

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230428

# 圩区河槽调蓄库容影响因素分析研究

吴 春,倪 鹏,丁兆晖

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

**摘要:**河槽调蓄库容是圩区排涝安全的重要组成部分,为分析圩区河槽实际有效调蓄库容的影响因素,采用非恒定流模型和水量平衡法对单一河道进行调蓄计算,对比计算结果表明,影响河槽调蓄库容的主要因素为起调水位对应水深、泵站外排流量、河道长度及断面形态等,对于过流量较大的骨干排涝通道,其实际有效调蓄库容为其达到泵站外排流量时对应水面线以上至最高水位水面线之间的库容。研究结果可为圩区排涝规划设计提供参考。

**关键词:**河槽调蓄;排涝计算;非恒定流;动库容

**中图分类号:**TV135.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-7709(2023)12-0082-03

## 1 引言

城市雨洪调蓄空间对降低城市洪涝灾害有重要作用<sup>[1]</sup>,大部分平原地区需通过河网调蓄涝水从而降低排涝模数,确保内河高水位不漫溢或地块雨水能自排入河。为充分利用河槽调蓄库容,可在汛期预降河道水位,在来水流量峰值前期尽可能外排来水,以维持相对较低的河道起调水位,确保河槽库容用于调蓄峰值流量,从而减小泵站规模或降低河道高水位。降低河道高水位是内涝防治的关键,也是排涝调控的最大技术难点<sup>[2]</sup>,为此有必要深入研究与排涝调控密切相关的河槽调蓄库容影响因素。在实际工程规划设计中,一般河道排涝调蓄计算主要采用河槽静库容,未考虑河道过流水面比降对河槽调蓄库容的影响,但实际上河道水面线的变化会影响河道蓄水体积<sup>[3]</sup>,特别是过流量相对较大而河道过水面积相对较小的排涝河道,其水面比降较大,水面线以下库容相应较大。圩区排涝河道与河道型水库类似,在调蓄演算中应考虑动库容的影响,而这往往造成计算中排涝河道河槽有效调蓄库容考虑不足。动库容主要源自于河道过流水面比降,而水面比降与河道起调水位对应的水深、河道糙率、河道横断面形态、河道长度等因素均有关,本文将分析这些因素对河槽调蓄库容的影响,并对各参数的确定提出优化建议,对于排涝工程决策具有一定参考价值。

## 2 圩区排涝计算方法及影响因素

### 2.1 圩区排涝特点

平原河网地区河网密度大、水面比降小,汛期排涝易受外江洪水或外海潮位顶托影响,低洼区需建立相对独立的圩区进行排涝,圩区一般水面率较高、河网密布、河道宽度相对较窄、河槽调蓄库容较大,涝水外排口门较多,各排涝河道流量、流速、水面比降均较小,河道上下游最高水位变幅较小,故一般直接采用单一水位作为圩区内所有河道的设计高水位。

### 2.2 圩区排涝计算方法

(1)水量平衡法。水量平衡法调蓄计算主要参数为来水流量过程、水位—库容曲线、外排—库容曲线,经迭代试算确定河道排涝高水位及所需调蓄库容,水位—库容曲线根据圩区河道资料、水面率、地坪标高、起调水位、排涝高水位等确定,外排—库容曲线根据排涝调度方式、外排泵站规模确定,水量平衡法基于水量平衡方程,具体公式为:

$$\frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t - \frac{q_1 + q_2}{2} \Delta t = V_2 - V_1 \quad (1)$$

式中, $Q_1$ 、 $q_1$  分别为时段初入流、出流流量; $Q_2$ 、 $q_2$  分别为时段末入流、出流流量; $\Delta t$  为计算时段; $V_1$ 、 $V_2$  分别为时段初、末蓄水量。

(2)排涝模数法。排涝模数法计算主要参数有净雨量、调蓄水深、水面率和计算时段,该方法

收稿日期:2023-03-21,修回日期:2023-04-19

作者简介:吴春(1985-),男,硕士、高级工程师,研究方向为水利工程规划,E-mail:wuchun@smedi.com

同样基于水量平衡方程推求得到<sup>[4]</sup>,通过调蓄水深和水面率参数简化考虑圩区水域调蓄作用,河道湖泊等调蓄设施均假定为直立断面,即不同河道水位对应的调蓄水域面积不变。

(3)一维非恒定流计算。一维非恒定流计算可在模型中体现来水流量过程、河道长度、河道断面、起调水位、糙率等参数,因此相比水量平衡法、排涝模数法能更准确地计算河道高水位,也能直观反映这些参数对河槽有效调蓄库容的影响。一维非恒定流一般采用一维圣维南方程组进行求解,连续方程、运动方程分别为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ |Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (3)$$

式中,  $Q$  为断面流量;  $A$  为过水断面面积;  $h$  为断面水位;  $q$  为单位河长的均匀旁侧入流流量;  $\alpha$  为动量分布系数;  $g$  为重力加速度;  $C$  为谢才系数;  $R$  为断面水力半径。

### 2.3 圩区排涝调蓄影响因素

圩区排涝是通过调蓄设施和排涝泵站的共同作用来调蓄和外排涝水,最终实现控制河道高水位不漫溢及地块排水自排入河不受涝。影响圩区河道高水位的因素主要有承泄区水情、圩内水面率、泵闸规模、起调水位、河底标高、河道糙率、河道排水距离、水面比降等。

## 3 某圩区排涝调蓄计算

### 3.1 圩区概况

某圩区集雨面积为 8 km<sup>2</sup>、水面率 2.95%、调蓄水域面积 23.6 ha、起调水位 2.6 m、河道长度 5.95 km、河道底宽和河道口宽均为 40 m(矩形直立断面)、河底标高 0.0 m、河道糙率 0.033。采用水量平衡法进行调蓄计算,得到不同泵站外排流量下所需调蓄库容。圩区来水过程和调蓄计算成果详见表 1、2。

表 1 圩区来水流量过程

Tab.1 Process of inflow in polder areas  $P=5\%$

时间	流量	时间	流量	时间	流量
/h	/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	/h	/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	/h	/ $(m^3 \cdot s^{-1})$
0	0.0	5	110.2	10	40.1
1	15.2	6	120.5	11	10.7
2	50.1	7	110.6	12	4.6
3	75.3	8	95.2	13	3.2
4	95.4	9	70.4		

表 2 不同泵站流量下对应所需调蓄库容、调蓄水深、排涝高水位一览表

Tab.2 Statistical table of required regulation & storage capacity, water depth, and high water level for drainage under different discharge of pump stations

泵站规模	排涝模数	所需调蓄库容	调蓄水深	起调水位	水量平衡法排涝高水位/m
$/(m^3 \cdot s^{-1})$	$/(m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2})$	$/10^4 m^3$	/m	/m	水位/m
50	6.25	115.8	4.87	2.6	7.47
70	8.75	65.9	2.77	2.6	5.37
90	11.25	27.4	1.15	2.6	3.75

### 3.2 河槽调蓄库容影响因素分析

本文重点分析影响河槽调蓄库容的三个因素,分别为起调水位、泵站外排流量及排涝河道长度。

(1)不同起调水位非恒定流排涝计算。拟定泵站外排流量 50 m<sup>3</sup>/s,分析不同起调水位对河槽调蓄库容的影响。排涝调度方式为当河道来水流量小于泵站外排流量时来多少排多少,控制河道水位不超过起调水位,当河道来水流量超过泵站外排流量时则按泵站流量外排。经一维非恒定流计算,不同起调水位下对应的河槽调蓄库容、河道最高水位成果详见表 3。

表 3 不同起调水位对应河槽调蓄库容一览表

Tab.3 Statistical table of storage capacity of river channel corresponding to different initial water levels

起调水位 /m	河槽静库容	静库容差值	河槽动库容	动库容差值	非恒定流平均高水位/m	水量平衡法排涝高水位/m
	$/10^4 m^3$	$/10^4 m^3$	$/10^4 m^3$	$/10^4 m^3$		水位/m
	(1)	(2)=(1)-115.8	(3)	(4)=(3)-115.8		
10.0	116.6	0.8	115.9	0.11	14.90	14.87
8.0	116.6	0.8	115.9	0.11	12.90	12.87
6.0	116.6	0.8	115.9	0.11	10.90	10.87
3.0	119.2	3.4	115.9	0.11	8.01	7.87
2.6	120.2	4.4	115.3	-0.49	7.65	7.47
2.2	122.1	6.3	114.8	-0.97	7.33	7.07
1.8	125.0	9.2	114.1	-1.68	7.05	6.67
1.6	126.9	11.1	113.9	-1.92	6.93	6.47
1.4	129.2	13.4	113.9	-1.92	6.83	6.27
1.2	131.9	16.1	113.9	-1.92	6.74	6.07

为便于分析,将起调水位至非恒定流最高水位水面线之间的河槽调蓄库容定义为河槽静库容。由表 3 可知,起调水位对应水深越小,河槽静库容与水量平衡法所需调蓄水量的差值越大,说明起调水位对应水深较小的情况下,河槽静库容内存在部分无效调蓄库容,即起调水位以上有部分库容为外排流量过流所需库容,该部分空间不能参与削峰调蓄。

将河道末端排涝泵站达到设计外排流量时刻对应水面线以上至非恒定流最高水位水面线之间

的库容定义为河槽动库容。由表 3 可知,不同起调水位下,河槽动库容与水量平衡法所需调蓄库容差值较小,说明河槽动库容接近有效调蓄库容,即达到泵站设计外排流量时刻河道水面线以下的过流库容属于行洪空间,不能参与削峰调蓄。

水量平衡法河道高水位均低于非恒定流河道高水位,起调水位越低,水位差值越大(图 1),主要原因为水量平衡法未考虑到动库容影响,水量平衡法将河道起调水位与达到外排流量时刻水面线之间的库容计入有效调蓄库容,从而导致水量平衡法高水位低于非恒定流高水位。

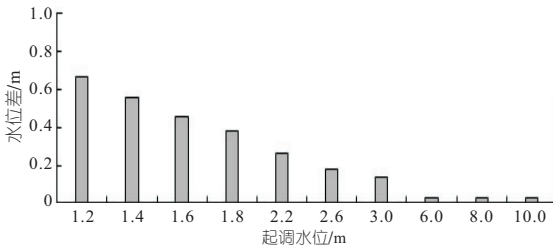


图 1 非恒定流平均高水位与水量平衡法排涝高水位之差随起调水位的变化趋势

Fig. 1 The variation trend of the difference between the average high water level of unsteady flow and the high water level of water balance method with the initial water level

(2)不同外排流量非恒定流排涝计算。起调水位取 2.6 m,分析计算不同泵站外排流量对河道调蓄库容的影响。由表 4 可知,相同起调水位下,泵站外排流量越大,河道流量达到泵站流量时刻形成的水面比降越大,即起调水位以上过流空间占用越大,故河槽静库容大于水量平衡法所需调蓄库容越多。河槽动库容与水量平衡法所需调蓄库容差值较小,与泵站外排流量无关,由于河道需形成水面比降才能达到设计泵站流量,起调水位与达到设计外排流量时刻对应水面之间的库容为过流空间,不具备调蓄功能,故河槽动库容接近有效调蓄库容。

表 4 不同泵站流量对应河槽调蓄库容一览表

Tab. 4 Statistical table of storage capacity of river channel corresponding to different discharge of pump stations

泵站	水量平衡法所需库容 / $10^4 m^3$	河槽静库容 / $10^4 m^3$	静库容差 / $10^4 m^3$	河槽动库容 / $10^4 m^3$	动库容差 / $10^4 m^3$	达到外排流量时刻水面比降
	(1)	(2)	(3)=(2)-(1)	(4)	(5)=(4)-(1)	(1/10 000)
50	115.8	120.2	4.4	115.3	-0.49	0.69
60	89.5	95.4	5.9	89.0	-0.49	0.91
70	65.9	73.5	7.6	65.7	-0.21	1.11
80	45.0	54.7	9.7	45.6	0.58	1.29
90	27.4	38.8	11.4	28.2	0.80	1.50

注:泵站流量单位为  $m^3/s$ 。

(3)不同河道长度非恒定流排涝计算。设定起调水位 2.6 m、泵站外排流量  $50 m^3/s$ ,分析计算不同河道长度对河槽调蓄库容的影响。由表 5 可知,河道长度越长,河槽静库容大于水量平衡法所需调蓄库容越多,即过流库容占用越大,河槽动库容小于实际所需调蓄水量越多,主要原因为河道长度越长,河道末端达到泵站外排流量时整条河道的平均流量越大,河道平均流量超过泵站外排流量越多,河道平均流量对应水面线以上河槽动库容小于所需调蓄库容越多。

表 5 不同河道长度对应河槽调蓄库容一览表

Tab. 5 Statistical table of storage capacity corresponding to different river lengths

河道长度 /m	河槽静库容 / $10^4 m^3$	静库容差 / $10^4 m^3$	河槽动库容 / $10^4 m^3$	动库容差 / $10^4 m^3$	达到外排流量时刻水面比降
(1)	(2)	(2)=(1)-115.8	(3)	(4)=(3)-115.8	(1/10 000)
2 950	117.1	1.26	115.8	-0.04	0.75
3 950	118.0	2.23	115.8	-0.01	0.71
4 950	119.0	3.20	115.5	-0.27	0.71
5 950	120.2	4.39	115.3	-0.49	0.69
7 950	123.0	7.17	114.3	-1.53	0.69
9 950	125.8	9.97	112.2	-3.56	0.68

## 4 结论

a. 河道达到泵站外排流量时刻对应水面线以下的库容为行洪库容、以上至最高水面线之间库容为有效调蓄库容,行洪库容无法参与调蓄。

b. 在实际排涝工程规划或设计中,应确保河道起调水位对应水深与河道末端排涝泵站流量相匹配,从而避免起调水位以上库容被行洪库容占用导致的实际排涝水位高于设计高水位的问题。

### 参考文献:

[1] 蒋祺,郑伯红. 城市雨洪调蓄空间对洪涝灾害影响研究——以长沙市 2017 年洪涝灾害为例[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 29-38.

[2] 林发永,李学峰,丁国川,等. 超大城市排涝关键技术思考与探讨[J]. 水利规划与设计, 2022(6): 12-15, 68.

[3] 徐晶,宋东辉. 考虑河道涌容调节的排涝设计[J]. 人民长江, 2010, 41(24): 17-19, 24.

[4] 高成,刘俊,崔韩,等. 城镇圩区排涝模数计算方法及其与河道调蓄库容关系研究[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 7-9.

(下转第 40 页)

## 5 结 论

a. 减碳政策对电力生产用水有一定的节约效果,京津冀三地分别为 4.8%、3.3%、2.1%,但会加大电力跨区输送以保证地区用电,导致电力贸易虚拟水流量增加。

b. 碳税对电力水足迹的节约最显著,京津冀三地分别为 4.5%、19.3%、-1.6%,而投资和可再生能源补贴会在一定程度上增加水足迹。

c. 政策影响存在地区差异,天津市水足迹节约最明显,河北省和北京市在组合情景下电力水足迹反而会上升。

### 参考文献:

[1] 周露明, 谢兴华, 余丽, 等. 水资源管理中的水—

能源—经济耦合关系[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4):144-147,166.

[2] 孙才志, 高春阳. 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):52-61.

[3] 王岩, 何山水. 生态足迹视角下我国能源贸易转型[J]. 经济与管理, 2017, 31(4): 83-88.

[4] 王勇. 全行业口径下中国区域间贸易隐含虚拟水的转移测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 107-115.

[5] 邓光耀. 中国多区域水资源 CGE 模型的构建及其应用[J]. 统计与决策, 2020, 36(14): 157-161.

[6] 贺菊煌, 沈可挺, 徐嵩龄. 碳税与二氧化碳减排的 CGE 模型[J]. 数量经济技术经济研究, 2002(10): 39-47.

[7] 车德竞, 孟洁, 陈永辉, 等. 未来 20 年我国火力发电用水情况预测分析[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 17-21.

## Research on Water Footprint of Power Industry Between Beijing, Tianjin and Hebei Regions Under Dual Carbon Goals

PENG Ying<sup>a,b</sup>, ZHOU Qian<sup>a,b</sup>

(a. School of Economics and Management; b. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The current regional water supply and power generation structure is not able to achieve sustainable development in the long term. It is worth exploring whether the production, trade and the corresponding water footprint of the power sector in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region can meet the long-term development needs of the region after the dual-carbon goals is proposed. Therefore, this study constructed a dynamic multiregional computable general equilibrium model to simulate the changes in the production and trade of the power sector and its water footprint in the BTH region caused by the carbon reduction policy. Four carbon reduction scenarios were designed in the model to explore the impacts of policies such as carbon tax, investment and renewable energy subsidies. The results show that the carbon tax policy has the most significant water saving effect on power generation; The carbon reduction policy significantly increases the inter-regional flow of virtual water in the power trade; The complete water footprint of the power sector under various scenarios does not change much (less than 15%), in which the water footprint of the power sector in Beijing has the highest sensitivity to the carbon reduction policy. Therefore, the focus of water conservation in the power sector under the dual-carbon target should be on the trade chain, optimizing the trade structure and reducing interregional virtual water flows.

**Key words:** water footprint; water consumption for power generation; CGE model; renewable energy generation; dual carbon goals; Beijing-Tianjin-Hebei region

\*\*\*\*\*  
(上接第 84 页)

## Analysis on Influencing Factors of Regulation and Storage Capacity of River Channel in Polder Areas

WU Chun, NI Peng, DING Zhao-hui

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) CO., LTD., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The regulation and storage capacity of a river channel plays an important role in the safety of drainage in polder areas. In order to study the factors related to the actual effective regulation and storage capacity of a river channel in polder areas, this paper adopts the unsteady flow model and the water balance method to calculate the regulation and storage capacity of a single river channel. The calculation results of the two methods show that the main influencing factors of the regulation and storage capacity of a river channel are the water depth corresponding to the starting regulation level, the roughness of the river channel, the length of the river channel and the cross-section morphology, etc. For the backbone drainage channel with large discharge, the actual effective regulation and storage capacity is the storage capacity from above the water surface line corresponding to the designed discharge to the maximum water level. The research results have certain reference value for the planning and design of drainage in polder areas.

**Key words:** channel regulation and storage; drainage calculation; unsteady flow; dynamic storage capacity