

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.03.039

CSTR:32311.14.rswc.2026.03.039

杨丽娜, 王秋霞, 顾朝军. 丹江口库区生态清洁小流域水土保持措施效益评价[J]. 水土保持研究, 2026, 33(3):211-218.

Yang Lina, Wang Qiuxia, Gu Zhaojun. Benefit evaluation of soil and water conservation measures for eco-clean small watersheds in the Danjiangkou Reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(3):211-218.

丹江口库区生态清洁小流域水土保持措施效益评价

杨丽娜, 王秋霞, 顾朝军

(长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站, 武汉 430010)

摘要: [目的] 构建适应水源区生态清洁小流域的情景模拟评价方法, 量化水土保持措施的减蚀减沙效益及其空间分布特征, 为水源区小流域水土保持措施的科学配置提供技术参考, 为治理工程的效益评价方法提供实证支持。[方法] 选取丹江口库区入库支流大柏河, 采用中国土壤流失方程开展生态清洁小流域综合治理的效益评估, 结合水土保持监测试验站实测资料对模型参数开展本地化, 定量评估生态清洁小流域治理的水土保持效益。[结果] 大柏河小流域未开展治理前, 平均土壤侵蚀模数为 $1\ 048.12\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 土壤流失量为 $57\ 028.52\ \text{t}/\text{a}$, 水土流失面积占流域总面积的 27.10%。实施生态清洁小流域综合治理后, 流域平均土壤侵蚀模数和总流失量分别减少 26.40% 和 28.37%。[结论] 石坎梯田和土坎梯田的减蚀减沙效果显著, 封禁管理措施对流域水土流失治理具有显著效益; 侵蚀热点区主要分布在坡度较大区域, 是未来水土流失治理的重点。

关键词: 丹江口库区; 大柏河; 生态清洁小流域; 水土保持措施; 效益评价

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0211-08

Benefit evaluation of soil and water conservation measures for eco-clean small watersheds in the Danjiangkou Reservoir area

Yang Lina, Wang Qiuxia, Gu Zhaojun

(Soil and Water Conservation Monitoring Center of Changjiang

River Basin, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] This study aims to establish a scenario simulation evaluation method for eco-clean small watersheds in water source areas and quantify the erosion and sediment reduction benefits of major measures and their spatial distribution patterns, thereby providing technical reference for the scientific allocation of soil and water conservation measures in small watersheds of water source areas and offering empirical support for the benefit evaluation methods of management projects. [Methods] The Dabaihe River, a tributary flowing into the Danjiangkou Reservoir area, was selected to evaluate the benefits of comprehensive management of eco-clean small watersheds using the Chinese Soil Loss Equation (CSLE). Model parameters were localized by incorporating measured data from soil and water conservation monitoring experimental stations, enabling a quantitative evaluation of the soil and water conservation benefits of management in the eco-clean small watersheds. [Results] Before the implementation of management in the Dabaihe River small watershed, the average soil erosion modulus was $1\ 048.12\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, the total soil loss was $57\ 028.52\ \text{t}/\text{a}$, and the area affected by soil and water loss accounted for 27.10% of the total watershed area. After the implementation of the comprehensive management of eco-clean small watersheds, the average soil erosion modulus and the total soil loss in the watersheds decreased by 26.40% and 28.37%, respectively. [Conclusion] Stone-bench terraces and earth-

收稿日期: 2025-07-18

修回日期: 2025-08-19

接受日期: 2025-09-14

资助项目: 丹江口库区及上游水质安全保障项目(102126242020150000002)

第一作者: 杨丽娜(1989—), 女, 河南漯河市人, 工程师, 硕士, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: 373730560@qq.com

通信作者: 王秋霞(1990—), 女, 河南周口市人, 工程师, 硕士, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: 121063771@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

bench terraces demonstrate significant effectiveness in reducing erosion and sediment, and closure management measures have a notable impact on controlling soil and water loss in the watersheds. Erosion hotspots are primarily distributed in areas with steeper slopes, which should be prioritized in future soil and water control efforts.

Keywords: Danjiangkou Reservoir area; Dabaihe River; eco-clean small watershed; soil and water conservation measures; benefit evaluation

水土保持是生态文明建设的必然要求、江河治理的根本措施,是全面推进乡村振兴、提升生态系统功能和稳定性的有效手段。丹江口库区及上游流域是南水北调中线工程水源地,中线工程不仅能缓解我国华北地区的水资源短缺,并能兼顾沿线的生态用水和灌溉用水,有力地推进沿线京津冀等用水区的社会经济发展和生态环境建设。因此,维护丹江口库区及其上游水源地生态环境是南水北调中线工程长期安全稳定运行,实现“一泓清水永续北上”的重要保障^[1-2]。

极端降雨导致严重的水土流失,同时携带大量泥沙和氮磷等污染物进入河道,从而对丹江口库区及其上游地区生态环境带来较大风险^[3],传统的小流域治理模式已经难以满足水源地生态环境保护需求。因此,在传统小流域治理基础上,将水土资源保护、农村垃圾及污水处理等相结合,形成生态清洁小流域治理模式^[4-5]。目前,全国已建成生态清洁小流域 4 000 余个,流域治理效果凸显,许多河流出口断面水质达到Ⅲ类以上^[6-10]。

已有大量研究开展了丹江口库区及其上游的水土流失监测、预报、水土保持效益评估,包括降雨和地形对坡面土壤侵蚀的影响^[11]、库区坡改梯工程的水土保持效益^[12]、坡耕地水土保持措施配置模式等^[13]研究。这些研究从不同的角度和尺度针对丹江口库区的水土流失状况进行定量评估,为水土保持措施效益评估方法提供参考。

尽管生态清洁小流域治理在全国范围内已取得一定成效,但其在南水北调水源地水土保持效益评价仍存在三方面科学问题:一是治理措施实施时间较短,如何在有限监测期内定量识别其减蚀减沙效应,缺乏科学有效的评估方法;二是现有模型多依赖经验赋值,模型参数难以考虑研究区的实际情况,因此不足以准确刻画水源地典型小流域的侵蚀特征及影响因素;三是不同类型水土保持措施的单一和群体效益尚缺乏定量对比,限制了治理模式的优化配置。

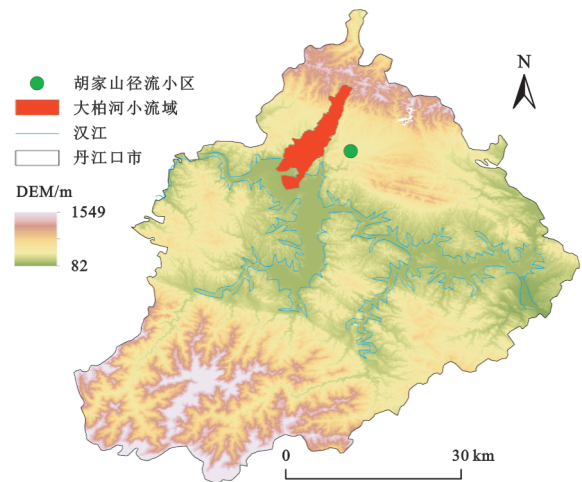
本研究针对上述问题,依托胡家山径流小区长期监测数据,结合遥感与 GIS 技术开展 CSLE 参数本地化,构建适应水源地生态清洁小流域的情景模拟

评价方法,并在大柏河流域开展应用,量化主要措施的减蚀减沙效益及其空间分布特征。该研究不仅为水源地小流域水土保持措施的科学配置提供技术参考,也为治理工程的效益评价方法提供实证支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

丹江口市大柏河生态清洁小流域位于丹江口市北部,丹江口水库周边,地处东经 111°6′55″—111°14′10″,北纬 32°41′20″—32°51′10″,如图 1 所示,涉及习家店镇的习家店村、庄子沟村、杏花村、李家湾村和小茯苓村共 5 个行政村,小流域土地总面积 5 791.23 hm²,流域内水系主要为大柏河。小流域地处秦岭、大巴山和武当山过渡地带,属秦岭、大巴山东延余脉,地形地貌以山地丘陵为主,地势起伏大,山地、河谷、丘陵地貌广泛分布,整体呈北高南低态势。土壤主要有黄棕壤、石灰土、紫色土。小流域属北亚热带季风气候区,多年平均气温为 16.0℃,多年平均无霜期为 250 d,多年平均降雨量 797.6 mm,多年平均蒸发量为 1 600 mm。降雨时空分布不均,集中在 4—9 月。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 大柏河小流域及胡家山径流小区位置
Fig. 1 Location of Dabaihe River small watershed and Hujiashan runoff plot

丹江口市胡家山综合观测站位于大柏河生态清洁小流域附近,属丹江口水库周边山地丘陵水质保护区,地处东经 111°13′34.78″,北纬 32°45′0.8″。胡

家山试验站共布设9个径流小区,包括5种生物措施、2种工程措施,径流小区具体布设情况见表1。本

研究收集整理了2022—2024年各个小区的产流、产沙性降雨、径流和泥沙资料。

表1 胡家山径流小区措施布设

Table 1 Layout of measures in Hujiashan runoff plot

试验站	措施类型	布设措施	坡度/(°)	小区面积/(m×m)
丹江口市 胡家山 径流小区	工程措施	土坎水平梯田	15	20×5
		石坎水平梯田	15	20×5
	生物措施	植物篱	15	20×5
		经果林(枇杷)	15	20×5
		经果林(柑橘)	15	20×5
		人工乔木林(侧柏)	15	20×5
		自然林(紫穗槐)	15	20×5
	对照	耕地	15	20×5
		裸地	15	20×5

2024年大柏河小流域开展生态清洁小流域综合治理,实施了一系列水土保持综合治理措施,建设石坎梯田62.81 hm²,土坎梯田26.02 hm²,村庄环境整治14.09 hm²,封禁治理1 573.40 hm²,河道综合整治长度1 050 m,措施布设位置如图2所示。

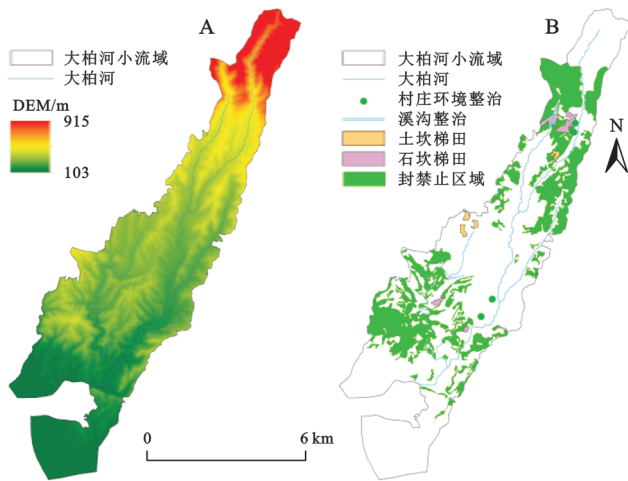


图2 大柏河小流域措施布设图

Fig. 2 Layout of measures in Dabaihe River small watershed

1.2 数据来源

胡家山径流小区2022—2024年的降雨、土壤流失量、措施布设等数据来自胡家山综合观测站,包括降雨次过程记录、降雨侵蚀力、各径流小区场次降雨事件的土壤流失量数据。大柏河小流域土地利用、植被覆盖、土壤类型、措施布设数据均来自于2024年遥感影像解译和野外实地调查,空间分辨率为10 m。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据来源于ALOS(Advanced Land Observing Satellite)卫星产品,为12.5 m分辨率。为开展模型计算,采用ArcGIS软件使用CUBIC方法进行空间插值,并重采样为10 m栅格。

1.3 水土保持措施效益评价

采用情景模拟方法进行水土保持措施效益评价,基于有措施和无措施情景下的2024年土壤侵蚀强度模拟,定量计算大柏河生态清洁小流域所实施的水土保持措施减蚀减沙效益。其中,降雨侵蚀力根据2024年的日降雨数据计算,土壤可蚀性因子使用EPIC模型方法估算。根据DEM提取坡度坡长因子,通过径流小区观测数据计算生物措施和植被覆盖对水土流失量的影响,验证植被覆盖与生物措施因子。利用径流小区观测土壤流失量对水土保持工程措施的响应获取水土保持工程措施因子。利用中国土壤流失方程计算土壤流失量,依据土壤侵蚀分类分级标准进行土壤侵蚀强度分级,综合分析土壤侵蚀的分布、面积和强度。土壤侵蚀评价技术路线见图3。

1.3.1 中国土壤流失方程 本研究采用中国土壤流失方程CSLE(Chinese Soil Loss Equation)^[14]计算土壤水力侵蚀。CSLE模型是根据我国水土流失实际情况,对美国修正通用土壤流失方程USLE进行修订后提出的^[15-16]。该模型是我国开展水土流失动态监测的主要方法,也是土壤侵蚀定量评价常用方法之一。CSLE模型包括7个因子的计算,即降雨侵蚀力因子R、土壤可蚀性因子K、坡度因子L和坡长因子S、生物措施因子B、工程措施因子E和耕作措施因子T。中国土壤流失方程基本形式为:

$$A = RKLSBET \quad (1)$$

式中:A为土壤侵蚀模数(t/hm²·a);R为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm²·h·a)];K为土壤可蚀性因子[t·hm²·h/(hm²·MJ·mm)];L为坡长因子,无量纲;S为坡度因子,无量纲;B为植被覆盖与生物措施因子,无量纲;E为工程措施因子,无量纲;T为耕作措施因子,无量纲。

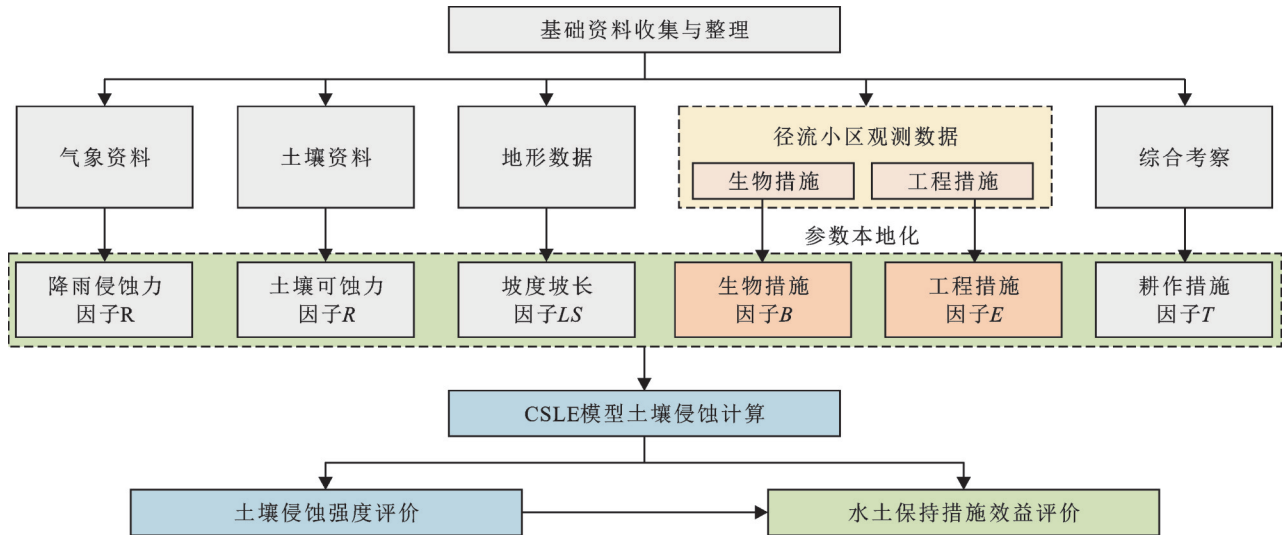


图 3 水土保持措施效益评价技术路线

Fig. 3 Technical route for benefit evaluation of soil and water conservation measures

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。降雨侵蚀力因子根据小流域内各站点的日降雨计算,再使用反距离权重法插值获取小流域降雨侵蚀力因子空间数据。年降雨侵蚀力因子的计算方法为^[17]:

$$R = \sum_{n=1}^{24} R_{\text{半月}} \quad (2)$$

$$R_{\text{半月}} = \alpha \sum_{i=1}^k (P_i)^\beta \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (5)$$

式中: n 表示一年中第 n 个半月(将一年划分为 24 个半月,以每月的前 15 d 为一个半月,剩余天数为另一个半月); $R_{\text{半月}}$ 为半月降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; k 表示半月内的天数; P_i 表示半月内第 i 天的侵蚀性降雨量(日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的为侵蚀性降雨); α 、 β 为回归系数; P_{d12} 表示日降雨量大于等于 12 mm 的日平均降雨量; P_{y12} 表示日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的年平均降雨量。

(2) 土壤可蚀性因子 K 。土壤可蚀性因子采用 EPIC 模型中提出的方法进行估算^[18]:

$$K = 0.1317 \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[0.0256s_a \left(1 - \frac{s_i}{100} \right) \right] \right\} \left(\frac{s_i}{c_i + s_i} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[1 - \frac{0.7s}{s_n + \exp(-5.51 + 22.9s_n)} \right] \quad (6)$$

式中: s_a 、 s_i 、 c_i 分别为土壤的砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、黏粒($< 0.002 \text{ mm}$)的含量百分比(%); s_n 为常数, $s_n = 1 - s_a/100$; C 为土壤有机碳含量(%).

(3) 坡长和坡度因子 LS 。坡长和坡度因子 LS 采

用刘宝元等^[19]改进的坡长因子和坡度因子计算公式:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (7)$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5 \leq \theta < 10^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (8)$$

$$m = \begin{cases} 0.2 & \theta \leq 1^\circ \\ 0.3 & 1^\circ < \theta \leq 3^\circ \\ 0.4 & 3^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ 0.5 & \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为从流域 DEM 中提取的坡长(m); m 为坡长指数; S 为坡度因子; θ 为坡度($^\circ$).

(4) 植被覆盖与生物措施因子。植被覆盖与生物措施因子基于径流小区参数本地化结果进行校正,计算为:

$$B = \frac{A_B / (R_B T_B)}{A_{\text{bare}} / R_{\text{bare}}} \quad (10)$$

式中: B 为校正后的植被覆盖与生物措施因子; A_B 、 A_{bare} 分别为实施生物措施及裸土径流小区校正为标准径流小区后的土壤侵蚀模数 ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$); R_B 、 R_{bare} 分别为实施生物措施及裸土径流小区的年降雨侵蚀力 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; T_B 为实施生物措施的径流小区的耕作措施因子,耕地赋值为 0.397,其他土地赋值为 1。

(5) 水土保持工程措施因子。水土保持工程措施因子 (E) 根据径流小区参数本地化结果进行校正,计算为:

$$E = \frac{A_E / (R_E T_E)}{A_{\text{bare}} / R_{\text{bare}}} \quad (11)$$

式中: A_E 、 A_{bare} 分别为实施工程措施及裸土径流小区校正为标准径流小区后的土壤侵蚀模数 ($\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$);

R_E, R_{bare} 分别为实施工程措施及裸土径流小区的年降雨侵蚀力 [$MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)$]; T_E 为实施工程措施的径流小区的耕作措施因子, 耕地赋值为 0.397, 其他类型土地赋值为 1。

(6) 耕作措施因子 T 。耕作措施因子 T 结合当地农业实践和气候条件综合考虑, 耕地赋值为 0.397, 其他地类赋值为 1。

1.3.2 土壤侵蚀强度评价 依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)^[20] 评价每个栅格的土壤侵蚀强度。

1.3.3 水土保持措施效益评价 为量化生态清洁小流域工程的水土保持效益, 本研究采用情景模拟对比法评估生态清洁小流域各主要水土保持措施效果。基于 2024 年无措施(现状)情景(S_0)和有措施情景(S_1)下的 CSLE 模型模拟结果, 使用下式定量评价不同水土保持措施的效益:

$$\eta = \frac{A_{S_0} - A_{S_1}}{A_{S_0}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: η 为水土保持措施效益(%); A_{S_0} 为无措施情景(S_0)下的土壤侵蚀模数 [$t / (hm^2 \cdot a)$]; A_{S_1} 为有措施情景(S_1)下的土壤侵蚀模数 [$t / (hm^2 \cdot a)$]。

2 结果与分析

2.1 模型因子本地化

胡家山不同措施径流小区场次降雨的土壤流失量具有显著的差异(图4), 不同水土保持措施可有效减蚀减沙, 且对于极端降雨事件的水土流失也有较好的拦蓄效果。具体来说, 经果林(枇杷)措施和自然林(紫穗槐)措施的水土保持效益最好, 土坎和石坎梯田效益次之, 裸地的土壤流失量最大。在极端降雨条件下, 经果林(枇杷)和自然林(紫穗槐)效果最好, 能够将土壤流失量控制在 10 t/hm^2 以内; 其次是土坎和石坎梯田, 能够将土壤流失量控制在 40 t/hm^2 以内; 而其余措施则将产生 100 t/hm^2 以上的土壤流失, 裸地甚至产生了接近 400 t/hm^2 的土壤流失。这表明经果林(枇杷)和自然林(紫穗槐)及土坎和石坎梯田措施能够较好地保护地表, 减蚀减沙效益十分显著。胡家山径流小区 E 因子(工程措施)和 B 因子(生物措施)的参数本地化结果如表3所示, 与径流小区侵蚀特征相对应。

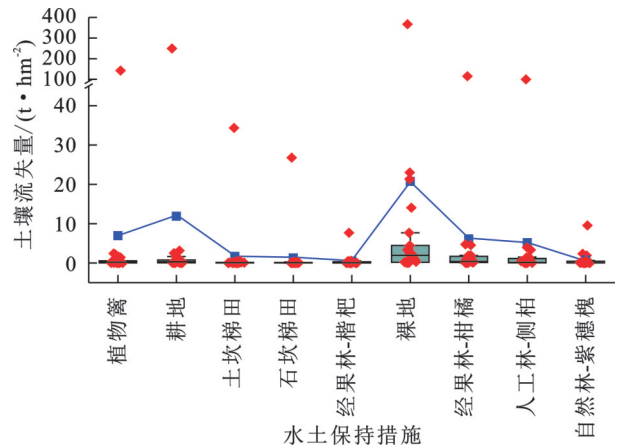


图4 胡家山径流小区场次降雨土壤流失量特征

Fig. 4 Characteristics of soil loss of individual rainfall events in Hujiaoshan runoff plot

表3 胡家山径流小区因子参数本地化结果

Table 3 Localization results of factor parameters for Hujiaoshan runoff plot

试验站	措施类型	布设措施	平均因子值
丹江口市 胡家山 径流小区	工程措施	土坎水平梯田	0.201
		石坎水平梯田	0.142
		植物篱	0.747
	生物措施	经果林(枇杷)	0.072
		经果林(柑橘)	0.390
		人工乔木林(侧柏)	0.321
		自然林(紫穗槐)	0.167

2.2 土壤侵蚀强度评价

大柏河小流域 2024 年平均土壤侵蚀模数为 771.46 $t / (km^2 \cdot a)$, 总土壤流失量为 40 847.06 t/a 。水土流失面积为 1 569.17 hm^2 , 占总面积的 27.10%, 其中: 轻度侵蚀面积为 855.37 hm^2 , 占水土流失总面积的 54.51%; 中度侵蚀面积为 516.95 hm^2 , 占水土流失总面积的 32.94%; 强烈侵蚀面积为 189.34 hm^2 , 占水土流失总面积的 12.07%; 极强烈侵蚀面积为 6.78 hm^2 , 占水土流失总面积的 0.43%; 剧烈侵蚀面积为 0.73 hm^2 , 占水土流失总面积的 0.05%。大柏河小流域土壤侵蚀强度面积统计见表4, 土壤侵蚀强度分布见图5。大柏河小流域土壤侵蚀类型主要为水力侵蚀, 土壤侵蚀强度以轻度侵蚀为主, 局部地区存在较强侵蚀状况。

表4 大柏河小流域土壤侵蚀面积及比例统计

Table 4 Statistics of soil erosion area and proportion in Dabaihe River small watershed

侵蚀强度	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
面积/ hm^2	4222.07	855.37	516.95	189.34	6.78	0.73
占土地总面积比例/%	72.90	14.77	8.93	3.27	0.12	0.01

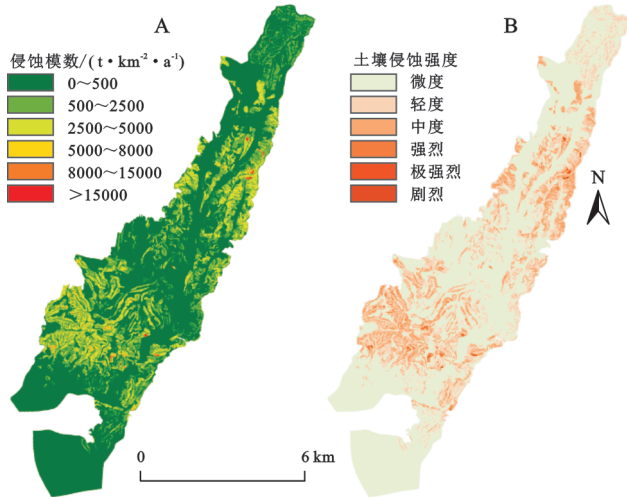


图 5 大柏河小流域土壤侵蚀强度分布

Fig. 5 Distribution of soil erosion intensity in Dabaihe River small watershed

2.3 水土保持措施效益

在实施水土保持措施后,大柏河小流域年土壤侵蚀模数由 $1\ 048.12\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 降至 $771.46\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 减少了 26.40%; 总土壤流失量从 $57\ 028.52\ \text{t}/\text{a}$ 降至 $40\ 847.06\ \text{t}/\text{a}$, 减少了 28.37%。水土流失面积减少了

$446.41\ \text{hm}^2$; 其中, 轻度侵蚀面积减少了 $137.40\ \text{hm}^2$, 中度侵蚀面积减少了 $218.03\ \text{hm}^2$, 强烈及以上侵蚀面积减少了 $90.98\ \text{hm}^2$ 。有无措施情况下水土流失面积变化情况见表 5。

表 5 大柏河小流域有无措施水土流失面积变化情况
Table 5 Changes in area of soil and water loss with and without measures in Dabaihe River small watershed

模拟情景	水土流失面积/ hm^2			
	合计	轻度	中度	强烈及以上
有措施情景(S_1)	1569.17	855.37	516.95	196.85
无措施情景(S_0)	2015.58	992.77	734.98	287.83
变化情况	-446.41	-137.40	-218.03	-90.98

不同水土保持措施的效益见表 6。封禁管理措施的减蚀效益为 12.13%, 减沙效益为 12.94%; 土坎梯田措施的减蚀效益为 77.83%, 减沙效益为 82.75%; 石坎梯田的减蚀效益为 90.95%, 减沙效益为 93.14%。模拟结果表明, 土坎梯田和石坎梯田的减蚀减沙效益非常显著, 且石坎梯田的效果更为显著, 而封禁管理措施的水土保持效益也较好, 由于实施面积较大, 对流域整体的减蚀减沙效果贡献也较大。

表 6 大柏河小流域不同水土保持措施减蚀减沙效益

Table 6 Erosion and sediment reduction benefits of different soil and water conservation measures in Dabaihe River small watershed

措施类型	面积/ hm^2	侵蚀模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$		减蚀比例/%	水土流失量/ $(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$		减沙比例/%
		无措施	有措施		无措施	有措施	
封禁管理	1573.4	2142.86	1882.85	12.13	25569.17	22260.88	12.94
土坎梯田	25.38	158.98	35.25	77.83	35.12	6.06	82.75
石坎梯田	53.16	769.07	69.59	90.95	330.60	22.67	93.14

3 讨论

3.1 模型因子本地化

大柏河流域及胡家山径流小区的水土保持工程措施主要是水平梯田, 并分为土坎和石坎两种类型, 其 E 因子值分别为 0.201, 0.142。水平梯田能够改变地面坡度和缩短坡长, 并截留上方来沙, 有效减少径流量和土壤流失量, 是最重要的水土保持工程措施之一^[21-22]。生物措施包含种类较多, B 因子值为 0.071~0.747。其中经果林(枇杷)的 B 因子值最小, 仅为 0.072, 表明其水土保持效果非常显著; 而植物篱的 B 因子值最大, 为 0.747, 说明其水土保持效果相对较差。不同措施方式的水土保持效果排序为经果林(枇杷) > 自然林(紫穗槐) > 人工乔木林(侧柏) > 经果林(柑橘) > 植物篱。经果林、自然林、人工乔木林的水土保持效果均较为显著。

3.2 水土保持措施效益

大柏河生态清洁小流域所实施的水土保持措施

能够有效减少土壤侵蚀, 特别是在轻度和中度侵蚀方面。梯田不仅减少了原位的土壤侵蚀, 还对上游的水土流失起到了拦截作用。梯田通过降低坡度、增加渗透和蒸发, 有效减少径流和泥沙输移^[21-22]。封禁管理措施通过增加地表植被盖度、减少雨滴击溅、固持土壤、拦截径流泥沙的方式持续减少径流和泥沙的排放, 作为一种易于大范围实施的水土保持措施, 对流域水土流失量的减少起到重要作用^[23-24]。随着各类水土保持措施的实施, 大柏河生态清洁小流域的水土流失得到有效控制, 然而, 强度侵蚀及以上级别的土壤侵蚀面积仍然存在, 主要分布在陡坡区域, 是未来治理的重点。因此, 笔者建议未来仍需采用工程措施和生物措施相结合的方式, 进一步提升流域水土保持成效, 加强重点区域的监测和评估, 确保治理措施的有效性和可持续性。

4 结论

本研究基于中国土壤流失方程, 结合胡家山径

流小区监测资料开展因子本地化,定量分析了丹江口库区大柏河生态清洁小流域的土壤侵蚀强度状况,主要结论如下:

(1) 2024年大柏河小流域经综合治理后,平均土壤侵蚀模数为771.46 t/(km²·a),土壤流失量为40 847.06 t/a,水土流失面积占流域总面积的27.10%。

(2) 较治理前,土壤侵蚀模数和总土壤流失量分别减少了26.40%和28.37%,水土流失面积减少了446.41 hm²。轻度、中度及强烈侵蚀面积均显著减少,表明水土保持措施在防治水土流失中的有效性。

(3) 综合评估表明,石坎梯田和土坎梯田在减蚀减沙方面的效益显著,其中石坎梯田效果最佳;封禁管理措施由于覆盖面积较大,对流域整体治理贡献突出。然而,强度侵蚀及以上级别的土壤侵蚀面积仍相对较大,主要分布在陡坡区域,是未来治理的重点。

未来仍需优化水土保持措施的空间格局、巩固治理成效,探索丹江口库区及上游水土保持治理模式,全面提升流域的水土资源可持续性和生态系统服务功能。

参考文献 (References):

- [1] 方怒放,史志华,李璐.基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J].水生态学杂志,2011,32(4):7-12.
Fang N F, Shi Z H, Li L. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in Danjiangkou Reservoir area [J]. Journal of Hydroecology, 2011,32(4):7-12.
- [2] 王玥,宋蕾,张萌,等.南水北调中线工程水源保护现状、问题及建议:以湖北省丹江口库区为例[J].环境保护,2024,52(6):64-66.
Wang Y, Song L, Zhang M, et al. Current status, problems, and suggestions for water source protection in the middle route project of the south to north water diversion project: a case study of Danjiangkou Reservoir area in Hubei Province [J]. Environmental Protection, 2024, 52(6):64-66.
- [3] 尹炜,史志华,雷阿林.丹江口库区生态环境保护的实践与思考[J].人民长江,2011,42(2):59-63.
Yin W, Shi Z H, Lei A L. Practice and consideration of ecological environmental protection of Danjiangkou Reservoir area [J]. Yangtze River, 2011,42(2):59-63.
- [4] 王振华,李青云,黄苗,等.生态清洁小流域建设研究现状及展望[J].人民长江,2011,42(S2):115-118.
Wang Z H, Li Q Y, Huang Z, et al. Research status and prospect of eco-clean small watershed construction [J]. Yangtze River, 2011,42(S2):115-118.
- [5] 蒲朝勇,高媛.生态清洁小流域建设现状与展望[J].中国水土保持,2015(6):7-10.
Pu Z Y, Gao Y. Present situation and prospect of ecological clean small watershed construction [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(6):7-10.
- [6] 毕小刚,杨进怀,李永贵,等.北京市建设生态清洁型小流域的思路与实践[J].中国水土保持,2005(1):18-20.
Bi X G, Yang J H, Li Y G, et al. Reasons and practice on establishing ecological and clean-type small watersheds in Beijing municipality [J]. Soil and Water Conservation in China, 2005(1):18-20.
- [7] 刘燕,孙浩峰.甘肃省生态清洁小流域建设技术体系研究[J].中国水土保持,2021(7):19-21.
Liu Y, Sun H F. Technology system of eco-clean small watershed construction in Gansu Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(7):19-21.
- [8] 邹英.湖北省丹江口库区生态清洁小流域建设评价研究[D].武汉:华中农业大学,2021.
Zou Y. Study on evaluation of the construction of ecologically clean small watershed in Danjiangkou Reservoir area in Hubei province [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.
- [9] 杨弦.北京生态清洁小流域建设研究[D].北京:华北电力大学,2023.
Yang X. Study on construction of eco-clean small watershed in Beijing [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [10] 乔殿新.新时代生态清洁小流域发展思考[J].中国水土保持,2024(2):1-5,75.
Qiao D X. Thinking on the development of ecological-clean small watersheds in the new era [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(2):1-5,75.
- [11] 姚娜,余冰,蔡崇法,等.丹江口库区土壤氮磷养分流失特征[J].水土保持通报,2017,37(1):97-103.
Yao N, Yu B, Cai C F, et al. Characteristic of soil nitrogen and phosphorus loss in Danjiangkou Reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1):97-103.
- [12] 白丹,王玮,王勇.南水北调中线水源区水平梯田建设效益分析[J].西北大学学报:自然科学版,2010,40(1):158-161.
Bai D, Wang W, Wang Y. Level terrace construction-benefit analysis of water district of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2010,40(1):158-161.
- [13] 高宝林,程胜高.丹江口库区坡耕地水土流失治理模式探讨[J].中国水土保持,2009(12):21-23.
Gao B L, Cheng S G. Discussion on soil erosion control model of sloping farmland in Danjiangkou reservoir area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(12):21-23.
- [14] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C] // Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference. Beijing, 2002: 26-31.
- [15] Zhang H D, Zhang R H, Qi F, et al. The CSLE model based soil erosion prediction: comparisons of sampling density and extrapolation method at the county level [J].

- Catena, 2018, 165:465-472.
- [16] 陈锐银, 严冬春, 文安邦, 等. 基于GIS/CSLE的四川省水土流失重点防治区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1):17-26.
Chen R Y, Yan D C, Wen A B, et al. Research on soil erosion in key prevention and control region of soil and water loss based on GIS/CSLE in Sichuan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 17-26.
- [17] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6):705-711.
Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(6):705-711.
- [18] Williams J R. Chapter 25: the EPIC model[C]//Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, 1995:909-1000.
- [19] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5):105-110.
Fu S H, Liu B Y, Zhou G Y, et al. Calculation tool of topographic factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5):105-110.
- [20] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [21] 刘晓燕, 王富贵, 杨胜天, 等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7):793-800.
Liu X Y, Wang F G, Yang S T, et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7):793-800.
- [22] 陈游倩. 淤地坝和梯田影响下黄土高原典型流域水沙变化响应分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
Chen Y Q. Response analysis of runoff and sediment change in typical waters watershed of Loess Plateau under the influence of check dam and terraces[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [23] 陈海滨. 侵蚀红壤小流域土壤养分空间变异与肥力质量评价: 以朱溪小流域为例[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.
Chen H B. Spatial Variability and quality evaluation of soil nutrient in the small watershed of red eroded soil area: a case study in the small watershed of Zhuxi[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- [24] 熊明彪, 李红卫, 郭进, 等. 小流域综合治理措施对土壤氮磷流失的影响: 以四川省汉源县清溪河小流域为例[J]. 中国水土保持, 2024(11):72-75, 95.
Xiong M B, Li H W, Guo J, et al. The impact of comprehensive management measures for small watersheds on soil nitrogen and phosphorus loss[J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(11):72-75, 95.

(上接第198页)

- [29] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: n: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1):139-151.
- [30] 姜哲浩, 周泽, 陈建忠, 等. 三江源区不同海拔高寒草原土壤养分及化学计量特征[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 1029-1036.
Jiang Z H, Zhou Z, Chen J Z, et al. Soil nutrient and stoichiometry of alpine steppe under different altitudes in the Three-River Headwaters Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4):1029-1036.

(上接第210页)

- [27] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 等. 晋西黄土区林草复合系统刺槐根系分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 151-155.
Yun L, Bi H X, Ma W J, et al. Root distribution characteristics of *Robinia pseudoacacia* in agroforestry systems in The Loess Region of Western Shanxi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(2):151-155.
- [28] 罗立娇, 高晓东, 赵连豪, 等. 黄土丘陵区植被群落水分利用策略对干旱胁迫的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1):280-288.
Luo L J, Gao X D, Zhao L H, et al. Response of water use strategies of vegetation community to drought stress in the Loess Hilly Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1):280-288.
- [29] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3):651-658.
Cheng L P, Liu W Z. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3):651-658.
- [30] 赵宝转, 邸利, 吴贤忠, 等. 陇东黄土残塬沟壑区不同地貌部位林地与草地土壤水分研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2022, 58(2):167-171.
Zhao B Z, Di L, Wu X Z, et al. Soil moisture between forest and grassland in different landforms in the gullied loess region of Longdong [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2022, 58(2):167-171.