

# 土地利用类型变化对水泉湾淤地坝 坝控区土壤侵蚀的影响

颀文伟<sup>1</sup>, 黄泉<sup>2</sup>, 田晋华<sup>1</sup>, 高金芳<sup>1</sup>, 王彦武<sup>1</sup>

(1.甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃兰州 730020; 2.兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃兰州 730050)

**摘要:** [目的] 研究土地利用类型变化对淤地坝坝控区土壤侵蚀量的影响, 为淤地坝坝控区域生态建设高质量发展提供理论依据。[方法] 以甘肃省渭源县水泉湾淤地坝坝控区为研究对象, 采用加权平均法对文献资料中的土壤侵蚀模数取值进行修正, 并计算出水泉湾淤地坝坝控区不同土地利用类型的土壤侵蚀量; 根据遥感影像分析土地利用类型变化过程与特征, 结合 Pearson 相关性分析探究土地利用类型变化对土壤侵蚀量的影响。[结果] ①2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型以梯田为主, 比例超过了 70%, 水体比例不到 0.1%, 土地利用类型转化方式为梯田、荒草地、坡耕地、疏林地和灌木林之间的相互转化; ②2005, 2010, 2018 和 2023 年土壤侵蚀总量分别为  $4.54 \times 10^3$ ,  $3.70 \times 10^3$ ,  $3.31 \times 10^3$ ,  $3.95 \times 10^3$  t, 土壤侵蚀主要发生在坡耕地、荒草地、疏林地、梯田和灌木林, 其中荒草地的年侵蚀总量最大, 所占比例为 41.74%~49.46%, 居民地和道路最小, 所占比例不到 1%; ③坡耕地与梯田面积变化呈显著负相关, 相关系数为 0.972; 土壤侵蚀量变化与荒草地面积变化呈显著正相关, 相关系数为 0.983。[结论] 农业结构调整和农业技术发展为土地利用类型格局变化的主要驱动因素之一。坡改梯和小流域的综合治理是减少区域水土流失的有效办法。

**关键词:** 土地利用类型; 土壤侵蚀量; 加权平均法; 水泉湾淤地坝; 甘肃省渭源县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0140-09

中图分类号: S157.1, F301.2

**文献参数:** 颀文伟, 黄泉, 田晋华, 等. 土地利用类型变化对水泉湾淤地坝坝控区土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 140-148. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.015; Jie Wenwei, Huang Xiao, Tian Jinhua, et al. Response of soil erosion to land use type change in dam-controlled area of Shuiquanwan check dam [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 140-148.

## Response of Soil Erosion to Land Use Type Change in Dam-controlled Area of Shuiquanwan Check Dam

Jie Wenwei<sup>1</sup>, Huang Xiao<sup>2</sup>, Tian Jinhua<sup>1</sup>, Gao Jinfang<sup>1</sup>, Wang Yanwu<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

**Abstract:** [Objective] The impact of changes in land use types on soil erosion amount in the control area of check dams was studied to provide a theoretical basis for the high-quality development of ecological construction in the dam control area. [Methods] The control area of the Shuiquanwan check dam in Weiyuan County, Gansu Province, was selected as the research site. The weighted average method was used to modify the soil erosion modulus from the literature, and the soil erosion amounts for different land use types in the control area were calculated. The change process and characteristics of land use types were analyzed based on remote sensing images, and the influence of changes in soil conservation measures on soil erosion was explored through Pearson correlation analysis. [Results] ① From 2005 to 2023, the main land use types in

收稿日期: 2024-07-14

修回日期: 2024-09-14

资助项目: 2022 年甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目“基于淤地坝变水库的提质增效转型研究”“基于机器视觉的淤地坝防汛监测途径与技术”(22GSLK006; 22GSLK011); 2022 年陇原青年创新创业人才(团队)项目“淤地坝水土资源利用关键技术集成与创新示范”(甘组通字[2022]77 号); 甘肃省重点研发计划项目“基于高质量发展的古浪县黄花滩生态移民区水—生态—经济系统耦合调控技术研究及示范”(22YF7FA165)

第一作者: 颀文伟(1974—), 男(汉族), 甘肃省甘谷县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持科研及管理方面的工作。Email: 714645282@qq.com。

the dam-controlled area of Shuiquanwan check dam were terraced fields, which accounted for more than 70%, while water bodies accounted for less than 0.1%. The transformation of land use types involved mutual changes among terraced fields, wasteland, sloping land, dredged land, and shrubland. ② The total amount of soil erosion in 2005, 2010, 2018, and 2023 was  $4.54 \times 10^3$ ,  $3.70 \times 10^3$ ,  $3.31 \times 10^3$  and  $3.95 \times 10^3$  t, respectively. Soil erosion mainly occurred in sloping farmland, wasteland, dredged land, terraces, and shrubland, with wasteland exhibiting the largest annual erosion. Its proportion ranged from 41.74% to 49.46%, while residential land and roads accounted for less than 1%. ③ A significant negative correlation exists between slope-cultivated land and terrace area, with a correlation coefficient of 0.972. There was also a significant positive correlation between soil erosion and grassland area, with a correlation coefficient of 0.983. [Conclusion] The adjustment of agricultural structure and the development of agricultural technology are among the main driving factors for land use types and patterns changes. Comprehensive management of slope changes and small watersheds effectively reduces regional soil and water loss.

**Keywords:** land use types; soil erosion amount; weighted average method; Shuiquanwan check dam; Weiyuan County, Gansu Province

土壤侵蚀是土壤物质在自然和人为条件作用下发生的原位剥离和沿地表的输移、沉积等事件的重要地表过程<sup>[1-3]</sup>,它不仅会造成土壤破坏、土壤肥力下降以及水体和农田的退化,甚至会造成生态系统濒临崩溃<sup>[4-7]</sup>。土壤侵蚀与土地利用相互关系的研究一直是土壤侵蚀研究的重要内容,在早期的土壤侵蚀研究中,土地利用通过影响土壤侵蚀的作物管理及水保措施因子,其往往与降雨、土壤、地形等其他因子一起综合研究土壤侵蚀<sup>[8]</sup>;并且相关研究表明,降雨量、降雨强度和土地利用都对土壤侵蚀产生了明显影响<sup>[9]</sup>。淤地坝坝控区属于一个完整的自然汇水单元,也是水土流失和土壤侵蚀发生、发展的基本单元。当前关于淤地坝坝控区土地利用与土壤侵蚀相互关系的研究主要以定性研究为主,即定性分析淤地坝坝控区不同土地利用与土壤侵蚀强度之间的关系,而定量研究相对较少。吴帅等<sup>[10]</sup>基于 RUSLE 模型模拟阴山北麓地区土壤侵蚀时空变化及驱动机制,分析土壤侵蚀动态变化情况,通过地理探测器探究土壤侵蚀影响因子,研究结果表明土地利用类型是研究区土壤侵蚀的主要影响因子;陈森等<sup>[11]</sup>基于 USLE 模型评估该县 1988—2020 年土壤侵蚀时空变化特征,定量分析不同土地利用和植被覆盖度变化对土壤侵蚀的影响。史学建等<sup>[12]</sup>利用小理河流域内的 21 座闷葫芦坝和 194 座排水不畅淤地坝的泥沙沉积信息,测算了闷葫芦坝和排水不畅淤地坝的淤积量,计算了每个淤地坝坝控流域的土壤侵蚀模数,分析了影响土壤侵蚀模数的因素,建立了土壤侵蚀模数与暴雨量之间的关系。

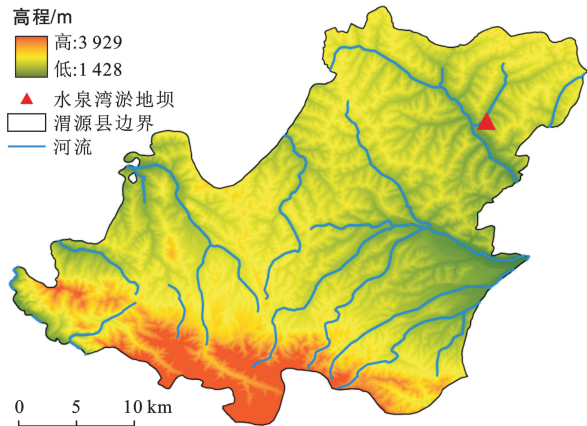
淤地坝是重要的水土保持工程措施。它在解决入黄泥沙、控制沟道侵蚀、拦蓄泥沙、淤地造田,促进水资源利用和改善生态环境和确保黄河安澜等方面

发挥着重要作用<sup>[13-14]</sup>。淤地坝泥沙来自侵蚀性降雨事件的径流泥沙沉积,赋存大量流域侵蚀产沙信息。据统计,过去 50 a 仅黄土高原建成淤地坝超过  $1.00 \times 10^5$  座<sup>[15]</sup>。近年来国内外学者广泛关注通过计算淤地坝淤积泥沙量来解译小流域土壤侵蚀概况<sup>[16-17]</sup>,在流域土壤侵蚀速率、演变规律、泥沙来源、时空变化和人类活动对土壤侵蚀影响等方面开展研究并取得了较好成果<sup>[18-19]</sup>。然而,现阶段土壤侵蚀量对土地利用格局变化的响应仍旧处于量化分析阶段,对于内部的变化机制机理研究相对较少,同时,详尽完善的高精度观测资料也较少。本次研究拟采用加权平均法对文献资料中的土壤侵蚀模数取值进行修正,利用不同土地利用类型的修正土壤侵蚀模数计算出水泉湾淤地坝坝控区土壤侵蚀量;并通过遥感影像解译分析土地利用类型变化过程与特征,以此来探究土地利用类型变化对土壤侵蚀量的影响。研究结果可为区域水土保持综合治理及决策管理提供数据支撑和科学依据,同时对淤地坝规划设计及流域综合治理措施配置思路提供参考。

## 1 研究区概况

甘肃省渭源县水泉湾淤地坝位于秦祁河流域,其地理位置见图 1。秦祁河是渭河上游左岸一级支流,发源于甘肃省临洮县东部与定西市安定区西南部交界处的胡麻岭南麓,在渭源县境内长 24 km,流域面积 470 km<sup>2</sup>。截至目前为止,渭源县共建成淤地坝工程 65 座,包括骨干坝 26 座,中型坝 19 座,小型坝 20 座<sup>[20]</sup>。其中水泉湾淤地坝建坝时间为 2 009 年,设计淤积年限 20 a,总库容  $6.99 \times 10^5$  m<sup>3</sup>,坝高 27 m,坝控面积 3.03 km<sup>2</sup>,拦泥库容  $3.26 \times 10^5$  m<sup>3</sup>。水泉湾淤地坝地处黄土丘陵沟壑区,地形破碎,切割严重,沟

壑密度达  $4 \text{ km}/\text{km}^2$ 。属温带半干旱气候区,年平均气温  $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年平均日照时数  $2\ 421 \text{ h}$ ,年平均无霜期  $157 \text{ d}$ ,多年平均年降水量  $507 \text{ mm}$ 。区域土壤属黄土母质发育而成的黄麻土和黄绵土,垂直节理明显,颗粒均匀,胶结力弱,易产生土壤侵蚀。植被属半干旱草原草场类,乔、灌木主要有山杨、旱柳、沙棘、山杏、白榆、刺槐、山定子、山毛桃、柠条等;草本植物主要有针茅、冰草、芨芨草、铁杆蒿等。



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2016)1600 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 甘肃省渭源县水泉湾淤地坝地理位置及地形图

Fig.1 Geographical location and topographic map of Shuiquanwan silting dam at Weiyuan County, Gansu Province

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

研究时间尺度内降水量、淤积高程、淤积面积和淤积库容数据由甘肃省水文水资源局及所属定西水文水资源局提供。不同土地利用类型的土壤侵蚀强度参考土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007,研究区地形和植被覆盖度主要来源于统计年鉴数据、水土保持年报及普查数据。2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区高分辨率土地利用面积和转移现状数据来源于 Google 卫星遥感影像,分辨率为  $1 \text{ m}$ ,并通过实地调研及查勘验证。

### 2.2 土地利用类型变化分析

通过对水泉湾淤地坝坝控区 2005(建坝前),2010(建坝完成),2018(建坝后)和 2023 年 4 期高分辨率 Google 卫星遥感影像进行筛选及解译,最终确定了道路、灌木林、荒草地、居民地、坡耕地、疏林地、水体和梯田 8 种土地利用类型,研究淤地坝坝控区不同时期土地利用类型结构变化情况,结合查阅资料和抽样检测进行实地调研,分析区域土地利用动态,揭示淤地坝坝控区土地利用类型转化规律。其中单一土地利用动态是定量描述土地利用变化速度和

变化类型的差异,具体计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $K$  是研究区间土地利用的动态度; $U_a, U_b$  分别是变化前后土地利用类型的面积; $T$  为研究时长。

土地利用转移矩阵:通过土地利用转移矩阵可以定量分析不同土地利用类型之间的结构特征和面积变化情况。其数学表达式如下:

$$A = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $A$  为土地利用转移矩阵; $i, j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, m, n$ ) 分别为转移前和转移后的土地利用类型; $m, n$  为转移前后的土地利用类型数; $S_{ij}$  表示转移前的  $i$  地类转换成转移后的  $j$  地类的面积。

### 2.3 土壤侵蚀模数的修正

本文提出了一种淤地坝坝控区土壤侵蚀量的计算方法。具体步骤为:①根据文献调查法查阅相关文献资料,获取研究区不同土地利用类型的土壤侵蚀模数;②根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007),在  $1:10\ 000$  地形图上分析计算沟壑密度、沟谷占坡面面积比例,并确定研究区不同土地利用类型土壤侵蚀强度级别;③根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)降雨量侵蚀强度分级指标表,分析流域降雨侵蚀强度级别;④通过遥感影像确定流域坡度和植被覆盖度,根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)确定地形和植被覆盖度修正系数;⑤依据各级修正系数确定适用于研究区域的土壤侵蚀修正模数。⑥采用加权平均法计算流域平均侵蚀模数,其计算公式为:

$$M = (F_1 \cdot M_1 + F_2 \cdot M_2 + \cdots + F_n \cdot M_n) / F_{\text{sum}} \quad (3)$$

式中: $M$  为流域平均侵蚀模数 [ $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ];  $M_1, M_2, \dots, M_n$  分别为各不同土地利用类型的侵蚀模数 [ $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ];  $F_1, F_2, \dots, F_n$  分别为各不同土地利用类型的面积 ( $\text{km}^2$ );  $F_{\text{sum}}$  为研究区总面积 ( $\text{km}^2$ )。

### 2.4 相关性分析

相关性分析旨在探究两个变量之间的相关方向和程度,常用的相关性系数有: Pearson 系数, Spearman 系数和 Kendall 系数。皮尔逊相关分析法适用于连续型变量的相关性分析。皮尔逊相关性系数反映两个变量之间变化趋势的方向以及程度,0 表示两个变量不相关,正值表示正相关,负值表示负相关,值越大表示相关性越强。皮尔逊系数公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: $x_i, y_i$  表示变量  $x, y$  的观测值;  $\bar{x}, \bar{y}$  表示  $x, y$  的平均值;  $n$  为样本数量。

本文以便探究土地利用类型变化与土壤侵蚀量的相关性,假设研究数据呈连续线性关系,在 IBM SPSS Statistics 26.0 中进行相关数据的线性拟合,选用皮尔逊相关性系数衡量两变量之间的线性相关程度。

### 3 结果与分析

#### 3.1 水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型变化过程与特征

参考《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007),根据项目区实际自然条件、水土流失特点,将土地利用类型划分为道路、灌木林、荒草地、居民地、坡耕地、

疏林地、水体和梯田 8 种类型。通过对水泉湾淤地坝坝控区 2005(建坝前),2010(建坝完成),2018(建坝后)和 2023 年 3 期高分辨率 Google 卫星遥感影像进行筛选及解译,绘制 2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型转移图(图 2),计算并绘制不同土地利用类型面积及所占比例情况表(表 1)。研究期间内,水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型以梯田为主,所占比例超过了 70%;其次是荒草地和疏林地,所占比例分别在 12%和 6%左右;其他土地利用类型所占比例均小于 3%,坡耕地于 2018 年消失。其中荒草地、疏林地面积呈持续增长趋势,灌木林、疏林地呈现先减小后增大的趋势,道路、居民地呈现先增大后减小的趋势,水体面积较小且变化不明显。

表 1 2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区不同土地利用类型面积所占比例

Table 1 Proportion of different land use types at control area of Shuiquanwan check dam from 2005 to 2023

土地利用类型	2005 年		2010 年		2018 年		2023 年	
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
道路	8.32	2.38	8.36	2.40	10.43	2.99	10.36	2.97
灌木林	5.54	1.59	4.62	1.32	4.48	1.29	7.47	2.14
荒草地	42.14	12.08	41.03	11.76	42.13	12.07	43.45	12.45
居民地	8.95	2.56	9.08	2.60	9.26	2.65	9.13	2.62
坡耕地	16.89	4.84	5.62	1.61	0.00	0.00	0.00	0.00
疏林地	22.38	6.41	21.55	6.18	19.94	5.72	33.91	9.72
水体	0.11	0.03	0.11	0.03	0.11	0.03	0.09	0.02
梯田	244.65	70.11	258.59	74.10	262.62	75.25	244.55	70.08
合计	348.97	100.00	348.97	100.00	348.97	100.00	348.97	100.00

2005—2023 年水泉湾流域各土地利用类型相互之间存在一定的转化关系(图 2)。研究期间内道路面积增加了 24.52%(2.04 hm<sup>2</sup>),主要转入类型为梯田(梯田建设配套田间道路增加所致);2005—2018 年期间灌木林地面积减小了 19.13%(1.05 hm<sup>2</sup>),主要转出为梯田和荒草地,2018—2023 年期间灌木林地面积增加了 66.74%(2.99 hm<sup>2</sup>),全部由梯田转入;2005—2018 年期间疏林地面积减小了 10.9%(2.44 hm<sup>2</sup>),主要转出类型是梯田,2018—2023 年疏林地增加了 70.06%(13.97 hm<sup>2</sup>),转入类型主要为梯田;2005—2018 年期间梯田面积增加了 7.35%(17.97 hm<sup>2</sup>),转入类型主要是道路、坡耕地、荒草地和疏林地,2018—2023 年梯田面积减少了 6.88%(18.07 hm<sup>2</sup>),主要转出类型为灌木林、荒草地、疏林地;2005—2018 年期间坡耕地面积(16.89 hm<sup>2</sup>)全部转出为梯田和道路;荒草地和水体面积变化不明显,研究期间内荒草地仅增加了 0.03%(1.31 hm<sup>2</sup>),水体仅在 2018—2023 年期间减少了 0.02 hm<sup>2</sup>。

水泉湾坝控区不同土地利用类型不同时段的地

动态度计算结果见表 2。总体来看,政府各部门组织实施的各类生态建设项目显著影响了土地动态度的发展与变化。其中,2005—2010 年期间坡耕地是所有土地利用类型中变化速度最快的,变化速率为 -13.35%;其次是灌木林和梯田,变化速率为 -3.32%和 1.14%,其他土地利用类型变化不大,尤其是水体;主要原因是 2009 年水泉湾淤地坝开始修建,所以 2005 年水泉湾淤地坝坝址有少量的季节性积水或者没有水体,建坝之后才开始淤积降雨来水,但是一直没有淤平。2010—2018 年期间变化速度最快的仍是坡耕地,变化速率为 -12.5%;道路次之,变化速率为 3.10%,其他土地利用类型变化不大;这是由于从 2008 年起甘肃省施行了长达五年的高标准梯田建设,所以本区域内的坡耕地持续减少,2013 年以前已全部转化完成。2018—2023 年期间灌木林和疏林地变化速率最为明显,变化速率为 13.35%和 14.01%;其次是水体,变化速率为 -4.55%;这是由于 2019 年以来甘肃省实施扩大甘肃省新一轮退耕还林还草规模和生态保护政策,在一定程度上促进了梯田和

未利用地转化为高质量的草地和林地。整体上,道路、灌木林、坡耕地和疏林地变化速度较为明显,其中疏林地面积增加最快,而坡耕地面积减少最多;淤地坝修建前后研究区土地利用类型变化速度较快,表明

淤地坝坝控区变化土地利用类型受人类活动和相关生态文明建设政策的影响较显著,并且农业结构调整和农业技术发展是土地利用格局变化的主要驱动因素之一。

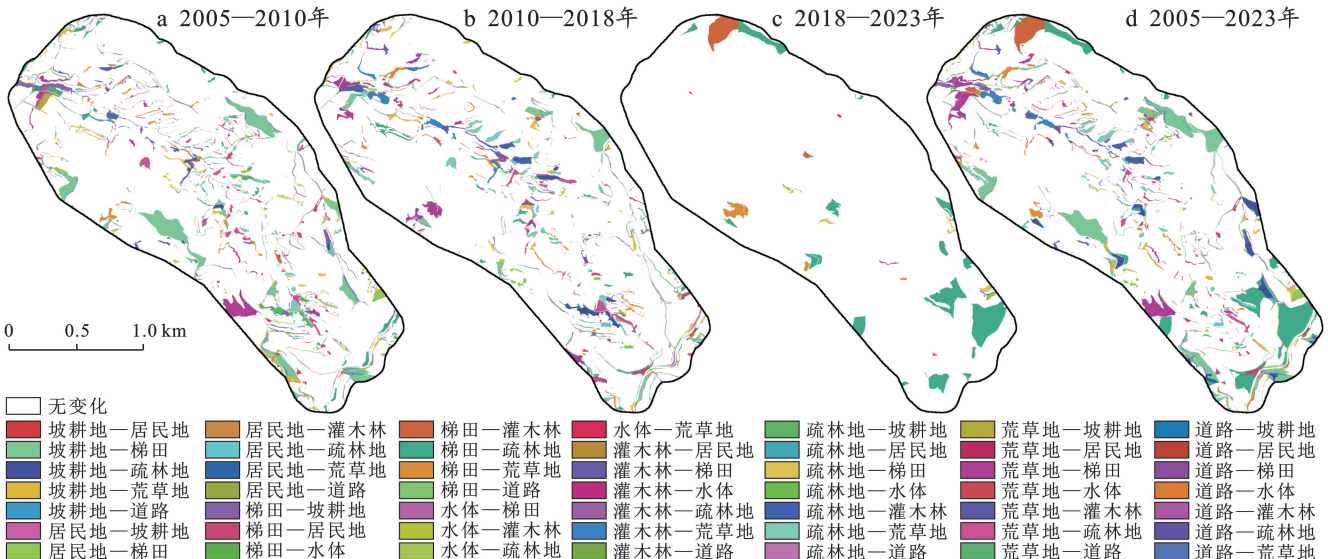


图 2 2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型转移图

Fig.2 Transfer map of land use types at control area of Shuiquanwan check dam from 2005 to 2023

表 2 水泉湾淤地坝坝控区土地利用动态度

Table 2 Land use dynamic attitude at control area of Shuiquanwan check dam

土地利用类型	土地利用动态度/%			
	2005—2010 年	2010—2018 年	2018—2023 年	2005—2023 年
道路	0.10	3.10	-0.13	1.36
灌木林	-3.32	-0.38	13.35	1.94
荒草地	-0.53	0.34	0.63	0.17
居民地	0.29	0.25	-0.28	0.11
坡耕地	-13.35	-12.50	0.00	-5.56
疏林地	-0.74	-0.93	14.01	2.86
水体	0.00	0.00	-4.55	-1.26
梯田	1.14	0.19	-1.38	0.00

### 3.2 水泉湾淤地坝坝控区土壤侵蚀模数修正

土壤侵蚀模数是水土保持规划重要衡量指标之一,为分类分区指导水土流失防治和水土保持规划提供基础的科学依据。大多数区域研究或者水土保持规划设计无法较准确地取值,通常采用间接途径获得的方法是查阅当地水土保持调查和区划、水资源调查评价与水利区划报告、水文图集和附近水文站的观测资料等,同时采用插值和判断该区域的实际情况进行确定。本文梯田侵蚀量参考张富等<sup>[21]</sup>对黄土丘陵沟壑区第 5 副区典型安家沟小流域调查研究结果,为 110 t/km<sup>2</sup>;根据安家沟流域观测资料,荒草地主要

分布在坡度>25°的沟坡上,覆盖度<0.4,荒草地侵蚀量为 2 292 t/km<sup>2</sup>;参考戚继阳等<sup>[22-23]</sup>研究的称钩河流域不同土地利用类型下的土壤侵蚀模数,选取坡耕地、疏林地、灌木林地、居民地和道路的土壤侵蚀模数。通过降水量侵蚀力、土壤侵蚀强度、地形以及植被覆盖度及管理对淤地坝坝控区不同土地利用类型土壤侵蚀模数进行修正详见表 3。结合表 1,表 3 和式(3)计算建坝前后的坝控区修正平均侵蚀模数,结果表明水泉湾淤地坝坝控区 2005,2010,2018,2023 年的平均侵蚀模数呈现先减小后增大的趋势,分别为 1 301.70,1 061.06,948.88,1 132.78 t/(km<sup>2</sup>·a),多年平均侵蚀模数修正值为 1 111.11 t/(km<sup>2</sup>·a)。这是由于受人类活动和相关政策的影响,在本文研究前期土壤侵蚀模数最大的坡耕地全部转化为土壤侵蚀模数较小的梯田和道路等土地利用类型,而后期土壤侵蚀模数较大的灌木林、荒草地和疏林地面积增长迅速。

根据调查显示,水泉湾淤地坝 2023 年淤积高程为 2 087 m,相较于建成时(2010 年)上涨了 12 m,淤积面积为 0.63 km<sup>3</sup>,淤积库容为 3.75×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,即淤积量为 5.06×10<sup>4</sup> t,所以其实际多年平均土壤侵蚀模数为 1 115.89 t/(km<sup>2</sup>·a),侵蚀强度属于轻度侵蚀。结果显示本研究的多年平均侵蚀模数修正值准确度为 99.57%,所以该方法在小流域的土壤侵蚀研究中是可行的。

表 3 淤地坝坝控区不同土地利用类型土壤侵蚀模数修正

Table 3 Soil erosion modulus correction for different land use types at dam-controlled area  $t/(km^2 \cdot a)$ 

土地利用类型	文献参考取值	取值系数							修正后采用值
		按降水量侵蚀力修正/mm	按土壤侵蚀强度修正		按地形修正		按植被覆盖度及管理修正		
		400~600 mm	侵蚀强度	系数	系数	坡度	覆盖度	系数	
道路	377	0.10	微度	-0.80	<5°	-0.30	—	—	20
灌木林	47	1.60	轻度	0.80	25°	0.85	56%	3.20	2 000
荒草地	2 292	0.20	中度	0.30	15°~25°	0.26	—	—	4 500
居民地	377	0.10	微度	-0.90	<5°	-0.30	—	—	10
坡耕地	4 553	0.09	强烈	0.03	15°~20°	0.05	—	—	6 800
疏林地	167	0.80	中度	0.80	25°	0.85	36%	2.50	4 000
水体	0	—	—	—	—	—	—	—	0
梯田	110	0.21	微度	0.25	5°~10°	0.20	—	—	200

### 3.3 水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型变化对土壤侵蚀量的影响

由图 3 分析可知,水泉湾淤地坝坝控区 2005, 2010, 2018, 2023 年土壤侵蚀总量分别为 4 542, 3 703, 3 311, 3 953 t, 土壤侵蚀主要发生在坡耕地、荒草地、疏林地、梯田和灌木林。其中荒草地土壤侵蚀量最大,比例分别为 41.74%, 49.87%, 57.25%, 49.46%, 主要原因是荒草地坡度陡、覆盖度低、且没有任何土地利用类型,因此最容易发生土壤侵蚀,所以土壤侵蚀量最大。疏林地土壤侵蚀量次之,2005, 2010, 2018,

2023 年土壤侵蚀量分别为 895(所占比例为 19.71%), 862(所占比例为 23.28%), 798(所占比例为 24.09%)和 1356(所占比例为 34.31%)t;灌木林土壤侵蚀量较小,所占比例在 2.44%~3.78%之间,主要是因为其面积比例较少。梯田土壤侵蚀量呈现先增加后减少的趋势,所占比例在 10.77%~15.86%之间。居民地和道路土壤侵蚀量很小,比例不足 0.1%。2005, 2010 年坡耕地年侵蚀总量较大,分别为 1149 t(所占比例为 25.28%)和 382 t(所占比例为 10.32%),主要原因是坡耕地常年处于荒裸状态,容易发生降水侵蚀和风力侵蚀。

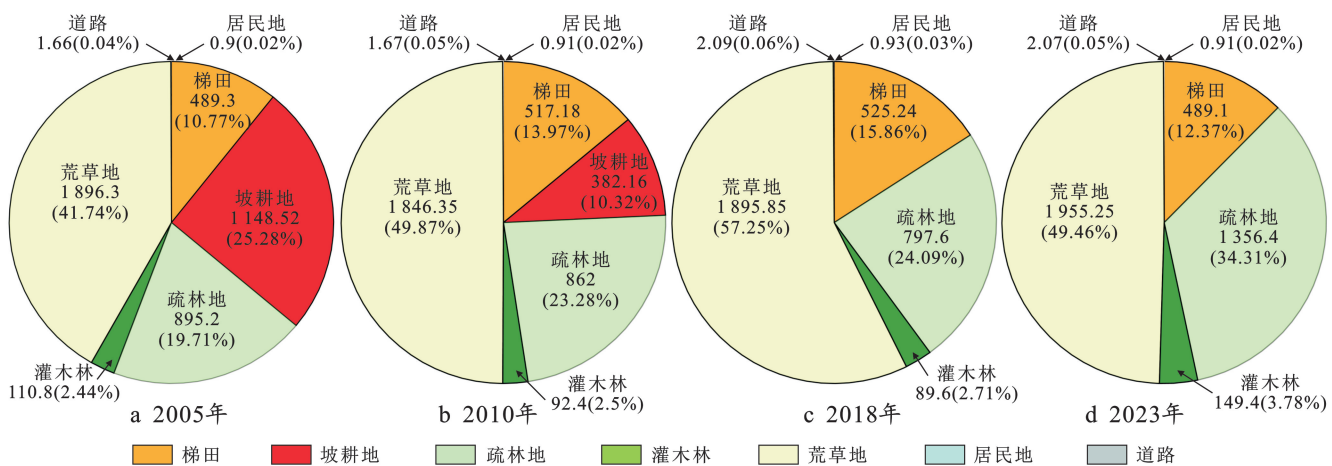


图 3 2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区不同土地利用类型土壤侵蚀量

Fig.3 Soil erosion under different land use types at control area of Shuiquanwan check dam from 2005 to 2023

对水泉湾坝控区不同土地利用类型淤地坝面积变化和侵蚀量变化进行分析(表 4)可知,2005—2010 年坡耕地面积的减少最大,其侵蚀量减少也最多,疏林地、灌木林和荒草地的面积和侵蚀量略有减少,梯田面积和侵蚀量略有增加,坝控区侵蚀量减少主要是由坡耕地减少造成的;2010—2018 年坡耕地面积的减少最大,其侵蚀量减少也最多,疏林地、灌木林的面积和侵蚀量略有减少,梯田、荒草地的面积和

侵蚀量略有增加,坝控区侵蚀量减少主要是由坡耕地减少造成;2005—2018 年研究区土壤侵蚀量减少 1 231.36 t,坡耕地土壤侵蚀量减少 1 148.50 t,所占比例为 93.26%,因此坡耕地面积的减少是造成坝控区侵蚀总量减少的关键因素,疏林地、灌木林和荒草地的面积和侵蚀量有少许减少,梯田面积虽有少许增加,但其产生的侵蚀量较小,对坝控区侵蚀总量影响不大;可见,水泉湾坝控区流域内土壤侵蚀量的减小

不仅仅受降雨因素的影响,同时受土地利用变化的影响。而 2018—2023 年研究区土壤侵蚀量却上升了 19.38%(641.83 t),主要是由疏林地面积增加导致

的,占侵蚀上升总量的 87.06%,其次受灌木林和荒草地面积增加的影响,表明土壤侵蚀量变化受人类活动和相关政策的影响显著。

表 4 水泉湾淤地坝坝控区不同土地利用类型面积变化量及土壤侵蚀变化量

Table 4 Area changes of different land use types and soil erosion changes at control area of Shuiquanwan check dam

指标	年份	道路	灌木林	荒草地	居民地	坡耕地	疏林地	水体	梯田	总计
面积变化量/hm <sup>2</sup>	2005—2010	0.04	-0.92	-1.11	0.13	-11.27	-0.83	0.00	13.94	0.00
	2010—2018	2.07	-0.14	1.10	0.18	-5.62	-1.61	0.00	4.03	0.00
	2018—2023	-0.07	2.99	1.32	-0.13	0.00	13.97	-0.03	-18.07	0.00
	2005—2023	2.04	1.93	1.31	0.18	-16.89	11.53	-0.03	-0.10	0.00
侵蚀量变化量/t	2005—2010	0.01	-18.40	-49.95	0.01	-766.30	-33.20	0.00	27.88	-839.95
	2010—2018	0.41	-2.80	49.50	0.02	-382.20	-64.40	0.00	8.06	-391.41
	2018—2023	-0.01	59.80	59.40	-0.01	0.00	558.80	0.00	-36.14	641.83
	2005—2023	0.41	38.60	58.95	0.02	-1 148.50	461.20	0.00	-0.20	-589.52

### 3.4 水泉湾淤地坝坝控区水土保持措施变化与土壤侵蚀量的相关性分析

水泉湾淤地坝坝控区水土保持措施与土壤侵蚀量之间有密切的关系,对其进行 Pearson 相关性分析(见图 4)。相关性分析结果表明,坡耕地与梯田面积变化呈显著负相关,相关系数达到了 0.972,说明坡耕地面积主要转化成梯田面积;乔、灌、草地的面积变化与梯田面积变化呈负相关,但相关性不显著,说明梯田与乔、灌、草地之间有不同程度的转化。草地、灌木林和坡耕地与土壤侵蚀量呈正相关性,其中荒草地与土壤侵蚀量相关性显著,相关系数高达 0.983,说明荒草地面积占比较大,但其水土保持能力较弱,导致流域土壤侵蚀量整体较大。土壤侵蚀量的变化与梯田、乔木林面积的变化呈负相关关系,相关系数为-0.815 和-0.317,说明水土保持措施中的梯田建设和造林措施可有效减少流域的土壤侵蚀量,其中梯田的水土保持能力更强,这是由于梯田的田坎、田埂坚实完整、坡度较小,能够有效地控制土壤侵蚀,造林措施中的乔木的水土能力强于灌木和草地。研究结果表明梯田建设和造林等水土保持措施的有机结合可有效遏制流域的水土流失。

## 4 讨论

不同的土地利用类型,可以通过改变地形条件、土壤性质、植被覆盖等来影响土壤侵蚀的发生、发展,土地利用类型不同,土壤侵蚀强度相差悬殊,合理的土地利用类型可以有效地避免或降低土壤侵蚀的产生与恶化<sup>[24]</sup>。本文针对坝控小流域土壤侵蚀研究表明,该区域平均侵蚀模数呈现先减小后增大的趋势,这与石学瑾等<sup>[25]</sup>、汪滨等<sup>[9]</sup>的研究结果较为一致。张艳等<sup>[2]</sup>研究表明,坡度是引起土壤侵蚀变化的主导因

素。坡耕地的减少,能够有效地缓解黄河流域的土壤侵蚀<sup>[26]</sup>。而梯田建设与植被恢复区域能够大幅度降低泥沙的连通性,从而缓解流域的水土流失<sup>[27]</sup>。因此,将侵蚀较为严重的坡耕地转化为梯田来减少小流域水土流失的政策是可行的。

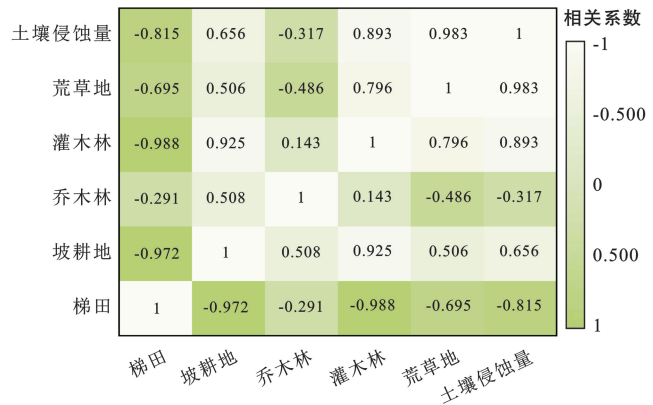


图 4 水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型面积与土壤侵蚀量间的相关系数

Fig.4 Correlation coefficient between land use types area and soil erosion amount at control area of Shuiquanwan check dam

常用的小流域土壤侵蚀模数确定方法有水文手册法、土壤侵蚀分类分级标准法和坝库工程淤积调查分析法等 3 种<sup>[28]</sup>。本文采用土壤侵蚀分类分级标准法根据《土壤侵蚀分类分级标准》SL 190—2007 确定土壤侵蚀强度、降雨侵蚀、地形和植被覆盖度侵蚀强度系数,对土壤侵蚀模数进行修正。该方法的优点是:侵蚀强度是根据流域不同地类、地面坡度、植被覆盖度、沟壑密度等分块加权平均确定的,对无实测水土流失资料的小流域无疑更具有针对性。但是也存在缺点:①工作量相对较大,需要在 1:10 000 的地形图上绘制土壤侵蚀分类图;②由于同一侵蚀强度

等级内侵蚀模数上、下限相差幅度较大,在实践中具体取值较难把握,也就难以准确地计算其侵蚀模数。

## 5 结论

淤地坝坝控区土壤侵蚀变化研究是近年来淤地坝研究中的热点问题,其本身非常复杂,又受许多自然因素和社会因素的影响。本研究采用加权平均法对文献资料中的土壤侵蚀模数取值进行修正,分析了土地利用类型变化过程与特征,研究了土地利用类型变化对土壤侵蚀量的影响,得出以下主要结论。

(1) 2005—2023 年水泉湾淤地坝坝控区土地利用类型以梯田为主,其次是荒草地和疏林地,水体面积较小,所占比例不到 0.1%。土地利用类型转化方式以梯田、荒草地、坡耕地、疏林地和灌木林之间的相互转化为主;其中坡耕地面积 16.89 hm<sup>2</sup> 全部转转为梯田和道路,疏林地面积变化最为明显,增加了 51.52% (11.53 hm<sup>2</sup>)。不同土地利用类型变化速度与方向存在差异,其中坡耕地减少速度最快,减少速度为 5.56%;疏林地增长速度最快,增长速度为 2.86%。淤地坝修建前后土地利用类型变化速度较快,受人类活动和相关政策的影响相对显著,农业结构调整和农业技术发展是土地利用类型格局变化的主要驱动因素之一。

(2) 水泉湾淤地坝坝控区多年平均侵蚀模数修正值为 1 111.11 t/(km<sup>2</sup> · a), 2005, 2010, 2018, 2023 年的平均侵蚀模数分别为 1 301.70, 1 061.06, 948.88, 1 132.78 t/(km<sup>2</sup> · a)。土壤侵蚀主要发生在坡耕地、疏林地、灌木林、荒草地和梯田,荒草地的年侵蚀总量最大,占总侵蚀比例在 41.74%~49.46% 之间。2005—2023 年研究区土壤侵蚀变化量呈现先减小后增大的趋势,2005—2018 年侵蚀总量减小了 1 231.38 t,其中坡耕地土壤侵蚀减少量所占比例 93.26%; 2018—2023 年研究区土壤侵蚀量却上升了 19.38% (641.83 t),其中疏林地土壤侵蚀增加量所占比例为 87.06%,研究结果说明坡改梯和小流域的综合治理是减少区域水土流失的有效办法。

(3) 坡耕地与梯田面积变化呈显著负相关,相关系数达到了 0.972;土壤侵蚀量变化与荒草地面积的变化具有显著的正相关关系,相关系数达到了 0.983,荒草地的面积过大,会增加土壤侵蚀量,不利于水土流失防治;坡耕地面积的减少是造成坝控区侵蚀总量减少的主要因素,土壤侵蚀量的减小不仅仅受降雨因素的影响,同时受土地利用类型变化的影响。在小流域综合治理的过程中加强梯田建设和造林等水土保持措施的有机结合可有效遏制流域的水土流失。

## 参考文献 (References)

- [1] 谢明阳,焦春萌,韩小雨,等.1990—2020 年延安市土壤侵蚀演变及其时空偏移特征[J].水土保持通报,2022,42(5):187-192.  
Xie Mingyang, Jiao Chunmeng, Han Xiaoyu, et al. Evolution and spatial-temporal shift characteristics of soil erosion in Yan'An City during 1990—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):187-192.
- [2] 张艳,史飞航,张悦,等.黄河中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素[J].水土保持研究,2023,30(5):1-12.  
Zhang Yan, Shi Feihang, Zhang Yue, et al. Temporal and spatial changes and driving factors of soil erosion in the middle reaches of the Yellow River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):1-12.
- [3] 赵娜,张道熙,韩东枫,等.湄公河典型区域旱雨季土地利用及土壤侵蚀差异研究[J].水生态学杂志,2024,45(2):47-53.  
Zhao Na, Zhang Daoxi, Han Dongfeng, et al. Differences in land use and soil erosion during dry and rainy seasons in the savannakhet-kratie area of Mekong River [J]. Journal of Hydroecology, 2024,45(2):47-53.
- [4] 徐少杰,邓良,赵明松,等.安徽省 1980—2020 年土壤侵蚀时空变化特征[J].科学技术与工程,2023,23(1):109-116.  
Xu Shaojie, Deng Liang, Zhao Mingsong, et al. Spatial-temporal characteristics of soil erosion in Anhui Province from 1980 to 2020 [J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(1):109-116.
- [5] 余恩旭,张明芳,蒋志魏,等.岷江上游土壤侵蚀时空演变特征及其成因分析[J].水土保持研究,2023,30(1):1-10.  
Yu Enxu, Zhang Mingfang, Jiang Zhiwei, et al. Spatio-temporal dynamics of soil erosion and associated influencing factors in the Upper Minjiang River watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):1-10.
- [6] Li Jiaying, Liu Qinglong, Feng Xiaoming, et al. The synergistic effects of afforestation and the construction of check-dams on sediment trapping: Four decades of evolution on the Loess Plateau, China [J]. Land Degradation & Development, 2019,30(6):622-635.
- [7] 高凡洁,张富,胡彦婷,等.基于 GIS 和 RUSLE 模型的定西市安定区土壤侵蚀时空变化[J].甘肃农业大学学报,2022,57(1):161-168.  
Gao Fanjie, Zhang Fu, Hu Yanting, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion in Anding District, Dingxi City based on GIS and RUSLE model [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022,57(1):161-168.
- [8] 贺倩,戴晓爱.基于 LMDI 模型的三江源区植被对土壤侵蚀变化影响的定量分析[J].长江科学院院报,2020,37(7):61-67.



- He Qian, Dai Xiaoi. Quantitative analysis of the effects of vegetation on soil erosion in the three-river head waters region using logarithmic mean division index model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(7): 61-67.
- [9] 汪滨, 张志强. 黄土高原典型流域土壤侵蚀对退耕还林土地利用变化的响应 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 60-70.
- Wang Bin, Zhang Zhiqiang. Response of soil erosion to land use change driven by grain for green project in a typical watershed of the Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(12): 60-70.
- [10] 吴帅, 阿如早, 潘海伟. 阴山北麓地区土壤侵蚀的时空变化及驱动力 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 380-390.
- Wu Shuai, A Ruhan, Pan Haiwei. Spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in north piedmont of Yinshan Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 380-390.
- [11] 陈淼, 汪小钦, 林敬兰, 等. 土地利用和植被覆盖变化对长汀县 30 多年土壤侵蚀变化的定量影响 [J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 168-177.
- Chen Miao, Wang Xiaoqin, Lin Jinglan, et al. Quantitative effects of land use and vegetation cover changes on soil erosion in Changting County in recent 30 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 168-177.
- [12] 史学建, 王玲玲, 杨吉山, 等. 基于淤地坝沉积信息的流域土壤侵蚀模数估算 [J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 103-106.
- Shi Xuejian, Wang Lingling, Yang Jishan, et al. Calculation of soil erosion modulus based on sedimentation investigation of check dam [J]. Yellow River, 2019, 41(2): 103-106.
- [13] 张建国, 董亚维, 李晶晶, 等. 黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中存在的问题及方法探讨 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 387-392.
- Zhang Jianguo, Dong Yawei, Li Jingjing, et al. Discussion on problem and methods of monitoring sediment deposition of warping dams in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 387-392.
- [14] 刘殿君, 于森森, 孟庆东, 等. 黄河流域鄂尔多斯十大孔兑淤地坝减沙效应 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 42-49.
- Liu Dianjun, Yu Senmiao, Meng Qingdong, et al. Effect of check dams on sediment retention of the Ten Tributaries in the Ordos Basin of the Yellow River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 42-49.
- [15] Bai Leichao, Wang Nan, Jiao Juying, et al. Soil erosion and sediment interception by check dams in a watershed for an extreme rainstorm on the Loess Plateau, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 35(4): 408-416.
- [16] 张凤宝, 杨明义, 张加琼, 等. 黄土高原淤地坝沉积泥沙在小流域土壤侵蚀研究中的应用 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 365-371.
- Zhang Fengbao, Yang Mingyi, Zhang Jiaqiong, et al. Progress on application of sediment in check dam to study soil erosion of small watershed on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 365-371.
- [17] Ma Tianle, Liu Baoyuan, He Liang, et al. Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years [J]. Geoderma, 2024, 443: 116837.
- [18] Chen Shidie, Wei Xingping, Cai Yunli, et al. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and soil erosion in Karst area of Chongqing and its driving factors [J]. Catena, 2024, 242: 108108.
- [19] Tian Tian, Yang Zhenqi, Guo Jianying, et al. Spatio-temporal evolution of soil erosion and its driving mechanism in the Mongolian section of the Yellow River basin [J]. Land, 2023, 12(4): 801.
- [20] 李小军. 渭源县淤地坝工程运行管理存在的问题及对策 [J]. 现代农村科技, 2021(11): 51-52.
- Li Xiaojun. Problems and countermeasures in operation and management of silt dam project in Weiyuan County [J]. Modern Rural Science and Technology, 2021(11): 51-52.
- [21] 张富, 赵传燕, 邓居礼, 等. 祖厉河流域降雨径流泥沙变化特征研究 [J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 74-82.
- Zhang Fu, Zhao Chuanyan, Deng Juli, et al. Change characteristics of the precipitation, runoff and sediment discharge in Zulihe River basin [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 74-82.
- [22] 戚继阳, 张富, 赵传燕, 等. 基于 GIS 和 RS 的称钩河流域土壤侵蚀与土地利用关系分析 [J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(2): 94-102.
- Qi Jiyang, Zhang Fu, Zhao Chuanyan, et al. Analysis on relationship between soil erosion and land use in Chenggou River basin based on GIS and RS [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 53(2): 94-102.
- [23] 戚继阳. 基于 GIS 和 RS 的称钩河流域土壤侵蚀及其影响因素研究 [D]. 甘肃兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- Qi Jiyang. Study on soil erosion and its influencing factors in Chenggou River basin based on GIS and RS [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2017.

- Yang Yingnan, Li Zifu, Liu Mengyun, et al. Analysis of topographic differences of Yongshou County based on different resolutions of DEM [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6):131-136.
- [22] 陈楠. DEM 分辨率与平均坡度的关系分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(4):524-530.
- Chen Nan. Relationship between DEM resolution and average slope derived from DEM [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(4):524-530.
- [23] Chen Xue, Chen Guokun, Feng Junxin, et al. Slope scaling effect and slope-conversion-atlas for typical water erosion regions in China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(4):3789.
- [24] 张永红, 黄付强, 程华, 等. 两种分辨率 DEM 在不同空间尺度下的差异: 以黄土高原丘陵区为例[J]. *西部林业科学*, 2020, 49(4):54-59, 67.
- Zhang Yonghong, Huang Fuqiang, Cheng Hua, et al. Difference of the two kinds of resolution DEM at different spatial scales: A case of hilly region in Loess Plateau [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2020, 49(4):54-59, 67.
- [25] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. *地理学报*, 2003, 58(6):824-830.
- Tang Guoan, Zhao Mudan, Li Tianwen, et al. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6):824-830.
- [26] Wang Shuyuan, Zhu Xiaoli, Zhang Wenbo, et al. Effect of different topographic data sources on soil loss estimation for a mountainous watershed in Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20):1382.
- [27] 胡云华, 贺秀斌, 毕景芝. 直方图匹配算法进行坡度变换的精度评价[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6):97-101.
- Hu Yunhua, He Xiubin, Bi Jingzhi. Assessment on the accuracy of the histogram matching algorithm for slope correction [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(6):97-101.
- [28] 李发源, 汤国安, 贾旖旎, 等. 坡谱信息熵尺度效应及空间分异[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(4):13-18.
- Li Fayuan, Tang Guoan, Jia Yini, et al. Scale effect and spatial distribution of slope spectrum's information entropy [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2007, 9(4):13-18.

(上接第 148 页)

- [24] 武磊, 高祖桥, 谢旭红, 等. 甘肃省黄河流域土壤侵蚀及其驱动机制[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(3):221-230.
- Wu Lei, Gao Zuqiao, Xie Xuhong, et al. Soil erosion and its driving mechanism in tributary basins of Yellow River in Gansu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(3):221-230.
- [25] 石学瑾, 张彪, 郭家龙, 等. 黄土高原典型小流域土壤侵蚀时空演变[J]. *地理学报*, 2024, 79(7):1787-1803.
- Shi Xuejin, Zhang Biao, Guo Jialong, et al. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical watershed of the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7):1787-1803.
- [26] 张慧雯, 赵燕, 陈怡平. 近 40 年来黄土高原植被变化趋势及其生态效应[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(4):881-894.
- Zhang Huiwen, Zhao Yan, Chen Yiping. Vegetation trends and ecological effects on the Loess Plateau, China in the last forty years [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(4):881-894.
- [27] 王榕华, 信忠保, 梁潇瑜. 植被和梯田对黄土高原小流域泥沙连通性的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(9):3756-3765.
- Wang Ronghua, Xin Zhongbao, Liang Xiaoyu. Effects of terrace and vegetation on sediment connectivity in a small watershed on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9):3756-3765.
- [28] 段菊卿, 柏跃勤, 王英顺. 黄土高原小流域侵蚀模数的确定方法[J]. *中国水土保持*, 2009(8):32-34.
- Duan Juqing, Bai Yueqin, Wang Yingshun. Determination methods of erosion modulus in small watersheds of Loess Plateau [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009(8):32-34.