皇甫川流域淤地坝措施空间优化配置及减沙潜力预测

陶文涛[1], 顾朝军[2], 赵广举[1], 田 鹏[1], 耿 韧[1], 毕 博[1], 宋卓远[1]
(1.南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
2.长江水利委员会 长江流域水土保持监测中心站, 湖北 武汉 430012)

摘 要: [目的]针对黄土高原多沙粗沙区,开展淤地坝空间优化配置情景下的减沙潜力预测研究,为该区域未来淤地坝的空间规划提供科学依据。[方法]以皇甫川流域为研究对象,基于修正通用土壤流失方程(RUSLE)模型与泥沙分布式输移模型(SEDD)算法,并考虑流域现有淤地坝的拦沙效应,分析流域的侵蚀产沙特征,进而以流域的产沙空间分布为基础,构建不同淤地坝空间优化配置情景,并预测各情景下的减沙潜力。[结果]①流域土壤侵蚀呈现显著的空间分异特征,其平均土壤侵蚀模数为5 592.18 t/(km^2·a),强度以上的侵蚀面积占流域总面积的36.58%,水土流失面积占流域总面积的86.38%,全流域年土壤侵蚀总量为1.815×10^7 t。②流域平均产沙模数为2 048.37 t/(km^2·a),总产沙量为6.649×10^6 t,其中南部区域为主要泥沙来源区。③依据子流域的产沙特征,将流域内子流域按产沙特征划分为不同淤地坝布设潜力等级,并按潜力等级划分结果构建不同情景,在淤地坝措施空间优化配置下,情景1、情景2、情景3分别布设淤地坝14座,46座和369座,预测其减沙潜力分别为3.88%,10.56%和57.33%。[结论]合理的淤地坝空间配置可显著提升该流域的减沙效果,单座淤地坝的拦沙能力主要受其控制流域的平均产沙模数和淤地坝自身的拦截效率等因素影响。

关键词: 淤地坝; RUSLE模型; SEDD模型; 减沙潜力; 皇甫川流域
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0136-10 **中图分类号:** S157.2

文献参数: 陶文涛, 顾朝军, 赵广举, 等.皇甫川流域淤地坝措施空间优化配置及减沙潜力预测[J].水土保持通报,2026,46(5):136-145. Tao Wentao, Gu Chaojun, Zhao Guangju, et al. Optimal spatial allocation and sediment reduction potential prediction of check dam measures in Huangfuchuan watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):136-145.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.023 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.023**

Optimal spatial allocation and sediment reduction potential prediction of check dam measures in Huangfuchuan watershed

Tao Wentao[1], Gu Chaojun[2], Zhao Guangju[1], Tian Peng[1], Geng Ren[1], Bi Bo[1], Song Zhuoyuan[1]
(1.*Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing*, *Jiangsu* 210029, *China*; 2.*Changjiang Soil Conservation Monitoring Centre*, *Changjiang Water Resources Commission*, *Wuhan*, *Hubei* 430012, *China*)

Abstract: [Objective] A study was conducted to predict the sediment reduction potential under scenarios of optimal spatial allocation of check dams in coarse and high sediment-yielding areas of the Loess Plateau in order to provide a scientific basis for future spatial planning of check dams in this region. [Methods] Taking the Huangfuchuan watershed as the research object, this study integrated the revised universal soil loss equation (RUSLE) and the sediment distributed delivery (SEDD) algorithm, and considered the sediment retention effect of existing check dams in the watershed to analyze the spatial characteristics of soil erosion and sediment yield. Based on the spatial distribution of sediment yield in the watershed, this study constructed various scenarios of

收稿日期:2026-02-03 **修回日期:**2026-04-07 **采用日期:**2026-04-11
资助项目:国家自然科学基金项目"基于模型集合评估的流域水土保持措施对水沙过程调控机制解析"(42577406);国家自然科学基金-黄河水科学联合基金项目"黄土高原水土保持措施潜力及其对河流水沙的调控机制"(U2243211);南京水利科学研究院研究生学位论文基金项目(Yy826001)
第一作者:陶文涛(2001—),男(汉族),安徽省滁州市人,硕士研究生,研究方向为现代农业水利工程。Email:wentaotao078@qq.com。
通信作者:赵广举(1980—),男(汉族),辽宁省葫芦岛市人,研究员,博士生导师,主要从事流域水文过程与土壤侵蚀模拟。Email:gjzhao@nhri.cn。

optimal spatial allocation of check dams, and further predicted the sediment reduction potential under each scenario. [Results] ① Soil erosion in the watershed exhibited significant spatial differentiation characteristics, with an average soil erosion modulus of 5 592.18 t/(km^2·a). The area with intense and above soil erosion accounted for 36.58% of the total watershed area, the soil and water loss area made up 86.38% of the total area, and the annual total soil erosion of the whole watershed reached 1.815×10^7 t. ② The watershed had an average sediment yield modulus of 2 048.37 t/(km^2·a) and a total annual sediment yield of 6.649×10^6 t, with the southern region being the primary sediment source area. ③ According to the sediment yield characteristics of sub-watersheds, the sub-watersheds within the watershed were divided into different grades of check dam layout potential, and different scenarios were constructed based on the potential grading results. Under the optimal spatial allocation of check dam measures, 14, 46, and 369 check dams were deployed in scenario 1, scenario 2, and scenario 3, respectively, and their corresponding predicted sediment reduction potentials were 3.88%, 10.56%, and 57.33%. [Conclusion] Reasonable spatial allocation of check dams can significantly enhance the sediment reduction effect of the watershed. The sediment retention capacity of an individual check dam is primarily governed by factors such as the average sediment yield modulus of its controlled watershed and the trapping efficiency of the check dam itself.

Keywords: check dams; RUSLE model; SEDD model; sediment reduction potential; Huangfuchuan watershed

黄土高原是中国土壤侵蚀最严重的区域之一,由此引发的土地退化问题,已严重威胁到土壤资源的可持续利用[1-2]。黄土高原中部的粗泥沙集中来源区,生态环境脆弱,是黄河输沙的首要来源;其多年平均输沙量高达3.19×10^8 t,贡献了黄河总输沙量的73.90%[3]。因此,在黄土高原的多沙粗沙区开展淤地坝潜力预测,对该区域未来淤地坝的空间布局与规划以及进一步减少入黄泥沙,具有重要的科学参考和实践指导意义。近30 a来,通过植被恢复与淤地坝建设等一系列水土保持措施,黄土高原年均入黄泥沙量得到控制[4]。其中,淤地坝工程通过拦截径流、淤积泥沙,在减少入黄泥沙和控制水土流失方面发挥着重要作用[5-6]。在早期运行阶段,淤地坝能够截获上游大部分的径流和沉积物[7],1970—2020年黄土高原的淤地坝共拦截了1.02×10^{10} t沉积物,形成了931 km^{2}的淤泥土地[8]。然而,随着时间推移,大量早期建设的淤地坝在长期运行后已基本淤满,其拦沙能力趋于饱和[9]。此外,由于前期规划不足,许多淤地坝并未布设在流域内的适宜位置,限制了其功能的持续发挥。在过往的研究中,已经证实了淤地坝工程的有效性[10-13],学界已在坝系科学布局、定量化优化等方面取得了一系列重要成果[5,14],为淤地坝的科学选址与精准布设提供了理论支撑,但对如何进一步优化坝系布局,最大化减沙潜力与淤地效益的定量化研究仍显不足。因此,在当前黄土高原土壤侵蚀持续发生以及对更多高产淤地需求的背景下,上述问题凸显了进一步优化淤地坝布局的重要性,也表明该区域在推进淤地坝精准建设与效能提升方面,仍具有显著的潜力。

皇甫川流域因其特殊的砒砂岩物质基础,极端破碎的地形,高强度暴雨集中的气候,植被覆盖度低的地表条件,成为黄河粗泥沙的主要来源区之一,其产沙情况直接关系到黄河下游的河道安全。因此,本研究以皇甫川流域为研究对象,通过修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)与泥沙分布式输移模型(sediment distributed delivery, SEDD),量化流域侵蚀产沙空间分布特征,分情景评估不同淤地坝空间配置的减沙潜力,为黄河流域水土保持措施的精准规划提供科学依据。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

皇甫川(110°18′—112°12′E,39°12′—39°54′N)是黄河中游的一级支流,发源于内蒙古准格尔旗,地处黄土高原与鄂尔多斯高原交接地带,最终在陕西省府谷县汇入黄河,干流全长137 km。流域地势北高南低,面积3 246 km^2,该流域属大陆性季风气候,年均气温9.1 ℃。多年平均降水量350~450 mm,年际、年内变化大,80%以上集中于夏季,多暴雨。流域主要包括3种地貌类型:砒砂岩丘陵沟壑区(948 km^2)、黄土丘陵沟壑区(1 756 km^2)、沙化黄土丘陵沟壑区(542 km^2)[15]。特别是流域西北部大面积裸露的砒砂岩,其结构松散,抗蚀性差,遇水极易崩解,是流域粗泥沙的主要来源。流域内土壤以栗钙土、黄绵土、风沙土为主,原生植被较为稀疏。在子流域的划分上,首先基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)生成流向栅格,进而计算汇流累积量,从而将全流域划分为1 053个子流域(如图1所示)。该划分

方法以DEM刻画的地形分水线为依据，通过调试汇流阈值提取与研究区实际河网一致的河道网络，确保子流域边界与地形特征高度吻合。

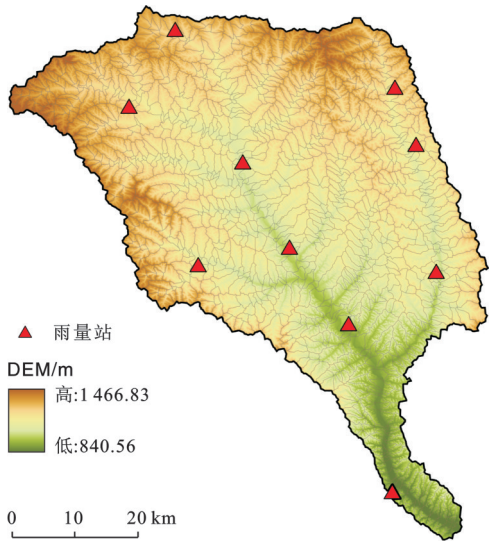


图1 皇甫川流域地形及采样点分布

Fig.1 Topography of Huangfuchuan watershed and distribution of sampling plots

1.2 数据来源

数据包含气象数据、DEM、土地利用/覆盖、植被覆盖度及土壤性质，如表1所示。气象数据源自中国气象数据集，逐日降雨量数据获取自《黄河流域水文年鉴(1994—2023年)》。空间分辨率为30 m的DEM由陕西省测绘地理信息中心提供，数据现势性截至2016年，是基于多期基础测绘成果整合而成的地形数据；数据获取需通过陕西政务服务网(https://zwfw.shaanxi.gov.cn/)提交涉密基础测绘成果使用申请，并经审批后获得。DEM数据用于提取坡度、坡长等地形参数，用于土壤侵蚀量的计算。

土地利用数据来源于国家地球系统科学数据中心[16](https://www.geodata.cn)，研究区共有7种土地利用类型，以《土地利用现状分类(GB/T 21010—2017)》为依据，将研究区土地利用类型划分为林地、草地、裸地或未利用地、沙地、耕地、水域和居民点。归一化植被指数(normalized difference vegetation index，NDVI)通过谷歌地球引擎(Google Earth Engine，GEE)采用最大值合成法计算。流域的主要土壤类型包括黄土、沙土，主要基岩类型为裸风化砂岩；通过野外定点采样测定土壤理化性质，以此计算土壤侵蚀模型中的可蚀性因子K值。淤地坝的数据来源共有两组，第1组来源于2010—2012年的全国水利普查，黄河水利委员会负责黄河流域片区；第2组来源于Zeng等[7]2016—2020年调查的数据，第2组数据为目前公开数据集中最新的数据；结合两组淤地坝的数据，可判断淤地坝的淤满情况以及模型的二次验证。

表1 研究区域数据来源

Table 1 Data sources of study area

数据名称	时间	分辨率	数据来源
DEM	—	30 m	陕西省测绘地理信息中心
土地利用	2024	30 m	国家地球系统科学数据中心
土壤性质	2017	—	野外采样
NDVI	2024	30 m	谷歌地球引擎
降水	1994—2023	10个雨量站	黄河流域水文年鉴
淤地坝数据1组	2010—2012	—	全国水利普查
淤地坝数据2组	2016—2020	—	西北农林科技大学水土保持研究所

2 研究方法

2.1 RUSLE

本研究使用修正通用土壤流失方程(RUSLE)，表达式为

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \tag{1}$$

式中：A表示土壤侵蚀模数[t/(hm²·a)]；R表示降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(hm²·h·a)]；K表示土壤可蚀性因子[(t·hm²·h]/(hm²·MJ·mm)]；L表示坡长因子(无量纲)；S表示坡度因子(无量纲)；C表示植被覆盖因子(无量纲)；P表示水土保持工程措施因子(无量纲)。

2.1.1 降雨侵蚀力

平均降雨侵蚀力表示区域降雨侵蚀潜在能力的特征值，反映多年降雨动力条件的综合效应[17]。其计算基于流域内10个雨量站的日降雨量数据，并通过反距离加权插值法进行空间插值，进而生成流域尺度的R因子空间分布。其中，通过日降雨量计算年降雨侵蚀力因子R可使用章文波[18]的方法：

$$R = \sum_{n=1}^{24} R_{半月} \tag{2}$$

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

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.189\,1} \tag{4}$$

$$\beta = 0.836\,3 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{5}$$

式中:n表示一年中第n个半月;$R_{半月}$为半月降雨侵蚀力[(MJ·mm)/(hm²·h·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;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}表示日降雨量大于等于12 mm的年平均降雨量。

2.1.2　土壤可蚀性

土壤可蚀性表示土壤在降雨和径流的作用下抵抗侵蚀过程的敏感性,土壤质地和土壤有机质是影响K值数值大小的关键因素。K值的计算采用EPIC模型中提出的方法进行估算,计算公式为

$$K = 0.131\,7\left\{0.2 + 0.3\exp\left[-0.025\,6S_a\left(1 - \frac{S_i}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{S_i}{C_l + S_i}\right)^{0.3} \cdot \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right]\left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)}\right] \tag{6}$$

式中:S,S_i及C_l分别表示土壤中砂粒(粒径介于0.05～2 mm)、粉粒(粒径范围0.002～0.05 mm)和黏粒(粒径<0.002 mm)的含量(%);S_n为模型修正系数;C表示土壤有机碳含量(%)。

2.1.3　坡长与坡度因子

在皇甫川流域,部分区域的坡度超过20%;而基于RUSLE模型开发的坡度数据全部在18%以内[19],故坡长和坡度因子采用刘宝元等[20]改进的坡长因子和坡度因子计算公式,其优势在于陡坡适用性强,与中国侵蚀环境高度匹配:

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

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

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

式中:L为坡长因子;λ为从流域DEM中提取的坡长;m为坡长指数;S为坡度因子;θ为坡度(°)。

2.1.4　C因子和P因子

C因子反映了耕作方式、植被和管理措施对土壤侵蚀的防治效应,其取值范围为0～1.0。对于未采取管理措施的裸露土壤,该值为1.0;其他条件下则小于1;当植被完全抑制侵蚀时,该值趋近于0。本研究通过融合土地利用类型与植被覆盖度来估算C因子,结果详见表2。

P因子表示水土保持措施对土壤侵蚀的削减效果。通过谷歌地球影像解译与实地调查,该流域的梯田措施有限,仅占全流域面积的0.5%,淤地坝工程为当地最主要的水土保持措施。

2.2　泥沙输移模型

SEDD算法可以将流域离散化为形态单元,并确定每个单元的泥沙输移比,是一种用于模拟流域内侵蚀泥沙从源地到河道输移过程的分布式模型[21]。其中泥沙输移比是流域出口实测输沙量与流域总侵蚀量的比值,其高度依赖于流域的地形和自然地理特征[22]。单个栅格的泥沙输移比基于数字高程模型和流域特征参数计算:

$$\mathrm{SDR}_i = \exp(-\beta \cdot t) = \exp\left[-\beta \cdot \sum_{i=1}^{N}\left(\frac{l_i}{v_i}\right)\right] \tag{10}$$

$$v_i = k_i\sqrt{s_i} \tag{11}$$

式中:SDR_i为泥沙输移比,在0～1(无量纲);β为流域特征参数;t_i为栅格i从当前栅格输移到最近的河道所需的输移时间(h);N为从当前栅格到最近的河道所途经的栅格数;l_i为长度(m);v_i为流动速度(m/s);k_i为与地表粗糙度有关的参数(m/s);s_i为坡度。

表2　不同土地利用类型与植被覆盖度下C因子的值

Table 2　C factor values under different land use types and vegetation coverage levels

土地利用类型	植被覆盖度/%	C	土地利用类型	植被覆盖度/%	C
森林	0～20	0.100	草地	0～20	0.450
	20～40	0.080		20～40	0.240
	40～60	0.060		40～60	0.15
	60～80	0.020		60～80	0.09
	80～100	0.004		80～100	0.043
水体	—	0	坡耕地	—	0.476
城市区域	—	0.353	耕地	—	0.230
沙地	—	0.550	裸地	—	0.69

为获取流域特征参数β,需要先计算整个流域的泥沙输移比SDR_w:

$$\mathrm{SDR}_W = \exp(-b \cdot S_W) \tag{12}$$

式中:SDR_w为流域平均泥沙输移比;b为经验系数,取值0.032 8;S_w为流域面积(km²)。

随后,采用试算法,计算流域特征参数β的值,计算公式为

$$SDR_w=\frac{\sum_{j=1}^{N}\left[\exp(-\beta\cdot t_j)\cdot l_j^{0.5}\cdot s_j^2\cdot a_j\right]}{\sum_{j=1}^{N}(l_j^N\cdot s_j^2\cdot a_j)} \quad (13)$$

式中：N为栅格j的排水面积。

流域中单个栅格的产沙量Y_i通过下式计算：

$$Y_i=SDR_i\cdot A_i\cdot a_i \quad (14)$$

式中：Y_i表示单个栅格像元的产沙量[t/(km²·a)]；SDR_i表示单个栅格像元的泥沙输移比；A_i表示单个栅格像元的土壤侵蚀模数[t/(km²·a)]；a_i表示单个栅格像元的面积。

结合淤地坝的影响因素，本研究利用2011年的土地利用数据、植被覆盖度数据、皇甫站1990—2019年的实测输沙数据为依据，对整个流域的SEDD模型进行校准，之所以选择2011年的数据，是因为它在30 a的输沙数据之中，在模型验证方面具有代表性。并选取28座无上游蓄水设施的淤地坝对模型模拟结果进行二次验证，此类淤地坝的平均淤积速率可直接表征其控制流域的产沙能力。上述淤地坝均在1991年之后修建，其淤积监测数据可用于推算研究期内流域的平均产沙量。

2.3 淤地坝的泥沙拦截效率

淤地坝对泥沙的拦截效果可以用拦截效率(trapping efficiencies, TE)表示。拦截效率计算公式为

$$TE=\frac{S_{in}-S_{out}}{S_{in}}=\frac{S_{settled}}{S_{in}} \quad (15)$$

式中：S_{in}为流入淤地坝的沉积物总量(t)；S_{out}为从淤地坝流出的沉积物量(t)；$S_{setteled}$为淤地坝拦截的沉积物量(t)。由于皇甫川流域的淤地坝数量较多，逐一测定每一个淤地坝的拦截效率难以实现，因此，拦截效率可以用下列经验公式进行估算[23]

$$TE=1-\frac{1}{1+0.002\,1D\dfrac{V}{W}} \quad (16)$$

式中：V为淤地坝的剩余库容(m³)；W为淤地坝控制面积(km²)；参数D的取值范围为0.046～1.0，本研究取值0.046。

2.4 淤地坝措施优化配置情景

本研究在划分淤地坝的潜力区域时，充分考虑现有淤地坝的拦沙效应。在淤地坝的筛选方面，剔除接近淤满与已损毁的淤地坝，得到可用淤地坝共计255座。然后以DEM为基础数据源，结合流域内黄土丘陵沟壑区典型的地形坡度、坡长及植被覆盖度等特征参数，通过多因子叠加计算，生成皇甫川流域尺度的泥沙输移比空间栅格数据。并进一步依托地理信息系统空间分析技术，将皇甫川流域的子流域单元的土壤流失量栅格图层与上述泥沙输移比栅格图层进行逐像元叠加运算，最终确定皇甫川流域各子流域的产沙量。

在计算得出各子流域产沙量的基础上，进一步纳入现有淤地坝的拦沙作用，确定了各子流域的现状产沙量。基于该结果，划分流域潜力区，并设定了3种规划情景，分别记为情景1、情景2与情景3，其中情景1是对产沙量大于7 000 t/(km²·a)的所有子流域布置淤地坝，包括极高潜力区；情景2是对产沙量大于5 000 t/(km²·a)的所有子流域布置淤地坝，包括极高潜力区和高潜力区；情景3是对产沙量大于2 500 t/(km²·a)，包括极高潜力区、高潜力区和中潜力区；并预测各情景下的产沙特征。

为降低拦截效率赋值的主观性，本研究在设定淤地坝配置情景后，结合拟布设区域的地形特征，参考流域现有淤地坝的工程参数，对需布设的淤地坝的坝高进行估算；库容则采用张麟等提出的淤地坝库容曲线幂函数确定(如表3所示)。表3所列淤地坝均位于皇甫川流域内，该形式的选取基于黄土高原淤地坝实测与设计数据研究结论，具备充分的科学性与合理性，经35座典型淤地坝实测数据拟合验证，拟合确定系数R^2均在0.94以上，黄土高原不同水土流失分区库容曲线公式，确定系数R^2均在0.88及以上[24]。在此基础上计算不同配置情景下淤地坝的拦截效率，进而计算流域产沙量。

表3 皇甫川流域淤地坝库容曲线

Table 3 Storage capacity curve of check dams in Huangfuchuan Watershed

淤地坝名称	所在地	库容曲线幂函数
沙圪坨	陕西府谷县	$V=0.689H^{1.874}$
李家塢	内蒙古准格尔旗	$V=0.034H^{3.043}$
油房沟梁	内蒙古准格尔旗	$V=0.011H^{3.167}$
西无色浪	内蒙古准格尔旗	$V=0.031H^{2.826}$
北茆洼	陕西府谷县	$V=0.277H^{2.065}$
前黄村沟	陕西府谷县	$V=0.247H^{1.96}$
张富贵	内蒙古准格尔旗	$V=0.021H^{3.811}$
杜家壕	内蒙古准格尔旗	$V=0.009H^{3.194}$
任家沟	内蒙古准格尔旗	$V=0.027H^{2.761}$

3 结果与分析

3.1 流域侵蚀产沙的驱动因素和空间分布特征

皇甫川流域模型因子的空间分布见图2，其降雨侵蚀力(R)均值为1 088.02 (MJ·mm)/(hm²·h·a)，空间分布呈现东南高，西北低的特征，空间分布明显

(图 2a)。土壤可蚀性因子(K)均值为 0.074,其分布与土壤类型密切相关(图 2b)。皇甫川流域以坡陡沟深、地形破碎为典型特征,尤其在沟谷区域坡度极为陡峭,该流域平均坡度为 18.12°,其中 25°以上面积比例达 30.71%。坡度长度因子(LS)均值为 5.08,其空间分布与坡度具有较高一致性(图 2c)。土地利用以草地为主,所占比例为 85.59%,其次为耕地(12.84%),表明流域植被覆盖整体较高;植被覆盖因子(C)的空间分布如图 2d 所示。该流域水土保持工程以淤地坝为主,其他措施极少,故水土保持工程措施因子较低(图 2e)。泥沙输移比基于公式(10)—(13)计算,先计算出每个栅格的泥沙输移比,并以已划分的子流域为基础,计算每一个子流域的平均泥沙输移比;其空间分布如图 2f所示,整体呈现南部高于北部的特点。

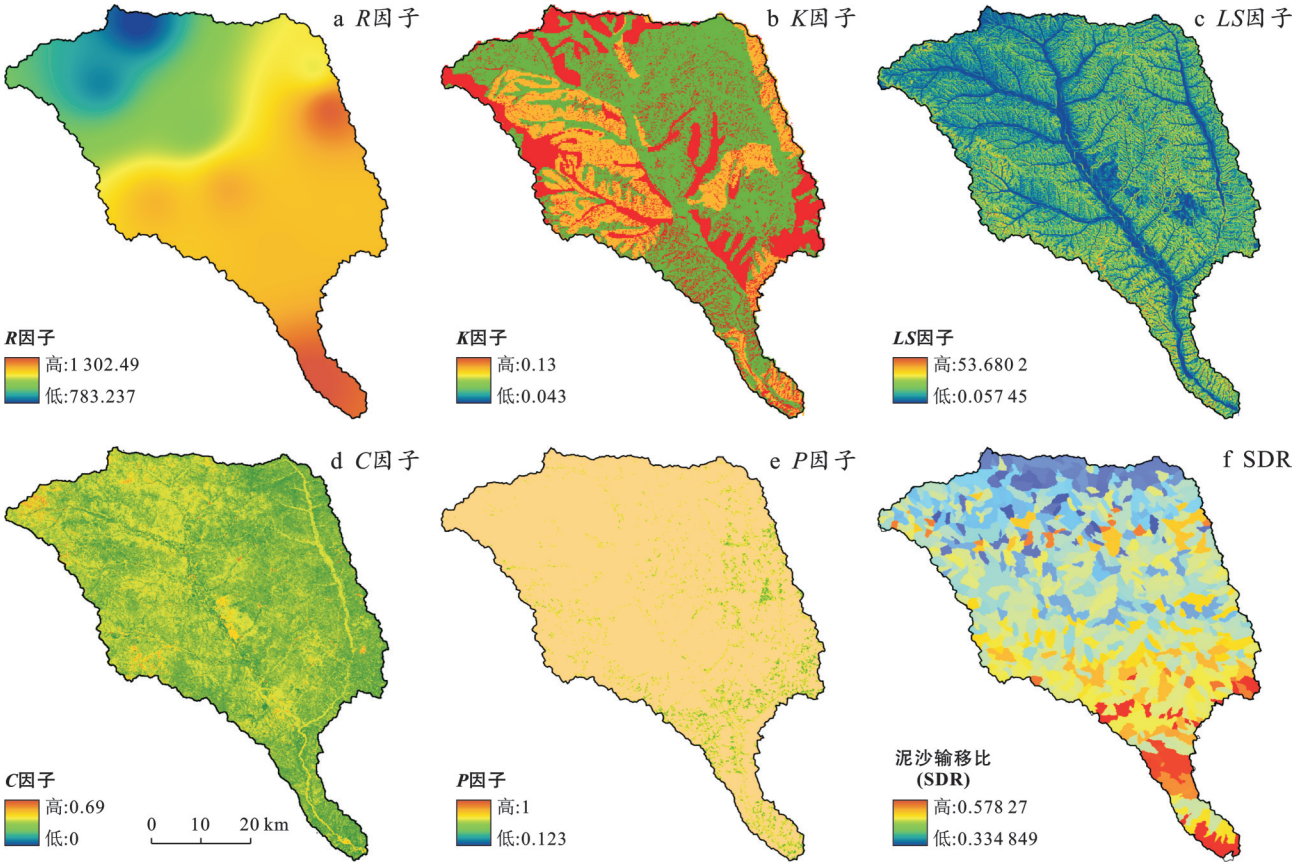


图 2　皇甫川流域模型因子的空间分布

Fig.2　Spatial distribution of model factors in Huangfuchuan watershed

基于已划分的子流域单元,计算出每个子流域的平均土壤侵蚀模数。进一步根据中华人民共和国水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》,将流域平均土壤侵蚀模数划分为 6 个侵蚀强度等级(图 3a),侵蚀强度分级如表 4 所示,流域的平均土壤侵蚀模数如图 3b 所示。

流域平均土壤侵蚀模数为 5 592.18 t/(km^2·a),土壤侵蚀强度空间分异明显,总体呈南高北低的特点。从土壤侵蚀量来看,全流域年土壤侵蚀总量达 1.815×10^7 t,其中,强度、极强度及剧烈侵蚀的土壤侵蚀量达 1.427×10^7 t,贡献了全流域侵蚀总量的 78.62%,表明高强度侵蚀区域是流域土壤侵蚀的主要来源。从侵蚀面积来看,水土流失面积占流域总面积的 86.38%,其中,强度、极强度及剧烈侵蚀的面积合计占总面积的 36.58%,水土流失现象依然严重。

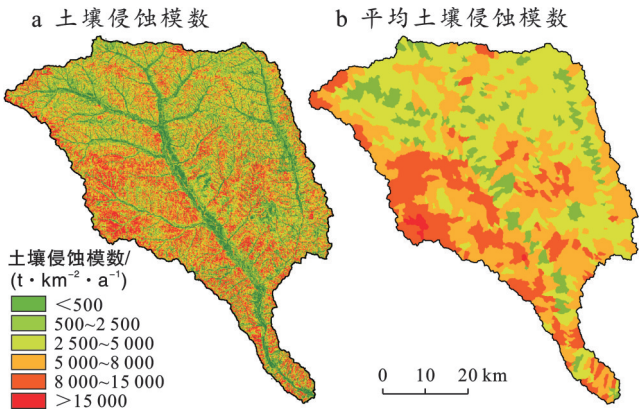


图 3　皇甫川流域土壤侵蚀模数空间分布

Fig.3　Spatial distribution of soil erosion modulus in Huangfuchuan watershed

表 4 皇甫川流域土壤侵蚀强度分级

Table 4 Classification of soil erosion intensity in Huangfuchuan watershed

土壤侵蚀强度分级	侵蚀面积/hm²	土壤侵蚀量/10⁴ t
微 度	43 670	9.66
轻 度	91 126	128.42
中 度	68 597	250.07
强 度	46 657	295.87
极强度	45 035	485.73
剧 烈	25 636	645.44

通过综合各子流域的平均土壤侵蚀模数与泥沙输移比，并结合现有淤地坝的拦沙作用，库容小于 1.00×10^5 m³的淤地坝占总量的 29.8%，其拦截效率如图 4a 所示，同时对流域当前的产沙情况进行了评估，相关结果见图 4b。结果表明，流域平均产沙模数为 2 048.37 t/(km²·a)，总产沙量为 6.65×10^6 t。其中淤地坝分布较为密集的子流域，由于现有淤地坝的拦沙效应，流域产沙量显著降低。然而，部分子流域因淤地坝拦截效率有限，产沙水平仍然较高。

3.2 淤地坝措施潜力

本研究以子流域产沙模数为基础指标，将淤地坝的布设潜力划分为 4 个等级：极高潜力区〔产沙模数＞7 000 t/(km²·a)〕、高潜力区〔5 000 t/(km²·a)＜产沙模数＜7 000 t/(km²·a)〕、中潜力区〔2 500 t/(km²·a)＜产沙模数＜5 000 t/(km²·a)〕、低潜力区〔产沙模数＜2 500 t/(km²·a)〕(图 5a)。子流域的产沙模数越高，相应划分的潜力区等级就越高，高潜力区位于流域中淤地坝布设较少的区域。从潜力区面积占全流域面积的比例来看，极高潜力区面积比例为 1.12%，高潜力区占 2.67%，中潜力区占 31.07%，低潜力区面积最大，占 65.14%；高潜力区主要分布在产沙模数高的子流域。

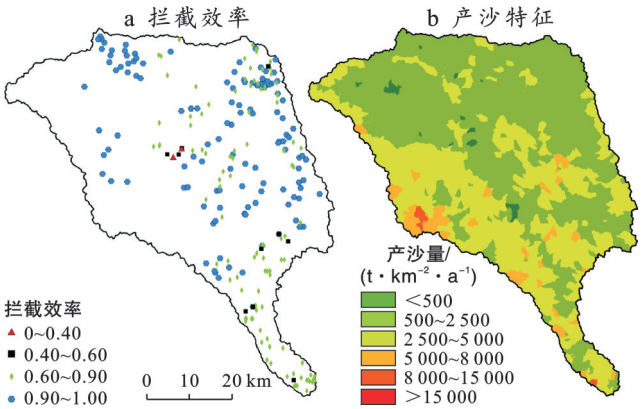


图 4 皇甫川流域的产沙特征

Fig.4 Sediment yield characteristics in Huangfuchuan watershed

根据淤地坝布设潜力区决定的优先次序，以潜力高的区域优先，每座淤地坝控制一个小流域。从布设数量来看，情景 1 仅在极高潜力区布设淤地坝，共计 14 座；情景 2 覆盖极高与高潜力区，布设数量为 46 座；情景 3 则进一步扩展至极高潜力区、高潜力区及中潜力区，总布设数量为 369 座。图 5b—5d 依次代表情景 1、情景 2、情景 3 下新布设淤地坝的空间分布及其对应的拦截效率。

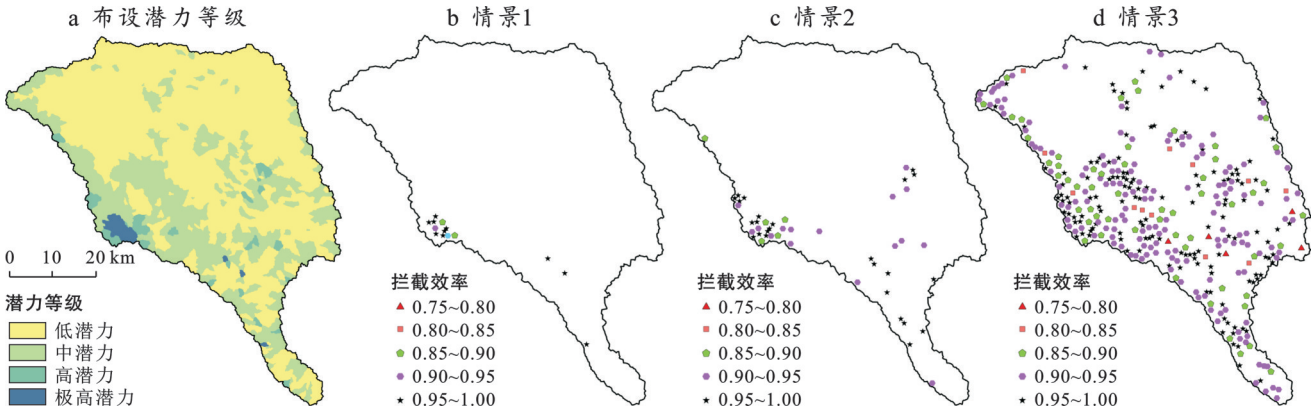


图 5 皇甫川流域淤地坝布设潜力及其拦截效率

Fig.5 Check dam layout potential and their trapping efficiencies in Huangfuchuan watershed

3.3 不同淤地坝配置情景的减沙潜力预测

从不同情景对流域整体的减沙量来看，随着淤地坝布设数量的增加，流域整体减沙效益得到显著提高(图 6)。其中情景 1(图 6a)的减沙效益为 3.88%，情景 2(图 6b)为 10.56%，情景 3(图 6c)的减沙效益达 57.33%；对应的年产沙量分别减少了 2.59×10^5 t，70.55×10^4 t 和 3.83×10^6 t。从不同潜力区淤地坝的拦沙效果来看，在极高潜力区，淤地坝拦沙效果最为显著，子流域最高的拦沙效果可达 11 089.23 t/(km²·a)；在高潜力区，子流域最高的拦沙效果为 6 542.04 t/(km²·a)；在中潜力区，子流域最高的拦沙效果为 4 475.83 t/(km²·a)。

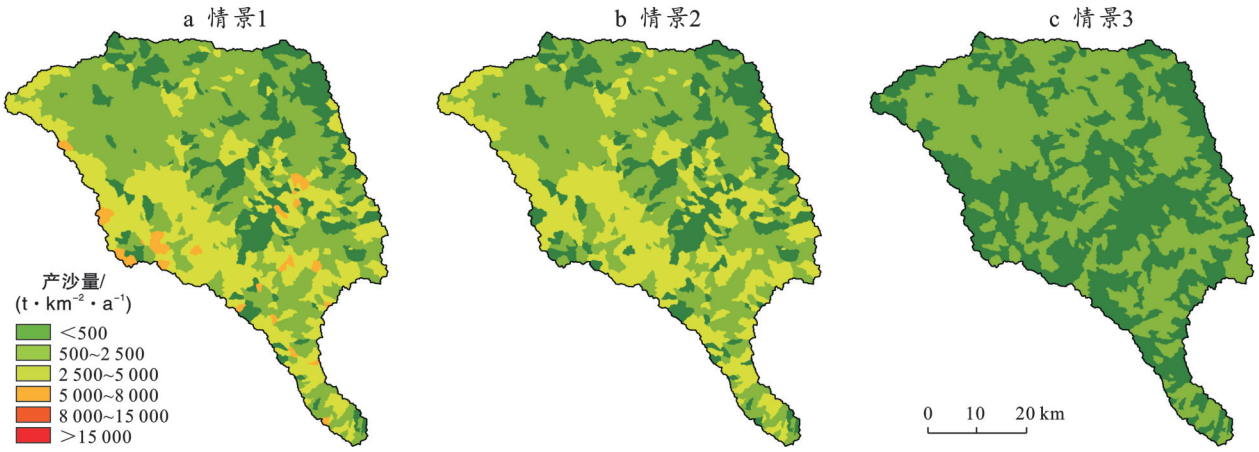


图 6　皇甫川流域各情景子流域产沙量的空间分布

Fig.6　Spatial distribution of sediment yield in sub-watersheds in Huangfuchuan watershed under each scenario

4　讨　论

4.1　流域侵蚀产沙的主要驱动因素

皇甫川流域作为黄河中游多沙粗沙区的典型代表,水土流失问题突出。本研究基于RUSLE模型,分析发现,流域内强度侵蚀以上的面积占总面积的36.58%,表明该区域水土流失状况较为严重。在空间分布上,流域南部侵蚀程度较北部更高,这一结果与Lu Ang等[25]及Zhao Guangju等[13]的研究结论一致。

研究发现,降雨、植被覆盖度以及坡度是导致流域侵蚀空间分布差异的主要原因。该流域地形破碎,沟壑纵横,侵蚀强度与坡度在空间分布上呈现显著的相关性。从动力学机制来看,坡度通过影响重力分力与水流速度,进而调控弗劳德数、水流剪切力及侵蚀强度[26]。而降雨侵蚀力与植被覆盖度则是影响流域侵蚀大小的主导因素。短历时、高强度的极端暴雨是流域侵蚀产沙的主要来源;流域内分布着大面积的砒砂岩和沙土区,植被覆盖度较低,受强降雨影响,水土流失严重,导致大量泥沙进入沟道[27-28]。

在皇甫川流域,淤地坝作为主要的水土保持工程措施,在抑制泥沙输出方面也发挥了至关重要的作用。研究发现,在淤地坝分布密集的子流域,即使局部土壤侵蚀较强,其产沙量也获得了显著削减。1983年,该流域被国务院列为全国八片水土流失重点治理区之一,淤地坝工程随后进入大规模建设阶段。然而,部分建设规划存在不足。例如在土壤侵蚀相对较弱的流域东北部,也集中修建了大量淤地坝,导致资源配置不尽合理,存在工程浪费现象。因此,未来有必要重点优化淤地坝的选址布局。本研究的相关成果,可为今后淤地坝的科学规划提供有益参考。

4.2　多情景淤地坝配置的减沙潜力

据统计,截至2006年,皇甫川流域已建淤地坝数量达385座。Zhao Guangju等[13]仅考虑淤地坝的减沙效应,在平均降雨条件下,得出2006年该流域已建淤地坝的减沙效益为51.9%。而本研究中情景3的淤地坝配置方案,在布设数量与该流域已建淤地坝相近的前提下,实现了57.33%的减沙效益,减沙效果显著优于流域现有淤地坝。究其原因,流域内部分早期建设的淤地坝经长期运行后已出现不同程度的淤积,泥沙拦截效率下降[9];此外,现有淤地坝的布设缺乏对流域产沙空间分布的精准考量。如流域东北部土壤侵蚀相对较弱的区域仍集中修建了大量淤地坝,造成工程资源配置的不合理。因此,基于流域产沙空间特征的科学选址与空间优化配置,是提升淤地坝整体减沙效益的关键途径。

子流域淤地坝的布设潜力等级依据平均产沙模数划定,产沙模数越高的子流域,布设淤地坝潜在的拦沙能力越大。而从单座淤地坝的拦沙量来看,其平均拦沙量呈现出情景1(1.85×10^4 t)>情景2(1.53×10^4 t)>情景3(1.04×10^4 t)的递减特征,这一结果与淤地坝布设的潜力区等级相关。情景一的淤地坝均布设在极高潜力区,该区域是流域泥沙的核心来源区。而情景2和情景3逐步将布设范围扩展至高、中潜力区,这些区域产沙模数依次降低,导致单座淤地坝的平均拦沙量逐步递减。这一特征明确了子流域的产沙模数是决定单座淤地坝拦沙潜力的核心因子。

从淤地坝布设方式来看,本研究遵循单座淤地坝控制单一子流域的布设原则。但本研究针对淤地坝减沙潜力的预测,均基于新建淤地坝的初始状态开展;随着运行时间推移,淤地坝内泥沙不断淤积,

其拦沙效益会逐步降低。此外,在实际布设过程中,由于不同淤地坝的建设时间可能存在先后差异,实际的减沙效益与预测值之间将产生一定偏差。这两点是本研究的局限性,尽管如此,本研究所提出的淤地坝空间配置方案及选址位置,仍具有明确的科学参考价值。

4.3 模型的校准与验证

如图 7 所示,本研究采用 28 座淤地坝的实测年均淤积率开展模型验证。基于 Zeng Yi 等[7]在 2016—2020 年调查的淤地坝数据,核算各淤地坝实际泥沙淤积量,并依据淤地坝建成年限推算其年均淤积量,实测年均淤积速率介于 3 579.55~23 749.42 t/(km²·a)。模型模拟方面,受限于逐年核算淤地坝拦沙量的难度,本研究以各淤地坝实际控制面积为依据,选取 1991,2000,2006,2011 和 2015 年 5 个典型年份,模拟流域逐年产沙量并取 5 a 均值,模拟淤积量范围为 2 183.06~27 745.06 t/(km²·a)。模拟值与实测值的决定系数为 0.628,表明模型模拟结果与淤地坝实测淤积数据总体一致;但整体而言,模型模拟的年均产沙量较淤地坝实测测算值偏高。

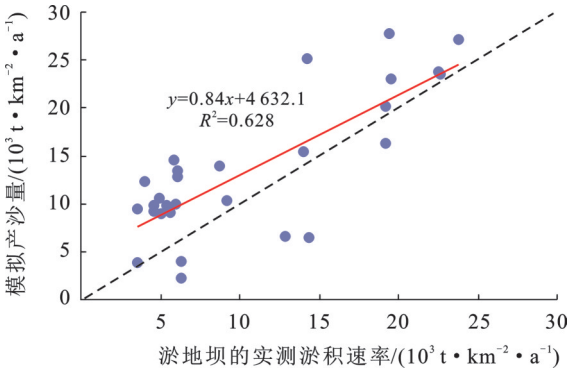


图 7 淤地坝淤积与 SEDD 模型的产沙量估算
Fig.7 Sediment yield estimation through check dam siltation and SEDD modeling

5 结 论

(1) 皇甫川流域的平均土壤侵蚀模数为 5 592.18 t/(km²·a),流域的水土流失面积占流域总面积的 86.38%,强度以上侵蚀占流域面积的 36.58%,降雨集中、植被覆盖度低是造成水土流失严重的主要原因。流域内淤地坝在减少泥沙方面发挥了重要作用。在考虑现有淤地坝的拦沙效应后,流域的平均产沙模数为 2 048.37 t/(km²·a)。

(2) 依据潜力的高低,将淤地坝的空间配置划分为 3 个情景。在 3 种情景下,流域整体拦沙潜力分别为 3.88%,10.56% 和 57.33%。情景 1,2,3 对应的单座淤地坝平均拦沙量分别为 1.85×10^4 t,1.53×10^4 t 和 1.04×10^4 t,单座淤地坝的拦沙能力主要受其控制流域的平均产沙模数和淤地坝自身的拦截效率等因素影响。该结果表明,合理的淤地坝空间配置能最大限度发挥其拦沙潜力,从而为流域未来的水土保持规划提供科学依据。

参考文献(References)

[1] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017,8:2013.

[2] 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.

[3] 王敏,刘志刚,张攀,等.黄河中游多沙粗沙区水土流失治理面临的关键问题与发展对策[J].中国水利,2023(10):42-45.
Wang Min, Liu Zhigang, Zhang Pan, et al. Key issues and development strategies of soil and water loss control in the abundant and coarse sediment area of the middle Yellow River [J]. China Water Resources, 2023(10): 42-45.

[4] 白璐璐,时鹏,李占斌,等.黄土高原梯田和淤地坝坡沟治理措施对产流产沙的协同效应[J].农业工程学报,2023,39(13):96-104.
Bai Lulu, Shi Peng, Li Zhanbin, et al. Synergistic effects of terraces and check dams on runoff and sediment yields in a slope-gully system in Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(13):96-104.

[5] Fan Rui, Fang Nufang, Zeng Yi, et al. Machine learning-assisted check dam planning on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2025,656:133015.

[6] 张泽宇,李占斌,朱记伟,等.基于径流侵蚀功率的次洪尺度淤地坝系淤积量估算研究[J].应用基础与工程科学学报,2026,34(2):475-486.
Zhang Zeyu, Li Zhanbin, Zhu Jiwei, et al. Research on event-scale sediment deposition estimation in check dam systems based on runoff erosion power [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2026,34(2):475-486.

[7] Zeng Yi, Jing Tongge, Xu Baodong, et al. Vectorized dataset of silted land formed by check dams on the Chinese Loess Plateau [J]. Scientific Data, 2024,11:348.

[8] 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.

[9] 刘晓燕,高云飞,马三保,等.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报,2018,49(2):145-155.

Liu Xiaoyan, Gao Yunfei, Ma Sanbao, et al. Sediment reduction of warping dams and its timeliness in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2):145-155.

[10] 郑明国.基于水沙关系框架的黄土区不同水保措施减沙贡献分割方法[J].农业工程学报,2020,36(7):173-183.
Zheng Mingguo. Partition of reducing sediment for various soil and water conservation measures of Loess Plateau in China based on runoff-sediment relationship [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(7):173-183.

[11] 蒋凯鑫,莫淑红,于坤霞,等.黄土高原地区淤地坝拦沙分析方法研究进展[J].水土保持学报,2023,37(6):1-10.
Jiang Kaixin, Mo Shuhong, Yu Kunxia, et al. Research progress on sediment retention analysis methods of Yudiba dams in the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(6):1-10.

[12] 张生,傅旭东,孙凯,等.数字流域模型淤地坝模块改进及减水减沙效益评估[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(2):301-313.
Zhang Ga, Fu Xudong, Sun Kai, et al. Improvement on the check-dam module in the digital Yellow River model and assessment of water and soil conservation benefits [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024,32(2):301-313.

[13] Zhao Guangju, Kondolf G M, Mu Xingmin, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2017,148:126-137.

[14] 张汉雄,邵明安,张兴昌.韭园沟流域坝系相对稳定的优化规划SD模型[J].人民黄河,2003,25(9): 23-25.
Zhang Hanxiong, Shao Ming'an, Zhang Xingchang. SD model of relative stable optimized plan for dam system of Jiuyuangou watershed [J]. Yellow River, 2003,25(9):23-25.

[15] 黎铭,张会兰,孟铖铖,等.皇甫川流域2000—2015年植被NDVI时空变化特征[J].林业科学,2019,55(8):36-44.
Li Ming, Zhang Huilan, Meng Chengcheng, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in Huangfuchuan basin from 2000 to 2015 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019,55(8):36-44.

[16] Wang Zhihui, Shi Xiaogang, Dou Shentang, et al. The 30 m land cover dataset for capturing land cover changes induced by ecological restoration from 1990 to 2022 on the Chinese Loess Plateau [J]. Scientific Data, 2025, 12:252.

[17] 殷水清,薛筱婵,岳天雨,等.中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J].农业工程学报,2019,35(9):105-113.
Yin Shuiqing, Xue Xiaochan, Yue Tianyu, et al. Spatiotemporal distribution and return period of rainfall erosivity in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(9):105-113.

[18] 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 Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002,22(6):705-711.

[19] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1571-1576.

[20] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. Transactions of the ASAE, 1994,37(6):1835-1840.

[21] Ferro V, Porto P. Sediment delivery distributed (SEDD) model [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2000,5(4):411-422.

[22] Davari M, Aghdam E A, Khaleghpanah N, et al. Assessing soil erosion and sedimentation in the Chehelgazi mountainous watershed, Iran, using GIS and RS [J]. Arabian Journal of Geosciences,2024,17(9):254.

[23] Gunnar M. Brune. Trap efficiency of reservoirs [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union,1953, 34(3):407-418.

[24] 张麟,高云飞,刘晓燕.基于坝前淤积厚度的淤地坝拦沙量计算方法[J].人民黄河,2023,45(12):113-116.
Zhang Lin, Gao Yunfei, Liu Xiaoyan. Calculation method of sediment retention of warping dam based on sediment thickness in front of dam [J]. Yellow River, 2023,45(12):113-116.

[25] Lu Ang, Tian Peng, Mu Xingmin, et al. Fuzzy logic modeling of land degradation in a Loess Plateau watershed, China [J]. Remote Sensing, 2022,14(19):4779.

[26] 蒲明芳,李天涛,裴向军,等.粉质土斜坡降雨侵蚀产沙过程及其动力学机制[J].工程地质学报,2025,33(3):987-1001.
Pu Mingfang, Li Tiantao, Pei Xiangjun, et al. Process of rainfall erosion and sediment yield on silty slope and its dynamic mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2025,33(3):987-1001.

[27] Li Erhui. Effects of extreme rainfall change on sediment load in the Huangfuchuan watershed, Loess Plateau, China [J]. Sustainability, 2024,16(17):7457.

[28] Luo Zeyu, Zhang Huilan, Pang Jianzhuang, et al. Coupling of SWAT and EPIC models to investigate the mutual feedback relationship between vegetation and soil erosion: A case study in the Huangfuchuan watershed, China [J]. Forests, 2023,14(4):844.