

北洛河流域生态环境变迁及对水资源和水沙关系的影响

韩双宝, 王 赛, 赵敏敏, 吴 玺, 袁 磊, 李海学, 李甫成, 马 涛, 李文鹏, 郑 焰

Ecological environmental changes and its impact on water resources and water-sediments relationship in Beiluo River Basin

HAN Shuangbao, WANG Sai, ZHAO Minmin, WU Xi, YUAN Lei, LI Haixue, LI Fucheng, MA Tao, LI Wenpeng, and ZHENG Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究

Improvement and application of a distributed hydrological model in karst regions

梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 陈爽, 黄奇波 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 60-67

白音诺尔铅锌矿区河流沉积物重金属的形态分布特征

Morphological characteristics of heavy metals in the river sediments in the Baiyinnuoer lead-zinc mining area

余楚, 张翼龙, 李剑锋, 吕敦玉 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 162-162

荒漠-湿地生态系统区盐渍土特征及空间变异性

Characteristics and spatial variability of saline soil in desert-wet ecosystem area, Gansu Province, China

魏玉涛, 刘德玉, 张伟, 喻生波, 吴耀坤 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 183-190

西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究

A comprehensive study of the maintaining mechanisms for hydrological cycle and ecological evolution and function in the northwest inland river basins of China

陈喜, 黄日超, 黄峰, 刘秀强, 张阳阳, 张润润 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 12-21

吉林省西部潜水资源与生态环境风险分析

Assessment of resources and ecological risks induced by groundwater utilization in the unconfined aquifer in the western Jilin Province: A case study in the Taoer River catchment

查恩爽, 肖霄 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 36-43

基于GSFLOW的青土湖生态输水量-湖水面面积关系研究

A study of the relationship between ecological water conveyance and water surface area of the Qingtu Lake based on GSFLOW

郭云彤, 周妍, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 32-41



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305018

韩双宝, 王赛, 赵敏敏, 等. 北洛河流域生态环境变迁及对水资源和水沙关系的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 14-24.
HAN Shuangbao, WANG Sai, ZHAO Minmin, *et al.* Ecological environmental changes and its impact on water resources and water-sediments relationship in Beiluo River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 14-24.

北洛河流域生态环境变迁及对水资源和水沙关系的影响

韩双宝^{1,2,3}, 王 赛¹, 赵敏敏¹, 吴 玺^{1,4}, 袁 磊¹, 李海学^{1,5}, 李甫成¹, 马 涛¹, 李文鹏⁶, 郑 焰²

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 南方科技大学环境工程与科学学院, 广东 深圳 518055; 3. 哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 湖北省地质局第一地质大队, 湖北 大冶 435000; 5. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430078; 6. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 黄土高原地区水土流失严重, 水资源短缺, 生态系统脆弱, 限制了该区域的社会和经济发展。针对人类活动将如何影响黄土高原水沙变化以及如何配置退耕还林还草面积的问题, 目前尚缺乏定量分析和研究。以黄土高原渭河流域北洛河流域为研究区, 分析了北洛河流域近 20 a 降雨、径流、水资源量、产沙量和归一化植被指数的时空变化, 建立了流域分布式水文模型, 定量评价了退耕还林还草对水资源和水沙关系的影响, 探索了不同决策条件下的最优退耕方案。结果表明: 流域水资源总量、径流量、地下水资源量和产沙量呈现递减趋势, 年均减少量分别为 $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.012 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $163 \times 10^4 \text{ t}$; 归一化植被指数和降水呈现递增趋势, 年均增加量分别为 0.006 4、 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$; 生态环境变化导致径流量和产沙量减少, 流域分布式水文模型模拟显示退耕还林还草或植被覆盖率增加会导致流域径流量和产沙量共同减少, 但产沙量的响应更为敏感; 综合考虑径流与产沙的影响, 基于多目标优化提出了退耕还林还草面积的优化配置建议, 最优退耕面积约为全部耕地面积的 28.1%。本研究可为黄土高原地区生态环境建设、水土保持、水沙资源的合理利用提供决策支持。

关键词: 生态环境; 水沙关系; 归一化植被指数; 分布式水文模型; 退耕还林还草; 北洛河流域

中图分类号: P641.6; X143

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0014-11

Ecological environmental changes and its impact on water resources and water-sediments relationship in Beiluo River Basin

HAN Shuangbao^{1,2,3}, WANG Sai¹, ZHAO Minmin¹, WU Xi^{1,4}, YUAN Lei¹, LI Haixue^{1,5}, LI Fucheng¹, MA Tao¹, LI Wenpeng⁶, ZHENG Yan²

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Baoding, Hebei 071051, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 3. Collage of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China; 4. The First Geological brigade of Hubei Geological Bureau, Daye, Hubei 435000, China; 5. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430078, China; 6. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2023-05-17; 修订日期: 2023-07-19

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221754; DD20230077)

第一作者: 韩双宝(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: hanshuangbao@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 王赛(1984-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源模拟。E-mail: wangsai@mail.cgs.gov.cn

Abstract: The Loess Plateau region is seriously affected by soil erosion, water scarcity, and fragile ecosystems, which severely hinder social and economic development in the region. There is currently a lack of quantitative analysis and research on how human activities will affect the changes in water and sediment on the Loess Plateau and how to allocate the areas for reforestation and grassland restoration. This study focuses on the Beiluo River Basin in the Loess Plateau, analyzing the spatiotemporal variations of precipitation, runoff, water resources, sediment yield and normalized difference vegetation index (NDVI) over the past 20 years. The study establishes a distributed hydrological model for the basin, quantitatively evaluates the impact of returning farmland to forests and grassland on water resources and sediment transport, and explores the optimal land retirement plan under different decision-making conditions. The results show that the total water resources, runoff, groundwater resources and sediment yield in the basin are decreasing, and the annual reductions are $7 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, and 1.6×10^4 tons respectively. While NDVI and precipitation is increasing, and the annual increases are 0.006 4 and $65 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively. The continuous increase in NDVI has resulted in a reduction in runoff volume and sediment transport. Returning farmland to forests and grassland or increasing vegetation density can reduce the amount of runoff and sediment transport, with sediment transport being more sensitive. Considering both the impact on runoff and sediment transport, based on multi-objective optimization, an optimal allocation proposal for the area of returning farmland to forest and grass is proposed. The optimal land retirement area is 28.1%. This study provides decision-making support for ecological environment construction, soil and water conservation, and rational utilization of water and sediment resources in the Loess Plateau region.

Keywords: ecological environment; water-sediment relationship; NDVI; distributed hydrological model; grain-for-green project; Beiluo River Basin

近几十年来,全球气候变化导致局地气温升高,降水减少,极端气象事件频发,给人们生产生活和社会经济的发展造成重大损失^[1]。人口增长、城市化进程加快、毁林开荒、工矿建设不注重环境保护等问题加剧了水资源供需的矛盾^[2]。有限的水资源量不仅要满足人类的生产生活用水,还要满足流域自身的生态需水。

北洛河为渭河的一级支流、黄河的二级支流,在陕西省境内长度最大。过去几十年的开荒耕种造成流域水土流失和土壤退化现象严重,北洛河流域成为黄河泥沙的主要产地之一^[3]。黄河流域是我国重要的生态屏障和核心经济带,黄河是世界上最为著名的多沙河流,因水少沙多,水沙关系不协调而成为世界上最复杂、最难治理的河流^[4-5]。近些年,北洛河进行了一些生态环境建设工作,例如在下游修建堤防、护岸,在上游进行了退耕还林工程等,提高了河床的稳定性,减缓了土壤侵蚀程度,减少了荒废土地的面积,恢复了植被覆盖^[6]。但流域水土流失仍然处于较为严重的程度^[3,7]。由于人口增加和经济发展需要,水资源供需矛盾加剧,生活用水、农业灌溉和采煤活动等使水资源供应日趋紧张^[8-10]。

目前,北洛河流域的研究大多集中在水沙变化和植被恢复等领域。薛帆等^[7]采用水文统计法对比分析了上、中、下游等不同地貌和植被类型区生态恢复对

水沙数量、径流调节、影响因素贡献等的影响及其差异;谢敏等^[11]采用 Pettitt 突变检验、双累积曲线等方法分析了流域降雨、径流和输沙的演变规律及土地利用变化特征;刘二佳等^[12]同样采用 Pettitt 突变检验探讨水土流失治理及大幅度退耕背景下流域水、沙等生态要素的演变规律;He 等^[13]利用线性回归分析、MK 检验等方法检测了北洛河的径流和泥沙输移的变化趋势,考察了在历史上不同气象条件下人类活动对径流和泥沙输移的影响。然而关于人类活动在未来将如何影响北洛河水沙变化,以及优化配置退耕还林还草面积,目前尚缺乏定量分析和研究。

本文以北洛河流域为典型研究区,利用流域气象、水文、水沙、地表水和地下水资源等数据,分析近 20 a 北洛河流域水资源的时空变化特征,利用归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)分析流域植被覆盖率演变进程及其格局变化特征,使用美国农业部的土壤和水资源评估工具(soil and water assessment tool, SWAT),建立了北洛河流域分布式水文模型,分析不同的人类干预情景下流域水土流失程度和径流量的变化,利用情景分析和优化算法对流域的土地利用方式和人类活动进行优化,探讨平衡北洛河流域水土流失治理与水资源利用之间矛盾的国土空间格局优化方案,可为黄土高原水土保持、生态环

境保护、水资源利用综合管理提供参考。

1 研究区概况

北洛河起源于榆林市定边县,初始流向为东南方,流经吴起县、志丹县,到甘泉县流向转为南方,再流经富县、洛川县、黄陵县、白水县、大荔县,最终在关中平原汇入渭河(图 1)。北洛河河道全长 680 km。流域大部分在陕西省,上游部分地区在甘肃省,流域面积 26 900 km²。出口控制性水文站为状头水文站,集水面积 25 645 km²。

北洛河多年平均径流量为 $9.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。8 月经流量最大,1 月经流量最小。上游夏季径流占比最大,其他季节的径流占比较小;下游夏季径流占比较上游减少,但比重仍为全年最大。北洛河泥沙含量较大,产沙能力非常高,年输沙总量可达亿吨,占陕西省全年产沙量的 12%。产沙量年内分配与降雨径流高度相关,集中于雨季汛期,夏季产沙量占全年输沙总量的 90% 以上。

北洛河流域地形总体上西北高、东南低,包括上游黄土丘陵沟壑区、中游黄土高原沟壑区和下游关中盆地黄土阶地地貌。流域气候是典型的大陆季风性气候,气候在空间分布上有较大差异,气温和降水量均呈东南高、西北低的趋势。流域年降水量为 454.10 ~ 709.20 mm,年均气温为 7.10 ~ 15.60 ℃。

北洛河流域植被类型差异较大,东南部为森林带和森林草原带,西北部为单一的草原带,流域内植被

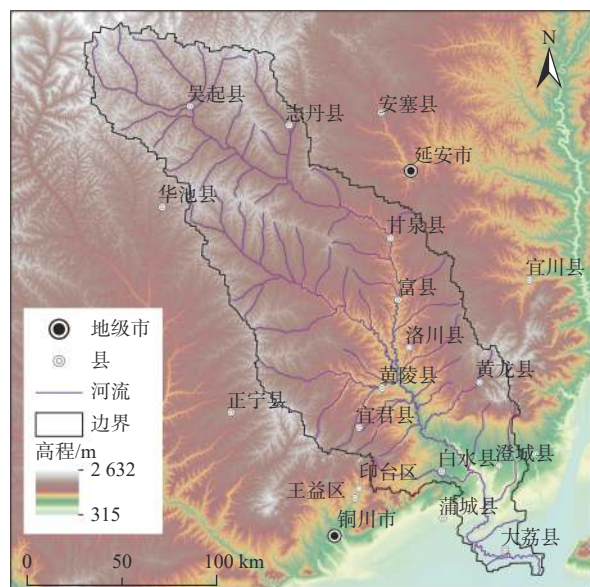


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

类型多样,植被覆盖较好,已形成良好的植物生态系统。

流域内地表以黄土覆盖为主,除洛川塬等黄土塬外,黄土大多透水不含水。土壤呈地带性分布,土壤类型包括黄绵土、褐土、垆土、水稻土、风沙土、红黏土等。

北洛河是流域内地下水的排泄面,大部分河段是地下水补给地表水。北洛河沿着河道方向依次切割碎屑岩裂隙孔隙含水层系统、碳酸盐岩岩溶含水层系统、松散孔隙含水层系统,各含水层被弱透水层分隔,水力联系不强。北洛河流域水文地质剖面图如图 2 所示。

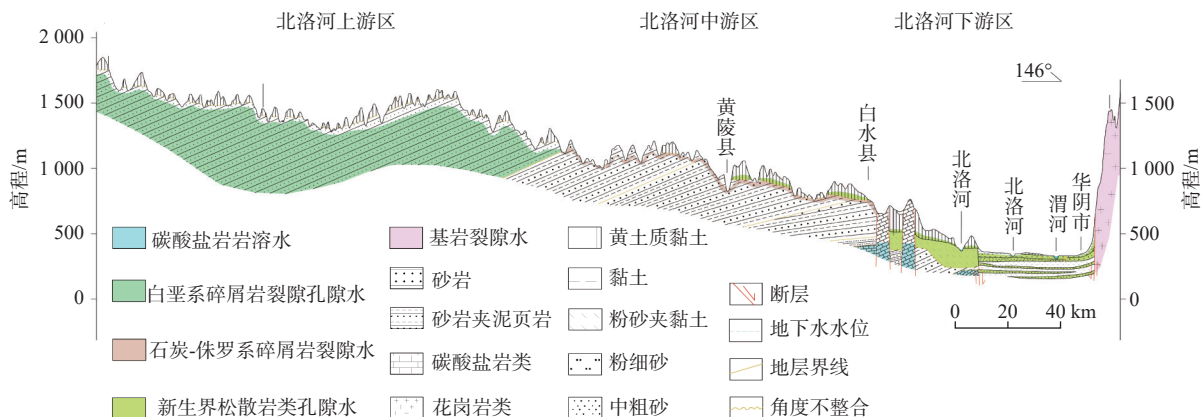


图 2 北洛河流域水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile of Beiluo River Basin

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

(1) MK 趋势检验法

Mann-Kendall(MK)趋势检验法^[13-14]主要用于检

验数据的趋势变化,主要特点是人为主观影响性小,定量化程度高。MK 趋势检验法应用非常广泛^[15-17],分析目标主要是基于时间序列的数据。MK 趋势检验法的计算方法如下:

设需要检验趋势性的时间序列数据为 $x_i (i=1, 2, \dots,$

$n, n \geq 10$), 计算其检验统计量(S):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n Sgn(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$Sgn(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k > 0) \\ 0 & (x_j - x_k = 0) \\ -1 & (x_j - x_k < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Sgn()$ ——符号函数。

为方便对比, 将 S 进行标准化得到 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (3)$$

对 Z 进行双边检验, 以验证 x 的趋势性。给定显著性水平 α , 当 $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表示序列没有显著的变化趋势; 当 $Z < -Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表明该序列有显著的下降趋势; 当 $Z > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表明该序列有显著的上升趋势。置信度分别取 90%、95% 和 99% 时, 需要 $|Z|$ 大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时, 才能表明序列有显著的变化趋势。本文的置信度选择 95%。

本文采用 Sen 斜率法对归一化植被指数的变化程度进行评估。Sen 斜率法将时间变化序列数据在一定时段变化率的中值作为时段的变化趋势, 避免因数据缺失或异常值造成的影响^[18], 其计算公式为:

$$\beta_i = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (\forall j > i) \quad (4)$$

其中, $1 < j < i < n$; β 为时间序列数据的 Sen 斜率, 正值表示增长, 负值表示减小。

(2) SWAT 模型

流域的大气-水文-土壤循环过程, 可以通过分布式水文模型得到较好的反映, 分布式水文模型也能体现降雨、产汇流等在时空上的差异性, 从而提高模拟结果的合理性, 成为流域水文模拟研究的有力工具。SWAT 目前受到广大水文研究者的重视, 并被广泛应用于各种流域水资源管理、水环境管理等水文研究中。SWAT 模型^[19]是美国农业部开发出的用于流域尺度研究的分布式水文模型。该模型的核心是基于水量平衡方程, 而非微分方程。模型最小的模拟单位是水文响应单元(hydrological response unit, HRU), 无需进行网格划分。SWAT 模型在国内外被大范围的应用, 模拟结果显示, 模型无论是对山区产汇流还是

平原水文过程都具有很强的普适性^[20-25]。

SWAT 模型的模拟过程主要包括 2 个阶段: 地表水和泥沙、污染物的循环过程, 以及地表水和泥沙、污染物的迁移过程。第 1 阶段主要模拟水和泥沙、污染物的产生和汇集过程。以子流域为计算范围, 以 HRU 为计算单元, 各种物质在气候、土地利用类型、植被、土壤等条件的影响下, 产生并相互影响, 最终汇入河道。第 2 阶段主要模拟水和泥沙、污染物在河道、湖泊、水库等水体的迁移转化的过程。主要利用圣维南方程和水流平衡方程进行计算。这个阶段利用上一个阶段计算出的河道中的水和泥沙、污染物等变量, 演算地表水网络包括流域出口的负荷情况。

本文采用 PEST 自动调参^[26], 调参目标是最大化模拟结果的纳什系数。纳什系数是检验模拟结果与观测结果吻合度的指标, 纳什系数最大是 1, 最小为负无穷。纳什系数越高, 表明模型模拟结果越接近观测结果。

2.2 数据来源

本研究采用的归一化植被指数遥感数据来源是中科院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(网址 <http://www.gscloud.cn>), 空间精度为 250 m, 为月合成产品。

气象数据采用国家气象科学数据中心(网址 <http://data.cma.cn/>)的北洛河流域及其周边 6 个基础气象站(吴旗、洛川、耀县、定边、延安、西峰镇)2000—2020 年的逐日降水、气温资料。

地面数字高程(digital elevation model, DEM)数据使用美国地质调查局 30 m SRTM 数据(Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global)。SRTM 数据相比原有 90 m 分辨率的数据已得到增强, 填充了缺失数据的区域, 提供分辨率为 1"的数字高程数据, 覆盖全球。

土壤类型数据使用南京土壤所的中国 1:100 万土壤空间数据, 包含土壤分层情况和理化性质。这是中国在丰富的野外工作和室内分析数据基础上编成的第一套 1:100 万土壤图, 也是到目前为止最为详细的全国性土壤图。土地覆盖数据使用中国科学院全国土地利用数据, 数据精度 1:10 万。

径流、水资源量等数据来自陕西省和甘肃省的水资源公报。数据时间范围为 2005—2015 年, 时间精度为逐月数据。

本研究沿北洛河干流进行了水位测量和取样工作, 测量河水水位 68 组, 地下水水位 269 组。

3 结果

3.1 生态水文特征及演变

(1) 生态水文变化

北洛河流域 2000—2020 年降水径流、水资源量、归一化植被指数、泥沙的变化如图 3 所示。本次研究进行了回归分析的 P 值检验, 主要分析自变量与因变量的相关性是否显著, P 值越小, 相关性越显著。从图 3(a)(b)降水、径流和水资源量的变化可以看出, 降水呈现较为显著的上升趋势, 斜率的 P 值为 0.43, 平均每年上升 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$; 地表水资源量(径流)、地下水水资源量呈现不显著的下降趋势, 斜率的 P 值为

0.8, 0.7, 年均减少量分别为 0.010×10^8 , $0.012 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水资源总量呈现较为显著的下降趋势, 斜率的 P 值为 0.3, 平均每年下降 $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000—2020 年流域平均径流量为 $6.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 较多年平均值减少了 26.3%。

从图 3(c)归一化植被指数变化趋势可以看出, 流域平均归一化植被指数值呈现显著的上升趋势, 斜率的 P 值为 6.6×10^{-8} , 显著性非常高, 平均每年上升 0.006 4。这表明流域总体植被覆盖率呈显著上升趋势。

从图 3(d)产沙量的变化趋势可以看出, 产沙量呈现显著的下降趋势, 斜率的 P 值为 0.005 7, 显著性非常高, 平均每年下降 $163 \times 10^4 \text{ t}$ 。但泥沙的显著下降时期为 2000—2006 年, 从 2007 年开始, 泥沙产量趋于平稳。

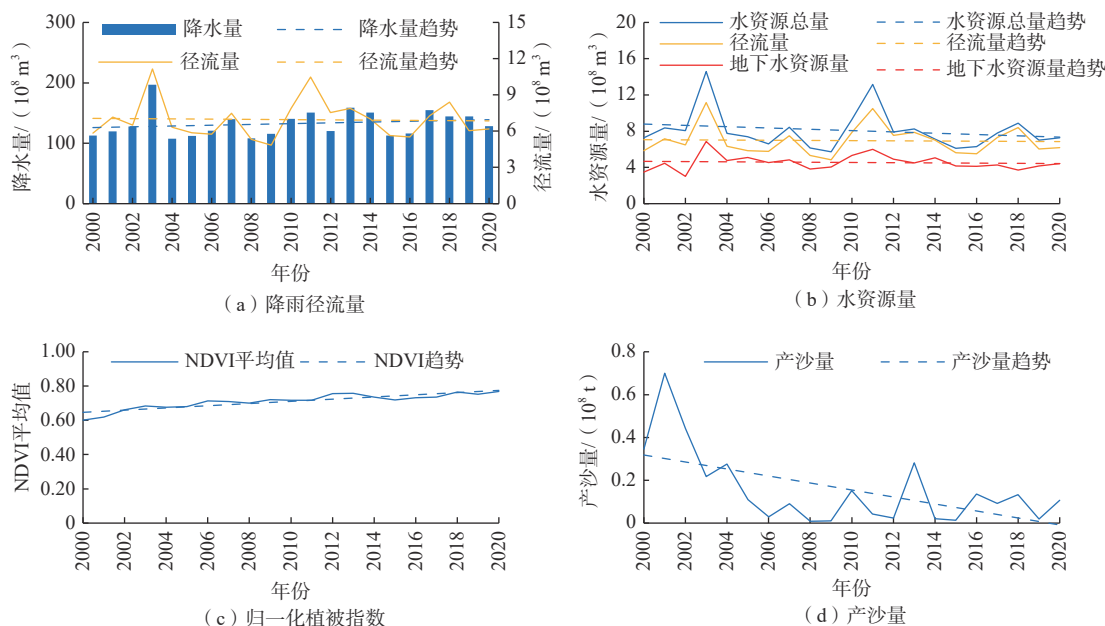


图 3 北洛河流域降水径流、水资源量、归一化植被指数、产沙量的趋势图

Fig. 3 The change trends of precipitation, runoff, water resources quantity, NDVI and sand in Beiluo River Basin

(2) 植被覆盖演变

对 2000—2020 年北洛河流域年度归一化植被指数数据进行 Sen 斜率法分析, 并进行了 MK 趋势检验, 结果见图 4。北洛河流域 79.26% 的区域归一化植被指数呈现显著增长趋势, 其中 60.20% 的区域归一化植被指数呈现轻度增长趋势(归一化植被指数年均增长量 < 0.01), 主要分布在北洛河发源地及中游地区, 19.06% 的区域归一化植被指数呈现中度增长趋势(归一化植被指数年均增长量 > 0.01), 主要分布在北洛河流域上游; 19.37% 的区域归一化植被指数未呈显著性的变化趋势, 主要分布在中下游区域; 仅有 1.37% 的区域在人类活动的影响下归一化植被指数呈现显著下降趋势, 主要分布在北洛河流域下游地区。

3.2 SWAT 模型模拟结果

北洛河流域 SWAT 模型建模面积共 $26\,924 \text{ km}^2$, 共分为 97 个子流域, 601 个水文响应单元。模拟时间为 2000—2020 年。其中 2000—2004 年为预热期, 2005—2015 年为校正期。2016—2020 年为验证期。流域子流域划分情况见图 5。

对模型植被类型、植被覆盖率、土壤类型、土壤渗透率、最大蒸发深度、最大毛管水容量、冠层雨雪截留量等参数逐一校正, 通过敏感性分析, 选出最敏感的参数, 然后进行调整。使用 LH-OAT 方法分析 SWAT 模型, 对与径流有关的 26 个参数进行分析, 得到的前 10 位参数敏感性, 见表 1。

经过模型调参, 流域下游的控制水文站状头站

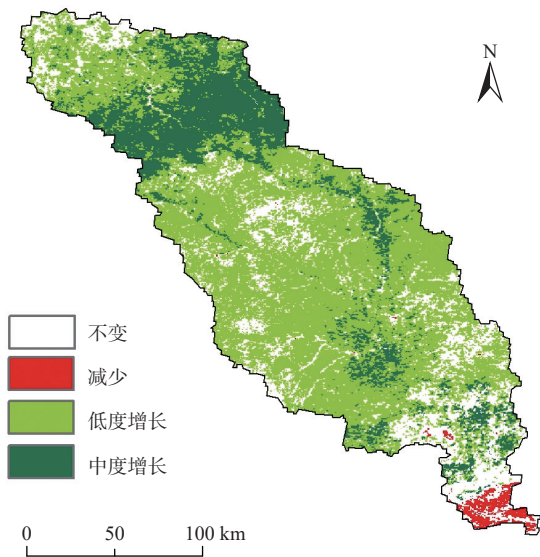


图 4 北洛河流域归一化植被指数演变趋势

Fig. 4 The evolution trend of NDVI in Beiluo River Basin

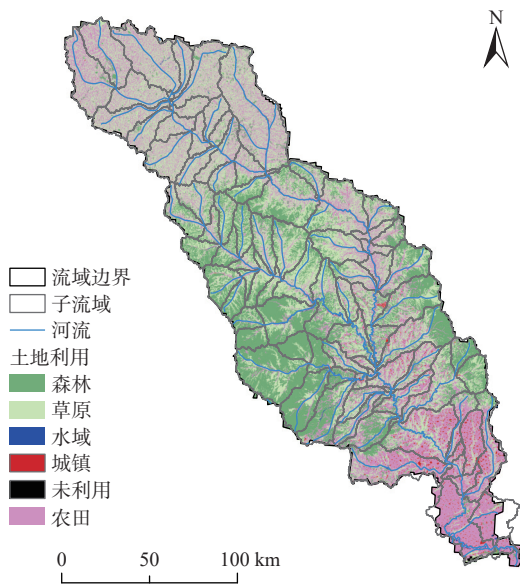


图 5 北洛河流域子流域划分、数字河道分布及土地利用类型

Fig. 5 Sub-basin division, digital river distribution and land use in Beiluo River Basin

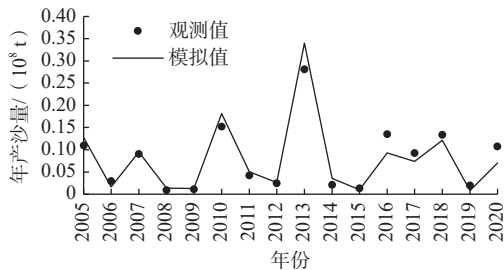
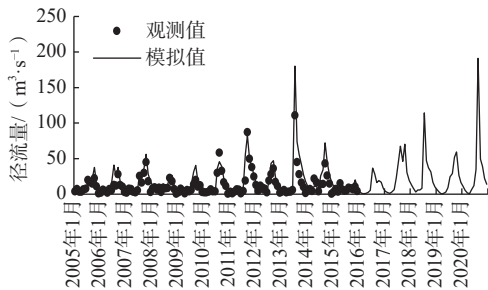


图 6 状头水文站径流量、产沙量模拟曲线

Fig. 6 Simulation curve of runoff and sediment for Hydrological Station Zhuangtou

表 1 北洛河流域 SWAT 模型敏感参数

Table 1 Sensitivity parameters in the SWAT model for Beiluo River Basin

参数	物理意义	取值
CN2	SCS径流曲线系数	35 ~ 98
Alpha_BF	基流衰退系数	0 ~ 1
GWQMN/mm	浅层地下水补给深度	0 ~ 5 000
ESCO	土壤蒸发补偿系数	0 ~ 1
SOL_K/(mm·h ⁻¹)	土壤饱和导水率	0 ~ 2 000
CANMX/mm	最大冠层蓄水量	0 ~ 100
REVAPMN/mm	浅层地下水蒸发深度	0 ~ 500
GW_REVAP	地下水蒸发系数	0.02 ~ 0.20
Sol_Z/mm	土壤深度	0 ~ 3 500
Sol_Awc	土壤可利用水量	0 ~ 1

的月流量模拟值如图 6 所示。由于人类活动数据(水库、灌溉等)较难准确获取,模拟值与观测值有差别。调参得到的纳什系数为 0.83, 总体能够满足水资源优化配置的需求, 表明 SWAT 模型在北洛河流域具有良好的适用性。在径流模拟的基础上, 对流域泥沙产量进行模拟和校正。使用 2005—2015 年状头站的年泥沙产量进行校正, 2016—2020 年进行验证。泥沙年产量的纳什系数为 0.90, 可以满足水沙关系模拟的需求。

(1)退耕还林还草对水沙关系的影响

通过情景分析的方法, 设定不同的变化条件, 分析不同情景模式下北洛河流域径流量和产沙量的变化趋势, 定量计算各种措施对流域产水产沙的影响。设置的情景包括森林郁闭度和草地覆盖率的变化以及退耕还林还草, 见表 2。

情景模式 A1 为维持现有的土地利用配置不变, 改变森林的郁闭度。情景模式 A2 为维持现有土地利用配置不变, 改变草地覆盖率。林草郁闭度或覆盖率是指林草覆盖面积与地表面积的比例。由于缺少覆盖率的准确数据, 建模时使用统一的重度覆盖率 0.3。A1-1 至 A1-4 分别代表森林郁闭度减少 50% 和

表 2 不同情景模式特征

Table 2 Mode characteristics under different scenarios

情景模式	主要特征	变化量/%
A1	森林郁闭度变化	-50, -25, +25, +50
A2	草地覆盖率变化	-50, -25, +25, +50
B1	耕地变为森林	25, 50, 75, 100
B2	耕地变为草地	25, 50, 75, 100

25%, 增加 25% 和 50%。A2-1 至 A2-4 分别代表草地覆盖率减少 50% 和 25%, 增加 25% 和 50%。选择径流量较大的年份 2013 年为基准年。经过计算, 基准年与 8 种情景下状头站径流量和产沙量见图 7(a)。情景模式 B1 为退耕还林, 情景模式 B2 为退耕还草。B1-1 至 B1-4 分别代表耕地面积的 25%、50%、75%、100% 变为森林; B2-1 至 B2-4 分别代表耕地面积的 25%、50%、75% 和 100% 变为草地。一般认为坡度 $[0^\circ, 5^\circ]$ 的平缓地区水土流失微弱, $(5^\circ, 10^\circ]$ 为中度侵蚀, $(15^\circ \sim 20^\circ]$ 为强烈侵蚀。在选择退耕位置时, 优先选择坡度较大的耕地。经过计算, 基准年(2013 年)及情景模式 B 不同情景下状头站的径流量和产沙量见图 7(b)。两种情景模式的径流量和产沙量均为 2013 年全年的径流量和产沙量。

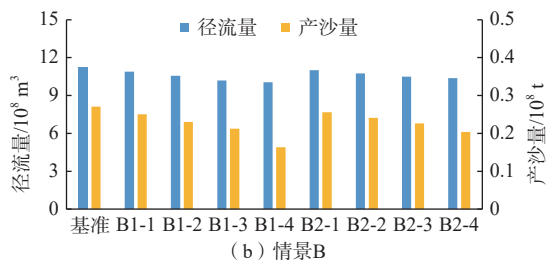
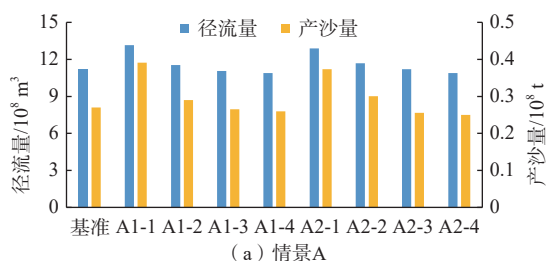


图 7 不同情景下状头站年径流量与产沙量柱状图

Fig. 7 Annual runoff and sediment yield in Hydrological Station Zhuangtou under different scenarios

(2) 退耕还林面积优化配置

为缓解流域内水土流失和水沙矛盾等严重问题, 对流域内森林、草原、农田、城市和未利用地 5 种土地利用类型的空间配置进行优化, 以达到优化产流产沙量的目标。优化方式为寻找最佳退耕还林的面积比例。配置原则为尽量少地改变现有的土地利用格

局, 以使方案有可操作性。因此同情景 B 的操作模式相同, 退耕优先选择坡度大的耕地。

优化目标为产流分数与产沙分数加权求和最大:

$$\max(G_T) = \omega_q G_q(Q(x)) + \omega_s G_s(S(x)) \quad (5)$$

式中: G_T ——总分值;

G_s ——产沙分值;

G_q ——产流分值;

Q ——径流量/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$;

S ——产沙量/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$;

ω_q ——产流权重;

ω_s ——产沙权重;

x ——退耕坡度/ $(^\circ)$ 。

产流越多越好, 产沙越少越好, 为平衡二者关系, 使用二次效用函数计算分值。在基准年情况下, 径流量 $Q_{\max}$, 分数设为 1, 产沙量 $S_{\max}$, 分数设为 0; 在最大限度退耕还林的情况下, 径流量 $Q_{\min}$, 分数设为 0, 产沙量 $S_{\min}$, 分数设为 1; 产流、产沙分数都设为 0~1 之间的二次函数形式, 二者加权求和, 即为总分。优先选择总分最高的情景。

$$G_q = 1 - \frac{(Q(x) - Q_{\max})^2}{(Q_{\min} - Q_{\max})^2} \quad (6)$$

$$G_s = 1 - \frac{(S(x) - S_{\min})^2}{(S_{\min} - S_{\max})^2} \quad (7)$$

经统计, 北洛河流域耕地的 HRU 最高坡度为 23.6° 。依次计算坡度 $1^\circ \sim 23^\circ$ 的耕地实施退耕还林后的径流量和产沙量。在给定不同权重比例的情况下分析最优的退耕还林措施。权重比例定义为产沙分数权重与产流分数权重的比值。计算结果见图 8。

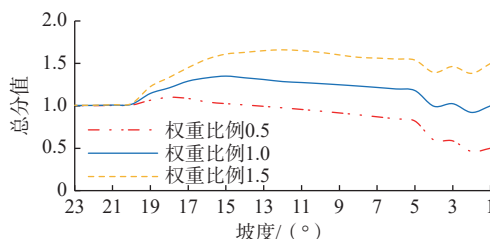


图 8 不同坡度、不同权重下退耕还林分值曲线

Fig. 8 Score curve of return farmland to forest with different slopes and weights

不同权重下, 需要退耕还林的耕地分布如图 9 所示。

4 讨论

4.1 生态水文指标变化原因

一般情况降雨增加会导致径流的增加, 北洛河

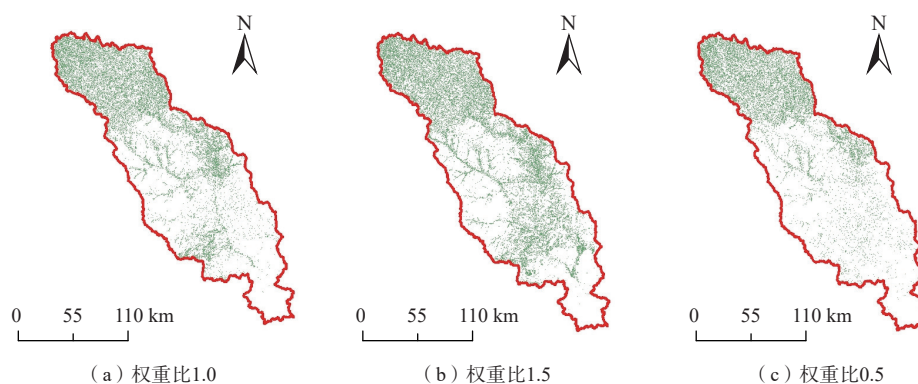


图9 不同权重比的退耕还林的耕地分布

Fig. 9 Distribution of return farmland with different weights ratio

流域近 20 a 的数据与此趋势相反, 这表明不只是降雨, 还有其他因素影响了北洛河流域降水与径流的关系。对 6 个气象站的年平均气温进行回归分析, 气温随年份的变化斜率的 P 值为 0.96, 非常不显著, 这表明年平均气温的影响可以忽略。北洛河流域干流地表水大部分地区接受地下水的补给^[27], 而地下水资源量在逐年减少, 这可能是径流量减少的一个原因。径流量、地下水资源量和水资源总量同时减少是由于近 20 a 的植被覆盖率显著上升、植被的保水作用和蒸散发量持续增加^[28-30], 同时区域内供水量增加可能加剧了这一过程。图 3(c) 平均归一化植被指数值的变化曲线和图 4 中归一化植被指数空间变化趋势佐证了这个观点。产沙量呈现下降趋势, 与归一化植被指数的增加和径流的减少相吻合。长周期流域径流变化研究也表明, 人类活动影响是北洛河产沙量减少^[31]、径流量减少和突变的关键因子^[32]。总体来看, 2000—2020 年北洛河流域归一化植被指数呈现增长趋势, 植被覆盖率增加会导致流域水热平衡向水分减少、能量增加的方向转化。植被覆盖率如果持续增加, 会造成表层土壤水分下降、径流量减少等不利影响, 造成干旱型缺水。因此, 需要对退耕还林等植被恢复工程的生态效应进行深入研究。

北洛河的归一化植被指数在稳定持续地增加, 相应的泥沙产量在减少, 这体现了北洛河流域在泥沙治理方面取得了一定的成效。但 2007 年产沙量开始稳定, 并没有随着归一化植被指数的增加而变化, 没有完全发挥植被的固沙作用。这表明到 2007 年流域产沙量已经下降到一个动态波动的平稳期, 已经没有太多下降空间, 单纯的增加植被密度无法进一步减少泥沙, 植被覆盖率的增加位置需要进行优化, 利用模型开展流域土地利用优化配置工作改善这种状况。因

此, 本文利用 SWAT 模型模拟流域产沙和植被的固沙作用, 并对退耕还林的位置和面积进行了优化。SWAT 模型适用于基岩山区和岩溶区域^[33], 可用于本区域的研究。

4.2 林草覆盖率对水沙的影响

根据模型结果(图 7), 随着林草植被覆盖率的增加, 径流量与产沙量均呈现下降趋势, 与观测趋势相符, 这体现了森林和草地的保水固沙作用。改变林草覆盖率对产沙的影响要大于径流的影响, 产沙量对植被的响应程度更大。通过比较 4 个增加覆盖率的情景可知, 在中等覆盖率的基础上再增加林草覆盖率, 对径流产沙起到的影响较小; 4 个减少覆盖率的情景对径流产沙的影响较大, 尤其是减少 50% 覆盖率的情景下, 径流量分别增加了 17.3%(森林)和 15%(草地), 产沙量分别增加 44.6%(森林)和 38.2%(草地)。随着退耕还林和还草面积增加, 径流量与产沙量均呈下降趋势, 还林比还草下降趋势更大。同情景 A 一样, 退耕对产沙量的影响要大于对径流量的影响, 即使退耕面积达到 100%, 流量的减少量也在 10% 以内, 但产沙量的减少量达到 40%(退耕还林)和 25%(退耕还草)。

4.3 退耕还林面积

注意到情景 B 中单纯增加林草覆盖率的情景并不能显著降低产沙量, 这与产沙量的观测数据(图 3d)相吻合。北洛河的平均归一化植被指数值(图 3c)已经非常高, 想要降低产沙量需要进行退耕还林。但考虑到我国粮食安全问题, 需要设置一个最优的退耕面积。本文综合考虑了水的价值与降低产沙量的价值, 依照一定的规则对退耕面积进行优化。根据优化结果(图 8), 权重比例 0.5 条件下, 比较重视径流量的增加, 总分最大值出现在 18°, 即坡度 18°以上的耕地全部退耕还林, 面积约占全部耕地面积的 20%; 权重比

例 1.5 的情景下, 比较重视产沙量的减少, 总分最大值出现在 12° , 即坡度 12° 以上的耕地全部退耕还林, 面积约占全部耕地面积的 52.6%; 权重比例 1.0 的情况下, 径流量的增加和产沙量的减少同等重视, 总分最大值出现在 15° , 即坡度 15° 以上的耕地全部退耕还林, 面积约占全部耕地面积的 28.1%。坡度是影响土壤侵蚀的主要原因之一^[34], 流域内有 28.1% 的耕地坡度大于 15° , 52.6% 的耕地坡度大于 12° 。这些大坡度的耕地是土壤侵蚀和泥沙的主要发源地^[35]。因此退耕优先考虑这些耕地。如图 9(a) 所示, 在综合考虑径流量和产沙量的前提下, 退耕的位置位于上游以及中游坡度大于 15° 的耕地。把不适宜耕种的坡地退下来栽种经济林木的收益远大于粮食作物的收益^[28]。本文的退耕还林策略具备经济可行性和生态可行性。

模型的优化结果仅就径流量与产沙量进行分析, 未综合考虑退耕还林的粮食成本与生态价值, 也未对效用函数的合理性进行分析。下一步工作可针对径流和水土流失的社会、生态和经济效益进行评估提出合理的效用函数, 并且加入成本估算, 以使计算结果更可靠更具备社会价值。

5 结论

(1) 采用回归分析法分别对北洛河流域降水径流量、水资源量、产沙量序列和归一化植被指数数据进行了趋势性分析。结果表明 2000—2020 年流域水资源总量呈现较为显著的递减趋势, 平均每年减少 $0.07 \times 10^8 \text{ m}^3$; 径流量和地下水水资源量呈现不显著的递减趋势, 年均减少量分别为 0.01×10^8 , $0.012 \times 10^8 \text{ m}^3$; 降水呈现较为显著的递增趋势, 平均每年上升 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000—2020 年流域平均径流量为 $6.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 较多年平均值减少了 26.3%。流域平均归一化植被指数值呈现显著上升趋势, 平均值每年上升 0.006 4; 产沙量呈现显著减少趋势, 平均每年减少 $163 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(2) 采用 Sen 斜率法分析和 MK 趋势检验对流域归一化植被指数空间分布进行趋势分析, 结果表明, 流域归一化植被指数总体呈现增长趋势, 79.26% 的区域归一化植被指数呈现显著增长趋势, 仅有 1.37% 的区域在人类活动的影响下归一化植被指数呈现显著下降趋势。

(3) 应用 SWAT 模型计算改变植被覆盖率和退耕还林还草情景下径流产沙的变化趋势。结果表明随着森林郁闭度或草地覆盖率的增加, 径流量与产沙量均呈下降趋势, 减少 50% 植被覆盖率的情景下, 径流

量分别增加 17.3%(森林)和 15%(草地), 产沙量分别增加 44.6%(森林)和 38.2%(草地)。随着林草地的面积增加, 径流量与产沙量均呈下降趋势, 退耕达到最大值 100% 的情景下, 流量的减少量在 10% 以内, 产沙量的减少量达到 40%(退耕还林)和 25%(退耕还草)。

(4) 本研究对流域内土地利用的空间配置进行优化, 以达到优化径流产沙量的目标。优化方式为寻找最优退耕还林面积。根据优化结果, 当产沙分数权重与径流分数权重的比值为 0.5 时, 重视径流效果, 坡度 18° 以上的耕地全部退耕还林, 最优退耕面积约为全部耕地面积的 20%; 当权重比 1.5 时, 重视产沙效果, 坡度 12° 以上的耕地全部退耕还林, 最优退耕面积约为 52.6%; 权重比 1.0 时, 两者重视程度相同, 坡度 15° 以上的耕地全部退耕还林, 最优退耕面积约为 28.1%。

参考文献 (References) :

- [1] 王明玮, 温跃修, 严登华, 等. 黄河流域未来极端气候事件变化趋势评估 [J]. 人民黄河, 2023, 45(2): 33 – 37. [WANG Mingwei, WEN Yuexiu, YAN Denghua, et al. Assessment of future trends of extreme climate events in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2023, 45(2): 33 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识 [J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303 – 310. [ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303 – 310. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 秦伟, 朱清科, 刘广全, 等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应 [J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1325 – 1332. [QIN Wei, ZHU Qingke, LIU Guangquan, et al. Regulation effects of runoff and sediment of ecological conservation in the upper reaches of Beiluo River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1325 – 1332. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测 [J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607 – 616. [YAO Wenyi, RAN Dachuan, CHEN Jiangnan. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 607 – 616. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析 [J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1070 – 1078. [ZHAO Guangju, MU Xingmin, TIAN

- Peng, et al. The variation trend of streamflow and sediment flux in the middle reaches of Yellow River over the past 60 years and the influencing factors[J]. *Resources Science*, 2012, 34(6): 1070 – 1078. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 闫瑞, 张晓萍, 李够霞, 等. 基于 RUSLE 的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 32 – 37. [YAN Rui, ZHANG Xiaoping, LI Gouxia, et al. Soil erosion and sediment yield assessment based on RUSLE in Beiluo River on the loess plateau, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 32 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 薛帆, 晁智龙, 何亮, 等. 近 70 年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应 [J]. *生态学报*, 2023, 43(8): 3247 – 3260. [XUE Fan, CHAO Zhilong, HE Liang, et al. Hydrologic and sediment responses to ecological restoration in different geomorphological and vegetation type areas in past 70 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(8): 3247 – 3260. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 马禹锟. 北洛河下游水资源情况及分析 [J]. *陕西水利*, 2017(6): 3 – 4. [MA Yukun. Analysis of water resources situation in the lower reaches of Beiluo River[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2017(6): 3 – 4. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 薛亚莉. 对北洛河水资源开发利用的调查与思考 [J]. *陕西水利*, 2010(2): 21 – 24. [XUE Yali. Investigation and thinking on the development and utilization of Beiluo River water resources[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2010(2): 21 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张翔, 李慷. 基于主成分分析的北洛河水质时空分布特征及污染源解析 [J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 153 – 160. [ZHANG Xiang, LI Su. Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Beiluo River and pollution sources based on principal component analysis[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4): 153 – 160.]
- [11] 谢敏, 张晓明, 赵阳, 等. 北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(1): 39 – 44. [XIE Min, ZHANG Xiaoming, ZHAO Yang, et al. The mechanism of response of runoff and sediment yield to precipitation and LUCC in Beiluohe River Basin[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2019, 17(1): 39 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘二佳, 张晓萍, 谢名礼, 等. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响——以北洛河上游为例 [J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 622 – 629. [LIU Erjia, ZHANG Xiaoping, XIE Mingli, et al. Hydrologic responses to vegetation restoration and their driving forces in a catchment in the Loess hilly-gully area: a case study in the upper Beiluo River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 622 – 629. (in Chinese with English abstract)]
- [13] HE Yi, WANG Fei, TIAN Peng, et al. Impact assessment of human activities on runoff and sediment of Beiluo River in the Yellow River based on paired years of similar climate[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(1): 121 – 135.
- [14] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245 – 359.
- [15] MCLEOD A I. Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test[J]. *R Package Kendall*, 2005, 602: 1 – 10.
- [16] HAMED K H, RAMACHANDRA RAO A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/2/3/4): 182 – 196.
- [17] HE Yi, SONG Jinxi, HU Yiyi, et al. Impacts of different weather conditions and landuse change on runoff variations in the Beiluo River Watershed, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101674.
- [18] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379 – 1389.
- [19] NEITSCH S, ARNOLD J, KINIRY J, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. Texas Water Resources Institute, 2011.
- [20] GASSMAN P W, REYES M R, GREEN C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(4): 1211 – 1250.
- [21] LEMMA H, FRANKL A, VAN GRIENSVEN A, et al. Identifying erosion hotspots in Lake Tana Basin from a multisite soil and water assessment tool validation: Opportunity for land managers[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(12): 1449 – 1467.
- [22] BAKER T J, MILLER S N. Using the soil and water assessment tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 100 – 111.
- [23] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2004, 28(2): 22 – 26. [HUANG Qinghua,

- ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River Basin, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2004, 28(2): 22 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1559 – 1567. [GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1559 – 1567. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 255 – 264. [CAO Can, SUN Rui, WU Zhixiang, et al. Responses of streamflow to climate change in upstream of nanduijiang river basin based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 255 – 264. (in Chinese with English abstract)]
- [26] DOHERTY J E, HUNT R J. Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration[M]. Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2010.
- [27] 吴玺, 韩双宝, 李海学, 等. 鄂尔多斯盆地北洛河上游河水基流来源的识别 [J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(10): 161 – 168. [WU Xi, HAN Shuangbao, LI Haixue, et al. Identification of base flow source of the upper reaches of Beiluo River in Ordos Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(10): 161 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 邸利, 孙鹏举, 周莉. 甘肃省坡耕地退耕的可行性与退耕还草的必要性分析 [J]. 青海草业, 2003, 12(2): 12 – 16. [DI Li, SUN Pengju, ZHOU Li. Feasibility analysis of returning cultivated land of sloping cultivated and necessity analysis of returning cultivated land to grassland in Gansu Province[J]. Qinghai Prataculture, 2003, 12(2): 12 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王凯利, 王志慧, 肖培青, 等. 气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 166 – 172. [WANG Kaili, WANG Zhihui, XIAO Peiqing, et al. Assessment on the impact of climate and the changes of underlying surface on the evapotranspiration in the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 166 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 周志鹏, 孙文义, 穆兴民, 等. 2001—2017 年黄土高原实际蒸散发的时空格局 [J]. 人民黄河, 2019, 41(6): 76 – 80. [ZHOU Zhipeng, SUN Wenyi, MU Xingmin, et al. Temporal and spatial pattern of actual evapotranspiration in the Loess Plateau from 2001 to 2017[J]. Yellow River, 2019, 41(6): 76 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 鲁俊, 朱信华, 崔振华, 等. 北洛河流域水沙特性与变化原因 [J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 20 – 24. [LU Jun, ZHU Xinhua, CUI Zhenhua, et al. Characteristics of flow and sediment of Beiluo River Basin and cause of its variation[J]. Yellow River, 2018, 40(3): 20 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 谢剑, 高鹏, 穆兴民, 等. 近 80 年来北洛河流域径流变化特征及其归因分析 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 122 – 128. [XIE Jian, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Variation characteristics of runoff in Beiluo River Basin over the past 80 years and its attribution analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 122 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 梁桂星, 覃小群, 崔亚莉, 等. 分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 60 – 67. [LIANG Guixing, QIN Xiaoqun, CUI Yali, et al. Improvement and application of a distributed hydrological model in Karst regions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 60 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 郭娇, 石建省, 叶浩, 等. 基于 RS 与 GIS 的麻地沟土壤侵蚀及其生态环境效应研究 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(5): 92 – 97. [GUO Jiao, SHI Jiansheng, YE Hao, et al. A study of soil erosion and its eco-environment effect of Madigou based on RS and GIS[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 92 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 陈国光, 刘红樱, 陈进全, 等. 福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 26 – 35. [CHEN Guoguang, LIU Hongying, CHEN Jinqian, et al. Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 26 – 35. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳