

基于分布式水沙模型的大夏河流域水沙过程 演变机理

朱熠明^{1,2,3}, 蓝云龙⁴, 周祖昊², 陈赛男³, 蔡静雅², 刘佳嘉²

(1.中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300461;

2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

3.华北水利水电大学, 郑州 450046; 4.黄河水利委员会西宁水文水资源勘测局, 西宁 810008)

摘 要:黄河上游水沙过程受气候和土地利用变化等因素影响,年际及年内分布差异较大。选择大夏河流域为研究区,对研究区的实测径流和输沙量进行趋势性分析,应用流域分布式水沙模型(WEP-SED)模拟流域水沙过程并采用多因子归因分析方法进行分析,探究大夏河流域在变化环境下的水沙演变规律。结果表明:大夏河流域年径流量下降速率为 0.85 亿 m³/10 a,年输沙量下降速率为 66.25 万 t/10 a,趋势均为负持续性,输沙量的减小幅度是径流量的 1.8 倍;大夏河流域水沙过程主要受汛期降水、气温以及土地利用变化的影响,降水对径流量和输沙量减少的贡献率分别为 -77.0% 和 -90.0%,气温对两者的贡献率分别为 -29.7% 和 -16.5%,而土地利用变化对两者的影响呈现微增作用。

关键词:水沙演变机理; 分布式水沙模型; 多因子归因分析方法; 大夏河流域

中图分类号:TV141

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0121-07

Evolution Mechanism of Water and Sediment Processes in Daxia River Basin Based on Distributed Water and Sediment Model

ZHU Yiming^{1,2,3}, LAN Yunlong⁴, ZHOU Zuhao², CHEN Sainan³, CAI Jingya², LIU Jiajia²

(1.CCCC (Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd.,

Tianjin 300461, China; 2.State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in
River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 4.Xining
Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Xining 810008, China)

Abstract: The water-sediment process in the upper reaches of the Yellow River is affected by factors such as climate and land use changes, and its distribution varies greatly between and within the year. The Daxia River Basin was selected as the study area to analyze the measured runoff and sediment transport data. The watershed distributed water and sediment model (WEP-SED model) was used to simulate the water and sediment processes, and the multi-factor attribution analysis method was used to analyze the water and sediment evolution patterns of the Daxia River Basin under changing environments. The results show that the annual runoff decline rate of the Daxia River Basin is 85 million m³/decade, and the annual sediment discharge decline rate is 662 500 t/decade; the trends are all negative and persistent; the reduction in sediment volume is 1.8 times that of runoff; the water and sediment processes in the Daxia River Basin are mainly affected by precipitation, temperature and land use changes during the flood season; the contribution rate of precipitation to the reduction of runoff and sediment is -77.0% and -90.0%, and the contribution rate of temperature is -29.7% and -16.5%, respectively, while the impact of land use change on runoff and sediment increases slightly.

Keywords: evolution mechanism of water and sediment; distributed water and sediment model; multi-factor attribution analysis method; Daxia River Basin

收稿日期:2020-08-14

修回日期:2020-09-06

资助项目:国家重点研发计划课题“未来 30—50 年黄河流域径流变化趋势预测”(2016YFC0402405);流域水循环模拟与调控国家重点实验室课题“黄河流域降雨径流关系时空演变及其尺度效应”(SKL2018TS04)

第一作者:朱熠明(1995—),男,河北石家庄人,助理工程师,硕士,研究方向为流域水循环模拟、疏浚工程。E-mail:zhuyiming2898@outlook.com

通信作者:周祖昊(1975—),男,湖北武汉人,教高,博士,研究方向为流域水循环及伴生过程模拟与调控。E-mail:zhzh@iwhr.com

黄河上游来水来沙分布不均、水沙异源的问题对黄河流域开发治理影响较大^[1-2]。针对黄河上游水沙变化规律,学者们从多角度进行了研究,侯素珍^[3]、张世军^[4]、罗春红^[5]、田小靖^[6]等采用趋势性和突变性方法对黄河上游石嘴山、头道拐等水文站的实测输沙量进行规律和发展趋势分析,站点断面年输沙量持续性锐减,于 1968 年和 1986 年输沙量发生突变,呈显著性减少趋势;郭彦^[7]、许文龙^[8]、苏晓慧^[9]、王秀杰^[10]等采用小波等周期性分析方法,发现黄河上游唐乃亥、石嘴山、头道拐等站点月输沙量的周期性在 70—90 年代间开始减弱并于 2000 年后消失,水沙序列的丰枯变化趋势不一致,水沙变化具有多时间尺度特性,大中尺度振荡嵌套较小尺度的周期振荡;姚文艺^[11]、申冠卿^[12]等探究黄河上游龙羊峡、刘家峡水库运行后引起的流量削峰作用与调节过程对河道输沙过程、冲淤演变产生的影响;冉大川等^[13]对黄河上游内蒙古河段构建降雨产流产沙力经验模型计算降水和水土保持措施对该河段产沙量的影响,降水是影响该河段产沙量减少的重要因素。

目前的研究多是针对黄河上游干流水文断面或水库开展,且多是利用实测输沙资料分析序列的趋势性、突变性、周期性等规律,而对于产沙量较大的支流水沙演变规律研究很少,且很少使用分布式水沙模型模拟探究水沙过程变化的机理。支流的气候条件、水文条件、地形地貌条件、植被条件、土壤条件与黄河干流不同,其变化特征和时空分布呈现明显的差异性。本文以黄河上游大夏河流域为研究区,分析该流域的水沙演变规律、变异特征及驱动机制。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大夏河发源于青海省黄南藏族自治州同仁县南部和甘肃省夏河县西南部,河源海拔 4 221 m,干流河道全长 203 km,流域面积 7 154 km²,于甘肃省临夏县塔张村注入刘家峡水库,大夏河流域地理位置 102°02′—103°23′E,34°51′—35°48′N。折桥水文站为大夏河流域出口控制站,控制流域面积 6 967 km²。

1.2 数据来源

研究区气象数据来源于中国气象数据网;地形数据采用的高程数据为 SRTM90;土壤类型数据来源于全国第二次土壤普查和《中国土志》;土地利用信息包括经国家相关部门批准的 1986 年、1996 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 6 个时段的 1 : 100 000 土地利用图;水土保持建设信息根据全流域各县《水利统计年鉴》公布数据,并与土地利用图的叠加提取获

得;植被信息由遥感数据反演,主要包含叶面积指数、植被覆盖度指数,其中植被覆盖度根据归一化植被指数(NDVI)计算得出,NDVI 来源于两种数据源分别为:8 km 精度的 GIMMS AVHRR 数据和 1 km 精度的 MOD13A2 数据;叶面积指数来源于两种数据源分别为:8 km 精度的 GlobMap LAI 数据和 1 km 精度的 MOD15A2 数据;输沙量数据来源于黄河水利委员会提供的折桥水文站观测数值。

2 研究方法

2.1 水循环表征要素的时空演变规律研究方法

水循环表征要素的时空演变规律主要采用统计学方法。使用 Mann-Kendall 非参数检验法^[14],对大夏河流域多年实测输沙序列要素的时间序列进行显著性检验,定量反映大夏河流域变化趋势和突变情况。

2.2 水循环影响要素的成因机理解析方法

水循环影响要素的成因机理解析方法主要采用水文模型法及归因分析法。基于 WEP-L 模型^[15-17]构建的 WEP-SED 模型^[18-19]模拟流域的产输沙过程。图 1 为 WEP-SED 模型坡面及沟道的产输沙过程,按照土壤侵蚀和泥沙输移的一般步骤,逐流域进行“坡道—沟道—河道”三级流域输沙计算。为验证模型在研究区的模拟效率,选取 Nash-Sutcliffe 效率系数(NASH)、相对误差(RE)及判定系数(R^2)评价模型模拟效果^[20]。一般来说, $Re < 20\%$, $R^2 > 0.5$, $Nash > 0.5$,认为模型模拟是可靠的。

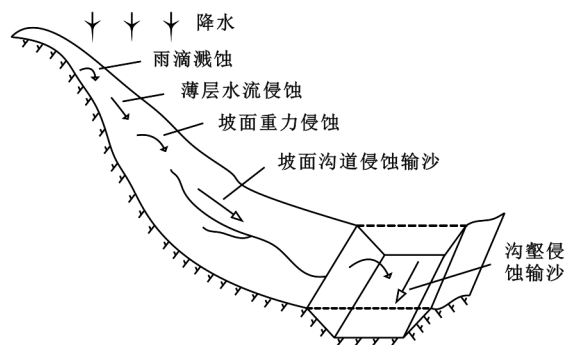


图 1 WEP-SED 模型坡面及沟道产沙过程

对折桥站模拟水沙过程进行率定和验证,表 1 为该站月尺度水沙过程模拟结果评价,图 2 为该站水沙过程模拟与实测结果对比。经过率定和验证后的水沙过程模拟均满足模拟评价的精度要求,为大夏河流域水沙过程变化分析和归因分析提供条件。

通过多因素归因分析方法进行归因计算^[21],根据各因素计算率公式,得到各因素分解量如下:

$$\delta x_i = \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{j=1}^{2^n} e_{i,j} \times S_j \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

$$A=\sum_{i=1}^n\delta x_i\quad(i=1,\cdots,n)\tag{2}$$

$$\beta_i=\frac{\delta x_i}{|\sum_{i=1}^n\delta x_i|}\times100\%\quad(i=1,\cdots,n)\tag{3}$$

式中: δx_i 表示因素 x_i 的贡献量; $e_{i,j}$ 是对应第 i 个因素在第 j 个情景下的权重系数(变化期 $e_{i,j}=1$,基准期 $e_{i,j}=-1$); S_j 是第 j 个情景的模型模拟结果值; n 为影响因素个数; A 为所有因素影响贡献量之和; β_i 表示在考虑 n 个影响因素前提下,第 i 个因素占总变化的贡献率。分析不同时期各因素对水沙过程影响,采用多因素归因分析方法对水沙过程进行归因分析,

包括气温、降水和土地利用 3 个影响因素,情景设置见表 2。

表 1 1956—2016 年折桥水文站月均水沙过程模拟结果评价

指标	模拟时段	RE/%	R ²	NASH
月均流量	全时段(1956—2016 年)	0.80	0.85	0.82
	校准期(1956—2000 年)	−0.90	0.86	0.83
	验证期(2001—2016 年)	6.70	0.80	0.75
月均输沙率	全时段(1956—2011 年)	0.36	0.71	0.65
	校准期(1956—2000 年)	0.24	0.72	0.68
	验证期(2001—2011 年)	2.86	0.60	0.57

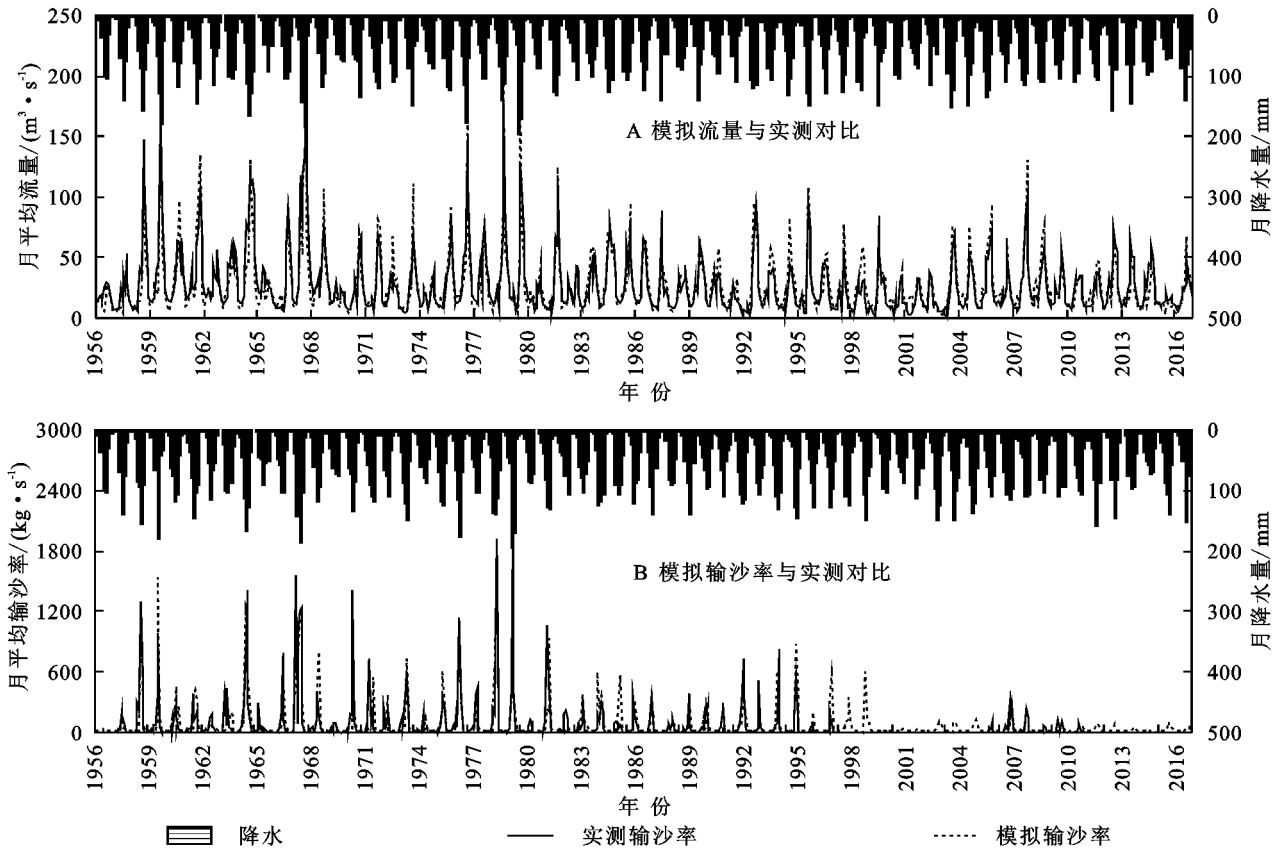


图 2 1956—2016 年折桥水文站水沙过程模拟与实测结果对比

表 2 归因分析因素情景

归因情景		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
影响因素	气温	变化期	变化期	基准期	基准期	变化期	基准期	变化期	基准期
	降水	变化期	基准期	变化期	基准期	变化期	变化期	基准期	基准期
	土地利用	变化期	基准期	基准期	变化期	基准期	变化期	变化期	基准期

3 结果与分析

3.1 实测水沙过程规律分析

图 3 为大夏河流域实测年径流量和年输沙量的变化情况,最大年径流量为 24.35 亿 m³(1967 年),最小年径流量为 3.85 亿 m³(1991 年),最大年径流量是最小年径流量的 6.3 倍;最大年输沙量为 1 391.48 万 t

(1967 年),最小年输沙量为 44.71 万 t(2009 年),最大年输沙量是最小年输沙量的 31.12 倍;径流和输沙变化差异极大。根据 Mann-Kendall 趋势分析法分析,年径流量整体上呈减少趋势,变化率为−0.85 亿 m³/10 a,1994 年后年径流量下降趋势显著;年输沙量整体上呈减少趋势,变化率为−66.25 万 t/10 a,1990 年后年输沙量下降趋势显著。

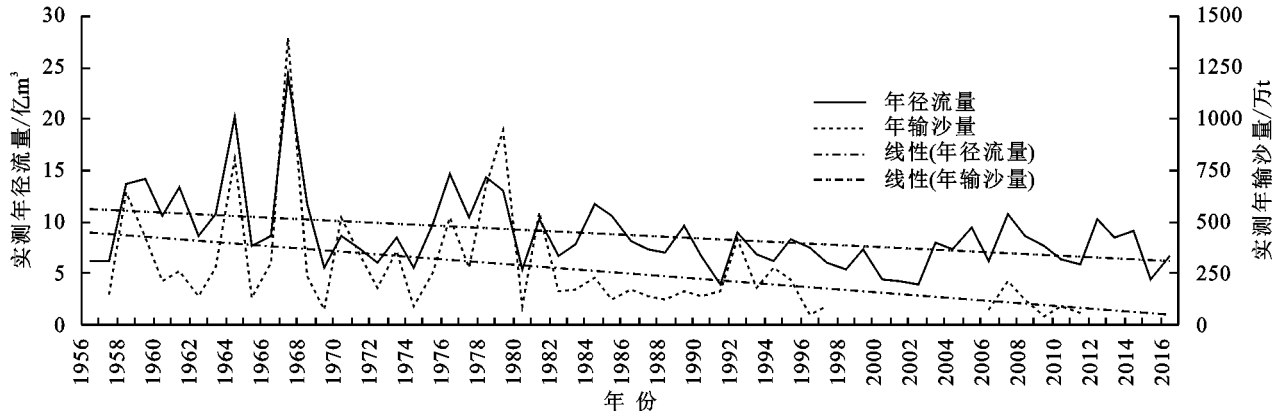


图 3 1956—2016 年大夏河流域实测径流和输沙量年际变化情况

图 4 为大夏河流域实测年径流量和年输沙量 Mann-Kendall 突变性检验结果,对检验结果进行分析,在给定显著性水平为 0.05 ($U_{0.05} = 1.96$) 的条件下,对于年径流量,标准正态分布序列 UF 和反序列 UB 在 1984—1985 年出现交点,年径流量发生突变,下降趋势显著;对于年输沙量,UF 和 UB 曲线在

1987—1988 年出现交点,该段时间年输沙量发生突变,且下降趋势显著。综上所述,年径流量和年输沙量均在 1980s 的中期发生突变。后续分析中,按照年输沙量出现的拐点分段,以 1956—1987 年为基准期,1988—2018 年为变化期,对水沙过程变化规律进行分析。

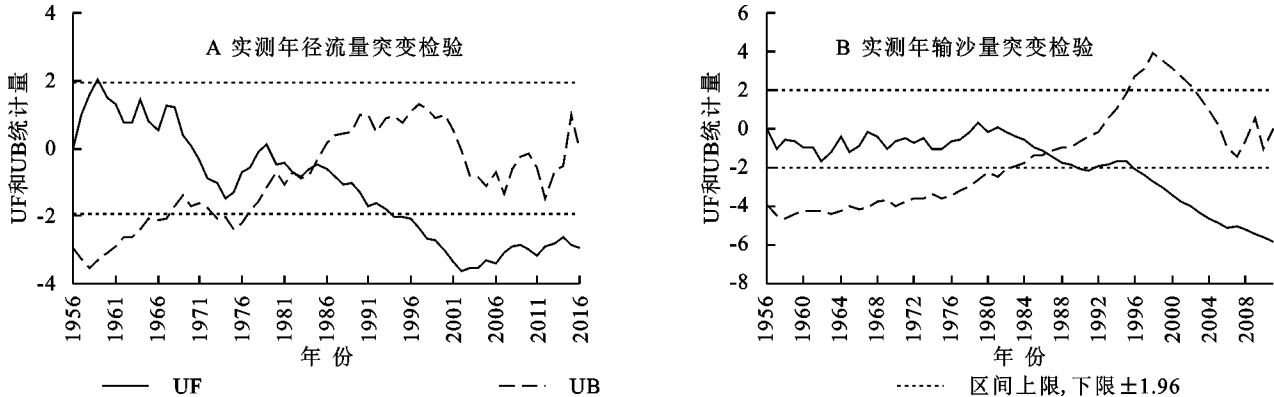


图 4 1956—2016 年大夏河流域实测径流和输沙量 Mann-Kendall 检验

图 5 为基准期和变化期的实测水沙过程年内变化情况。对于输沙年内分布过程,折桥站的年内水沙过程曲线呈明显“单峰型”,但河道径流过程与输沙过程不完全同步。

最大月径流量出现在 9 月,而最大月输沙率出现在 8 月;径流量减幅最大的月份也出现在 9 月,而输沙率减幅最大的月份也出现在 8 月。由此推断,大夏河产流产沙机制存在较大的不同。

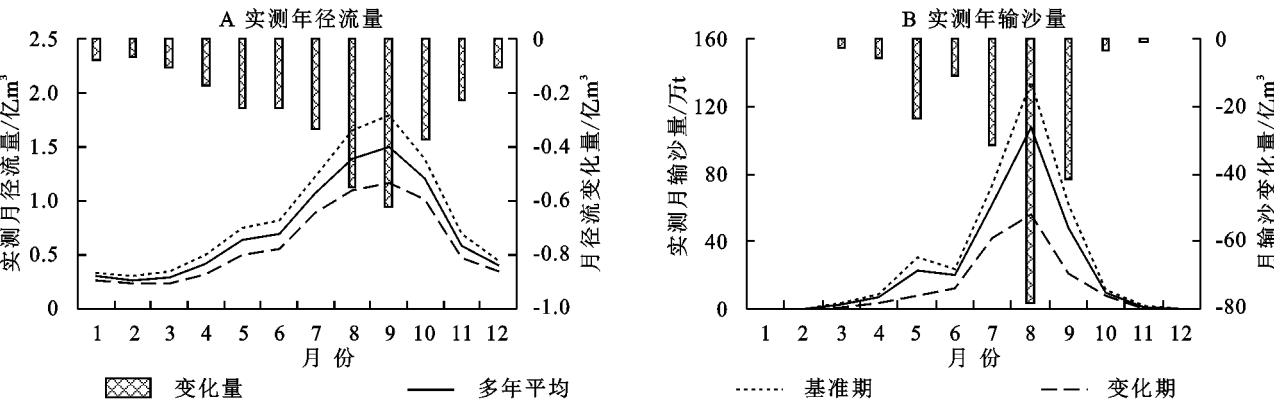


图 5 1956—2016 年大夏河流域基准期和变化期实测水沙过程年内变化情况

通过计算,折桥站的多年平均输沙量 282 万 t,主要集中在汛期的 7—9 月,占年输沙量的 79%。变化

期(1988—2018 年)相较于基准期(1956—1987 年)的径流量和输沙量均在减小,变化期的年径流量较基准

期减少 31%,输沙量减小 57%,输沙量的减小幅度是径流量的 1.8 倍;在输沙量最大的 7—9 月,输沙量月均减小幅度为 56%,径流量月均减小幅度为 32%,与全年基本一致;在输沙量最大的 8 月,输沙量月均减小幅度为 58%,径流量月均减小幅度为 33%,与全年基本一致;分析在 1—6 月和 10—12 月的输沙量变化,相较于基准期,变化期的径流量和输沙量同汛期一样均在减少,该 9 个月的输沙量减少 52%,径流量减少 29%,与全年基本一致。

3.2 气象要素和土地利用变化情况

表 3 和图 6 为大夏河流域在基准期与变化期各影响因素变化情况。变化期内的年均气温和月均气温较基准期均呈增加趋势,流域多年平均气温 1.91℃,变化期较基准期增加 0.80℃;其中,7 月、8 月的月均气温为年内最大温度,多年平均月均气温分别为 11.88℃,11.38℃,变化期内月均气温较基准期分别增加 0.90℃,0.76℃;1 月、12 月为年内最低月均气温,多年平均月均气温分别为-9.63℃,-8.04℃,变化期内平均月均气温较基准期分别增加 0.96℃,0.96℃。

大夏河流域多年平均年降水量 525.33 mm。分析降水、径流、输沙年内过程,发现最大月降水量出现在 7—8 月,略早于最大月输沙量(8 月),早于最大月径流量(9 月)。可以推断,输沙量不仅与河道径流量有关系,还跟坡面的产流、产沙量有关系,8 月降水量

最大,推断是 8 月输沙量最大的原因,在后文模型模拟中将对进行分析。

变化期的多年平均降水量较基准期变化幅度很小,两个时期的年均降水变化幅度几乎为 0,7 月和 8 月为年内最大降水月,占年降水量的 40%,分析这两个月发现,变化期 8 月的降水较基准期减少 11.32 mm,下降幅度 10%;变化期 7 月降水较基准期增加 0.65 mm,增加幅度只有 1%。

对于土地利用,大夏河流域林地、草地、裸地、农田面积占比分别为 30.6%,45.2%,17.8%,5.3%,余下的 1.1%为水域和城镇地表面积,所占比例较小。变化期相较基准期,林地减少面积与草地增加面积的变化幅度较大且变化量相当,裸地、农田面积变化总量较小,见表 3。

表 3 1956—2018 年大夏河流域基准期与变化期各影响因素对比分析

因素	基准期	变化期	变化量	
	1957—1987 年	1988—2018 年		
气温/℃	1.47	2.35	0.88	
降水/mm	527.66	526.05	−1.61	
土地利用	林地/km ²	2239.44	2023.41	−216.03
	草地/km ²	3050.87	3255.20	204.33
	裸地/km ²	1250.25	1227.82	−22.43
	农田/km ²	354.01	386.19	32.18

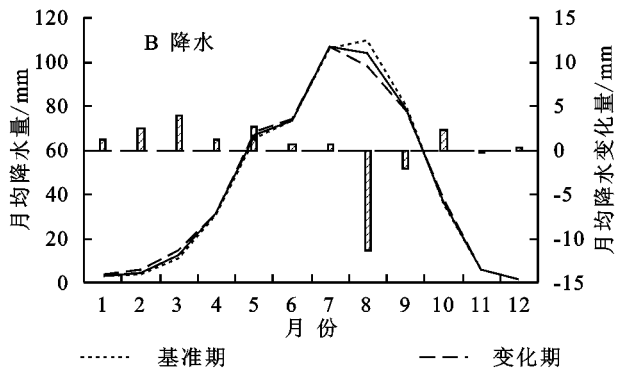
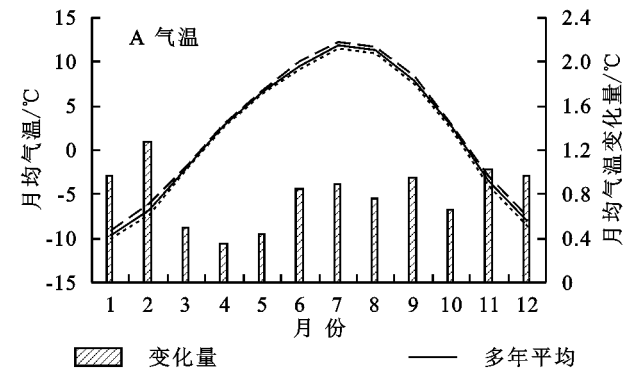


图 6 1956—2018 年大夏河流域气温、降水年内分布情况

3.3 气候要素和土地利用变化对水沙过程归因分析

3.3.1 水沙年内分布规律成因分析 流域内蒸散发量的变化受气温、降水等因素影响,在前文 3.2 节分析得到,7—8 月的多年平均月均气温为年内最大月均气温,多年平均月降水量在 7 月出现峰值,通过对大夏河流域的蒸散发量进行模拟,分析大夏河流域在年内蒸散发量变化过程,大夏河流域年均气温蒸散发量 474.06 mm,月蒸散发量在年内随着温度的变化呈明显的先增后减的趋势,在 7 月达到年内峰值,其中,5—9 月的蒸散发量分别为 67.7 mm,80.5 mm,92.7 mm,87.5 mm,60.9 mm,共

计约占全年总蒸散发量的 82%。

通过分析,7 月之前的降水量较小,7 月降水量较 6 月增加 31.0%,达到年内峰值。由于 7 月前的土壤较为干燥,含水率较低,土壤吸水率较大,又因为 7 月的蒸散发量较 6 月增加 13.2%达到年内峰值,在土壤吸水 and 蒸散发大的双重影响下,径流量在 7 月并未达到年内峰值,但较 6 月增幅 35.5%;由于 7 月较大的降水强度,坡面上的泥沙颗粒受降水形成的坡面水流作用,较容易发生泥沙起动,表层土壤中起动功率较低的泥沙颗粒较容易发生迁移,可较快完成产汇沙过程,导致 7 月的月输

沙量增加较多,输沙量较 6 月的增加幅度为 68.4%。

进入 8 月后,8 月蒸散发量较 7 月减少 5.9%,降水减少 2.5%,蒸散发的减少幅度高于降水减少幅度,导致 8 月的径流量较 7 月增加 23.0%;由于降水过程的持续,8 月的土壤含水率较 7 月高,泥沙颗粒在水流作用下更容易发生迁移,故年内月输沙量的峰值出现在 8 月,输沙量较 7 月增加 42.0%。9 月的蒸散发量较 8 月减少 43.7%,降水的幅度减少为 32.2%,蒸发的减少幅度大于降水,因为 9 月的实际降水量依然较大,且土壤含水率较 7 月高,径流在 9 月出现年内峰值;随着 9 月降水量的减少,少部分泥沙起动功率较高的颗粒较难完成泥沙颗粒的迁移,故 9 月的月输沙量较 8 月下降明显,下降幅度为 124.3%。10 月后,随着降水、蒸发的快速下降,径流量和输沙量下降明显,减少幅度分别为 24.0%和 124.3%。

3.3.2 各项因子贡献分析 图 7 为大夏河流域径流过程在气温、降水和土地利用等因素影响下的水沙过程年内影响量变化情况,表 4 为该流域在各因素影响下的水沙过程归因分析。通过分析,降水因素对大夏河流域减水、减沙的影响最大。前文中分析

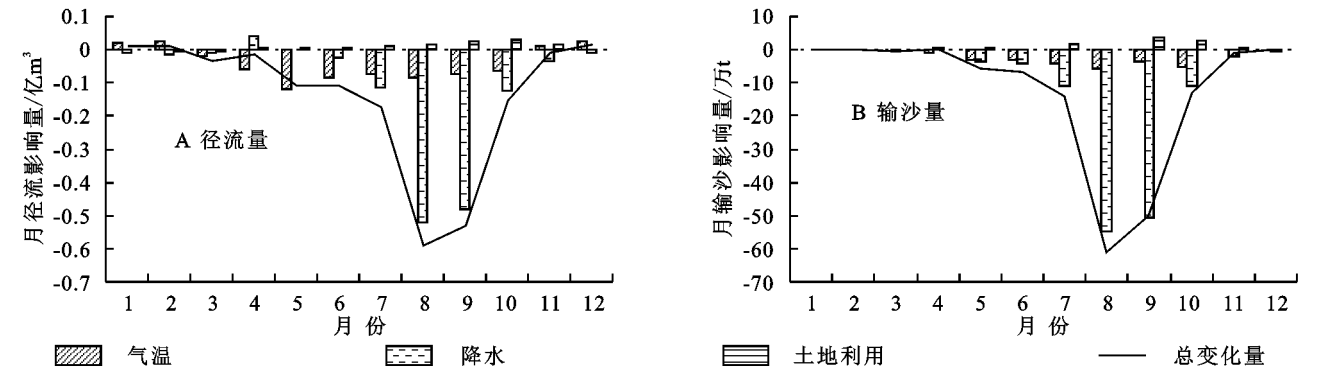


图 7 各因素对 1956—2018 年大夏河流域水沙过程的影响

表 4 1956—2018 年大夏河流域产输沙减少归因分析

项目	总变化量	各因素影响量			各因素贡献率/%		
		气温	降水	土地利用	气温	降水	土地利用
折桥站年径流量/亿 m ³	−1.69	−0.50	−1.30	0.11	−29.7	−77.0	6.7
折桥站年输沙量/万 t	−152.53	−25.19	−137.34	10.00	−16.5	−90.0	6.6

4 结论与展望

4.1 结论

本文采用统计学方法分析了大夏河流域实测输沙量的变化特征,采用 WEP-SED 模型模拟该流域水沙过程并进行归因分析,探究气温、降水和土地利用变化对水沙过程的影响,得到如下结论:

(1) 通过 Mann-Kendall 趋势分析,大夏河流域 1957—2011 年的年径流量呈减少趋势,年平均下降

了降水量下降对径流和输沙过程的影响方式,尤其在降水量较大的 7—9 月,径流量和输沙量下降明显。综合来看,降水对减水、减沙的贡献率分别为 −77.0%和 −90.0%。

分析气温对径流和输沙过程的影响,变化期内 5—10 月的月均气温较基准期增加,该时段的气温增加导致流域内蒸散发加大,因此变化期的河道水量较基准期减少,河道水流挟沙力下降,从而输沙量下降;其他月的气温对径流、输沙的影响较小,对年内变化总体影响不大。综合来看,气温对水沙过程的影响以减水、减沙为主,贡献率分别为 −29.7%和 −16.5%为主。

分析土地利用因素对水沙过程影响,大夏河流域内土地利用主要以林地、草地和裸地为主,农田面积较小,由于受人类活动的影响,变化期较基准期的林地面积减少量与草地面积增加量变化相当,由于草地的保水固沙能力较林地弱,尤其是植被生长旺盛的 5—10 月,植被的面积变化导致该区域的综合保水固沙能力减弱,从而土地利用变化对径流量和输沙量的影响呈微弱的增水、增沙作用,贡献率分别为 6.7%,6.6%。

速率为 0.85 亿 m³/10 a;多年输沙量呈减少趋势,平均下降速率约为 66.3 万 t/10 a。采用 Mann-Kendall 突变检验,大夏河流域的年径流量在 1984—1985 年发生突变后呈显著下降趋势,年输沙量在 1987—1988 年发生突变后显著下降趋势,输沙量的减小幅度是径流量的 1.8 倍。

(2) 分析大夏河流域气温、降水和土地利用的在基准期和变化期的变化情况。变化期的年内气温较基准期增加幅度为 0.35~1.28℃,增加幅度较大;两时期的降

水年均变化为几乎为0,其中,在降水量最大的7月,变化期较基准期的变化量基本不变,但降水量次大的8月降水减少较多,减少了10%,其余月的降水量均有所增加;对于土地利用,林地面积减少量与草地面积增加量相当,裸地、农田面积变化总量较小。

(3) 采用多因素分析法对大夏河流域水沙过程归因分析,发现降水对折桥站径流量和输沙量减少的贡献最大,贡献率分别为-77.0%和-90.0%;气温对径流和输沙量变化的贡献率分别为-29.7%和-16.5%;土地利用变化对径流和输沙量的贡献率分别为6.7%和6.6%,对水沙产沙起到微弱的增加作用。

4.2 展望

虽然本文使用的 WEP-SED 模型在大夏河流域具有较好的适用性,但由于对水沙过程认识的局限性,模型模拟结果存在一定的误差。模型中所使用的气象数据、地形数据、土地利用类型、植被数据等由于测量和统计误差,对模型模拟结果的准确性和可靠性也有一定影响。下一步研究中,将侧重于上述不确定性问题的研究以提高量化结果。

致谢:感谢黄河水文水资源科学研究院张学成教高和李东教高、西安理工大学的李鹏教授、西北农林科技大学的赵广举教授、黄河水利科学研究院的夏润亮教高、中国水利水电科学研究院的张晓明教高对本研究的大力支持。

参考文献:

- [1] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近70年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):120-127.
- [2] 李万寿,吴国祥.青海省境内黄河上游区水沙来源及组成分析[J].水土保持通报,1999,19(6):6-10.
- [3] 侯素珍,王平,楚卫斌.黄河上游水沙变化及成因分析[J].泥沙研究,2012(4):46-52.
- [4] 张世军,俞卫平,张红平.黄河上游径流泥沙特性及变化趋势分析[J].水资源与水工程学报,2005,16(3):57-61.
- [5] 罗红春,冀鸿兰,牟献友,等.黄河石嘴山站水沙变化及趋势分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(4):193-201.
- [6] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.
- [7] 郭彦,侯素珍,王平,等.基于小波分析的黄河上游水沙多时间尺度特征[J].干旱区研究,2015,32(6):1047-1054.
- [8] 许文龙,赵广举,穆兴民,等.近60年黄河上游干流水沙变化及其关系[J].中国水土保持科学,2018,16(6):41-50.
- [9] 苏晓慧,张晓华,田世民.黄河上游宁蒙河段水沙变化特征分析[J].人民黄河,2013,35(2):13-15.
- [10] 王秀杰,练继建.近43年黄河上游来水来沙变化特点[J].干旱区研究,2008,25(3):342-347.
- [11] 姚文艺,侯素珍,丁赞,龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13.
- [12] 申冠卿,张原锋,侯素珍,等.黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响[J].泥沙研究,2007(1):67-75.
- [13] 冉大川,张栋,焦鹏,等.西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):143-149.
- [14] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings A, 1998, 454(1971):903-995.
- [15] Jia Y, Ni G, Kawahara Y, et al. Development of WEP model and its application to an urban watershed[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(11):2175-2194.
- [16] Jia Y, Wang H, Zhou Z, et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3/4):606-629.
- [17] Zhou Z, Jia Y, Qiu Y, et al. Simulation of Dualistic Hydrological Processes Affected by Intensive Human Activities Based on Distributed Hydrological Model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(12):04018077.1-04018077.16.
- [18] Cai J, Zhou Z, Liu J, et al. A three-process-based distributed soil erosion model at catchment scale on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 578, 124005.10.1016/j. jhydrol.2019.124005.
- [19] 蔡静雅,周祖昊,刘佳嘉,等.基于三级汇流和产输沙结构的分布式侵蚀产沙模型[J].水利学报,2020,51(2):140-151.
- [20] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles-ScienceDirect[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):282-290.
- [21] 刘佳嘉,周祖昊,贾仰文,等.水循环演变中多因素综合影响贡献量分解方法[J].水利学报,2014,45(6):658-665.