-1117.
- [4] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016,9:38-41.
- [5] Naeem S, Zhang Yongqiang, Zhang Xuanze, et al. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2021,66(12):1160-1163.
- [6] 傅伯杰.黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J].*科学通报*,2022,67(32):3769-3779.  
Fu Bojie. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022,67(32):3769-3779.
- [7] Cao Shixiong, Chen Li, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011,104(4):240-245.
- [8] Chen Yiping, Wang Kaibo, Lin Yishan, et al. Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 2015,8:739-741.
- [9] Zhang Shuilei, Yang Dawen, Yang Yuting, et al. Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018,123(3):923-935.
- [10] 赵东晓.高效水土保持植物资源建设是黄土高原高质量发展的一条必由之路[J].*中国水土保持*,2021(1):1-4.  
Zhao Dongxiao. Construction of soil and water conservation efficient plant resources is the only way for high quality development of Loess Plateau [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(1):1-4.
- [11] Li Peng, Wang Jing, Liu Mengmeng, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015 [J]. *Catena*, 2021,203:105331.
- [12] 周璐红,张康.2000—2020年延安市植被覆盖时空变化及其影响因素[J].*水土保持通报*,2023,43(4):356-365.  
Zhou Luhong, Zhang Kang. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its influencing factors in Yan'an City from 2000 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(4):356-365.
- [13] Fan Xinyi, Gao Peng, Tian Biqing, et al. Spatio-temporal patterns of NDVI and its influencing factors based on the ESTARFM in the Loess Plateau of China [J]. *Remote Sensing*, 2023,15(10):2553.
- [14] 张乐艺,李霞,冯京辉,等.2000—2018年黄河流域NDVI时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J].*水土保持通报*,2021,41(5):276-286.  
Zhang Leyi, Li Xia, Feng Jinghui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River Basin and its dual response to climate change and human activities during 2000—2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(5):276-286.
- [15] Zhang Yichi, Jiang Xiaohui, Lei Yuxin, et al. The contributions of natural and anthropogenic factors to NDVI variations on the Loess Plateau in China during 2000—2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022,143:109342.
- [16] Wang Xiaqing, Liu Fenggui, Zhang Xinbao, et al. Asynchronized erosion effects due to climate and human activities on the central Chinese Loess Plateau during the Anthropocene and its implications for future soil and water management [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022,47(5):1238-1251.
- [17] 高健翎,陈小科,张佃茂.黄土高原地区淤地坝现状分析[J].*中国水土保持*,2023(1):1-5.  
Gao Jianling, Chen Xiaoke, Zhang Dianmao. Current situation of warping dams in the Loess Plateau [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(1):1-5.
- [18] 艾开开,杨乙丹.明至民国时期黄土高原淤地坝的发展变迁:以陕晋为中心[J].*农业考古*,2018(6):134-141.  
Ai Kaikai, Yang Yidan. Development of check dams in the Loess Plateau from the Ming Dynasty to the republic of China; Case study of Shaanxi and Shanxi Provinces [J]. *Agricultural Archaeology*, 2018(6):134-141.
- [19] 陈祖煜.黄土高原坝田绿色走廊建设的构思与实践[J].*水利规划与设计*,2022(9):1-5.  
Chen Zuyu. Conception and practice of green corridor development in dam field of the Loess Plateau [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022(9):1-5.
- [20] Fang Nufang, Zeng Yi, Ran Lishan, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023,4:65.
- [21] Wang Xiaqing, Wang Zhaosheng, Xiao Jun, et al. Soil erosion fluxes on the central Chinese Loess Plateau during CE 1811 to 1996 and the roles of monsoon storms and human activities [J]. *Catena*, 2021,200:105148.
- [22] 彭勇,梁武,彭日民,等.保靖县黄金茶园野生植物种类及群落结构调查[J].*湖南文理学院学报(自然科学版)*,2018,30(2):23-26.

- Peng Yong, Liang Wu, Peng Rimin, et al. Investigation of distribution and harm of wild plant resources in golden tea field [J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology)*, 2018, 30(2):23-26.
- [23] 王夏青, 彭保发, 李福春, 等. 黄土高原聚淤沉积旋回特征及地球化学划分[J]. *土壤*, 2018, 50(5):1046-1054.  
Wang Xiaqing, Peng Baofa, Li Fuchun, et al. Features and geochemical identification index of deposition couplets in landslide-dammed reservoirs on Loess Plateau of China [J]. *Soils*, 2018, 50(5):1046-1054.
- [24] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(1):101-110.
- [25] Lü Feiya, Wang Xiaqing, Liu Fenggui, et al. Vegetation, temperature, and Indian Summer Monsoon evolution over the past 4 400 years revealed by a pollen record from Drigo Co on the Southern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 655:112556.
- [26] 王乐, 董雷, 胡天宇, 等. 中国植被图编研历史与展望[J]. *中国科学(生命科学)*, 2021, 51(3):219-228.  
Wang Le, Dong Lei, Hu Tianyu, et al. History and prospect of vegetation map compilation in China [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2021, 51(3):219-228.
- [27] 崔亦凡, 秦锋, 赵艳, 等. 孢粉多样性能否反映植被多样性?: 以中国东北地区为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(9):2127-2138.  
Cui Yifan, Qin Feng, Zhao Yan, et al. Does palynological diversity reflect floristic diversity?: A case study from Northeast China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(9):2127-2138.
- [28] 刘艳杰, 黄伟, 杨强, 等. 近十年植物入侵生态学重要研究进展[J]. *生物多样性*, 2022, 30(10):276-292.  
Liu Yanjie, Huang Wei, Yang Qiang, et al. Research advances of plant invasion ecology over the past 10 years [J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30(10):276-292.
- [29] 白剑波. 陕北黄土高原丘陵沟壑区油松飞播造林成效调查[J]. *陕西林业科技*, 2012, 40(6):31-33.  
Bai Jianbo. Effect of ariel afforestation with pinus tabulaeformis in Loess Plateau of North of Shaanxi [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2012, 40(6):31-33.
- [30] 凤紫棋, 孙文义, 穆兴民, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复方式对小流域土壤水分的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2023, 21(4):1-10.  
Feng Ziqi, Sun Wenyi, Mu Xingmin, et al. Effects of vegetation restoration methods on soil moisture in the small basins of Loess Plateau Gully Region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(4):1-10.

(上接第 64 页)

- [15] 李昌兰. 喀斯特典型坡耕地土壤养分流失试验研究[D]. 贵州 贵阳: 贵州大学, 2016.  
Li Changlan. Experimental study on soil nutrient loss in typical karst sloping cropland [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2016.
- [16] 翟元晓, 李彦旻, 崔胜辉, 等. 丽江市漾弓江流域水体氮负荷及污染源特征研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(7):329-337.  
Zhai Yuanxiao, Li Yanmin, Cui Shenghui, et al. Study on the characteristics of water nitrogen load and pollutant source of the Yanggongjiang Watershed, Lijiang City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(7):329-337.
- [17] 王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13):160-169.  
Wang Shuaibing, Song Yali, Wang Keqin, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13):160-169.
- [18] 彭遥, 周蓓蓓, 陈晓鹏, 等. 间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3):54-60.  
Peng Yao, Zhou Beibei, Chen Xiaopeng, et al. Study on the mechanism of soil, water and nutrient loss on loess slope under interval rain events [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):54-60.
- [19] 罗春燕, 涂仕华, 庞良玉, 等. 降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4):24-27.  
Luo Chunyan, Tu Shihua, Pang Liangyu, et al. Effect of rain intensity on nutrient losses from sloping land of purple soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4):24-27.
- [20] 杨任翔, 邱凡, 郑佳舜, 等. 赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(3):904-913.  
Yang Renxiang, Qiu Fan, Zheng Jiashun, et al. Characteristics of runoff and the dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3):904-913.
- [21] 汤珊珊, 李鹏, 任宗萍, 等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1):39-47.  
Tang Shanshan, Li Peng, Ren Zongping, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):39-47.