

# 黑水河流域产沙特征及模拟研究

朱玲玲<sup>1</sup>, 杨成刚<sup>1</sup>, 陈根<sup>2</sup>, 曾凌<sup>1</sup>, 格宇轩<sup>2</sup>

(1. 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团公司, 宜昌 443002)

**摘要:** 白鹤滩水库库区是金沙江下游产输沙强度最大的区域, 库区入汇的多条支流含沙量偏大, 支流来沙带来的河口段及干流库区泥沙淤积对于水库运行和局部水生态环境有重要影响。本文以当前金沙江流域含沙量最大的支流黑水河为研究对象, 基于流域全序列的降雨、径流和泥沙观测资料, 详细解析了流域水沙输移及其变化特征与主要影响因素, 建立了流域高精度的分布式侵蚀产沙模型, 开展了产流产沙过程模拟, 结果表明: ① 黑水河流域降雨径流量增大的趋势性不显著, 受水土保持工程的影响, 2001—2020年输沙量均值相较于1981—2000年减少约214万t, 减幅达到34.5%; ② 降雨是流域主要的产沙驱动因子, 降雨量、落区、强度和过程均会影响产沙和输沙, 流域中下游普格至宁南段的强降雨更容易导致宁南水文站的强输沙; ③ 计算出2021—2023年黑水河流域径流偏枯, 平均年径流量为16.8亿m<sup>3</sup>, 平均年输沙量为164万t, 径流偏枯导致输沙量较多年平均值偏少65.3%。

**关键字:** 白鹤滩水库; 黑水河; 产沙模型; 输沙量

DOI: 10.11821/dlxb202601005

## 1 引言

金沙江下游是长江流域的重点产沙区<sup>[1]</sup>, 在三峡工程论证建设阶段, 规划建设金沙江下游梯级水库, 为三峡水库拦截泥沙<sup>[2]</sup>。自2012年起, 金沙江下游4座梯级水电站相继建成运行, 白鹤滩是仅次于三峡工程的世界第二大水电站, 于2021年汛前蓄水, 上游乌东德水库2019年蓄水, 拦截了金沙江中游至乌东德坝址的泥沙<sup>[3]</sup>, 出库水流含沙量下降至0.021 kg/m<sup>3</sup>, 白鹤滩水库的泥沙主要来源于库区未控区间和支流水系, 但库区无其他水文站、支流水文测站较少, 入库泥沙量的估算难度大。

白鹤滩水库库区是金沙江下游产输沙强度最大的区域, 尤其是其常年回水区小江河口至黑水河口库段分布有北西向的则木河断裂、北东向的莲峰断裂、近南北向的小江断裂、属于凉山断裂束的越西断裂和四开—交际河断裂<sup>[4]</sup>等, 岩性破碎, 地表产输沙强度大<sup>[5]</sup>。库区分布有数条含沙量较大的支流, 其中黑水河是当前长江流域含沙量最大的支流<sup>[6]</sup>, 近年汇入金沙江干流的输沙量超过泥石流高发的东川小江流域<sup>[7-8]</sup>。2021年之前, 黑水河下游设有宁南水文站, 1970—2020年该站多年平均年输沙量约473万t, 平均含沙量约2.25 kg/m<sup>3</sup>, 输沙量和含沙量远大于乌东德水库下泄值; 白鹤滩水库蓄水后, 该站位于水库回水影响范围, 停止水沙观测, 黑水河的输沙量观测进入空白期。

收稿日期: 2025-01-26; 修订日期: 2025-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040218); 中国长江三峡集团有限公司项目(0711606) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U2040218; China Three Gorges Corporation Project, No.0711606]

作者简介: 朱玲玲(1984-), 女, 江西鄱阳人, 博士, 正高级工程师, 主要从事流域水沙输移与数值模拟研究。

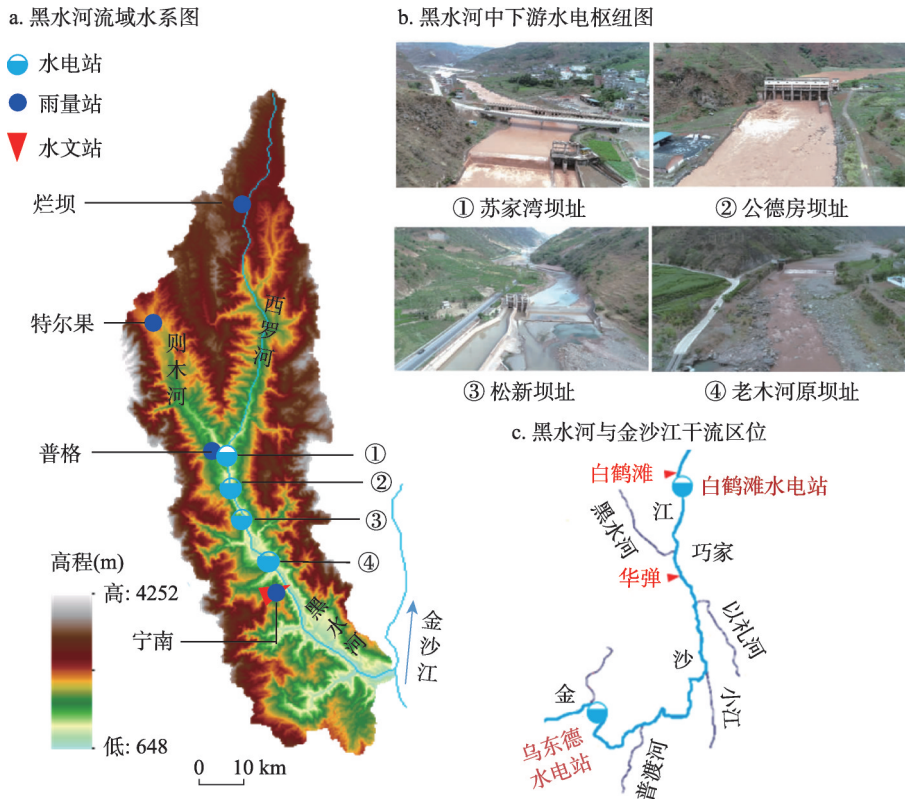
E-mail: Zhull1012@foxmail.com

黑水河河口距白鹤滩坝址仅31 km, 泥石流等次生灾害会产生大量泥沙<sup>[9]</sup>, 直接淤积在河口区和水库近坝段, 同时其河口段是金沙江鱼类的重要替代生境<sup>[10]</sup>, 泥沙淤积还会间接作用于水生态环境<sup>[11]</sup>。本文基于黑水河流域全序列的降雨、径流和泥沙观测资料, 分析流域产输沙基本特征及主要影响因素与作用机制, 建立能够较为精准模拟流域产流产沙过程的分布式侵蚀产沙模型, 合理模拟2021—2023年黑水河的径流输沙过程与量值, 填补了水库蓄水后流域入汇水沙条件的空白, 可有效支撑白鹤滩水库的安全运行及黑水河流域的水生态保护, 模拟计算方法可推广应用于其他无水文站点控制的强产沙区域。

## 2 研究区域与方法

### 2.1 研究区域

黑水河属金沙江左岸一级支流, 发源于四川省凉山彝族自治州昭觉县玛果梁子, 自北向南流经凉山彝族自治州的昭觉、普格、宁南三县, 上游右岸有较大支流则木河汇入, 则木河全长约55 km, 流域面积658 km<sup>2</sup>, 在则木河汇口以上称为西罗河, 西罗河全长约104 km, 流域面积为1447 km<sup>2</sup>, 这两条河汇合以后称为黑水河。黑水河干流全长约174 km, 集水面积3611 km<sup>2</sup>, 自然落差2240 m, 河流平均纵比降为10.5%, 于宁南县葫芦口处汇入金沙江。考虑水库淤积后, 河口段约30.5 km的河道位于白鹤滩水库回水影响区, 流域水系及中下游干流梯级枢纽分布见图1。



注: 图b图片来自中国环境科学学会2021年科学技术年会环境工程技术创新与应用分会场论文集。

图1 黑水河流域水系及中下游干流梯级枢纽分布

Fig. 1 Distribution of water system and cascade hubs in the middle and lower reaches of the Heishui River Basin

文中收集采用的数据主要有流域降水、泥沙观测数据和下垫面条件,其中水文泥沙观测数据来源于四川省水文局,降雨分布、土壤类型、土壤可蚀性、植被覆盖、土地利用类型、坡度坡长因子数据集等数据来源于国家地球系统科学数据中心。降雨侵蚀力数据来自北京师范大学地理科学学部地理数据与应用分析中心地学数据共享平台。

## 2.2 研究方法

本文采用DDRM (DEM-based Distributed Rainfall-runoff Model) 模型为分布式流域产汇流计算的基础模型,引入通用土壤流失方程以进行栅格单元产沙计算,参考国内外已有产输沙模型,根据长江上游流域侵蚀产输沙的基本特性,优化了模型中的沟道产汇沙和水库拦沙计算模块,可较好地实现长江上游大中型流域分布式水沙产输的模拟计算。模型结构及计算流程如图2。

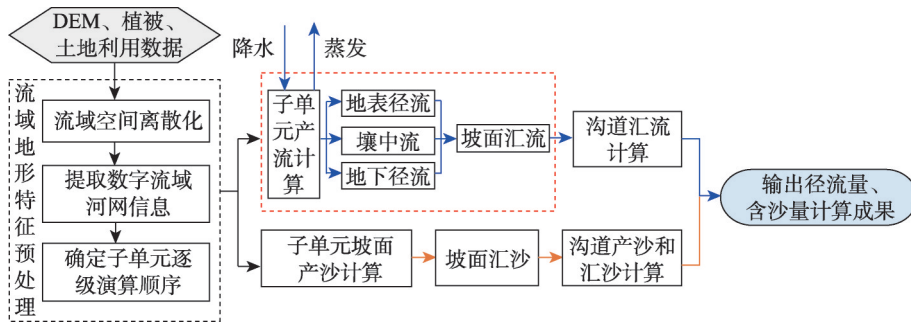


图2 黑水河流域分布式产输沙模型架构图

Fig. 2 Architecture of the distributed sediment yield and transport model in the Heishui River Basin

黑水河流域水电建设工程较少,流域采用4级开发方案,自上而下依次为苏家湾电站(2006年投产)、公德房电站(2011年投产)、松新电站(2008年投产)、老木河电站(1986年投产),各梯级均为引水式开发,规模较小。白鹤滩水库蓄水后,老木河坝址因鱼类洄游通道阻隔问题已被拆除。现存的3个梯级电站规模均较小,为典型小型溢流坝<sup>[12]</sup>,无调节作用,拦沙能力有限,黑水河未因水库建设而出现明显的减沙现象。因此,在进行黑水河流域产输沙模拟时,可不考虑水库拦沙的影响。

沟道产汇沙模块的构建演算依据包为民等<sup>[13]</sup>提出的水沙耦合模型,计算式如下:

$$S_{ot} = CS_0 \times S_{it} + CS_1 \times S_{i(t-\Delta t)} + CS_2 \times S_{o(t-\Delta t)} + e + f \quad (1)$$

$$CS_0 = (0.5\Delta t - KSG \times XS - 0.5\alpha \times \zeta \times \Delta t) / RR \quad (2)$$

$$CS_1 = (0.5\Delta t + KSG \cdot XS - 0.5\alpha \times \zeta \times \Delta t) / RR \quad (3)$$

$$CS_2 = 1 - CS_0 - CS_1 \quad (4)$$

$$e = \zeta \cdot [0.5\alpha \times (I_1 \times CI_1 + I_2 \times CI_2) + 0.5(1 - \alpha) \times (Q_1 + Q_2)] / RR \quad (5)$$

$$f = \zeta \cdot KXD \times 0.5(Q_1 + Q_2) \times 0.5(C_1 + C_2) \left[ \frac{0.5(Q_1 + Q_2)}{BQM} \right]^{0.5} / RR \quad (6)$$

$$RR = 0.5\Delta t - KSG \times XS + KSG + 0.5\zeta \times \Delta t \times (1 - \alpha) \quad (7)$$

式中:  $S_i$ 和 $S_o$ 分别为河道上、下游断面输沙率;  $CI_1$ 和 $CI_2$ 分别为上、下游断面的水流挟沙能力;  $C_1$ 和 $C_2$ 分别为上、下游断面实际含沙量;  $Q_1$ 和 $Q_2$ 分别为上、下游断面流量,  $KXD$ 为河道动力非线性冲刷系数;  $BQM$ 为断面平均流量;  $KSG$ 为泥沙在河段的平均传播时间;  $XS$ 为比重系数;  $\zeta$ 为冲淤系数;  $\Delta t$ 为时间步长;  $\alpha$ 为上、下游段面冲淤速率比重系数;  $RR$ 为地下径流量。

### 3 流域侵蚀产输沙特征

#### 3.1 流域水沙输移特征

**3.1.1 降雨量** 黑水河流域降雨量以波动变化为主,年降雨量变幅在624~1064 mm,降雨量均值无明显趋势性变化(图3、表1)。流域降雨主要发生在4—10月,降雨量占比接近全年的95%,且6月的平均降雨量最大,汛前汛后枯期降雨量较小。

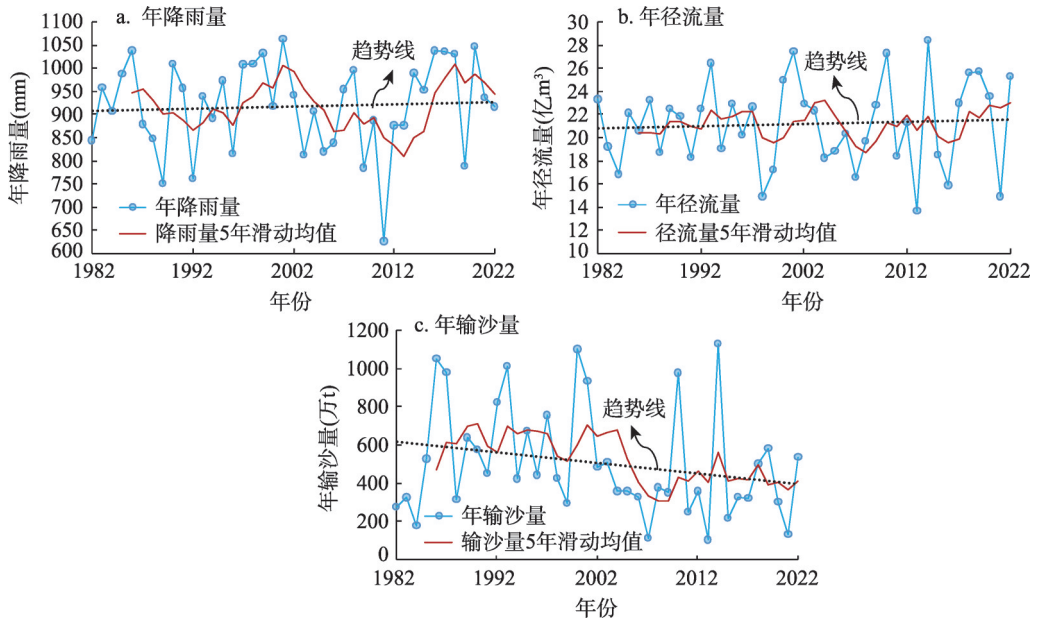


图3 1982—2022年黑水河流域降雨量、径流量和输沙量年际变化

Fig. 3 Interannual variations of rainfall, runoff and sediment transport in the Heishui River Basin from 1982 to 2022

表1 1981—2020年黑水河宁南站降雨量、径流量和输沙量时段平均值统计

Tab. 1 Average rainfall, runoff and sediment transport at Ningnan Station of Heishui River from 1981 to 2020

时段	年降雨量(mm)	年径流量(亿 $m^3$ )	年输沙量(万t)	年含沙量( $kg \cdot m^{-3}$ )	年侵蚀模数( $t \cdot km^{-2}$ )
1981—1990年	913	20.6	586	2.85	1910
1991—2000年	930	21.9	654	2.99	2130
1981—2000年	922	21.2	620	2.92	2020
2001—2010年	900	20.6	398	1.93	1290
2011—2020年	925	21.4	415	1.94	1350
2001—2020年	913	21.0	406	1.94	1320

**3.1.2 径流量** 黑水河流域径流量主要来自降雨,年际间径流量变化与降雨相似,1981—2020年宁南站的年径流量波动性变化,变幅在13.64亿~28.38亿 $m^3$ ,各时段平均年径流量在21亿 $m^3$ 上下浮动(图3、表1)。最小年径流量与最小年降雨量均出现在2011年,最大年径流量与最大年降雨量不重合,径流量不仅仅取决于降雨量,还与降雨落区、雨强等有关。汛期4—10月径流量约占全年的79%,较同期降雨量的占比偏小。

**3.1.3 输沙量** 黑水河流域的年输沙量呈现减少趋势,且主要出现在2000年之后(图3、表1)。1981—2000年宁南站多年平均年输沙量约620万t,平均年含沙量为2.92  $kg/m^3$ 。2001—2020年宁南站多年平均径流量与1981—2000年持平,多年平均年输沙量为406万t,

平均年含沙量为 $1.94 \text{ kg/m}^3$ ，年输沙量、含沙量均值分别偏少34.5%、33.6%。2012年宁南站出现最大年径流量，对应年输沙量也达到最大值1130万t，类似地，年最小输沙量为2011年的103万t，与年降雨量和径流量最小值同步出现。可见，年输沙量与降雨、径流量都有一定相关性。

### 3.2 流域产输沙影响因素

流域产输沙是一个复杂的物理过程，形式多样，长江上游的产沙以重力侵蚀为主<sup>[14]</sup>，降雨是主要动力因子。产输沙影响因素包含自然和人类活动两类，其中自然因素以下垫面条件与降雨为主，人类活动以水土保持工程为代表<sup>[15]</sup>，而人类活动也主要是改变下垫面条件。泥沙从坡面进入河道之后，输沙过程的影响因子主要有水流条件和河道内的阻隔工程，如水利枢纽等<sup>[16-17]</sup>，针对上文分析的黑水河宁南站年输沙量变化特征，其产输沙影响因素主要包含下垫面条件和降雨变化。

**3.2.1 下垫面条件的影响** ① 植被覆盖度及其变化。黑水河上游段主要在普格县境内，两岸为山地，右岸最高峰为螺髻山主峰，海拔4359 m，中间为宽谷，宽度约2 km，河谷两侧山地植被覆盖率高，右岸植被覆盖率大于左岸。中游段主要在宁南县境内，为中、高山宽谷地貌，谷坡植被覆盖率高。下游段主要在宁南县城以下，河谷高差进一步增大，植被相对上游变差，两岸海拔高处覆盖率较大，越近河谷植被覆盖率越低，且草被比例较大。右岸植被覆盖率大于左岸，河谷为人工植被，由于水分不足，乔木基本长不大。至河口段，干热河谷特征明显，植被主要集中于陡坡及沟道。沿河谷公路两侧有人工种植的合欢树，20~30 a的树龄，树木不高且枯死比例较大，但密度大，对沟道侵蚀的防治作用较强。2001—2023年流域植被覆盖度向好发展，NDVI指数整体呈上升趋势（图4），至2020年，流域整体植被覆盖度较好，且远离主河道的区域的植被覆盖度略高于靠近主河道的区域，其原因在于流域耕地主要沿河两岸分布。

② 土壤类型的影响。考虑紫色土有机质和氮素含量低，又因主要分布在丘陵坡地，土层浅薄，抗冲刷能力弱，水土容易流失，因而侵蚀模数大，是长江上游地区主要产沙源<sup>[18]</sup>，本次关于黑水河土壤类型着重针对紫色土的分布。依据2018年长江上游1:100万分辨率的土壤类型数据集，计算出黑水河流域分布有紫色土的面积约1217 km<sup>2</sup>，占流域总面积的比例约33%，且紫色土主要分布在流域的上游地区和下游右岸侧。

③ 土地利用的影响。根据LUCC分类体系，对金沙江下游地区土地利用进行分类。遥感资料来源为中国土地利用现状遥感监测数据库，数据集包括20世纪80年代末期（1990年）、1995年、2000年、2005年、2010年、2015年、2020年共7期，数据生产制作是以各期Landsat TM/ETM遥感影像为主要数据源，通过人工解译生成，栅格数据精度为1 km。黑水河流域林地、草地占比较高，1980—2020年变化较小，基本稳定在75%以上，耕地面积占比仅减小0.5个百分点（图5）。整体上，黑水河流域的土地利用变化较小。

④ 水土保持工程的影响。黑水河是“长治”工程二期重点治理区域，宁南县天久沟、银厂沟、大水沟、梁家沟、白水沟5条泥石流沟先后开展了水土保持治理工程。1989—2004年流域内宁南县第一—五期水土保持工程共治理24条小流域，19个乡镇完成治理面积约656.6 km<sup>2</sup>，占宁南站以上流域面积的21.4%。完成坡改梯64.6 km<sup>2</sup>，植造水土保持林255.5 km<sup>2</sup>，种草60.1 km<sup>2</sup>，封禁管育198.8 km<sup>2</sup>，保土耕作77.5 km<sup>2</sup>；完成小型水利水保工程，谷坊1369座，排洪沟沿山沟500.34 km，蓄水塘、池2778口，渠堤316.58 km，总蓄引水量1365 m<sup>3</sup>，沉沙池2782口，开挖土石2700万m<sup>3</sup>。

1981—1990年黑水河宁南站平均年径流量为20.6亿m<sup>3</sup>，输沙量约586万t，这一时期流域无水土治理措施，流域侵蚀强度为1910 t/km<sup>2</sup>；1991—2000年平均年径流量21.9亿m<sup>3</sup>，

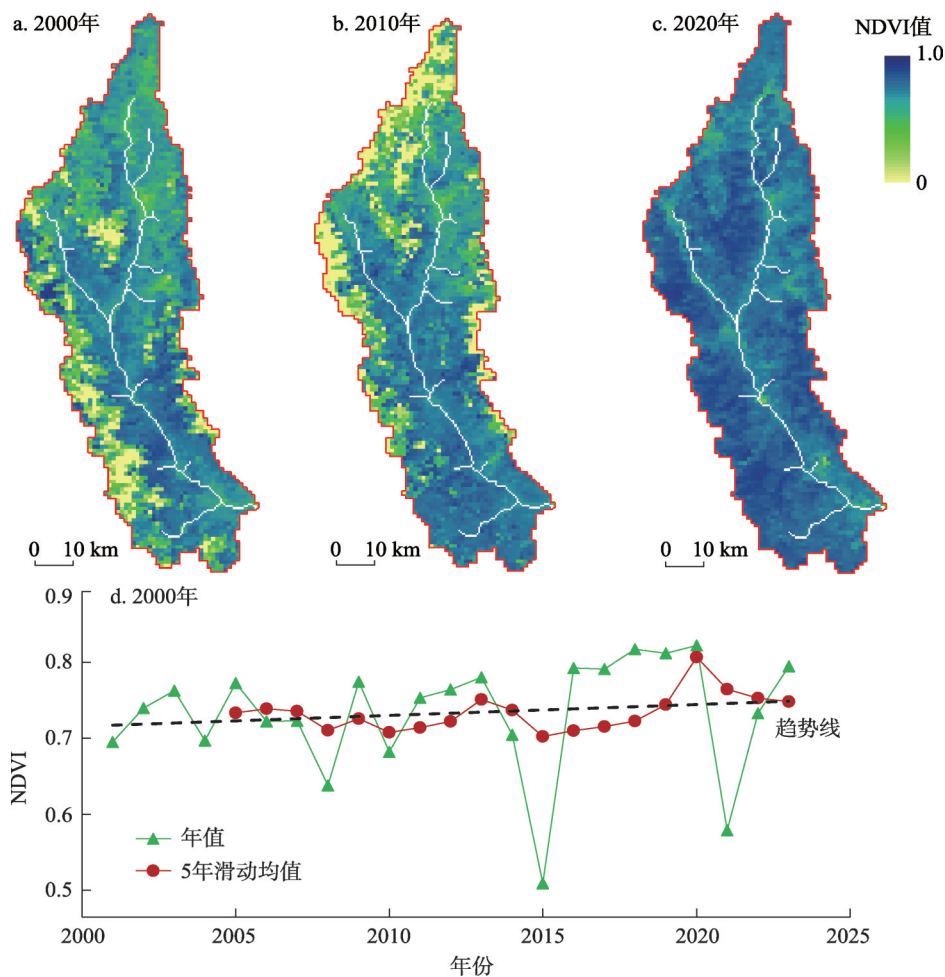


图4 2000—2023年黑水河流域植被覆盖度分布及逐年变化

Fig. 4 Distribution and annual changes of vegetation coverage in the Heishui River Basin from 2000 to 2023

输沙量654万t, 径流量增加6.3%, 输沙量增加11.6%, 正值“长治”工程第一至三期治理期, 工程施工对原有的下垫面有一定扰动, 工程治理效果尚未显现, 流域侵蚀强度增大至2130 t/km<sup>2</sup>。其后, 随着水土保持林的生长、坡改梯陆续完成等, 水土保持工程的作用逐步显现, 2001—2010年平均年径流量约20.6亿m<sup>3</sup>, 输沙量下降至398万t, 年径流量与1981—1990年持平, 较1991—2000年略偏小, 输沙量较1981—1990年减少32.1%, 较1991—2000年减少39.1%, 这一时期“长治”工程第五期完成。至2011—2020年, 水土保持工程持续发挥作用, 流域平均年径流量为21.4亿m<sup>3</sup>, 稳中略有增大, 平均年输沙量为415万t, 流域侵蚀强度下降至1350 t/km<sup>2</sup>。

对比水土保持工程实施前后1981—2000年与2001—2020年宁南站的年径流量、输沙量来看, 工程实施后多年平均年径流量基本维持不变, 且逐年降雨量和径流量呈不明显的上升趋势, 虽然流域干流在2000年之后建设了一些枢纽工程, 但工程规模较小, 无调节作用, 拦沙能力有限。由此推断, 促使黑水河输沙量减少的主要因素为水土保持工程, 初步估算工程年均减少输沙量约214万t。

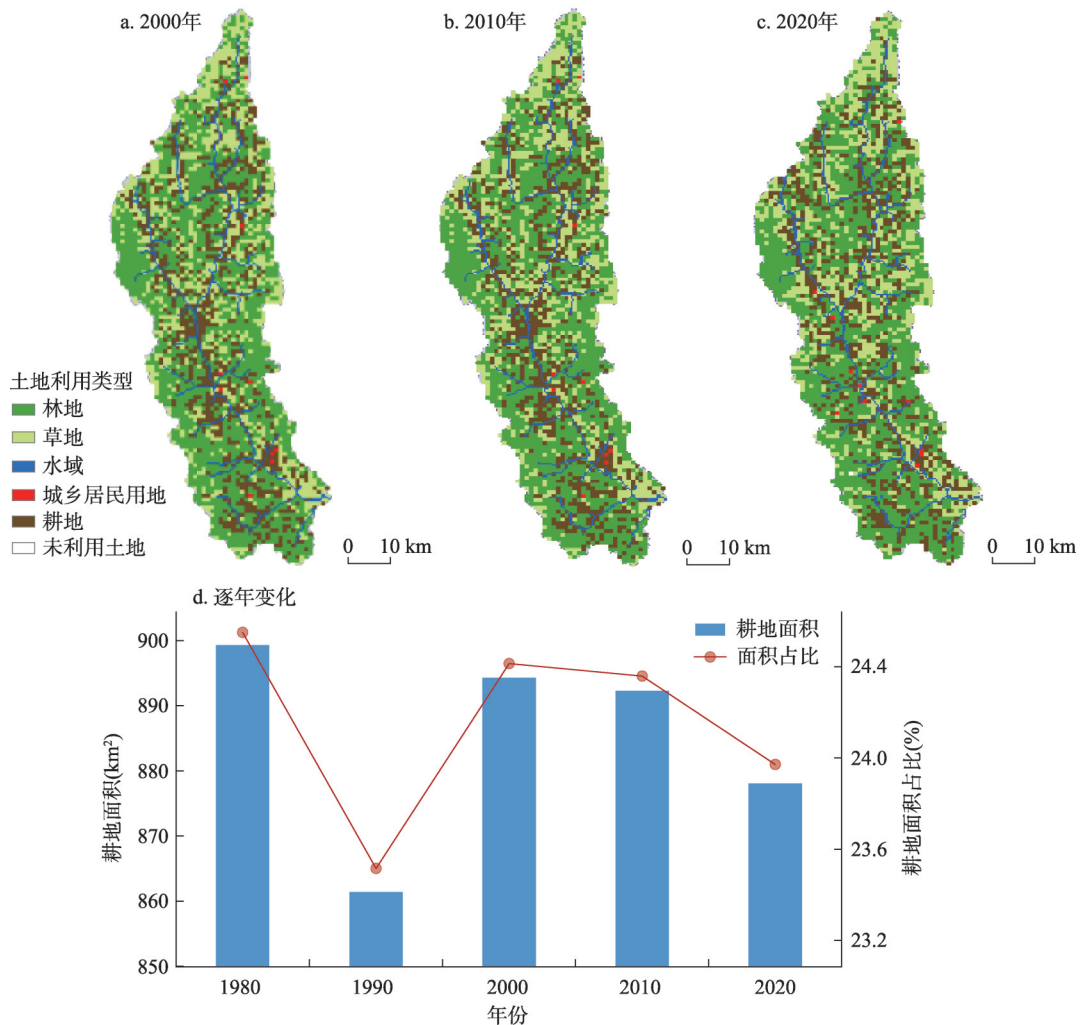


图5 1980—2023年黑水河流域土地利用平面分布及耕地面积与占比逐年变化

Fig. 5 Land use distribution and annual changes in cultivated land area and proportion in the Heishui River Basin, 1980-2023

**3.2.2 降雨的影响** ① 降雨量的影响。黑水河宁南站的年径流量与流域年降雨量、年径流量与年输沙量存在一定正相关关系，即降雨量越大，径流量也越大，产生和挟带至河道内较多的泥沙（图6）。不同时期年尺度下降雨—径流、径流—输沙的相关关系有较大差异，一方面流域降雨—侵蚀—输沙是一个复杂的综合物理过程；另一方面，金沙江下游主要的径流、输沙一般由短时间的场次暴雨造成，在长时间尺度下这一过程被均化；再者，水土保持工程等人类活动也对自然降雨侵蚀输沙过程有一定扰动。当人类活动频次降低，水土保持工程逐渐融为自然的一部分后，降雨与径流、径流与输沙的关系更为密切，如2011—2020年年降雨量与径流量、年径流量与输沙量的相关关系系数均接近或超过0.8，超过历史其他时期。

② 降雨落区的影响。由于流域植被覆盖、土地利用和土壤类型分布沿程有差异，因此降雨落区对黑水河流域产输沙的影响较大，普格以下的暴雨过程更容易引发强输沙现象。选取2013年以来黑水河流域共40个场次日平均面降雨量在20 mm左右的典型暴雨过

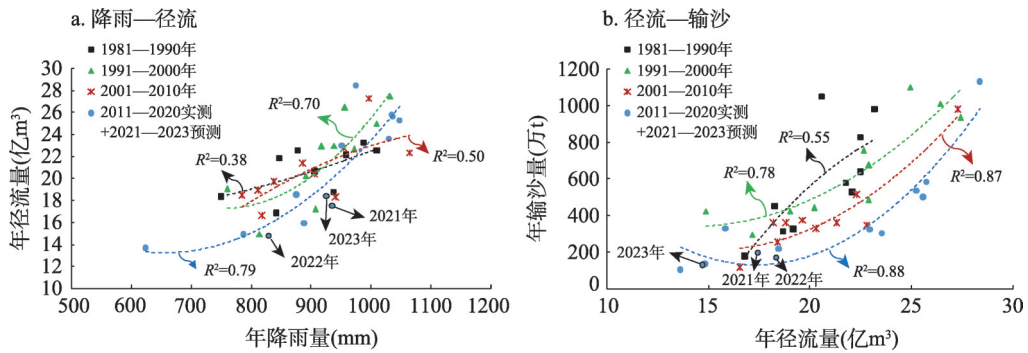


图6 1981—2020年黑水河流域年降雨量与径流量、年径流量与输沙量相关关系

Fig. 6 Correlation between annual rainfall and runoff, annual runoff and sediment transport in Heishui River Basin, 1981-2020

程,分析相同日雨量下不同场次暴雨的产流、产沙差异及原因。其中,最大日输沙量为173万t(洪号20160628),最小输沙量0.02万t(洪号20130603),可见同等面降雨量条件下的产输沙水平悬殊,主要原因是降雨落区。统计40场降雨过程中,宁南站不同日输沙量对应黑水河流域特尔果、烂坝、普格和宁南4个雨量站的降雨均值如表2,当宁南站日输沙量不超过5万t时,日输沙量均值与普格、宁南站降雨量均值同步增大,当流域各站降雨量均值都接近或超过20 mm时,宁南站的日输沙量才能超过5万t,普格和宁南站强降雨过程对于日输沙量超过10万t的贡献更为明显。可见,黑水河中下游地区的侵蚀产沙强度更大,这与流域泥石流、滑坡及抗侵蚀力较弱的紫色土等分布区域一致。

表2 2014—2020年40场暴雨过程中黑水河宁南站不同日输沙量对应的平均降雨量(mm)

Tab. 2 Average rainfall at Ningnan Station of Heishui River during 40 rainstorms from 2014 to 2020 (mm)

区域	雨量站	黑水河宁南站日输沙量范围(万t)				
		<1	1~3	3~5	5~10	≥10
则木河	特尔果	14.4	15.8	13.6	25.1	16.9
西罗河	烂坝	25.0	12.3	15.1	23.2	19.4
黑水河	普格	17.6	26.4	26.8	18.9	23.4
	宁南	12.4	21.8	23.3	18.1	32.4

③ 降雨强度的影响。雨强对产输沙的作用机制主要体现在两方面,一是强降雨对地面的冲击力大,更易产生溅蚀和冲刷,甚至引发滑坡泥石流等地质灾害;二是强降雨过程中,雨水往往来不及下渗,从而形成更大的地表径流量,对坡面和河道从冲刷能力更强,因此雨强越大,容易产生较大的侵蚀量。在统计的40场强降雨过程中,针对中下游强产沙区,当普格或宁南站的最大小时雨强超过10 mm/h时,宁南站日输沙量均值为15.2万t,当普格和宁南站最大小时雨强均小于5 mm/h时,宁南站日输沙量均值仅为1.62万t。

④ 降雨过程的影响。相比干旱地面,前日已发生降雨的地面,其土壤含水量接近饱和,降雨大都直接转化为坡面径流,产生的径流量更大,对坡面、沟道的冲刷更强,更容易诱发岸坡崩塌等,输送和冲刷更多的泥沙。在统计的40场暴雨中,前一日面降雨量超过20 mm的有5场,其平均输沙量为59.8万t;前一日降雨量超过10 mm的有17场,其平均输沙量为25.0万t;前一日降雨量超过5 mm的有22场,其平均输沙量为19.9万t。而前一日降雨量低于2 mm的有10场,其平均输沙量仅为3.1万t。可见,前一日降雨量越大,次日降雨的输沙量越大;前一日无降雨或降雨量极小时,次日降雨的输沙量一般较小。

### 4 流域侵蚀产输沙模拟

2021—2023年黑水河流域来水来沙条件进入空白期，本文在掌握流域产输沙特性的基础上，建立了流域分布式侵蚀产沙模型，模拟计算了2021—2023年黑水河宁南站的径流量和输沙量。

#### 4.1 分布式侵蚀产沙模型构建

模型充分结合黑水河流域侵蚀产沙的基本特征，采用变网格布置。分别基于30 m和300 m空间分辨率的DEM数据提取了流域的数字信息，包括坡长、坡度、坡向、集水面积、河网水系和湿度指数等（图7）。统计出流域坡度地形分布特征如表3，根据坡度，结合植被覆盖等条件，可以筛选出流域的重点产沙区和非重点产沙区。其中，对于坡度>20°，且植被覆盖条件较差、土地利用以耕地为主的抗侵蚀能力较弱的区域，采用30 m空间分辨率的DEM数据，其他区域均采用300 m空间分辨率的DEM数据。

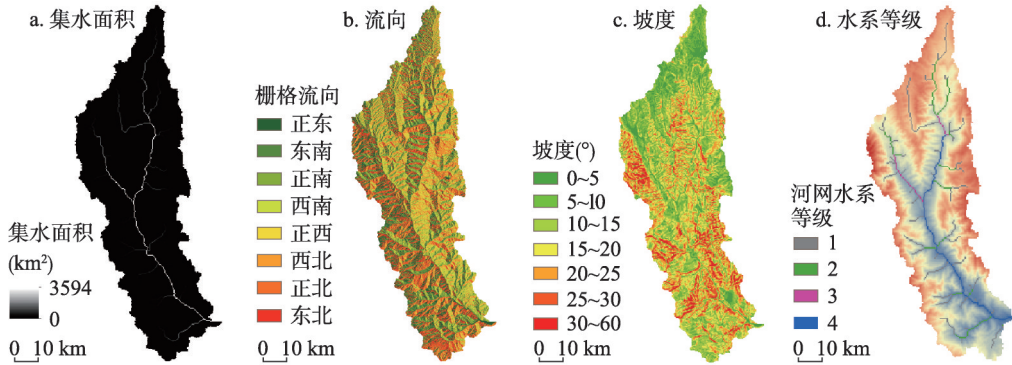


图7 黑水河流域水文特征属性分析结果

Fig. 7 Analysis results of hydrological characteristics and attributes in the Heishui River Basin

表3 黑水河流域宁南站上游区域不同坡度地形面积占比统计表

Tab. 3 Proportion of terrain area with different slopes in the upstream of Ningnan Station in the Heishui River Basin

网格尺寸(m)	不同坡度地形面积占比(%)									
	0~5°	5°~10°	10°~15°	15°~20°	20°~25°	25°~30°	30°~35°	35°~40°	40°~45°	>45°
300	6.96	18.08	24.64	23.10	15.35	8.03	3.09	0.69	0.06	0
30	3.51	7.27	13.94	18.77	18.51	15.13	11.12	6.73	3.08	1.94

模型水沙计算的数据出口为宁南站，宁南站集水面积约占流域总面积的85%，位置靠近河口，2021年白鹤滩水库蓄水后，水库回水范围覆盖宁南站，自此该站停止水文泥沙观测。因此，本次模拟以宁南站2010—2020年典型洪水输沙过程作为模型建立的基础率定与验证资料。

分别收集黑水河流域长序列的逐日平均降雨量、气温、流量和悬移质输沙量资料作为模型的驱动数据，以流域的土地利用类型、植被覆盖指数、土壤质地、土壤有机碳含量等流域下垫面资料作为模型的边界条件。选取2010—2018年汛期作为模型参数率定期，2019—2020年汛期作为验证期。受观测资料限制，模型模拟的时间步长选为1 d。采用SCE-UA算法为模型参数率定的优化算法，以Nash效率系数作为模型参数率定的目标函数。分布式水沙产输模型率定的参数主要有产汇流、产输沙参数，共计19个，各参数意义及推荐取值范围见表4。

表4 分布式水沙产输模型产汇流、产汇沙模拟率定参数汇总表

Tab. 4 Calibration parameters for distributed water and sand yield and transport model

相关参数	物理意义	取值范围	计量单位	模型率定值
<i>SOSO</i>	全流域栅格土壤最小蓄水能力	5~50	mm	23.6
<i>SM</i>	全流域栅格土壤蓄水能力变化幅度	5~500	mm	322.5
<i>SN</i>	经验参数, 反映土壤蓄水能力与对应地形指数之间的非线性关系	0~1	-	0.17
<i>TS</i>	时间常数, 反映地下水出流特性	2~200	h	58.3
<i>TP</i>	时间常数, 反映浅层地表水坡面流形成特性	2~200	h	39.2
<i>alpha</i>	经验参数, 反映地下水出流特性	0~1	-	0.44
<i>beta</i>	经验参数, 反映坡度对地下水出流的影响	0~1	-	0.36
$C_i(i=0,1)$	栅格内河道汇流马斯京根参数	0~1	-	0.87, 0.09
$hc_i(i=0,1)$	子流域之间河道汇流马斯京根参数	0~1	-	0.81, 0.12
$\beta_i(i=1, 2)$	经验参数, 用于日降雨的降雨侵蚀力因子计算	0~100	-	53.4, 19.2
$\beta_i(i=3, 4, 5, 6)$	经验参数, 用于栅格单元坡度因子计算	0~100	-	9.5, 12.7, 30.5, 18.9
<i>BV</i>	沟道产沙计算系数	0~1	-	0.45
<i>KXD</i>	河道动力非线性冲刷系数	0~5	-	2.12

## 4.2 RUSLE模型计算参数

RUSLE模型计算的主要参数有地形坡度因子 $LS$ 、降雨侵蚀力因子 $R$ 、土壤可蚀性因子 $K$ 、植被覆盖与管理因子 $C$ 以及水土保持措施因子 $P$ 。

以地形坡面因子 $LS$ 来表征金沙江下游地区地形地貌特性。 $LS$ 分为坡长因子 $L$ 和坡度因子 $S$ 。 $LS$ 因子越大, 说明地形坡面越容易产沙, 即坡面越长或越陡峭, 产沙能力越强。 $LS$ 值由地形地貌决定, 在短时间内相对稳定, 年际无明显变化。 $LS$ 因子的计算主要基于地形高程数据, 但不同空间分辨率下计算得到的 $LS$ 数据差异较大, 因此尽量使用高分辨率的DEM数据提高模型计算精度。本次根据杨勤科等<sup>[19]</sup>基于公开的1弧秒分辨率SRTM数字高程数据, 经过去接边、去除伪条纹等和滤波除噪等预处理, 利用CSLE模型中的坡度坡长因子算法和坡度坡长因子计算工具(LS\_Tool), 计算得到7.5弧秒分辨率坡度坡长因子(图8)。

黑水河流域的降雨侵蚀力因子 $R$ 来源于北京师范大学地理科学学部土壤侵蚀团队发布的中国大陆地区降雨侵蚀力空间数据集, 数据集主要由2000多个气象站逐日和逐时降水数据生成, 经62个气象站逐分钟数据验证。站点降雨侵蚀力值首先通过泛克里金方法插值到1 km网格, 再由双线性内插生成 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 网格数据。时段包含5个气候态(1951—1980年、1961—1990年、1971—2000年、1981—2010年和1991—2020年)多年平均年降雨侵蚀力。气候态是指一个地区大气的多年平均状况, 包括光照、气温和降水等主要气候要素, 根据世界气象组织的规定, 气候态的计算标准时段为30 a, 黑水河流域 $R$ 平面分布和时段均值变化如图8, 流域降雨侵蚀力因子呈现上游、流域左岸偏小, 右岸偏大的平面分布特征。

土壤可蚀性是指土壤对侵蚀的敏感性, 它被定义为每单位外生力或侵蚀力(如降雨量、地表流量和渗流)造成的土壤流失量。一般而言, 土壤可蚀性是土壤的固有属性, 在短时间尺度内(相对于地质时间尺度)基本维持一定的数值不变, 随着时间变化而变化的速率交换。因此, 近期数据可反映黑水河流域的土壤特性。本次土壤可蚀性因子 $K$ 采用2023年全球1 km分辨率土壤可蚀性数据集如图8所示。

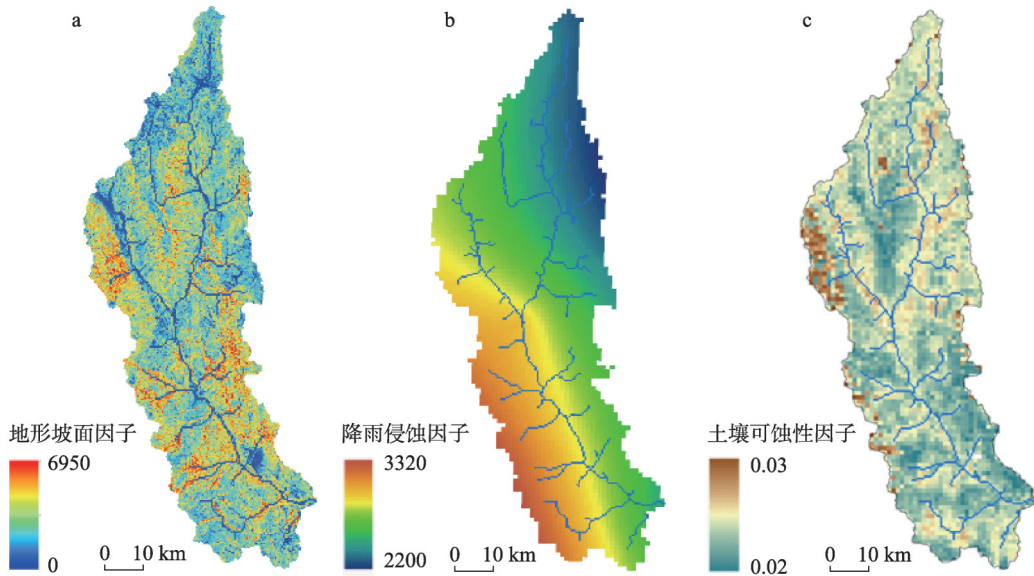


图8 黑水河流域水文流域特征属性因子分析计算结果

Fig. 8 Analysis and calculation results of hydrological characteristic attribute factors in the Heishui River Basin

植被覆盖因子 $C$ 指在相同土壤、地形和降雨条件下,某一特定作物或植被情况下土壤流失量与连续休闲土地土壤流失量的比值。对植被覆盖因子估算应用最多的是蔡崇法等<sup>[20]</sup>在三峡水库库区建立的关系式:

$$C = \begin{cases} 1, & f_c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c, & 0 < f_c < 78.3\% \\ 0, & f_c \geq 78.3\% \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f_c$ 为植被覆盖度,利用Gutman模型得到:

$$f_c = \frac{I - I_{soil}}{I_{veg} - I_{soil}} \quad (9)$$

式中:  $I$ 为研究区各象元的NDVI值;  $I_{soil}$ 为完全裸土或无植被区域的NDVI值;  $I_{veg}$ 为完全被植被覆盖的像元的NDVI值。黑水河流域2020年的NDVI指数平面分布如图4。

模型中的水土保持措施因子 $P$ 是基于经验和物理过程的混合模型,是采取专门措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量之比,该因子的值在0~1之间,0为不发生土壤侵蚀的地区,1为未采取任何水土保持措施的地区。常用经验公式来计算,  $P = 0.2 + 0.3S$ ,  $S$ 为坡度。

此外,还可根据土地利用类型进行直接判断,水体和人工表面的水土保持措施因子赋值为0,林地、草地和未利用地的该因子值赋值为1。因此,水保因子 $P$ 与目标区域的土地利用类型息息相关。黑水河流域的土地利用类型及其变化如图5。

#### 4.3 侵蚀产输沙模拟效果评价

针对模型计算结果,选用Nash效率系数及洪峰、洪量、沙峰过程的相对误差和峰现时间误差等作为流量和输沙量模拟效果的评价指标。黑水河宁南站场次洪水和泥沙过程模拟精度评定成果分别见表5和表6。率定期2016年和验证期2019年实测、模型模拟径流和泥沙过程见图9。对于率定期,流量过程的Nash效率系数除20140818场次略小于0.70以外,其他测次均大于0.71,洪峰流量相对误差介于-15.1%~-4.8%,洪量模拟相对误差介

表5 2010—2020年宁南站汛期洪水过程径流量模拟精度评定

Tab. 5 Accuracy evaluation of runoff simulation at Ningnan Station during flood season from 2010 to 2020

时期	洪号	洪峰流量(m <sup>3</sup> /s)		相对误差 (%)	峰现时间 误差(d)	洪量(亿m <sup>3</sup> )		相对误差 (%)	Nash 效率系数	
		实测	模拟			实测	模拟			
率定期	2010年	20100710	309	286	-7.4	0	0.9	0.8	-11.1	0.76
	2011年	20110623	311	269	-13.5	0	1.2	1.3	8.3	0.71
	2012年	20120705	667	589	-11.7	0	2.1	2.4	14.3	0.82
	2013年	20130912	520	495	-4.8	0	2.7	2.3	-14.8	0.71
	2014年	20140818	511	434	-15.1	0	1.6	1.8	12.5	0.68
	2015年	20150715	424	372	-12.3	0	0.9	0.8	-11.1	0.83
	2016年	20160628	656	598	-8.8	0	4.4	3.8	-13.6	0.73
验证期	2017年	20170625	431	382	-11.4	0	2.9	2.6	-10.3	0.72
	2018年	20180614	402	380	-5.5	0	2.9	3.1	6.9	0.76
	2019年	20190713	330	288	-12.7	0	1.3	1.4	7.7	0.82
	2020年	20200917	583	548	-6.0	0	4.2	3.8	-9.5	0.77

表6 2010—2020年宁南站汛期洪水过程输沙量模拟精度评定表

Tab. 6 Accuracy evaluation of sediment load simulation at Ningnan Station during the flood season from 2010 to 2020

时期	洪号	沙峰量(万t)		相对误差 (%)	峰现时间 误差(d)	输沙量(万t)		相对误差 (%)	Nash效率 系数	
		实测	模拟			实测	模拟			
率定期	2010年	20100710	34.9	31.2	-10.6	0	103	97.5	-5.3	0.73
	2011年	20110623	51.2	48.8	-4.7	0	70.7	67.	-5.2	0.74
	2012年	20120705	71.6	69.6	-2.8	0	146	129	-11.6	0.81
	2013年	20130912	38.4	42.5	10.7	0	69.2	71.3	3.0	0.73
	2014年	20140818	57.5	55.2	-4.0	0	75.6	79.3	4.9	0.75
	2015年	20150715	46.9	43.5	-7.2	0	50.2	47.3	-5.8	0.73
	2016年	20160628	174	161.	-7.5	0	374	359	-4.0	0.82
验证期	2017年	20170625	109	116	6.4	0	298	277	-7.0	0.71
	2018年	20180614	29.6	30.4	2.7	0	88.0	95.6	8.6	0.73
	2019年	20190713	56.7	53.4	-5.8	0	65.3	68.7	5.2	0.80
	2020年	20200917	39.9	41.5	4.0	0	163	171	4.9	0.75

于-14.8%~12.5%。输沙量过程的Nash效率系数均大于0.70, 沙峰相对误差介于-10.5%~14.3%。对于验证期, 流量过程Nash效率系数均大于0.77, 洪峰流量相对误差介于-12.7%~6.0%, 洪量模拟相对误差介于-9.5%~7.7%。输沙量过程Nash效率系数均大于0.75, 沙峰相对误差介于-5.8%~4.0%。洪峰、沙峰的峰现时间吻合较好。率定期和验证期汛期流量、输沙量的涨落过程、峰值总体上与降雨过程匹配。综上认为, 所建立的模型对于宁南站流量和输沙量过程的模拟效果较好。

#### 4.4 流域侵蚀产沙模拟计算

2021年白鹤滩水库蓄水后, 受水库回水的影响, 黑水河宁南站停止水沙观测, 考虑黑水河是白鹤滩库区水沙来量最大的支流, 且其入汇口门离坝址较近, 流域来沙容易进入库区沉积, 影响水库库容。为掌握其来水来沙量, 基于流域降雨观测数据, 采用上述率定验证后的模型, 模拟计算出2021—2023年宁南站日均流量和输沙量过程如图10。计算出的宁南站年内流量和泥沙涨落过程与降雨量存在较好的对应关系。

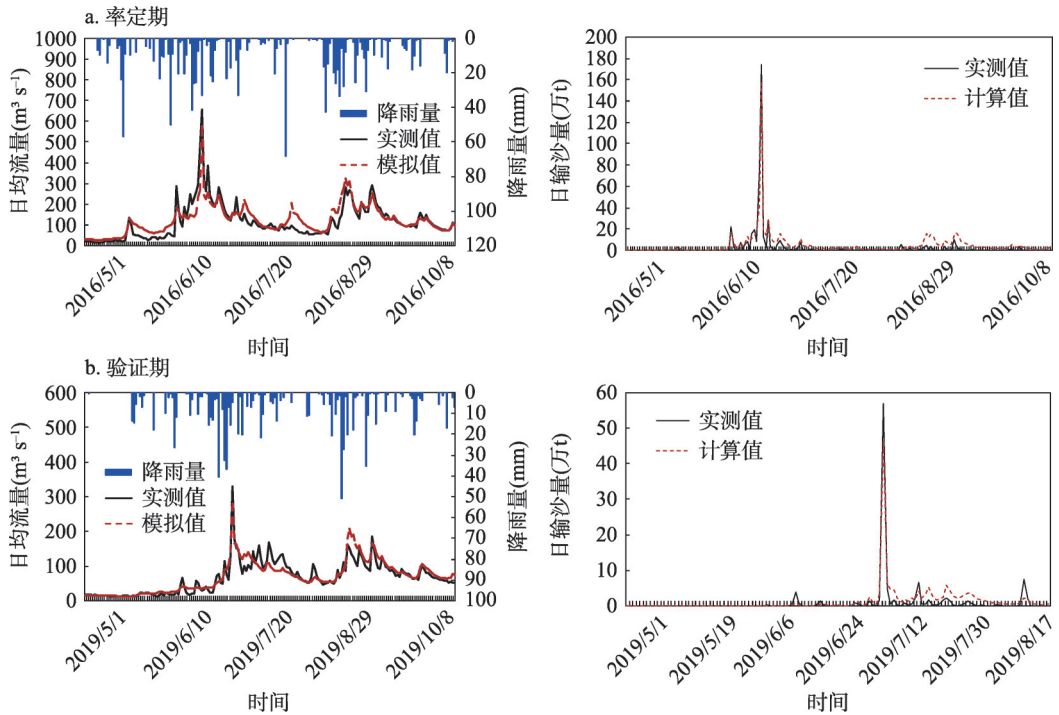


图9 黑水河宁南站汛期实测与模型模拟水沙过程对比

Fig. 9 Comparison of measurement and model simulation of water and sediment processes during the flood season at Ningnan Station

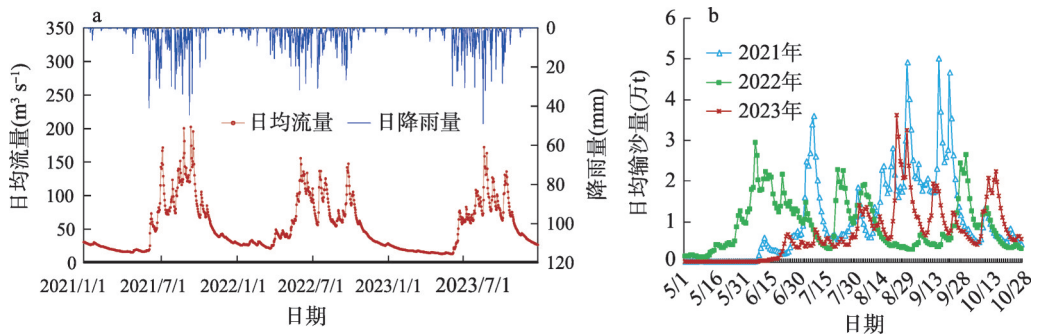


图10 2021—2023年黑水河宁南站计算水沙过程

Fig. 10 Calculation of water and sand processes at Ningnan Station in the Heishui River from 2021 to 2023

计算得到2021年、2022年、2023年宁南站年径流量分别为17.4亿 $m^3$ 、18.4亿 $m^3$ 和14.7亿 $m^3$ ，年输沙量分别为194万t、169万t和128万t。为检验计算成果的合理性，一方面在前文图6中，加入2021—2023年的计算值，其基本分布在实测2011—2020年曲线附近，符合长时间尺度的水沙变化特征；另一方面实测干流白鹤滩水文站2021—2023年径流量均值约1062亿 $m^3$ ，较多年（1960—2020年）平均值1262亿 $m^3$ 偏枯15.8%，类似地，宁南站计算的年径流量均值较多年平均值偏枯20.8%，较好地反映了流域性枯水情势；再者，计算出黑水河宁南站3 a的来沙总量为491万t，这部分泥沙基本堆积在宁南以下的河口段，实测2021—2023年黑水河河口段泥沙累积淤积1097.8万 $m^3$ ，其中有167.6万 $m^3$ 来自河口段两岸岸坡的坍塌，930.2万 $m^3$ 泥沙来源于流域，参照溪洛渡水库距坝较近的西苏角河河口段

泥沙淤积物干容重 $0.7\text{ t/m}^3$ , 折算出黑水河河口淤积的流域来沙约651万t, 较宁南站输沙量偏大约32.6%, 这之间还有宁南站至河口约27 km河道两岸区间汇入的泥沙, 尤其是两岸在水库蓄水初期较为频繁的坍塌和坡面沟壑输沙等, 实际淤积量较宁南站输沙量偏大属于正常现象。可见, 计算所得2021—2023年宁南站径流量和输沙量较为合理。

## 5 结论

本文依据观测资料, 分析在掌握流域产输沙特性, 建立了流域分布式侵蚀产沙模型, 模拟计算了2021—2023年黑水河宁南站的径流量和输沙量, 得到以下主要结论:

(1) 1981—2020年黑水河流域降雨、径流年际以波动性变化为主, 呈不显著的上升趋势, 输沙量自2000年以来有较为明显的下降趋势, 2001—2020年输沙量均值相较于1981—2000年减少约34.5%, 含沙量从 $2.92\text{ kg/m}^3$ 下降至 $1.94\text{ kg/m}^3$ 。年内降雨、径流和输沙都集中在汛期。

(2) 影响黑水河流域侵蚀产输沙的主要因素有下垫面条件和降雨变化。流域植被覆盖度向好发展, 土地利用变化较小, 抗侵蚀能力较弱的紫色土分布面积占比约33%, 主要分布在上游和下游右岸侧; 水土保持工程是近20年输沙量减少的关键因素; 降雨量、落区、强度和过程会对产输沙造成影响, 普格至宁南段的强降雨过程更容易导致宁南水文站的强输沙。2011年以来降雨—径流—输沙的相关关系更为紧密。

(3) 通过改进分布式侵蚀产沙模型的沟道产汇沙计算模块, 较好地模拟了黑水河流域产流产沙过程。模拟计算出2021—2023年宁南站平均年径流量为16.8亿 $\text{m}^3$ , 较多年平均值偏枯20.8%, 平均输沙量为164万t, 较多年平均值偏少65.3%, 输沙量减少对径流量减少较为敏感, 填补了流域输沙数据的空白。

## 参考文献(References)

- [1] Chen Songsheng, Zhang Ouyang, Chen Zefang, et al. Variations of runoff and sediment load of the Jinsha River. *Advances in Water Science*, 2008, 19(4): 475-482. [陈松生, 张欧阳, 陈泽方, 等. 金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析. *水科学进展*, 2008, 19(4): 475-482.]
- [2] Zhu Lingling, Dong Xianyong, Chen Zefang. Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and its impact on Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(3): 1-7. [朱玲玲, 董先勇, 陈泽方. 金沙江下游梯级水库淤积及其对三峡水库影响研究. *长江科学院院报*, 2017, 34(3): 1-7.]
- [3] Zhu Lingling, Chen Di, Yang Chenggang, et al. Sediment deposition of cascade reservoirs in the lower Jinsha River and scouring of river channel under dam. *Journal of Lake Science*, 2023, 35(3): 1097-1110. [朱玲玲, 陈迪, 杨成刚, 等. 金沙江下游梯级水库泥沙淤积和坝下河道冲刷规律. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 1097-1110.]
- [4] Guo Wei, Zhao Cuiping, Zuo Kezhen, et al. Characteristics of seismicity before and after impoundment of Baihetan dam in the lower reaches of Jinsha River. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(12):4659-4671. [郭伟, 赵翠萍, 左可桢, 等. 金沙江下游白鹤滩水库蓄水前后地震活动特征. *地球物理学报*, 2022, 65(12): 4659-4671.]
- [5] Wang Zhihua. Landslides and debris flows in the lower reach of the Jinsha River, China. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(2):142-149. [王治华. 金沙江下游的滑坡和泥石流. *地理学报*, 1999, 54(2): 142-149.]
- [6] Tan Yuning, Liu Huaixiang, Lu Yongjun. Factors controlling sediment yield and prediction of ungauged areas in the Lower Jinsha River basin. *Advances in Water Science*, 2023, 34(2): 277-289. [谭寓宁, 刘怀湘, 陆永军. 金沙江下游区间来沙驱动因子分析及产沙预测模型. *水科学进展*, 2023, 34(2): 277-289.]
- [7] Huang Jiangcheng, Ou Guoqiang, Pan Huali, et al. Comparative study on the typical soil slurry rheological properties of prone area of debris flow. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(6): 49-53. [黄江成, 欧国强, 潘华利, 等. 泥石流多发区典型土浆体流变特性比较研究. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(6): 49-53.]
- [8] Wang Zhaoyin, Wang Guangqian, Gao Jing. An ecological dynamics model of vegetation evolution in erosion area. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 99-105. [王兆印, 王光谦, 高菁. 侵蚀地区植被生态动力学模型. 生态学报, 2003, 23(1): 99-105.]
- [9] Yang Zhi, Gong Yun, Dong Chun, et al. Fish resource status of the lower reaches of the Heishui River and the measures for their conservation. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(6): 847-855. [杨志, 龚云, 董纯, 等. 黑水河下游鱼类资源现状及其保护措施. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 847-855.]
- [10] Liu Jinfeng, You Yong, Chen Xiaoqing. Evaluation of the influences of debris flow on large hydropower projects: A case study on Heishui debris flow in the reservoir area of Baihetan Hydropower Station. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 285-289. [柳金峰, 游勇, 陈晓清. 泥石流对重大水电工程的影响评估: 以金沙江下游白鹤滩电站库区黑水河泥石流为例. 水土保持通报, 2012, 32(3): 285-289.]
- [11] Sun Jianing. Fish habitat simulation of the Heishui River: The backwater tributary of Baihetan Reservoir [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. [孙嘉宁. 白鹤滩水库回水支流黑水河的鱼类生境模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.]
- [12] He Shufeng, Tang Lei, Wang Jun, et al. Effects of dam removal on fish community structure and spatial distribution in Heishui River. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3525-3534. [何术锋, 唐磊, 王骏, 等. 水坝拆除对黑水河鱼类群落结构和空间分布的影响. 生态学报, 2021, 41(9): 3525-3534.]
- [13] Bao Weimin, Hou Lu, Shen Dandan. Application of flow-sedimentation coupled model in Dali River Basin of Loess Plateau. Journal of Lake Science, 2019, 31(4): 1120-1131. [包为民, 侯露, 沈丹丹. 黄土高原大理河流域水沙耦合模型应用研究. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1120-1131.]
- [14] Xu Quanxi, Shi Guoyu, Chen Zefang. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 420-426. [许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析. 水科学进展, 2004, 15(4): 420-426.]
- [15] Du J, Shi C X, Fan X L, et al. Impacts of socio-economic factors on sediment yield in the upper Yangtze River. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(2): 359-371.
- [16] Zhu Lingling, Chen Cuihua, Zhang Jishun. Study on variations of runoff and sediment and effect to the lower Jinsha River. Journal of Sediment Research, 2016(5): 20-27. [朱玲玲, 陈翠华, 张继顺. 金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究. 泥沙研究, 2016(5): 20-27.]
- [17] Xie Yiqin, Deng Anjun, Dong Xianrong, et al. Study on the spatial-temporal variations of runoff and sediment in the lower reach of Jinsha River. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(11): 1309-1322. [谢益芹, 邓安军, 董先勇, 等. 金沙江下游流域水沙格局变化研究. 水利学报, 2023, 54(11): 1309-1322.]
- [18] Bao Yuhai, Cong Peijuan, Feng Wei, et al. Comprehensive management system of soil and water loss in purple soil area of southwestern China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 143-150. [鲍玉海, 丛佩娟, 冯伟, 等. 西南紫色土区水土流失综合治理技术体系. 水土保持通报, 2018, 38(3): 143-150.]
- [19] Yang Qinke, Guo Lanqin, Wang Chunmei. Extracting and analyzing slope and slope length based on ASTER GDEM and SRTM elevation datasets. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 142-146. [杨勤科, 郭兰勤, 王春梅. 基于ASTRE和SRTM高程数据的坡度和坡长提取与分析. 水土保持通报, 2012, 32(6): 142-146.]
- [20] Shi Z H, Cai C F, Ding S W, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: A case study in the Three Gorges area of China. Catena, 2004, 55(1): 33-48.

## Characteristics and simulation of sand yield in the Heishui River basin

ZHU Lingling<sup>1</sup>, YANG Chenggang<sup>1</sup>, CHEN Gen<sup>2</sup>, ZENG Ling<sup>1</sup>, GE Yuxuan<sup>2</sup>

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, Hubei, China)

**Abstract:** The Baihetan Reservoir area is the region with the highest sediment yield and transportation intensity in the lower Jinsha River. Multiple tributaries flowing into the reservoir carry high sediment concentrations, and the sediment deposition in the estuary and main stream reservoir areas caused by the inflow of sediment from tributaries has significant impacts on the operation of the reservoir and local aquatic ecosystems. This study focuses on the Heishui River, currently the tributary with the highest sediment concentration in the Jinsha River Basin. Based on complete time-series observations of rainfall, runoff, and sediment across the watershed, the characteristics and main influencing factors of water and sediment transport and their changes in the basin are analyzed in detail. A high-precision distributed erosion and sediment yield model is established, and the simulation of the process of runoff and sediment yield are carried out. The results show that the trend of increasing rainfall runoff in the Heishui River Basin (HRB) is not significant. Due to soil and water conservation projects, the average annual sediment transport during 2001-2020 decreased by approximately 2.14 million tons compared to 1981-2000, representing a 34.5% reduction; Rainfall is the primary driver of sediment yield in the basin. Rainfall amount, spatial distribution, intensity, and duration all affect sediment yield and transport. Heavy rainfall in the middle-lower reaches (Puge to Ningnan section) is more likely to cause high sediment transport at the Ningnan hydrological station. Calculations show that during 2021-2023, the HRB experienced relatively low runoff, with average annual runoff of 1.68 billion m<sup>3</sup> and average annual sediment transport of 1.64 million tons. The reduced runoff caused a 65.3% decrease in sediment transport compared to the multi-year average.

**Keywords:** Baihetan Reservoir; Heishui River; sand yield model; sediment transport volume