

台风“利奇马”暴雨引发的流域产流产沙特征 ——以山东省临朐县为例

乔殿新¹, 冯伟², 王飞^{3,4}, 李斌斌¹, 韩剑桥^{3,4}, 李琦¹, 王国振⁴

(1.水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 2.水利部 水土保持司, 北京 100053;

3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了明确极端暴雨下不同尺度流域的产流产沙特征,为应对极端暴雨事件提供技术支撑。基于 2019 年 9 号台风“利奇马”导致的暴雨洪水事件,采用暴雨中心的辛庄控制站和弥河干流黄山水文站的水文数据,分析了本次暴雨中两个不同尺度流域的径流、泥沙总量及过程特征。结果表明:2019 年 8 月 10—17 日,辛庄观测站次洪水径流总量为 123 万 m³,实测洪峰为 40.96 m³/s,洪水泥沙总量为 4 600 t,产沙模数为 1 285 t/km²。黄山水文站实测洪峰流量为 2 210 m³/s,是自 1988 年建站以来的最大流量,重现期为 33.3 年一遇。黄山水文站输沙量为 36.23 万 t,输沙模数为 966 t/km²。本次暴雨洪水的输沙量是多年平均输沙量(19.50 万 t)的 1.65 倍,与 2018 年夏季汛期洪水泥沙过程的水沙关系曲线相关性较好。综上,基于水沙关系的黄山水文站流域场次洪水输沙量预测方法是准确的,说明在极端暴雨事件中采用历史洪水泥沙关系预测输沙量是可行的。

关键词:“利奇马”台风;暴雨;产流产沙;水土流失;输沙量预测

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0031-05

Characteristics of Runoff and Sediment Yield of Typhoon ‘Lekima’ Rainstorm —A Case in Linqu County, Shandong Province

QIAO Dianxin¹, FENG Wei², WANG Fei^{3,4}, LI Binbin¹,
HAN Jianqiao^{3,4}, LI Qi¹, WANG Guozhen⁴

(1.Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources,

Beijing 100053, China; 2.Department of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources,

Beijing 100053, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the rainstorm flood event caused by the 9th typhoon ‘Lekima’ (2019), we analyzed the characteristics of runoff and sediment yield of two watersheds of different scales in this rainstorm by using hydrological data from Xin Zhuang Control Station and Huangshan Hydrological Station in the mainstream of Mihe River in the rainstorm center with the purpose of clarifying the characteristics of runoff and sediment yields in different scale basins under extreme rainstorm and providing technical support for coping with extreme rainstorm events. The result showed that from August 10th to August 17th, 2019, the total flood runoff of Xin Zhuang Observation Station was 1.23 million m³, and the measured flood peak was 40.96 m³/s; the total amount of flooded sediment was 4 600 t, and the specific sediment yield was 1 285 t/km²; the measured peak flow at Huangshan Hydrological Station was 2 210 m³/s, which was the maximum flow since the establishment in 1988, and the return period was 33.3 years; the sediment runoff of Huangshan Hydrological Station was 362 300 t, and the sediment transport modulus was 966 t/km²; the sediment runoff caused by this storm and flood was 1.65 times that of the average annual sediment runoff (195 000 t); the correlation between the storm flood and the water-sand relationship curve of the flooding process in the flood season in the summer of 2018 was good. In conclusion, the prediction based on the relationship between water and

收稿日期:2020-07-30

修回日期:2021-05-05

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42077071);国家自然科学基金水科学联合基金(U2040208)

第一作者:乔殿新(1970—),男,山东莱阳人,教授级高级工程师,主要从事水土保持行政和技术管理工作。E-mail:qdx@mwr.gov.cn

通信作者:韩剑桥(1987—),男,河南禹州人,副研究员,主要从事流域洪水泥沙与环境研究。E-mail:hjq13@163.com

sediment is accurate, indicating that it is feasible to use the relationship between historical flood and sediment to predict the sediment transport during extreme rainstorm.

Keywords: ‘Lekima’ typhoon; rainstorm; runoff and sediment yield; soil erosion; prediction of sediment discharge

全球气候变化背景下,我国特大暴雨的发生频次和影响范围显著增加^[1]。极端暴雨形成的洪水灾害,严重威胁居民人身财产安全,导致工农业与城市经济遭受重大损失。如何应对极端暴雨条件下的洪水灾害是中国乃至世界未来长期时间内需要面对的新问题^[2]。研究极端暴雨下不同尺度流域的产流产沙特征对于极端暴雨致灾机理与防灾减灾具有重要的理论与实践意义。

在特定降雨条件下,流域产流、产沙及其之间的相互关系是流域综合治理的理论基础。流域的产流产沙是一个非常复杂的物理过程,是降水和流域下垫面相互作用的结果^[3],人类活动主要通过改变土地利用方式和实施水土保持措施来改变流域下垫面,使流域的水文泥沙过程发生显著变化^[4-6]。目前通过一些经验模型、随机模型和确定性模型已经可以进行流域产流产沙的预测^[7-9],其中利用 SWAT, MIKE, WEPP, RUSLE 等模型来模拟流域的产流产沙过程已经在实际应用中得到了广泛的认可^[10-14],但是这类方法对资料要求性较高并且计算量较大。而通过使用水沙关系来模拟流域的水沙过程,则回避了很多细节问题,对资料的要求较低^[15]。冉大川等^[16]使用历史水沙关系预测佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水输沙量,发现水土保持措施使得暴雨输沙量减少了 64.3%;赵阳等^[17]以无定河“7·26”暴雨为例,发现在相似降雨的条件下,水土保持措施使得暴雨洪水输沙量减少了 53%;师长兴等^[18]通过水沙关系曲线分析了黄河内蒙古段不同时期的洪水输沙量特征。由此可知,基于水沙关系的场次洪水输沙量预测可以在宏观角度对场次洪水输沙量有一个相对准确的预测。

为此,本文以 2019 年 8 月 10 日发生于山东省潍坊市临朐县的“利奇马”台风暴雨洪水事件为对象,通过降雨洪水泥沙数据进行产流产沙特征分析,提出基于水沙关系的场次洪水输沙量预测方法,以期应对类似暴雨引发的洪水灾害和水土流失防治提供理论依据。

1 研究区概况

台风“利奇马”于 8 月 10 日 1:45 在浙江省温岭市城南镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有 16 级(52 m/s),又于 8 月 11 日 20:50 在山东省青岛市黄岛区沿海再次登陆,登陆时中心附近最大风力有 9

级(23 m/s),此后其移入渤海海面并不断减弱,最终于 8 月 13 日 14:00 被中央气象台停止编号。“利奇马”在山东造成的过程降雨强度位列历史记录第一,在 8 月 11 日 20:00—12 日 16:00 过境期间,潍坊市临朐降水量 385.4 mm,打破了当地单日降水极值纪录,黄山水文站测得的洪峰流量高达 2 210 m³/s,是自 1988 年以来记录的最大洪峰流量^[19]。

临朐县隶属山东省潍坊市(北纬 36°04′—36°37′,东经 118°14′—118°49′),属典型的北方丘陵轻度侵蚀区,暖温带亚湿润大陆性季风气候,多年平均降水量 695 mm。弥河由南向北而过,县内流域面积 1 438 km²,占临朐县总面积的 78.5%。

黄山水文站控制流域位于弥河上游,流域面积为 375 km²(图 1)。该流域多年平均降水量 707 mm,多年平均径流深 156 mm,折合年径流量 1.23 亿 m³。流域内主要由棕壤、褐土覆盖,植被覆盖度较低,水土流失严重,河流输沙量大。辛庄观测站控制流域面积为 3.58 km²。该流域多年平均降水量 592 mm,多年平均径流深 254 mm,降雨主要集中在夏季。流域内主要由棕壤土覆盖,土壤孔隙度大,胶结力弱,易被雨水冲蚀。

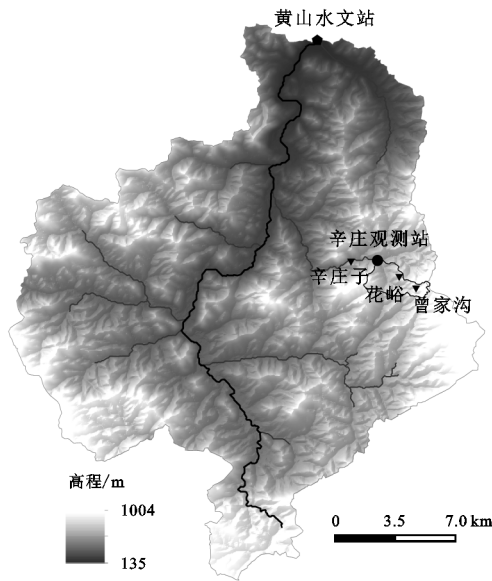


图 1 研究区位置

2 研究方法

2.1 降雨数据来源与处理

在暴雨中心落区选取曾家沟、花峪和辛庄子 3 个

雨量站(图 1)的降雨观测资料分析本次台风暴雨的降雨过程。3 个雨量站的降雨过程资料及辛庄子雨量站的 24 h 最大降雨量资料来源于山东省潍坊市水文局。主要参考了次降雨量、最大 24 h 降雨和日降雨量几个指标(表 1)。其中曾家沟雨量站的

次降雨量、最大 24 h 降雨量、最大日雨量等值均为最大,花峪次之,辛庄子最小。利用 python 软件对降雨数据数据进行处理,计算出最大瞬时雨强;采用皮尔逊Ⅲ型曲线计算该次暴雨中 24 h 最大降雨量的重现期^[19]。

表 1 暴雨中心 3 个雨量站降雨数据 mm

雨量站	气象日雨量(20:00—次日 20:00)			水文日雨量(8:00—次日 8:00)			次降雨	最大 24 h 降雨
	10 日	11 日	12 日	10 日	11 日	12 日		
曾家沟	73.5	386.0	41.5	383.5	116.0	2.5	570.6	507.6
花峪	89.2	424.8	38.2	423.4	127.4	1.4	552.2	487.4
辛庄子	91.0	441.2	38.4	428.0	140.8	4.0	502.0	434.0

2.2 洪水泥沙资料的获取与处理

洪水泥沙资料来源于潍坊市水文局收集的辛庄观测站和黄山水文站的实测数据,主要参考了洪峰流

量、沙峰、洪水径流总量、洪水泥沙总量、径流模数、产沙模数等指标(表 2)。

表 2 黄山水文站与辛庄观测站洪水泥沙数据

测站	洪峰流量/ (m ³ · s ⁻¹)	沙峰/ (kg · s ⁻¹)	洪水径流 总量/万 m ³	洪水泥沙 总量/t	径流模数/ (万 m ³ · km ⁻²)	产沙模数/ (t · km ⁻²)
辛庄观测站	55.96	283.41	123.00	4600.00	34.36	1285.00
黄山水文站	2210.00	18634.00	10200.00	362300.00	27.20	966.00

其中流量数据来源于实测值,洪水径流总量根据公式(1)计算:

$$V=\sum \frac{Q_{n+1}+Q_n}{2} \cdot \Delta T \tag{1}$$

式中:V 为洪水径流总量;Q_n 为一个时间点的实测流量;Q_{n+1} 为后一个时间点的实测流量(m³/s);ΔT 为两个时间点的时间差(s)。将所有测量时段内的洪水径流量累加得到洪水径流总量。

月 10 日上午 9:00 左右,持续近 48 h,直至 2019 年 8 月 12 日上午 8:00 才基本停止。曾家沟为本次“利奇马”台风的暴雨中心,最高瞬时雨强发生于 8 月 11 日 08:08:43—08:08:50,为 240 mm/h。离曾家沟较远的花峪最高瞬时雨强为 144 mm/h,与曾家沟最强瞬时雨强时间接近,但瞬时雨强明显弱于曾家沟。离暴雨中心最远的辛庄子最高瞬时雨强为 138 mm/h,发生于 8 月 11 日 04:42:49—04:43:27。

暴雨中心的曾家沟降雨量达到 570.6 mm,占多年平均降雨量的 82%。花峪暴雨过程与曾家沟相似,降雨量为 552.2 mm。辛庄子的降雨过程弱于曾家沟与花峪,其降雨量为 502.0 mm。辛庄子雨量站 24 h 最大降雨量为 434.0 mm,根据皮尔逊Ⅲ型曲线计算重现期,达到了 50 a 一遇(图 3)。

3.2 小流域产流产沙特征分析

由图 4 可知,辛庄观测站场次洪水径流总量为 123 万 m³,径流模数为 34.36 万 m³/km²;实测洪峰 40.96 m³/s,洪峰模数为 11.44 m³/(s · km²),发生于 8 月 11 日 6:00。辛庄观测站次洪水泥沙总量为 4 600 t,沙峰为 283.41 kg/s,产沙模数为 1 285 t/km²;最大含沙量为 6.92 kg/m³,发生于 8 月 11 日 6:00。对比洪水过程和泥沙过程,发现洪峰与沙峰出现的时间一致,洪水过程线与泥沙过程线基本重合,说明该地区的流量与输沙率呈正比关系^[20]。

3.3 流域水沙输移特征

3.3.1 洪水泥沙分析 图 5 为黄山水文站洪水和泥

洪水泥沙总量采用公式(2)计算:

$$F=\sum \frac{P_{n+1}+P_n}{2} \cdot \Delta T \tag{2}$$

式中:P_n 为一个时间点的输沙率;P_{n+1} 为后一个时间点的输沙率(kg/s);ΔT 为两个时间点的时间差(s)。将所有时间段的泥沙量累加起来,得到测量时间内洪水泥沙总量。

根据潍坊市水文局所提供的历年洪峰流量数据(1988—2019 年),使用皮尔逊Ⅲ型曲线计算本次暴雨洪峰流量的重现期;采用 Excel 分别对 2019 年和 2018 年的两次洪水的水沙数据进行拟合,以得出两次洪水的水沙关系并进行对比,判断该区域在暴雨洪水的条件下水沙关系是否稳定,提出基于水沙关系的黄山水文站场次洪水输沙量预测方法。

3 结果与分析

3.1 暴雨特征分析

图 2 显示了曾家沟、花峪、辛庄子雨量站在本次暴雨期间的降雨过程。可以看出,暴雨开始于 2019 年 8

沙过程线图。受台风“利奇马”影响,黄山水文站实测洪峰 2 210 m³/s,发生于 8 月 11 日 06:30。该洪峰是黄山水文站自 1988 年建站以来的最大流量。图 6 为洪峰频率分析图,2019 年 8 月“利奇马”台风造成的洪峰流量重现期为 33.3 a 一遇。黄山水文站最大沙峰为 18 634 kg/s,出现在 8 月 11 日 06:30。平均含沙量为 3.34 kg/m³,最大含沙量为 11.4 kg/m³;输沙量为 36.23 万 t,输沙模数为 966 t/km²。本次暴雨洪水的输沙量是多年平均输沙量(19.5 万 t)的 1.65 倍。

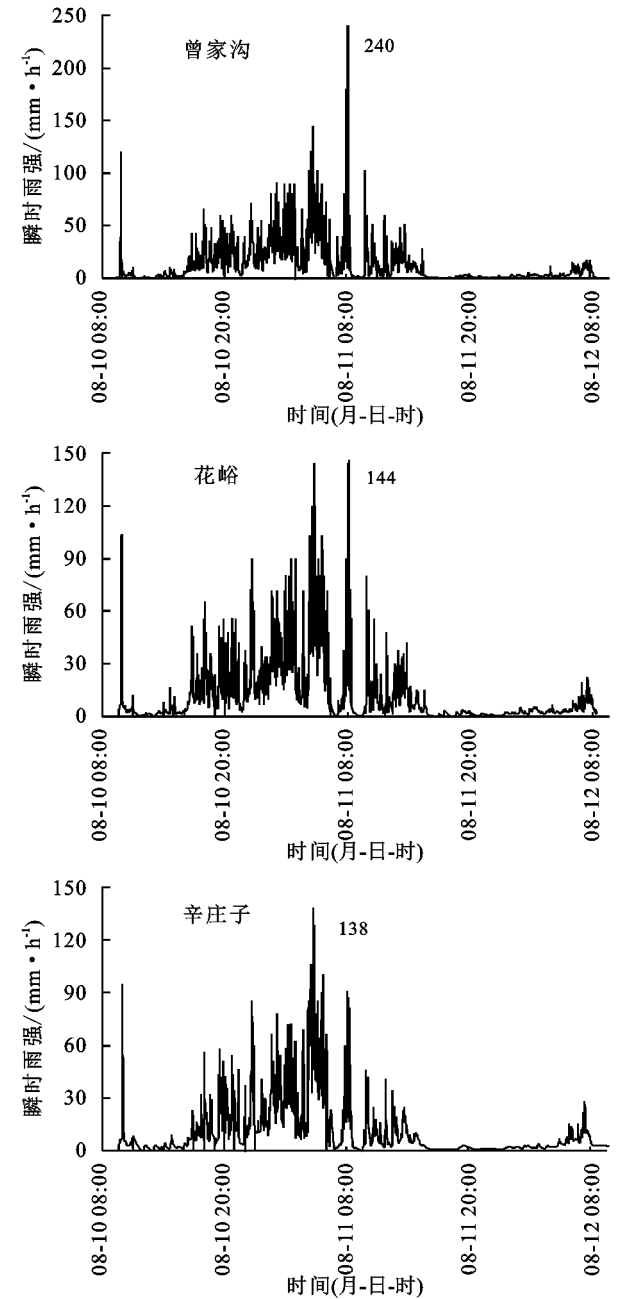


图 2 各雨量站的瞬时雨强

基于黄山水文站洪水过程数据计算可知,8 月 10—18 日测量时段内,黄山水文站径流量高达 1.02 亿 m³。该径流量是 2018 年同期台风“摩羯”与“温比亚”叠加引起的洪水径流量 0.68 亿 m³的 2.32 倍。

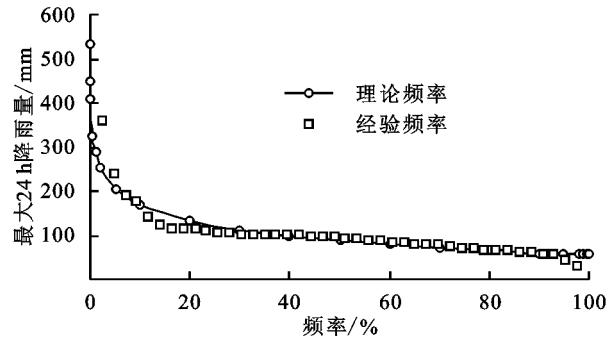


图 3 辛庄子雨量站 24 h 最大降雨量频率曲线

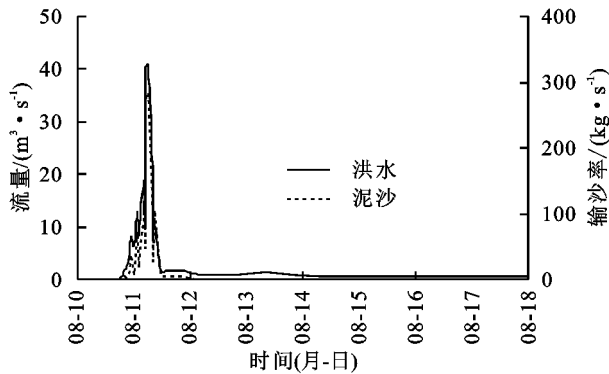


图 4 辛庄观测站洪水过程线和泥沙过程线

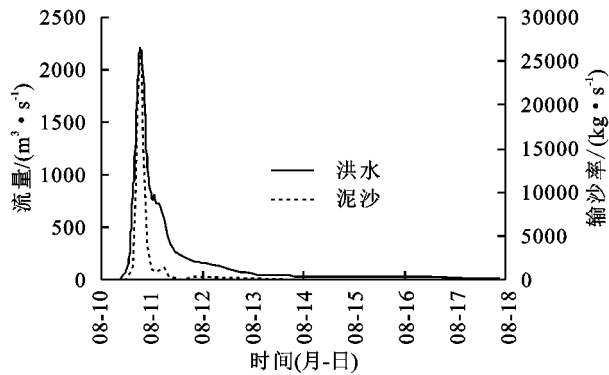


图 5 黄山水文站 2019 年“利奇马”台风暴雨洪水过程线和泥沙过程线

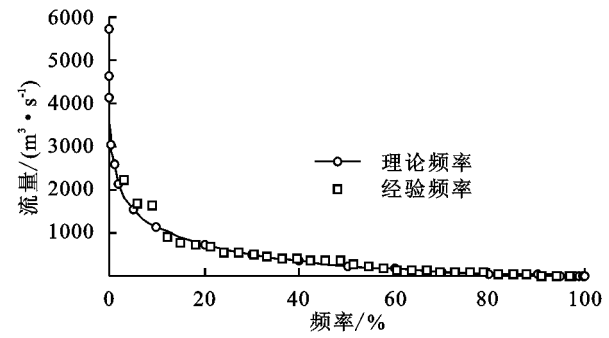


图 6 黄山水文站 2019 年洪峰频率曲线

3.3.2 水沙关系分析 从图 7 中可以看出,2018 年夏季汛期期间临朐共经历 3 次洪水,除 6 月份第一次洪水过程中沙峰略提前于洪峰,表现出一定的水沙异步特性外,第二次和第三次洪水过程中洪峰与沙峰基本同时出现,表明该地区的水沙关系较为稳定,可以基于水沙关系曲线进行场次暴雨洪水输沙量的预测^[21]。

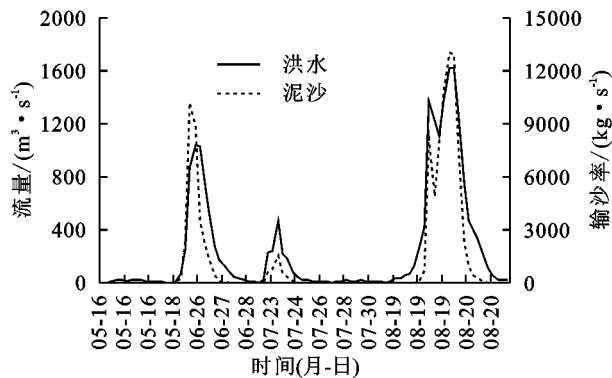


图 7 黄山水文站 2018 年洪水泥沙过程

图 8 绘制了 2019 年“8·10”特大暴雨洪水和 2018 年第 3 次洪水(最大一次洪水)的流量—输沙率曲线关系图,代表了特大洪水条件下的水沙关系。可以看出,当流量 $<1\,380\text{ m}^3/\text{s}$ 时,2018 年与 2019 年两次洪水的水沙关系曲线几乎重合,表明流量与输沙率之间有良好的相关关系;当流量 $>1\,380\text{ m}^3/\text{s}$ 时,与输沙率的相关关系减弱,可能是因为 8 月 11 日凌晨上游一建筑工地因水位上涨,导致大量的浆砌石、沙土等建筑材料被洪水冲走,引起该时段的洪水输沙率明显提高。总体来看,两次洪水的水沙关系曲线 R^2 均大于 0.90,并且洪峰与沙峰出现时间一致,表明该地区的水沙关系稳定。按照 2018 年的水沙关系与 2019 年的径流量,估算出黄山水文站的场次暴雨洪水输沙量约为 40 万 t,与实测值相差 9.4%,说明在该区域可以采用历史暴雨洪水泥沙关系估算洪水输沙量。

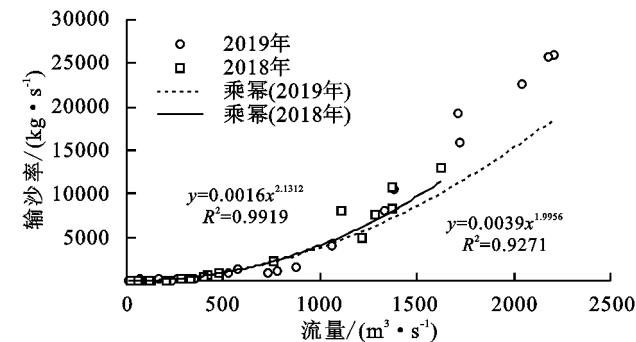


图 8 2018—2019 年黄山水文站水沙关系

4 结论与建议

(1) 曾家沟为本次“利奇马”台风造成暴雨的中心,暴雨开始于 2019 年 8 月 10 日上午 9:00 左右,持续将近 48 h,降雨量达到 570.6 mm,占多年平均降雨量的 82%。

(2) 2019 年 8 月 10—17 日辛庄控制站次洪水径流总量为 123 万 m^3 ,径流模数为 34.36 万 m^3/km^2 ;实测洪峰 40.96 m^3/s ,洪峰模数为 11.44 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。辛庄观测站次洪水泥沙总量为 4 600 t,产沙模数为 1 285 t/km^2 ;最大含沙量为 6.92 kg/m^3 。

(3) 黄山水文站实测洪峰 2 210 m^3/s ,是自 1988 年建站以来的最大洪峰,重现期为 33.3 a 一遇。径流量高达 1.02 亿 m^3 ,占年最大径流量 1.58 亿 m^3 (2018 年)的 64.6%。该径流量是 2018 年同期台风“摩羯”与“温比亚”叠加引起的洪水径流量 0.68 亿 m^3 的 2.32 倍。最大沙峰为 18 634.29 kg/s ,输沙量约为 36.23 万 t,是多年平均输沙量(19.5 万 t)的 1.65 倍。

(4) 按照 2018 年的水沙关系与 2019 年的径流量,估算出黄山水文站的场次暴雨洪水输沙量为 40 万 t,与实测值相差 9.4%,说明在该区域暴雨洪水中水沙关系稳定,可以采用历史暴雨洪水泥沙关系估算暴雨洪水输沙量。

(5) 由台风引起的暴雨洪涝、水土流失会对当地城镇居民人身财产安全 and 生产建设项目形成严重威胁,应采取适应性对策提升区域灾害风险防范和综合适应能力,有效地减轻该地区因台风暴雨所造成的灾害损失。

参考文献:

- [1] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.
- [2] Han J Q, Ge W Y, Hei Z, et al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,301.DOI:10.1016/j.agee.2020.107047.
- [3] 张小峰,许全喜,裴莹.流域产流产沙 BP 网络预报模型的初步研究[J].水科学进展,2001,12(1):17-22.
- [4] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(4):9-16.
- [5] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.赣江流域径流量和输沙量的变化过程及其对人类活动的响应[J].泥沙研究,2016(3):38-44.
- [6] 王飞,穆兴民,焦菊英,等.基于含沙量分段的人类活动对延河水沙变化的影响分析[J].泥沙研究,2008(4):8-13.
- [7] 毕华兴,朱金兆.国外土壤侵蚀与流域产沙模型研究综述[J].北京林业大学学报,1995,17(3):79-85.
- [8] 徐宗学.水文模型:回顾与展望[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3):278-289.
- [9] 周玲微,雷廷武,武阳.岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型[J].农业工程学报,2010,26(11):54-60.
- [10] Wangpimool W, Pongput K, Sukvibool C, et al. The effect of reforestation on stream flow in Upper Nan river basin using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2013,1(2):53-63.

- Environmental Quality, 2009, 38(2):762-771.
- [6] Munoz-Carpena R, Parsons J E, Gilliam J W. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips [J]. Journal of Hydrology, 1999, 214(1/4):111-129.
- [7] 张壮.浑河沈抚段河岸缓冲带组成调查和结构配置模式优化研究以及优势植被缓冲能力分析[D].沈阳:辽宁大学, 2018.
- [8] 杨方社,曹明明,李怀恩,等.基于 VFSMOD 模型的沙棘—灌草植被过滤带拦沙效果模拟[J].干旱区资源与环境, 2017, 31(6):71-75.
- [9] 潘岱立,赵西宁,高晓东,等.基于 VFSMOD 模型的黄土坡面生草带产流产沙动态模拟[J].农业工程学报, 2017, 33(8):119-125.
- [10] 孙晓涛.植被过滤带拦截径流和泥沙效果的 VFSMOD 模型适用性研究[D].长沙:中南林业科技大学, 2014.
- [11] 张鸿敏.植被过滤带对非点源污染物的净化效果及机理分析[D].西安:西北大学, 2017.
- [12] 杨寅群,李怀恩,史冬庆. VFSMOD 模型对植被过滤带净化效果的模拟与适应性分析[J].环境科学, 2010, 31(11):2613-2618.
- [13] Rawls W J, Brakensiek D L, A Procedure to Predict Green and Ampt Infiltration Parameters[C]//Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration. Chicago, USA:1983.
- [14] Haan C T, Barfield B J, Hayes J C. Design hydrology and sedimentology for small catchments [J]. Design Hydrology & Sedimentology for Small Catchments, 1994, 11(3):1-4.
- [15] 张超,吴爽,荣燕妮.大沽河流域北部山区土壤侵蚀状况研究[J].长春大学学报, 2019, 29(2):28-31.
- [16] 陈旭飞,刘通,程炯,等.华南地区草被过滤带对菜地径流、泥沙和磷阻控效果及影响因素[J].水土保持研究, 2019, 26(2):377-383.
- [17] 李怀恩,庞敏,杨寅群,等.植被过滤带对地表径流中悬浮固体净化效果的试验研究[J].水力发电学报, 2009, 28(6):176-181.
- [18] 罗晓娟,余勇利.植被缓冲带结构与功能对水质的影响[J].水土保持应用技术, 2006(4):1-3.

(上接第 35 页)

- [11] Singh R K, Panda R K, Satapathy K K, et al. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3):261-276.
- [12] Wang S, Zhang Z, Sun G, et al. Multi-site calibration, validation, and sensitivity analysis of the MIKE SHE Model for a large watershed in northern China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(12):4621-4632.
- [13] 陈云明,刘国彬,郑粉莉,等.RUSLE 侵蚀模型的应用及进展[J].水土保持研究, 2004, 11(4):80-83.
- [14] Kinnell P I A, Wang J X, Zheng F L. Comparison of the abilities of WEPP and the USLE-M to predict event soil loss on steep loessal slopes in China[J]. Catena, 2018, 171:99-106.
- [15] 万新宇,包为民,钟平安.基于相似推理的多沙河流水库坝址泥沙预测[J].水电能源科学, 2013, 31(12):191-194.
- [16] 冉大川,齐斌,肖培青,等.佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应[J].水土保持研究, 2015, 22(6):7-13.
- [17] 赵阳,刘冰,张晓明,等.极端降雨条件下黄河典型流域水沙变化特性研究[J].泥沙研究, 2020, 45(6):50-55.
- [18] 师长兴,邵文伟,范小黎,等.黄河内蒙古段洪峰特征及水沙关系变化[J].地理科学进展, 2012, 31(9):1124-1132.
- [19] 从辰宇,韩剑桥,焦菊英,等.台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究:以山东省临朐县为例[J].水土保持通报, 2020, 39(5):337-344.
- [20] 汪岗,徐明权.从黄河下游“92·8”洪水看游荡性河段高含沙水流的河床演变特性[J].泥沙研究, 2000(6):46-51.
- [21] 何斌,张澎辉,梁国华,等.基于 BP 神经网络的场次洪水河道沙量预报[J].南水北调与水利科技, 2015, 13(3):406-408, 416.