



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.008

王坤, 杨同春, 徐征和, 等. 多级闸门调控下徒骇河流域雨洪资源利用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 50-57. WANG Kun, YANG Tong-chun, XU Zheng-he, et al. Research on utilization of rain flood resources with the operation of multi-stage sluices in Tuhai River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 50-57. (in Chinese)

多级闸门调控下徒骇河流域雨洪资源利用

王坤¹, 杨同春², 徐征和¹, 周肆访¹, 王江婷¹, 徐晶¹

(1. 济南大学 资源与环境学院, 济南 250022; 2. 济南市小清河管理处, 济南 250013; 3. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 徒骇河流域缺水严重, 水资源供需矛盾尖锐, 而汛期雨量丰富且蓄滞工程较为完善, 因此提出通过合理地调度使用主河道上的多级闸门来提高雨洪资源利用率以缓解供需矛盾的思路。选用 MIKE11 软件建立多级闸门调控下雨洪演进模拟模型, 主要运用其中的水动力模型(HD)和降雨径流模型(NAM), 并将两者进行耦合, 设计了闸门全开、水位控制、水位差控制三种调度模式, 结合典型年的选取, 进行典型工况下雨洪演进模拟。基于模拟结果, 利用水量调控计算方法对流域调控水量进行定量分析和比较, 结果表明, 通过对闸门的调度, 可提高雨洪资源利用率, 更大程度地解决流域水资源危机。

关键词: 徒骇河流域; 多级闸门; 雨洪资源; 模拟; MIKE11; 水量调控

中图分类号: TV 122.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0050-08

Research on utilization of rain-flood resources with the operation of multi-stage sluices in Tuhai River Basin

WANG Kun¹, YANG Tong-chun², XU Zheng-he¹, ZHOU Si-fang¹, WANG Jiang-ting¹, XU Jing³

(1. University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Management Service of Xiaqing River of Jinan, Jinan 250013, China; 3. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The lack of water and the imbalance between supply and demand of water resources are both serious problems in Tuhai River Basin. However, in this basin, rainfall in the flood season is abundant, and the storage and detention engineering is excellent. Therefore, we put forward an idea to improve the utilization of rain flood resources by properly operating the multi-stage sluices on the main channel to relieve the contradiction between supply and demand. We used MIKE11 software to establish a simulation model on rain flood resources, coupled the hydrodynamic model (HD) and rainfall runoff model (NAM), and designed three operation modes: full open gate, water level control, and water level difference control. We used these three modes to simulate the rain and flood process in typical working conditions. Based on the results of simulation, we carried out quantitative analysis of water regulation using the water quantity regulation calculation method. The results showed that the operation of the sluices can improve the utilization of rain flood resources and solve the water resources crisis better.

Key words: Tuhai River Basin; multi-stage sluices; rain flood resources; simulation; MIKE11; water quantity regulation

近年来徒骇河流域灾害频发, 常出现连旱连涝或是旱涝交织现象, 严重制约了国民经济的发展。

流域内河道洪水主要由汛期暴雨所致, 降水量高度集中, 占全年总降水量的 60%~80%^[1-2]。降水的

收稿日期: 2016-06-08 修回日期: 2017-01-10 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 山东省重大水利科研及技术推广(SDSLKY201314); 山东省高等学校科技计划(J15LH08); 济南大学研究生创新基金(GIFUJN)

Funds: Shandong Major Water Conservancy Research and Technology Promotion (SDSLKY201314); Science and Technology Program of Higher Education of Shandong Province (J15LH08); University of Jinan Graduate Innovation Fund (GIFUJN)

作者简介: 王坤(1991-), 女, 山东济宁人, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: 1015157780@qq.com

通讯作者: 徐征和(1968-), 男, 山东济南人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源及农田水利方面研究。E-mail: xu4045@126.com

年内、年际以及空间分布的不均性给水资源的充分利用带来了困难。为了管理汛期多余水量,以备枯水期之用,就需要合理的水量调控措施。徒骇河流域虽缺少对水量进行调控的大中型水库,但河流主干道上已建的多级闸门可以为充分利用汛期雨量提供良好的基础设施。由于现实中闸门的运行存在很大的人为性和随意性,使得雨洪资源利用率不高。因此,本文提出利用合理的调度规则对闸门运行进行调度,以期充分发挥河道调蓄功能来实现丰水枯用。

目前,已有学者在闸门调度以及雨洪资源利用方面进行了一些研究工作,例如谷洪梅^[3]、左其亭^[4]等分析了闸门调度对河流水质及水量调控方面的影响;闫轲^[5]在总结国内外雨洪利用的经验和教训后,介绍了雨洪资源利用工程和非工程的措施;毛慧慧^[6]、田友^[7]等在雨洪资源利用现状分析的基础上,对洪水资源化在海河流域水生态恢复中的重要性及其实现途径做了探讨。本人在前人的基础上,以徒骇河流域为研究对象,利用数值模拟软件^[8,9] MIKE11 对不同闸门调度模式下的雨洪演进过程进行模拟,计算出不同降水典型年不同闸门运行工况下的可调控水量,并进行规律总结和调度效益分析,为徒骇河流域雨洪资源高效利用提供一定的理论依据。

1 流域基本概况

1.1 自然地理概况

徒骇河流域属于华北平原,位于海河流域最南部,南邻黄河下游流域。发源于山东聊城莘县古云镇文明寨村东,流向为西南至东北方向,与黄河流向几乎平行。徒骇河流经山东省 13 个县(区),最终在沾化县东风港暴风站流入渤海,整个流域呈窄长条带状。徒骇河在山东省境内主河道全长 406 km,流域面积 13 296 km²。

1.2 闸门概况

徒骇河水系处于人工调控的多闸门平原河网地区,水流几乎全面受到闸门的控制。干流河道设置了 12 座节制闸(其中四河头节制闸已经停用)和 1 座橡胶坝。自上下游顺序为杨庄闸、李凤桃闸、王堤口闸、陶桥闸、南刘桥闸、南营闸、宫家闸、营子闸、樊桥闸、堡集闸和坝上闸,具体分布情况见图 1。各级闸门分布较均匀,对汛期洪水具备良好的拦蓄能力,为雨洪资源的利用提供了基础设施保障。通过对闸门的科学调度,可减少洪水下泄,在防洪安全的基础上,将多余水量储存起来,从而大大增加了河道的调蓄能力。为研究方便,将南刘桥闸、营子闸作为徒骇河上、中、下游流域分界线。



图 1 徒骇河流域划分及闸门分布

Fig. 1 Division of Tuhai River Basin and distribution of sluices

1.3 水资源供需情况

通过查阅文献以及查找《聊城市统计年鉴》、《滨州市统计年鉴》等统计信息,结合供需水量计算方法^[10],可得徒骇河流域水资源供需情况见表 1。

由表可知,保证率为 50% 的水平年,需水量比可供水量多 19 444 万 m³,缺水率为 4.55%;保证率为 75% 的水平年,需水量比可供水量多 79 913 万 m³,缺水率高达 16.39%。由此可知该研究区缺水严重,供需矛盾十分严峻。因此将汛期大量集中的

表 1 水资源供需计算

Tab. 1 Calculation of supply and demand of water resources

水平年	可供水资源量 / 万 m ³	总需水量 / 万 m ³	余(+) 缺(-) 水量/ 万 m ³
P= 50%	407 800	427 244	- 194 44
P= 75%	407 800	487 713	- 799 13

降水储存起来,充分合理地利用当地雨洪资源,可一定程度上缓解供需矛盾。

2 研究方法

2.1 闸门调控下雨洪演进模型建立

通过对国内外已公开发布的水力学模型进行收集和分析^[17-18], 徒骇河流域雨洪演进模型选用了一维水力学模型软件 MIKE11。本研究中主要应用其中的水动力模型和降雨径流模型, 并将其进行耦合。水动力模型 HD 中的可控建筑物模块(SO)是 HD 模型的特色, 提供了丰富的闸门操作设计。模型中可设置不同的调度方案及其优先级, 可对各类实际工况运行情况进行模拟。

2.1.1 降雨径流模型(NAM)

NAM 模型是一个由一系列以简单定量关系描述水文循环中各种陆相特征连接起来的集总参数的概念性水文模型, 模拟自然流域的降雨径流过程^[19]。降雨产生的径流以旁侧入流的形式耦合到 HD 模型的河网中。

NAM 模型调整的参数包括地表、根区储水层及地下水储水层相关参数。徒骇河流域上、中、下游段水文站均有较长的降雨、流量资料, 满足 NAM 建模的需要, 因此利用各子流域的降雨径流资料建立 NAM 模型, 用于计算区间入流。利用 MIKE11 的自动率定功能, 结合人工调参方式对 NAM 模型中的各参数进行率定, 使得模拟结果与实测结果吻合程度较好(图 2-图 4), 表 2 即为 NAM 模型中各参数的取值。

2.1.2 水动力模型(HD)

HD 模型基于垂向积分的物质和动量守恒方程, 即一维非恒定流圣维南(Saint-Venant)方程组来模拟河流或河口的水流状态。方程组包括连续性方程和动量方程, 其具体表达式如下。模型采用明渠非稳定流隐式格式有限差分分解, 其差分格式采用了六点中心隐式差分格式(Abbott 格式), 离散后的线形方程组用追赶法求解^[20]。

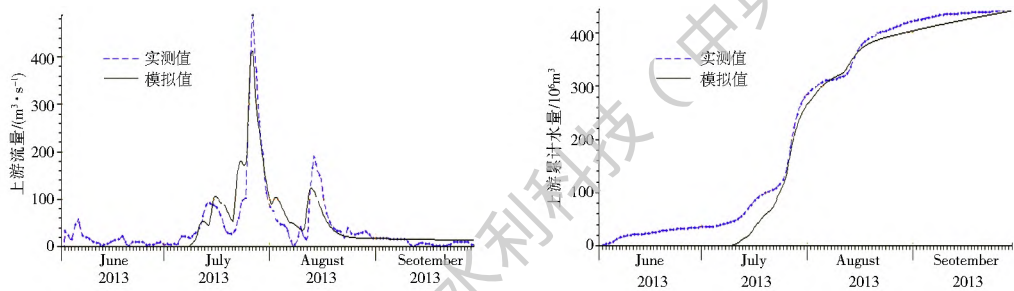


图 2 上游流量与累计水量模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured values in upper stream

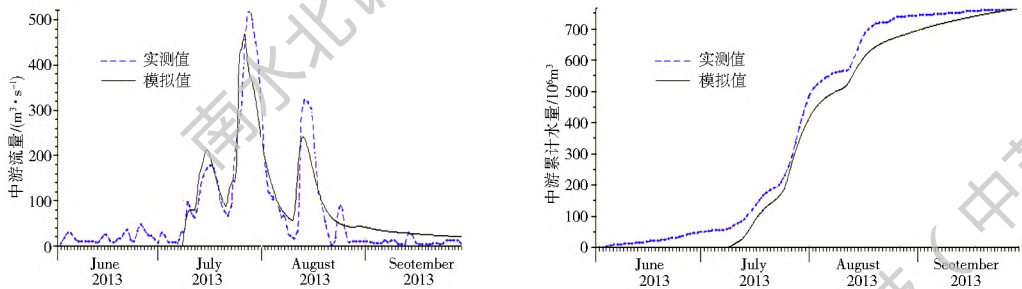


图 3 中游流量与累计水量模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured values in midstream

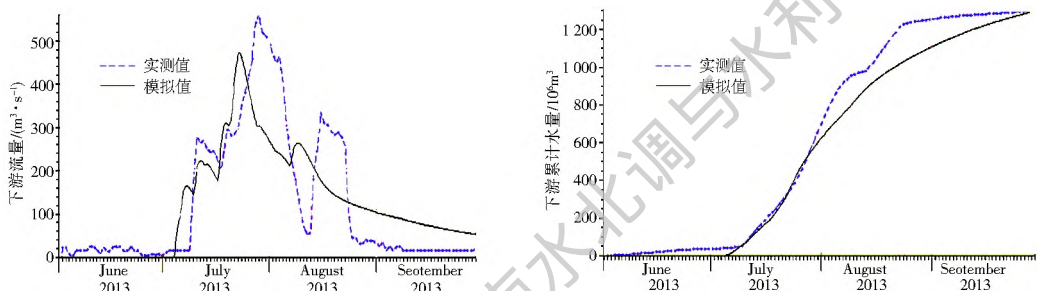


图 4 下游流量与累计水量模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and measured values in lower stream

表2 NAM 率定参数取值
Tab. 2 Parameter values for NAM

区域	参数	参数含义	上游率定取值	中游率定取值	下游率定取值
地表根区储水层	U_{max} / mm	地表储水层最大含水量	17.2	19.8	15.4
	L_{max} / mm	土壤层/根区最大含水量	228	102	109
	C_{QOF}	坡面流系数	0.937	0.577	0.166
	C_{KIF}	壤中流排水系数	599.6	517.5	521.3
	TOF	坡面流临界值	0.395	0.064	0.135
	TIF	壤中流临界值	0.692	0.336	0.855
	CK_{12} / h	坡面流壤中流时间常量	46.8	48.7	49.4
地下水储水层	T_C	地下水补给临界值	0.131	0.17	0.501
	CK_{BF} / h	基流时间常量	2 207	1 131	1 025

$$\begin{cases} B_s \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, t 分别表示空间坐标和时间坐标; Q, h 分别表示断面流量和水位; A, R 分别表示断面的过水面积和水力半径; B_s 为河宽; q 为旁侧入流量; C 为谢才系数; g 为重力加速度; α 为垂向速度分布系数。

水力模型率定的主要参数是河道糙率。本文选取 2013 年的流量过程分段进行糙率的率定, 经过调算, 徒骇河上、中、下游段糙率分别为 0.029、0.033、0.035。在 MIKE View 结果查看中导出上、中、下游闸门模拟计算值, 然后与实测值进行比较, 分析模型的稳定和准确程度。上、中、下游的日径流过程模拟结果见图 2- 图 4。由模型的率定结果可知, 徒骇河干流上游的计算结果与实测值吻合较好。相比之下, 下游计算结果与实测值吻合稍差, 其原因是河道闸门较多, 在实际调度过程中受不确定性因素的影响比较大, 模型运行过程中系统误差逐渐累积造成。

2.1.3 可控建筑模块

MIKE11 中可控建筑物模块(SO) 可以方便有效地用来模拟灌溉渠道、河流、水库中的控制闸门及其它控制建筑物(如桥梁、涵洞、管道、堤坝、堰、泵站等)的操作运行。本研究中模拟涉及到的闸门共 11 级。由于该流域全年总降水量的 78% 集中在汛期(6 月- 9 月), 考虑流域降雨径流过程的延迟作用, 故模拟时段为 6 月- 10 月。

根据各闸门所在位置、闸底高程、闸孔尺寸及最高蓄水位等因素的差异, 考虑不同典型年的暴雨量大小, 结合可控建筑物模块提供的闸门调度模式, 现制定以下三种调度模式。

(1) 全开控制。汛期时各闸门全部开启, 模拟没

有闸门控制的河道水流流态。

(2) 水位控制(H 控制)。汛期闸前水位高于最高蓄水位时, 闸门开启, 否则关闭。最高蓄水位由收集到的闸门设计参数中获得, 并将各闸对应水位作为阈值输入到模型中。

(3) 水位差控制(dH 控制)。当闸前闸后水位差达到特定值时, 闸门开启, 否则关闭。通过进行模型调试, 最终确定这一特定值为 0.5 m。

在调度过程中, 闸门的启闭速度设置为 0.001 m/s, 系统由设定好的调度参数和阈值, 根据水流状态自动控制各级闸门的运行状态。

2.2 调控水量计算方法

根据徒骇河河道规划现状, 河道上已建的 11 级闸门将天然河道划为 11 个串联水库($i = 1, 2, \dots, 11$), 本研究以旬为单位将模拟期划为 15 个时段($t = 1, 2, \dots, 15$)。调控水资源量按下式^[21-22]计算:

$$\begin{cases} V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t}) \Delta t + P_{i,t} \\ V = \sum_i V_{i,t+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V 为第 t 时段末河道总调控水量(m^3); $V_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段初水库蓄水量(m^3); $V_{i,t+1}$ 为第 i 水库第 t 时段末水库蓄水量(m^3); $I_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段平均入库流量(m^3/s); $Q_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段下游出库流量(m^3/s); $P_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段旁侧入流量(m^3)。

3 结果及分析

3.1 模型模拟结果及分析

经统计徒骇河流域近 30 年(1984 年- 2013 年)的降水资料, 利用皮尔逊 III 型频率曲线进行水文频率分布曲线适线后, 最终选取降水频率为 5%、10% 和 20% 的雨洪典型年, 依次为 2004 年、2013 年

和 2005 年。分别模拟了徒骇河流域在三种闸门运行工况下的洪水演进过程, 选取上、中、下游分界点为三个节点, 以 H 控制调度为例, 模拟得到的水位、流量过程线见图 5~ 图 7。

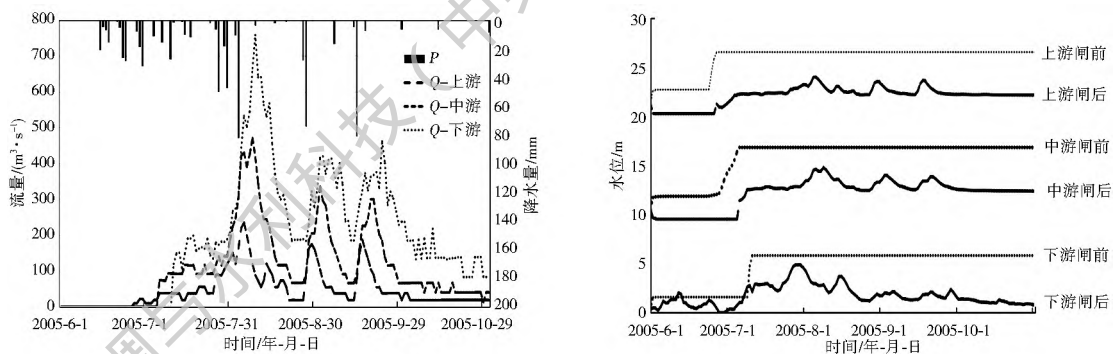


图 5 $P = 5\%$ 典型年 H 控制调度模拟结果

Fig. 5 The results of water level control mode in a typical year of $P = 5\%$

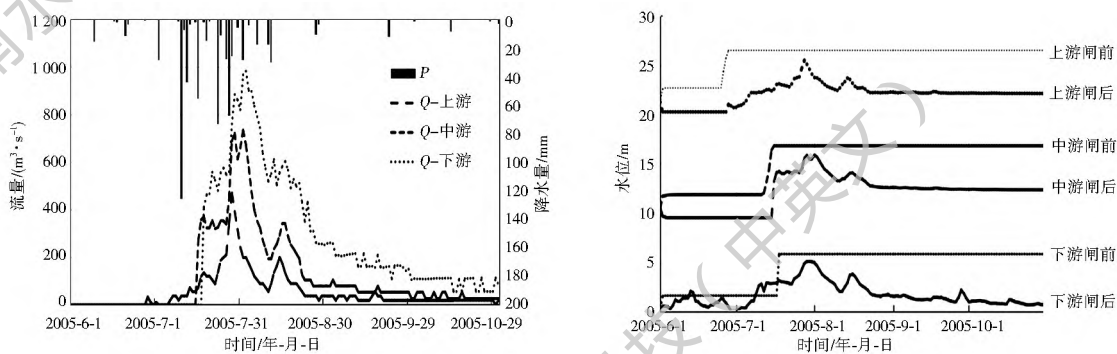


图 6 $P = 10\%$ 典型年 H 控制调度模拟结果

Fig. 6 The results of water level control mode in a typical year of $P = 10\%$

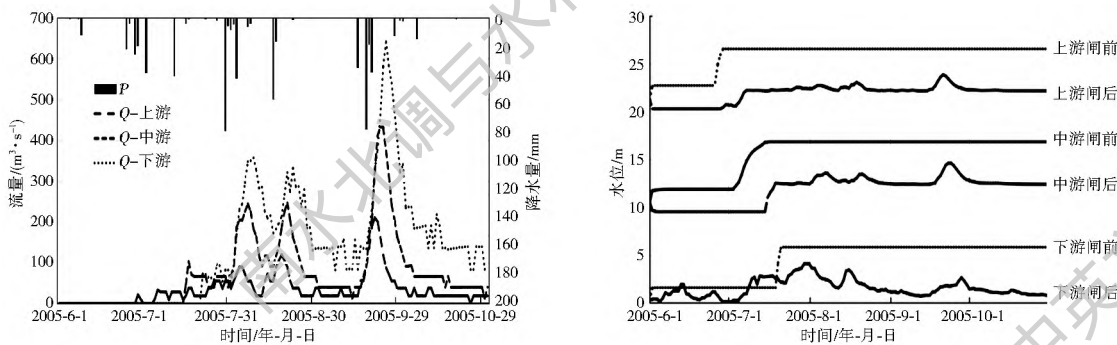


图 7 $P = 20\%$ 典型年典型年 H 控制调度模拟结果

Fig. 7 The results of water level control mode in a typical year of $P = 20\%$

由模拟结果可以看出: $P = 5\%$ 典型年降水比较分散, 河道出现三次洪峰, 上游洪峰比中游洪峰早 4 d 左右, 比下游洪峰早 6 d 左右。南刘桥闸、营子闸及坝上闸闸门开启的时间分别为 6 月 27 日、7 月 6 日、7 月 11 日, 此时所对应的水位分别为 26.5 m、16.8 m、5.8 m; $P = 10\%$ 典型年降水比较集中, 受降水影响, 河道出现一次较大洪峰, 且洪峰流量较大, 下游峰值可达 $1\,025.46\text{ m}^3/\text{s}$, 上、中、下游闸门开启的时间分别为 6 月 28 日、7 月 16 日、7 月 18 日; $P = 20\%$ 典型年, 由于降水分散且雨期较晚, 河道在 8 月份出现两次较大洪峰, 最大洪峰出现在 9 月下

旬, 上、中、下游闸门开启的时间分别为 6 月 28 日、7 月 16 日、7 月 22 日。

3.2 调控水量计算结果及分析

徒骇河属于天然河道, 虽枯水期有断流, 但河道常年有水, 统计多年 6 月初平均水深为 1.0 m, 选取两闸之间平均断面, 计算其过水面积, 从而计算出水库的初始蓄水量, 见表 3。另外, $I_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 利用第而章 MIKE11HD 输出的流量结果; $P_{i,t}$ 利用 NAM 输出的旁侧入流流量结果。利用 2.2 节调控水量计算方法可得不同典型年下徒骇河流域可调控水量, 见表 4。

表 3 初始蓄水量计算

Tab. 3 Calculation of initial water storage capacity

闸门名称	过水面积/ m^2	长度/m	初始蓄水量/ $万 m^3$
杨庄闸	13.02	58 750	76
李凤桃闸	22.60	9 110	21
王堤口闸	27.17	16 140	44
陶桥闸	50.85	46 000	234
南刘桥闸	35.80	25 550	91
南营闸	36.33	26 000	94
宫家闸	37.37	32 275	121
营子闸	128.61	45 800	589
樊桥闸	107.01	49 925	534
堡集闸	147.21	28 950	426
坝上闸	92.38	33 050	305

分析表 4 中数据可知,在三种调度工况下,若典型年降水比较分散,通过闸门的调度运行,可以将更多的雨洪水储存在河道中。峰值河道调控水量和汛期之后河道调控水量遵循以下规律:调控水量由多

到少依次为:水位(H)控制调度、水位差(dH)控制调度、全开调度。例如 $P=5\%$ 典型年三种调度可控峰值水量依次为 22 401 万 m^3 、16 882 万 m^3 、13 142 万 m^3 ,汛期之后可控水量依次为 15 336 万 m^3 、11 027 万 m^3 、7 373 万 m^3 ;若典型年降水较为集中,即使通过闸门的运行来调节雨洪,但为保证防洪安全会导致大量雨洪水下泄。在三种调度工况下,峰值河道调控水量差异不大,但汛期之后河道调控水量仍呈现以上规律。例如 $P=10\%$ 典型年三种调度可控峰值水量依次为 13 402 万 m^3 、11 804 万 m^3 、10 242 万 m^3 。10 月下旬, H 控制调度时可调控水量为 7 247 万 m^3 , dH 控制调度时调控水量为 6 003 万 m^3 ,而全开调度时调控水量仅为 5 470 万 m^3 ;若典型年雨期较晚,则汛期结束之后,河道调控水量也会相对较多。例如 $P=20\%$ 典型年,在 10 月下旬, H 水位调度时河道调控水量为 7 599 万 m^3 , dH 控制调度时调控水量为 6 636 万 m^3 ,而全开调度时调控水量为 5 803 万 m^3 。

表 4 不同典型年不同调度规则下调度水量计算结果

Tab. 4 Calculation results of water quantity regulation in different typical years under different operation rules

时段	闸门全开调度/ $万 m^3$			H 控制调度/ $万 m^3$			dH 控制调度/ $万 m^3$		
	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=20\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=20\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=20\%$
6 月上旬	1 887	1 887	1 659	3 174	1 887	1 791	3 152	1 887	1 791
6 月中旬	2 276	2 376	2 112	3 484	2 376	2 703	3 614	2 593	2 672
6 月下旬	3 716	3 716	2 701	5 978	3 716	4 280	6 281	3 833	4 014
7 月上旬	5 766	5 766	4 553	16 129	5 766	5 825	8 210	4 959	4 897
7 月中旬	6 387	6 487	4 974	17 183	6 487	7 887	8 986	9 592	5 563
7 月下旬	9 305	9 205	5 982	18 885	9 205	8 837	11 800	9 181	6 462
8 月上旬	13 142	10 242	7 563	22 401	13 402	9 578	16 882	11 804	7 530
8 月中旬	8 479	7 879	8 457	18 986	10 479	10 801	12 565	10 465	8 163
8 月下旬	8 659	10 124	9 580	18 350	8 424	11 218	13 650	9 501	10 845
9 月上旬	11 624	8 379	7 214	19 403	8 249	10 228	12 683	9 052	8 694
9 月中旬	12 526	9 876	6 529	19 813	8 486	8 976	16 596	9 274	8 302
9 月下旬	9 373	9 443	8 423	20 723	8 473	8 862	14 181	8 909	7 930
10 月上旬	8 349	7 499	9 405	19 740	7 509	10 216	13 839	8 515	9 682
10 月中旬	8 005	6 001	6 795	17 289	7 295	8 668	11 700	6 991	7 946
10 月下旬	7 373	5 470	5 803	15 336	7 247	7 599	11 027	6 003	6 636

3.3 闸门调度效益分析

徒骇河流域现有闸门归行政区管理,堤闸管理处对闸门的操作存在很大的人为性和随意性,尤其是在汛期,当洪水来临时,管理者往往为了快速下泄洪水,而几乎将闸门全部打开,使得流域水量流失严重,造成浪费。因此,研究中将汛期闸门运行现状概化为全开模式,并以此为基础,与其他两种调度模式

比较得出闸门调度效益。基于不同闸门运行工况下的雨洪演进模拟结果以及可控水量计算结果,可以得到徒骇河流域通过调度后可增加的雨洪资源利用量,见表 5。结果显示,根据汛期来水情况,采用 H 和 dH 控制调度来调节闸门的启闭可以使雨洪资源的利用能力得到进一步提高,也可以在一定程度上缓解徒骇河流域水资源供需矛盾压力。

表 5 闸门调度后可增调控水量计算结果

Tab. 5 Calculation results of water quantity under the operation of sluices

典型年	调度方式	可调控峰值水量/ 万 m^3	可增调控水量/ 万 m^3
P= 5%	闸门全开调度	13 142	-
	H 控制调度	22 401	9 259
	dH 控制调度	16 882	3 740
P= 10%	闸门全开调度	10 242	-
	H 控制调度	13 402	3 160
	dH 控制调度	11 804	1 562
P= 20%	闸门全开调度	9 580	-
	H 控制调度	11 218	1 638
	dH 控制调度	10 845	1 265

4 结语

本文通过 MIKE11 模型, 实现了不同典型年不同闸门调度模式下雨洪演进过程的模拟, 并利用可调控水量计算方法分别对各工况下的调控水量进行了计算分析。通过模拟, 可最终率定出徒骇河上游段糙率为 0.029, 中游段糙率为 0.033, 下游段糙率为 0.035。从计算分析结果中可以看出, 徒骇河流域可调控雨洪资源量十分丰富, 最高可达 22 401 万 m^3 。并且在闸门全开调度、水位(H)控制调度、水位差(dH)控制调度三种调度工况下, 具有不同降雨特征的典型年峰值调控水量和汛期之后河道调控水量同时呈现以下规律: 水位(H)控制调度下可调控水量最多, 水位差(dH)控制调度次之, 全开调度方式下最少。

通过对三种调度方式下的可调控水量进行比较分析, 可知根据汛期来水实际情况, 通过对各级闸门进行水位或水位差控制调度会大大提高雨洪资源的利用效率, 对缓解徒骇河流域水资源供需矛盾具有重要意义。随着徒骇河流域在雨洪资源化管理运用方面的完善以及闸门信息化和自动化调控系统的发展, 其将对流域水量调控及经济发展起到日益显著的作用。

参考文献(References):

[1] 李亚平, 陈友媛, 胡广鑫等. 基于分布式水文模型的徒骇河流域生态需水量预测研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(09): 2619-2625. (LI Ya ping, CHEN You yuan, HU Guang xin, et al. Prediction of ecological water demand of Tuhai River using a distributed hydrological model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(09): 2619-2625. (in Chinese))

[2] 王克磊. 滨州市徒骇河雨洪水资源综合利用工程可行性研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. (WANG Ke lei. The feasibility study

of Binzhou City Tuhai rainwater utilization of water resource engineering[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese))

[3] 谷洪梅, 任影, 肖芳, 等. 北运河闸坝生态调度研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(3): 31-33. (GU Hong mei, REN Ying, XIAO Fang, et al. Ecological regulation of gate dam in north canal[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(3): 31-33. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2012.03.009

[4] 左其亭, 刘子辉, 窦明, 等. 闸门对河流水质水量影响评估及调控能力识别研究框架[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 18-21. (ZUO Qi ting, LIU Zi hui, DOU Ming, et al. Research framework of assessment of dam's impact on water quality and quantity and identification of regulation ability[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 18-21. (in Chinese))

[5] 闫轲, 方国华, 黄显峰, 等. 雨洪资源利用进展与利用模式探索[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(3): 58-60. (YAN Ke, FANG Guo hua, HUANG Xian feng, et al. A study on the pattern of rainfall flood resource and the nearly progress of this utilization[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(3): 58-60. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2011.03.023

[6] 毛慧慧. 平原河网地区洪水资源利用问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2009. (MAO Hu hui. Study on flood resources utilization in plain River Network Area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese))

[7] 田友. 海河流域生态恢复与洪水资源化[J]. 中国水利, 2002(7): 29-30. (TIAN You. Water ecological restoration and flood resource utilization in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources, 2002(7): 29-30. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2002.07.007

[8] 吴天蛟, 杨汉波, 李哲, 等. 基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 02: 51-57. (WU Tian jiao, YANG Han bo, LI Zhe, et al. Modeling of flood routing for three gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 02: 51-57. (in Chinese))

[9] 杨洵, 李伟, 张勤, 等. 基于 MIKE11 的闸坝操控与河流水质水量响应关系模拟[J]. 东北水利水电, 2012, (11): 10-11. (YANG Xun, LI Wei, ZHANG Qin, et al. Simulation of response relationship between gate control and river water quality and water quantity based on MIKE11[J]. Northeast Water Conservancy and Hydropower, 2012, (11): 10-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0624.2012.11.005

[10] 左其亭, 窦明, 吴泽宁. 水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版, 2011. (ZUO Qi ting, DOU Ming, WU Ze ning. Water resources planning and management[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower, 2011. (in Chinese))

[11] 张成, 张尚弘. 闸门调控下大型输水系统的水力响应特征研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19: 98-107. (ZHANG Cheng, ZHANG Shang hong. Hydraulic response characteristics of large water delivery system under the control of gate[J]. Journal of Basic and Engineering, 2011, 19: 98-107. (in Chinese))

[12] 朱德军, 陈永灿, 刘昭伟. 大型复杂河网一维动态水流水质数值模型[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 83-87. (ZHU De jun, CHEN Yong can, LIU Zhao wei. One dimensional hydrodynamic water quality model for large complex river networks[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 83

87. (in Chinese))
- [13] 陈学群, 李福林, 张瑞青, 等. 黄河河口平原多闸坝河道水流数学模型[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 38-41. (CHEN Xuequn, LI Fulin, ZHANG Ruqing, et al. Mathematical model of flow in rivers with multiple sluices and dams in plain area in Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 38-41. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.009
- [14] 杨洵, 杨永洁, 李伟, 等. 太子河流域水质改善水量调控技术研究[J]. 东北水利水电, 2013(1): 40-43. (YANG Xun, YANG Yongjie, LI Wei, et al. Study on technologies of water quality improvement and water quantity regulation in Taizi River area [J]. Northeast Water Conservancy and Hydropower, 2013(1): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0624.2013.01.016
- [15] 林波, 刘琪瀑, 尚鹤, 等. MIKE11/NAM 模型在挠力河流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 99-108. (LIN Bo, LIU Qipao, SHANG He, et al. Application of coupled MIKE11/NAM model in Naoli River Basin, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(5): 99-108. (in Chinese))
- [16] 杨甜甜. 大沽夹河流域水文水动力耦合模型研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2015. (YANG Tiandian. Study and application on hydrologic hydrodynamic coupling model in Daguji River Catchment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [17] Zhu Z D, Oberg N, Morales V M. Integrated urban hydrologic and hydraulic modelling in Chicago, Illinois [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 77: 63-70.
- [18] Archibald T W, McKinnon K I M, Thomas L C. An aggregate stochastic programming model of multiple reservoir systems [J]. Water Resource Research, 2012, 2: 333-340.
- [19] 孙映宏, 姬战生, 周蔚. 基于 MIKE11 HD 和 NAM 耦合模型在河流施工围堰对防洪安全影响分析中的应用与研究[J]. 浙江水利科技, 2009(2): 31. (SUN Yinghong, JI Zhan-sheng, ZHOU Wei. Application and research on influence of construction cofferdam on river areas upon flood control safety based on MIKE11 HD and NAM coupling model [J]. Zhejiang Hydraulics, 2009(2): 31. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-701X.2009.02.012
- [20] 赵凤伟. MIKE11 HD 模型在下辽河平原河网模拟计算中的应用[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(8): 33. (ZHAO Fengwei. Application of Mike11 HD on hydrodynamic modeling of waterways in Xiaohaohe River Plain [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20(8): 33. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2014.08.015
- [21] 魏加华, 王光谦, 蔡治国. 多时间尺度自适应流域水量调控模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(12): 1973-1977. (WEI Jiayua, WANG Guangqian, CAI Zhiguo. Multitime scale adaptive regulation model of a river basin water allocation [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2006, 46(12): 1973-1977. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0054.2006.12.007
- [22] 宋刚福, 沈冰. 基于生态的城市河流水量水质联合调度模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 258-263. (SONG Gangfu, SHEN Bing. An ecology-based water quantity and quality combined operation model for urban rivers [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(3): 258-263. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.003

(上接第 49 页)

- [9] 傅小城, 王芳, 王浩, 等. 柴达木盆地气温降水的长序列变化及与水资源关系[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 408-415. (FU Xiaocheng, WANG Fang, WANG Hao, et al. Analysis of long-term changes in temperature and precipitation and their relationships with water resources in the Qaidam Basin in China [J]. Resources Science, 2011, 33(3): 408-415. (in Chinese))
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. (WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese))
- [11] 孙永亮, 李小雁, 汤佳, 等. 青海湖流域气候变化及其水文效应[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 354-362. (SUN Yongliang, LI Xiaoyan, TANG Jia, et al. Climate change and hydrological response in the watershed of Qinghai Lake [J]. Resources Science, 2008, 30(3): 354-362. (in Chinese))
- [12] 宋月君, 杨洁, 莫明浩, 等. 赣县近 60a 气温与降雨量变化趋势研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 39-47. (SONG Yuejun, YANG Jie, MO Minghao, et al. Trends of variations of temperature and precipitation in Ganxian in recent 60 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 39-47. (in Chinese))
- [13] 于惠. 青藏高原草地变化及其对气候的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2013. (YU Hui. Dynamics of grassland growth and its response to climate change on Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese))
- [14] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm dry to warm wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164. (in Chinese))
- [15] 王澄海, 李健, 许晓光. 中国近 50 年气温变化准 3 年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 126-136. (WANG Chenghai, LI Jian, XU Xiaoguang. Universality of quasi 3 year period of temperature in last 50 years and change in next 20 years in China [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(1): 126-136. (in Chinese))
- [16] 宋正山, 杨辉, 张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 552-566. (SONG Zhengshan, YANG Hui, ZHANG Qingyun. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over North China [J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 552-566. (in Chinese))