

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0126

梁霄, 巨文慧, 孙博闻, 等. 基于关键闸坝优选的区域水网水量调控[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1238-1248. LIANG X, JU W H, SUN B W, et al. Water quantity regulation of regional water network based on optimal selection of key gate dam[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1238-1248. (in Chinese)

基于关键闸坝优选的区域水网水量调控

梁霄¹, 巨文慧², 孙博闻¹, 胡泽¹, 高学平¹, 张晶³, 赵进勇³

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100089)

摘要:为实现区域水网水量的高效调控,从水量、水生态、水质和闸坝管理等 4 个方面构建包含 10 个指标的闸坝优选评价指标体系,以廊坊市凤河-永定河流域水网为研究对象,计算区域内 32 座闸坝的综合关键指数并给出影响程度排序,采用水动力数学模型验证关键闸坝选取的合理性。结果表明:优选出的永丰闸和东张务闸是区域水网的关键闸坝,通过调节这两座闸坝的开度即可满足区域水网的生态需水和防洪排涝调度目标,保持区域水网较优的水力连通能力,提高区域水网水量调控效率。

关键词:区域水网;水量调控;闸坝调度;水动力模型;关键闸坝

中图分类号:TV213

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



区域水网是由区域范围内交错纵横的河流、湖泊、水库、沟渠、坑塘和洼淀等构成的水系^[1]。区域水网水量分布不均造成的河道断流及生态需水难以满足等问题会对区域水网的生态环境产生不良影响,为此科学制定区域水网水量调控方案十分重要^[2-4]。水量调控方案常通过调度闸坝来实现,但选择不同数量和规模的闸坝会影响调控效率与效果^[5-7]。如何在不同目标条件下优选出对区域水网影响程度较大的部分闸坝,通过调度部分关键闸坝,在保证调控效果的前提下实现对区域水网水量的高效调控成为亟待解决的问题。

在区域水网水量调控方面,近年来学者们通常采用多目标水量调控模型进行研究;张永勇等^[8]将闸坝水质水量联合调度模型和遗传算法耦合到流域综合管理模型 SWAT 中,用此耦合模型优化北京市温榆河干流内的 4 座闸坝出流量,实现区域水质提升;Gao 等^[9]通过构建北运河流域多目标优化模型,

实现区域水网的水量优化配置;联合调度闸坝群是实现区域水网水量调控的重要手段,李冬锋等^[10]以淮河流域重污染河流沙颍河上的闸坝群为研究对象,构建了多闸坝河流一维水动力水质模型,分析了关键闸坝对水环境的影响,通过调控 3 座关键闸坝的泄流最终改善了河流水质;杨星等^[11]构建一维水动力水质耦合模型,通过控制分水口闸前水位模拟南水北调中线总干渠在不同水力调控下污染物的迁移状况;Lee 等^[12]利用 SWAT 模拟闸坝的运行场景,评价各方案对 Nakdong 河流域的水质改善效果;Ahn 等^[13]采用 SSARR 模型评估闸坝群建设前后的径流变化;刘子辉^[14]探讨了闸坝对河流水质水量影响的作用机理,以槐店闸为例,分析了闸坝开度与污染物质量浓度的关系。在以上研究中,区域水网的水量调控目标随着季节、年际变化而改变^[9,15],导致所需调度的闸坝数量与调度方式存在差异。大量闸坝的存在使水量调控方案的实施变得更加复

收稿日期:2021-03-11 修回日期:2021-08-08 网络出版时间:2021-08-16

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210816.1050.002.html

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项项目(2018ZX07105);国家自然科学基金项目(51621092)

作者简介:梁霄(1997—),女,内蒙古赤峰人,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:liangxiao2019@tju.edu.cn

通信作者:孙博闻(1987—),男,河北唐山人,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:bwsun@tju.edu.cn

奈^[16],因此通过调度几座关键闸坝来实现水量调控目标是实际运行中常采用的方式,但如何选择关键闸坝当前研究较少提及。

闸坝对区域水网影响的相关研究可以为关键闸坝的选择提供参考:张永勇等^[17]构建了淮河流域闸坝水文水环境效应定量评价的研究框架,将水质作为关键评价要素进行定量分析;崔凯等^[18]、左其亭等^[19]在淮河流域构建了闸坝调控能力识别框架,从水质、水量等2个方面对闸坝进行评价研究;左其亭等^[20]在对淮河流域进行生态健康评价时将水生态和水质作为准则层指标分析与计算;刘静玲等^[21]在滦河流域建立了包括水文水量特征、水生态特征等因子的闸坝水生态效应评估体系;杨志峰等^[22]将闸坝运行状态及管理现状作为生态风险评估的重要影响因素。基于上述研究,为提高区域水网的水量调控效率、降低闸坝调度数量,本文从水量、水生态、水质的影响程度以及闸坝管理等4个方面建立闸坝优选评价指标体系,以廊坊市凤河-永定河区域水网为研究对象,评价并优选出对区域水网水量调控影响程度高的关键闸坝;采用水动力数学模型,计算调节关键闸坝开度对于区域水网生态需水、防洪排涝和水力连通能力的影响,验证关键闸坝选取的合理性。

1 研究方法

本文从水量、水生态、水质以及闸坝管理等4个方面选取指标构建闸坝优选评价指标体系,对于较难直接量化的指标采用专家赋分法为其赋值,应用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-熵权法计算指标体系中各指标权重,确定研究区域内各闸坝对区域水网水量调控的影响程度,优选出区域水网在多目标水量调控下的关键闸坝,最后建立可调节关键闸坝开度的水动力数学模型,验证关键闸坝选取的合理性。

1.1 闸坝优选评价指标体系的构建与计算

1.1.1 指标体系的构建

在建立闸坝优选评价指标体系时需要遵循一定的原则和标准,确保能够综合、客观、科学地评判闸坝的影响程度,指标选取原则主要有:(1)综合性、适用性原则,即指标的选取需要充分考虑研究区域水网与闸坝特征,从不同的方面综合、全面地对区域闸坝进行分析和评价;(2)层次性、客观性原则,即指标体系应由主到次逐层细化;(3)简明性、科学性原则,即评价指标的选取都应以科学性为

原则,能够清晰直观地描述闸坝特点与对区域水网的影响作用。

基于以上原则,选取10个指标构成闸坝优选评价指标体系,具体包括:水量准则层,闸坝最大下泄流量、闸坝上游最大来水量、闸坝控制水域范围;水生态准则层,生态流量满足度、物种多样性情况;水质准则层,COD质量浓度变化率、氨氮质量浓度变化率;闸坝管理准则层,闸坝建筑物现状、分级调控效率、闸坝运营净效益。

1.1.2 指标的计算方法

采用专家赋分法^[23-28]并结合实地调研结果,将评价指标由低(劣)到高(优)分为5个等级,分别赋予1~5分,得到研究区域内闸坝分数表。为了能客观准确地对研究区域闸坝群进行指标的判断和赋分,邀请了对海河流域、廊坊市水系闸坝调度管理方面熟悉的5位专家进行赋分,并取其均值作为最终赋分结果。赋分结果显示,并未存在不同专家对同一闸坝的同一指标出现极端打分差距的情况,所以各专家对区域内闸坝情况具有共性认同。其他可以量化的指标,如水量准则层各指标可根据闸坝参数信息、水文站点历年实测水文数据与《廊坊市水资源公报》等计算得到。

1.1.3 指标权重的确定方法

采用AHP-熵权法对本文构建的闸坝优选评价指标体系中各指标权重进行计算。AHP-熵权法^[29]是一种主客观结合的赋权方法,该方法可避免单一主观或客观评价方法在确定权重和定性评价闸坝时产生误差,指标权重计算过程如下。

(1) AHP权重计算。层次分析法^[30]基于主观定性分析,对各层次中的指标相对重要程度两两比较构建判断矩阵并进行一致性检验:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (1)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; m 为判断矩阵的阶数; R_1 为一一致性指标标准值。若 $C_R < 0.1$,则检验通过。借助MATLAB程序计算 λ_{\max} 对应的特征向量,得到各层次元素权重。将各层次元素权重相乘即可得到评价指标相对准则层的权重,即AHP权重。

(2) 熵权计算。熵权法^[31]是一种客观赋权方法,首先对评价指标数值进行归一化处理,得到归一化矩阵,然后定量计算各评价指标对应的熵值,得到指标对应的熵权。熵权的计算步骤如下。

指标归一化处理。对于正向指标,归一化计算公式为

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (3)$$

对于负向指标,归一化计算公式为

$$x(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (4)$$

式中: x_{\max} 和 x_{\min} 分别为第 j 个评价指标的最大值和最小值; i 为第 i 座闸坝。

熵值计算公式为

$$H_j = -k \sum_{i=1}^N f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

$$f_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_{i=1}^N g_{ij}} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{\ln N} \quad (7)$$

式中: H_j 为评价指标 j 的熵值,在此假定当 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$; g_{ij} 为评价指标的归一化矩阵; k 为玻尔兹曼常量; N 为闸坝总数。

熵权计算公式为

$$w'_j = \frac{1 - H_j}{M - \sum_{j=1}^M H_j} \quad (0 \leq w'_j \leq 1, \sum_{j=1}^M w_j = 1) \quad (8)$$

式中: M 为评价指标的总个数。

(3)综合权重计算(AHP-熵权法)。将 AHP 法计算得到的指标权重值记为 w^* ,熵权法计算得到的指标权重记为 w' ,评价指标的个数记为 $j(j=1, 2, \dots, M)$,计算得出的综合权重为

$$w_j = \frac{(w'_j w_j^*)^{0.5}}{\sum_{j=1}^M (w'_j w_j^*)^{0.5}} \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

由计算与赋分得到的各闸坝优选评价指标数据构建初始决策矩阵 \mathbf{X} ,将其标准化处理后得到规范化矩阵 \mathbf{Y} ,由评价指标权重值可以得到权重矩阵 \mathbf{W} 。利用规范化矩阵 \mathbf{Y} 、权重矩阵 \mathbf{W} ,计算得到决策值矩阵 \mathbf{V} ,即 $\mathbf{V} = \mathbf{Y}\mathbf{W}$ ^[31-32]。设研究区域内共有闸坝 N 座,每座闸坝有 M 个评价指标, x_{ij} 代表第 i 座待评价闸坝中的第 j 个指标值,则初始决策矩阵 \mathbf{X} 、规范化矩阵 \mathbf{Y} 、权重矩阵 \mathbf{W} 及决策值矩阵 \mathbf{V} 分别表示为

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NM} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NM} \end{pmatrix} \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_M \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{Y}\mathbf{W} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1M} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{pmatrix}^T$$

正向指标标准化处理公式为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij} + \min x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

负向指标标准化处理公式为

$$y_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{\max x_{ij} + \min x_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M) \quad (11)$$

1.2 水动力数学模型

模型采用一维 Saint-Venant 方程组构建,采用隐式有限差分法进行求解,方程为

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial x} + \partial A \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (13)$$

式中: A 为过水断面面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; x 为纵轴坐标, m ; t 为时间, s ; q_1 为单位长度侧向入流量, m^2/s ; U 为纵向流速, m/s ; Z 为水位, m ; $S_f = Q|Q|/K^2$, m^3/s , K 为流量模数; g 为重力加速度, m/s^2 。

2 廊坊市凤河-永定河区域水网闸坝优选与水量调控

2.1 研究区域概况

廊坊市属于暖温带大陆性季风气候,区域北部多年平均降水量 $550 \sim 800$ mm;中南部降水量偏少,年均 $400 \sim 550$ mm,个别地区可达 600 mm。研究区域位于海河流域的中下游,以平原和洼地为主,海拔约 $0 \sim 20$ m,地势平缓。境内河流属海河流域的北三河、永定河水系,水系十分发达,属于廊坊市凤河-永定河区域水网,共建有橡胶坝 4 座、水闸 28 座,其中龙河上游三小营闸和齐营大闸已基本废弃处于常开状态,区域水网与主要闸坝见图1。该区域水网以龙河为界分为环城水系和永定河泛区水系两部分,水量分布不均,其中城区河段、永定河泛区水资源短缺。为使区域恢复水生态健康,实现各河道生态需水、防洪排涝以及永定河断流区恢复通水等诸多目标,科学调控区域水网的水量十分必要。

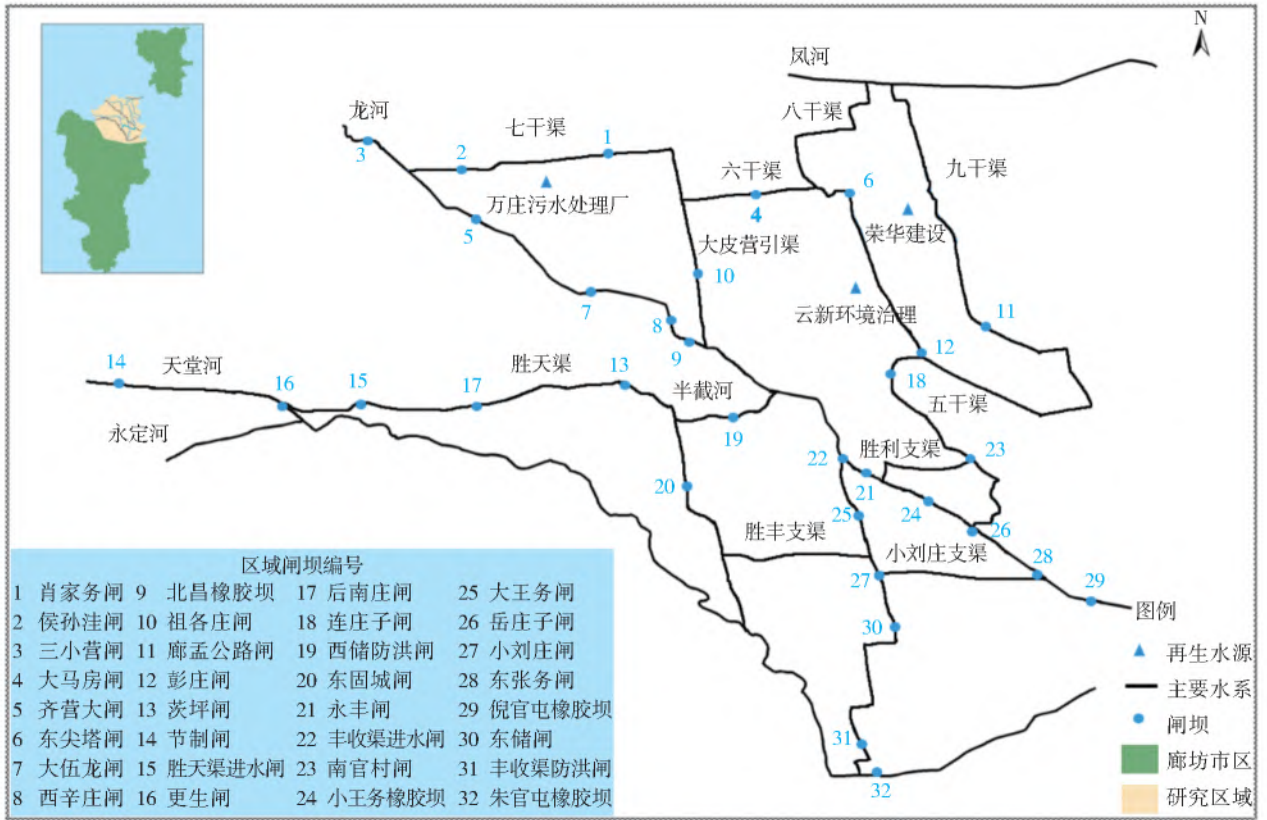


图 1 区域水网与主要闸坝

Fig. 1 Regional water network and main gate dams

2.2 建立闸坝优选评价指标体系

根据保序性、客观性、协调性等原则,选择水量、水生态、水质和闸坝管理^[17-22,33]等 4 个准则层共 10

个指标建立闸坝优选评价指标体系,将闸坝对河道水量、水生态、水质等方面的影响程度作为定量表征闸坝对区域水网影响的关键指数,见表 1。

表 1 闸坝优选评价指标体系
Tab. 1 Evaluation index system of gate dam

准则层	指标名称及单位	指标意义与影响方式	指标计算方法
水量	闸坝最大下泄流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	反映闸坝的过流能力	闸坝多年最大下泄流量均值
	闸坝上游最大来水量/ m^3	闸坝上游来水量最大值,反映了闸坝可调控最大水量	闸坝上游河道多年最大来水量均值
	闸坝控制水域范围/ km	闸坝控制河段长度,反映了闸坝的水量调控能力	依据闸坝规模与闸坝参数等分析计算 ^[34]
水生态	生态流量满足度	闸坝控制范围内可以满足河道生态需水量的程度	河道生态流量与现状径流量对比分析 ^[35]
	物种多样性情况	闸坝控制范围内的水生动植物生长生活状况	采用浮游植物、浮游动物、水生高等维管束植物、底栖动物和鱼类等指标表征 ^[36]
水质	COD 质量浓度变化率	闸坝前后河段的 COD 质量浓度变化,可以反映闸坝的存在对水质的影响	闸坝前后河段 COD 质量浓度变化百分比 ^[36]
	氨氮质量浓度变化率	闸坝前后河段的氨氮质量浓度变化,可以反映闸坝的存在对水质的影响	闸坝前后河段氨氮质量浓度变化百分比 ^[36]
闸坝管理	闸坝建筑物现状	闸坝建设时间、功能和设计参数、现阶段运营状态会对闸坝调度产生影响	依据闸坝建设与运行状态等定性分析
	分级调控效率	从闸坝主管部门发出调控指令到闸坝实际操作过程的效率	依据闸坝调度情况定性分析
	闸坝运营净效益/万元	闸坝的经济效益扣除日常维护和开支等剩余的部分	实地调研与资料收集 ^[34]

采用 AHP-熵权法计算各指标综合权重,结果列于表 2。

表 2 闸坝优选评价指标体系指标权重

Tab. 2 The index weight of gate dam evaluation index system

准则层	指标层	权重		
		AHP	熵权法	综合权重
水量	闸坝最大下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	0.138	0.126	0.132
	闸坝上游最大来水量/m ³	0.104	0.112	0.108
	闸坝控制水域范围/km	0.108	0.099	0.104
水生态	生态流量满足度	0.110	0.111	0.111
	物种多样性情况	0.090	0.060	0.074
水质	COD 质量浓度变化率	0.100	0.100	0.100
	氨氮质量浓度变化率	0.100	0.096	0.100
闸坝管理	闸坝建筑物现状	0.111	0.107	0.109
	分级调控效率	0.079	0.095	0.087
	闸坝运营净效益/万元	0.060	0.094	0.075

为得到评价指标决策值矩阵和等级划分标准,优选出区域水网水量调控目标需求下的关键闸坝,需要进行目标决策分析。根据式(10)、(11)对各闸坝评分数据进行标准化处理,得到规范化矩阵 Y。根据表 2 可以得到权重矩阵为

$$W = (0.132 \ 0.108 \ 0.104 \ 0.111 \ 0.074 \ 0.100 \ 0.100 \ 0.109 \ 0.087 \ 0.075)^T$$

利用综合权重法,根据规范化矩阵和权重矩阵,计算得到决策值矩阵为

$$V = YW = (0.440 \ 0.373 \ 0.319 \ 0.367 \ 0.259 \ 0.415 \ 0.390 \ 0.375 \ 0.389 \ 0.470 \ 0.475 \ 0.438 \ 0.467 \ 0.477 \ 0.526 \ 0.520 \ 0.378 \ 0.311 \ 0.581 \ 0.313 \ 0.660 \ 0.510 \ 0.330 \ 0.384 \ 0.439 \ 0.440 \ 0.322 \ 0.734 \ 0.475 \ 0.370 \ 0.374 \ 0.407)^T$$

类似地,首先根据式(10)、(11)对各闸坝评分数据进行标准化处理得到闸坝优选评价指标体系划分标准数据,然后根据式(3)、(4)对标准数据进行归一化处理,结合闸坝优选评价指标综合权重计算结果,得到综合关键指数的等级阈值,见表 3。

表 3 闸坝等级划分标准

Tab. 3 Grading standard of gate dam

闸坝等级划分	I 级	II 级	III 级
综合关键指数	≤ 0.385	0.385~0.596	≥ 0.596

2.3 区域闸坝优选结果分析

依据上述方法计算各闸坝在水量、水生态、水质和闸坝管理等 4 个方面的单一关键指数(图 2)和综合关键指数(图 3)。

由图 2 可知,在水量方面,东张务闸、永丰闸、胜天渠进水闸和西储防洪闸的关键指数明显高于其他

闸坝,因此可在用水需求大、过流能力要求高的调控方案中发挥重要作用。在水生态方面,区域内大部分闸坝的水生态关键指数为 0.070~0.100,由于东张务湿地的存在,东张务闸发挥了较大的水生态调控功能,因此其水生态关键指数也在所有闸坝中处于第一。在水质方面,由于万庄污水处理厂、荣华建设投资有限公司、云新环境治理有限公司处再生水源汇入,肖家务闸、廊孟公路闸、彭庄闸水质关键指数达到了 0.130 以上,对区域水质产生较大影响。在闸坝管理方面,永丰闸、东张务闸、胜天渠进水闸以及西储防洪闸运营状况良好,所以其闸坝管理关键指数较高,更易实施水量调控目标。此外,龙河上游三小营闸和齐营大闸已基本废弃,因此这两座闸在闸坝管理方面的关键指数最低。

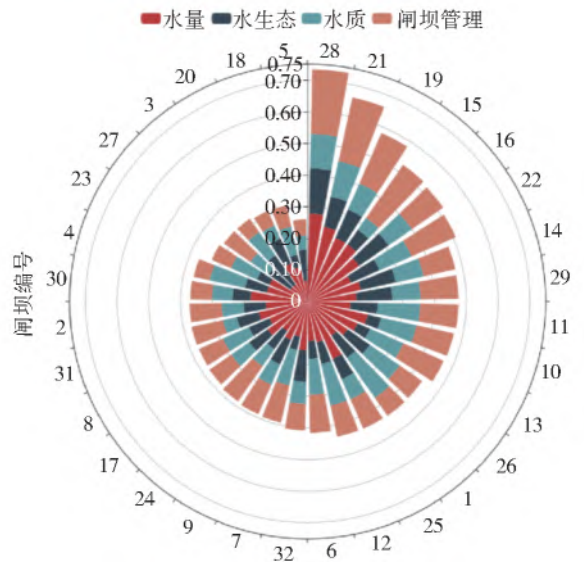


图 2 水量、水生态、水质、闸坝管理关键指数

Fig. 2 Key index map of water quantity, water ecology, water quality and gate dam management

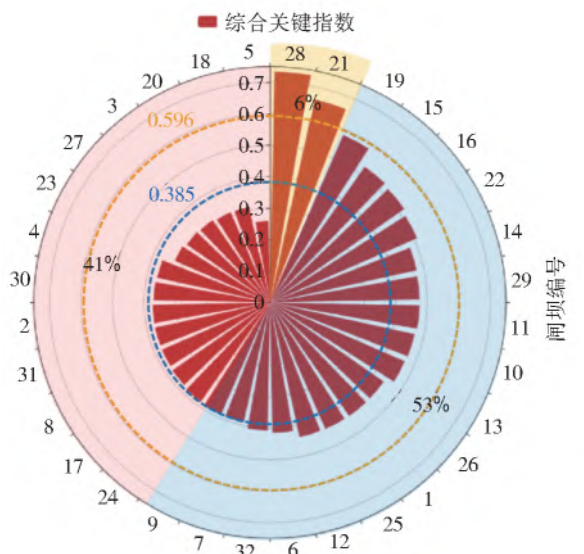


图 3 综合关键指数

Fig. 3 Comprehensive key index of gate dam

从闸坝综合关键指数计算结果(图3)可以看出:龙河上东张务闸和永丰闸综合关键指数明显高于其他闸坝达到了Ⅲ级标准占比6%,是区域水网多目标水量调控中的关键闸坝,具有承担重要调水任务的能力,具备调控区域水量分布进而影响水生态和水质的综合作用;区域内53%的闸坝综合关键指数为0.385~0.596,这17座闸坝可承担一定的区域水系连通和水量调控任务,部分闸坝在水量、水生态、水质等方面仍有重要调控能力,可根据调控范围以及调控目标择优选择调度方案和调度数量;综合关键指数处于0.385以下的13座闸坝占比41%是区域内的Ⅰ级闸坝,这部分闸坝通过水量调控对区域水量、水生态和水质起到改善的能力十分有限,其中部分闸坝的闸坝管理关键指数极低,在实际工况中可考虑边缘化处理。

此外,部分闸坝呈现单一关键指数与综合关键指数差异明显以及在水量、水生态、水质和闸坝管理等4个方面的调控效果也存在“偏科”现象。如:胜天渠进水闸,其综合关键指数为0.526,在32座闸坝中排序第4,但水质关键指数仅为0.045,排序第30,这表明此闸在水质调控方面的作用不明显;肖家务闸在水质调控方面具有重要作用,但其闸坝管理

关键指数较低。对于上述情况,在实际应用中,可根据调控目标按需选择调度闸坝,如对于多目标条件下的水量调控,综合关键指数可以起到良好参考作用;对于更关注单一目标的调控需求,可更精确地选择其目标对应关键指数较高的闸坝,同时兼顾考虑综合关键指数。综上,东张务闸和永丰闸为廊坊市凤河-永定河区域水网中的关键闸坝,可以在多目标水量调控中发挥重要作用。

2.4 关键闸坝对区域多目标水量调控效果分析

为了验证关键闸坝优选结果,构建可调控关键闸坝开度的区域水网水动力数学模型,以生态水位、防洪排涝为水量调控目标,验证通过调度关键闸坝实现区域水网水量调控目标的可行性。

2.4.1 多目标分析与计算

研究区域内永定河泛区水量不足,因此需要通过调度闸坝,将水由环城水系自北向南调入永定河泛区,对永定河泛区进行水量补给,实现区域水网水量调控目标。在水量调控过程中,还需兼顾区域水网生态需水和龙河防洪安全要求,实现区域水网连通与水量合理分配。参考研究区域已有的研究成果^[37-38],计算具体的生态需水、防洪排涝需求,见表4。

表4 区域水网水量调控目标

Tab. 4 Analysis of regional water transfer target

水量调控目标	目标要求	计算依据
生态需水	满足各河道生态需水量	改进湿周法
防洪安全	城市堤防堤顶超高 1.562 m	《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)
排涝流量	廊坊市中心城区排涝流量为 399.431 m ³ /s	《廊坊市生态水系总体规划(2016—2030)》

2.4.2 构建水动力数学模型

建立由龙河、永定河等共13条河流组成的区域水网水动力模型,模型上游流量边界分别位于龙河、天堂河、八干渠和九干渠4处,对应流量条件分别为1.65、1.65、0.55和0.69 m³/s,下游边界采用正常水深。侧向边界条件包括生态需水量、入泛区水量和再生水,均按比例折算分配至每个河段。除大皮营引渠糙率设置为0.015以外,其他河段主槽和滩地糙率均为0.025。

2.4.3 模型计算与结果分析

考虑到关键闸坝需通过开度调节实现水量调控目标,因此在模型计算中分别将东张务闸与永丰闸开度设置为0%、25%、50%、75%、100%这5挡并组合成25种模拟工况。对各工况进行模拟计算,分别得到满足水量调控需求的河长比,见图4。考虑到研究区域还存在水系连通不足的问题,因此增加不

同工况河道水力连通能力^[39-40]($C_h = (|\Delta Z| + 1)^{-1}$, ΔZ 为两相邻水位站点之间的水位差)作为评价各工况水量调控效果的指标,见图5。

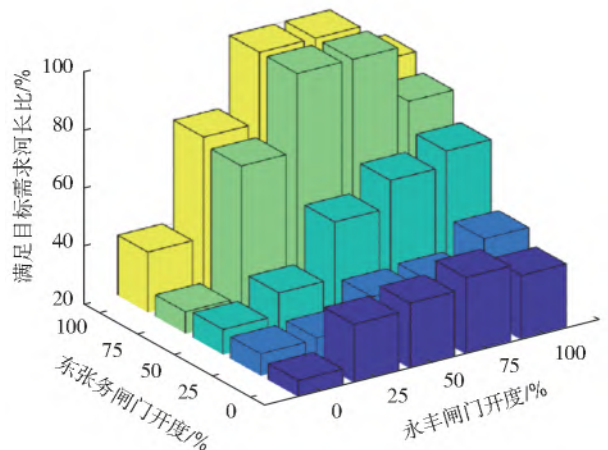


图4 各工况满足调控需求河长比计算结果

Fig. 4 The calculation results of river length ratio meet the water transfer demand in each working condition

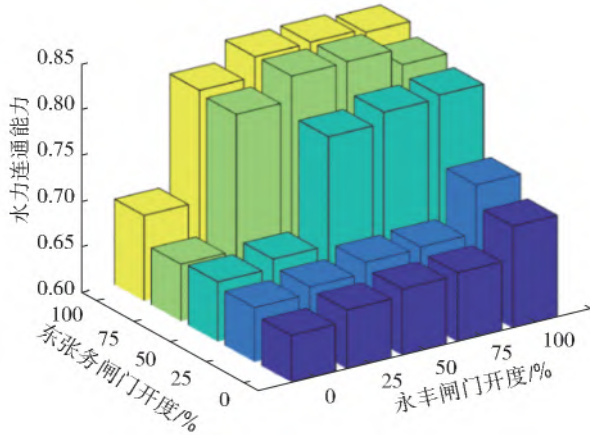


图 5 各工况水力连通能力计算结果

Fig. 5 Calculation results of hydraulic connectivity demand under various working conditions

选择一组工况进行说明:当东张务闸和永丰闸全开时,龙河东张务湿地处水位为 7.375 m,满足湿地生态水位;在该工况条件下区域加权平均水力连通能力为 0.834;在全长 184.68 km 的区域水网中,可同时满足生态需水和防洪要求的河道长度占比 86.49%。在 25 种工况模拟计算中有 4 种工况可满足区域水网生态需水和防洪安全的调控需求,且在这 4 种工况下的水力连通能力指标较高,为 0.837~0.839。可见通过调节东张务闸和永丰闸这两座关键闸门的开度,即可满足区域

水网的生态需水和防洪排涝调度目标,保持区域水网较优的水力连通能力,提高区域水网水量调控效率。

2.5 闸坝优选方法对比分析

目前在区域水网水量调控中进行闸坝优选的研究较少,但在多数水系连通评价中闸坝会作为影响水系连通度的关键要素出现,本质上属于以水量调控为目标的闸坝优选,因此将其与本文的优选方法进行对比。选择窦明等^[41]对淮河水系连通的研究作为对比,该研究考虑闸坝在过流量、调控能力等方面的差异,对闸坝运用图论点连通度理论^[39]进行概化,依据闸坝规模赋予其不同的割点系数,计算并分析了闸坝对水系连通度的影响。将该方法应用于本研究区域中,参数选取均沿用原研究。对比各规模闸坝单独影响下水系连通度的变化百分比,依据闸坝对水系连通度的促进与阻碍能力确定区域关键闸坝,计算结果见表 5。由表 5 可知,基于水系连通度的优选方法会优先采用大型闸坝进行水量调控,以体现其对水系连通的促进作用。然而,水系连通度并不能表征闸坝在水生态、水质和闸坝管理方面的影响程度,因而此种方法对闸坝优选过程的考虑并不够全面。

表 5 基于水系连通度的闸坝优选计算(闸坝规模对水系连通度影响情况)

Tab. 5 Calculation of gate dam based on water system connectivity

闸坝规模	闸坝在图模型中的割点系数	无闸坝时水系连通度	有闸坝时水系连通度	闸坝影响水系连通度变化百分比/%
小型闸坝	0.2	0.737	0.710	-3.640
中型闸坝	0.5		0.725	-1.610
大型闸坝	0.8		0.740	0.429

2.6 闸坝优选评价指标体系适用性讨论

通过指标选取、权重计算和闸坝评价等 3 个步骤构建了闸坝优选评价指标体系,对区域水网中 32 座闸坝在水量、水生态、水质和闸坝管理方面的影响程度进行评价。从研究方法来看,本文提出的评价闸坝影响程度的 10 个指标,在考虑指标易获取性的前提下,充分参考了闸坝对区域水网影响的研究成果,权重计算中采用的 AHP-熵权法在进行指标权重赋值的研究中应用广泛。从研究结果来看,优选出的永丰闸和东张务闸是区域水网的关键闸坝,通过调节这两座闸门的开度,即可满足区域水网的生态需水和防洪排涝调控目标,提高水量调控效率。因此本文提出的闸坝优选评价指标体系适用于区域水网水量调控中选择关键闸坝、提高调控效率的相关研究。

3 结论

以优选区域内关键闸坝、提高区域水网水量调控效率为研究目标建立闸坝优选评价指标体系,将其应用于廊坊市凤河-永定河区域水网,结果如下。

(1) 永丰闸和东张务闸是研究区域内的关键闸坝,其在闸坝优选结果中的水量关键指数与综合关键指数最高。东张务闸开度为 75%~100%,永丰闸开度为 50%~75%,对应节点水头范围分别为 10.55~11.65 m 和 11.30~11.95 m,可以保证研究区域各河段、湿地满足生态水位需求且兼顾防洪安全。

(2) 闸坝优选评价指标体系对多目标水量调控下的闸坝调度有指向性作用,可以反映闸坝在单方面或综合方面的影响程度,在实际应用中采用该方法确定闸坝调度优先级,对于合理减少闸坝调度

数量,提高水量调控效率具有参考意义。

参考文献(References):

- [1] 中国质量检验协会. 区域水网水质水量联合调度平台技术导则:T/CAQI 167—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020:12. (China Quality Inspection Association. Technical guidelines for regional water network joint operation platform of water quality and quantity; T/CAQI 167-2020[S]. Beijing:Standards Press of China,2020:12. (in Chinese))
- [2] ZEINALI M, AZARI A, HEIDARI M M. Multiobjective optimization for water resource management in low-flow areas based on a coupled surface water-groundwater model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(5): 1-15. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001189.
- [3] 董哲仁,赵进勇,张晶. 3流4D连通性生态模型[J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 134-141. (DONG Z R, ZHAO J Y, ZHANG J. Three types flows via four dimensional connectivity ecological model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 134-141. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.06.018.
- [4] MARK M, DRAGAN S. Water resource systems analysis for water scarcity management: The Thames water case study[J]. Water, 2020, 12(6): 1-10. DOI: 10.3390/w12061761.
- [5] 梁士奎. 闸控河流生态需水调控理论方法及应用研究[D]. 郑州:郑州大学, 2016. (LIANG S K. Research on the theory and application of regulation on ecological water requirement in river controlled by sluices[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese))
- [6] 吕继强,刘俊,沈冰,等. 基于分布式水文模型 GBHM 的河流闸坝调控研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 63-67. (LYU J Q, LIU J, SHEN B, et al. Study on regulation and control of urban river dams based on distributed hydrological model GBHM[J]. Yellow River, 2018, 40(9): 63-67. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.09.015.
- [7] AHN J M, LYU S. Analysis of the coordinated operation of reservoirs and weirs during the management of Nakdong River water resources[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(8): 1-10. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000780.
- [8] 张永勇,夏军,陈军锋,等. 基于 SWAT 模型的闸坝水量水质优化调度模式研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5): 159-164. (ZHANG Y Y, XIA J, CHEN J F, et al. Study on optimal dam operation of water quantity and quality based on a distributed SWAT model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 159-164. (in Chinese))
- [9] GAO X, LIU Y, SUN B. A joint-probabilistic programming method for water resources optimal allocation under uncertainty: a case study in the Beiyun River, China [J]. Journal of Hydroinformatics, 2018, 20(2): 393-409. DOI: 10.2166/hydro.2017.032.
- [10] 李冬锋,左其亭. 重污染河流闸坝作用分析及调控策略研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 87-90. (LI D F, ZUO Q T. Effect simulation and regulation strategy of dam on heavily polluted rivers[J]. Yellow River, 2014, 36(8): 87-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2014.08.026.
- [11] 杨星,崔巍,穆祥鹏,等. 南水北调中线总干渠Ⅲ级水污染应急处置水力调控方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 21-28. (YANG X, CUI W, MU X P, et al. Study on hydraulic regulation of level Ⅲ emergency water pollution in Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 21-28. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddq.2018.0034.
- [12] LEE J, LEE Y, WOO S, et al. Evaluation of water quality interaction by dam and weir operation using SWAT in the Nakdong River basin of South Korea [J]. Sustainability, 2020, 12(17): 1-19. DOI: 10.3390/su12176845.
- [13] AHN J M, LEE S, KANG T. Evaluation of dams and weirs operating for water resource management of the Geum River[J]. Science of the Total Environment, 2014, 478: 103-115. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.038.
- [14] 刘子辉. 对重污染河流水质水量影响的实验与模拟研究[D]. 郑州:郑州大学, 2011. (LIU Z H. Experimentation and simulation with impacts of dam operation on water quality and quantity in polluter rivers[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese))
- [15] RYAN A, MC M. Quantifying and generalizing hydrologic responses to dam regulation using a statistical modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1278-1296. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.053.
- [16] 吕菲菲,单楠,马天海,等. 多闸坝河网水系 TMDLs 计算模型构建及应用[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, 52(1): 96-102. (LYU F F, SHAN N, MA T H,

- et al. Buildup of TMDLs model for river network with muti-slucies and its application[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 2016, 52(1): 96-102. (in Chinese)) DOI: 10. 13232/j. cnki. jnju. 2016. 01. 011.
- [17] 张永勇, 夏军, 翟晓燕. 闸坝的水文水环境效应及其量化方法探讨[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 105-113. (ZHANG Y Y, XIA J, ZHAI X Y. The hydrologic-environmental effects of dams and sluices and the assessment frameworks[J]. Progress in Geography, 2013, 32(1): 105-113. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1033. 2013. 00105.
- [18] 崔凯, 高军省, 左其亭, 等. 闸坝对河流水质水量的影响评价研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(6): 12-14, 32. (CUI K, GAO J X, ZUO Q T, et al. Impact evaluation of sluice dam on river water quality and quantity[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2011, 8(6): 12-14, 32. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1409. 2011. 06. 005.
- [19] 左其亭, 陈豪, 张永勇. 淮河中上游水生态健康影响因素及其健康评价[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1019-1027. (ZUO Q T, CHEN H, ZHANG Y Y. Impact factors and health assessment of aquatic ecosystem in upper and middle Huai River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1019-1027. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20141160.
- [20] 左其亭, 刘子辉, 窦明, 等. 闸坝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 Q T, LIU Z H, DOU M, 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)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 02018.
- [21] 刘静玲, 尤晓光, 史璇, 等. 滦河流域大中型闸坝水文生态效应[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 23-28, 35. (LIU J L, YOU X G, SHI X, et al. Hydrological and ecological effects of dams in Luanhe River basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 23-28, 35. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2016. 01. 003.
- [22] 杨志峰, 董世魁, 易雨君, 等. 水坝工程生态风险模拟及安全调控[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 29-32. (YANG Z F, DONG S K, YI Y J, et al. Ecological risk simulation and safety regulation on dam projects [M]. Beijing: Science Press, 2016: 29-32. (in Chinese))
- [23] 匡舒雅, 李天宏. 五元联系数在长江下游生态航道评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 93-101. (KUANG S Y, LI T H. Application of five-element connection number to assessment of ecological waterway in the lower reaches of Yangtze River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 93-101. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0129.
- [24] 王先庆, 李博, 郑建. 基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 87-93. (WANG X Q, LI B, ZHENG J. Comprehensive evaluation of water resources security based on GRA-ANP model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 87-93. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0088.
- [25] 吕彩霞, 仇亚琴, 贾仰文, 等. 海河流域水资源脆弱性及其评价[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 55-59. (LYU C X, QIU Y Q, JIA Y W, et al. Water resources vulnerability and its assessment of Haihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 55-59. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2012. 01055.
- [26] 胡铁松, 张兵堂, 程晓峰, 等. 基于非负矩阵分解的水量分配方案后评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 13-19, 66. (HU T S, ZHANG B T, CHENG X F, et al. Post-evaluation of water allocation based on non-negative matrix factorization[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 13-19, 66. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 03. 003.
- [27] 闫堃, 钟平安, 万新宇. 滨海地区水资源多目标优化调度模型研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 59-66. (YAN K, ZHANG P A, WAN X Y. An optimal operation model for multi-objective water resources schedule in coastal area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 59-66. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 01. 010.
- [28] 潘翔, 沈振中, 甘磊, 等. 大坝除险加固效果评价的时效性指标量化模型[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 155-161. (PAN X, SHEN Z Z, GAN L, et al. Quantitative model of time-efficient indexes for evaluation of reinforcement effect of dam[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 155-161. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0082.
- [29] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于 AHP 和熵权法组合

- 权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 67-74. (WANG F Q, MA S Y, ZHAO H, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water circulation health in Beijing-Tianjin-Hebei region based on combined weights of AHP and entropy[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 67-74. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0006.
- [30] LIANG R, SONG S, SHI Y, et al. Comprehensive assessment of regional selenium resources in soils based on the analytic hierarchy process: Assessment system construction and case demonstration [J]. Science of the Total Environment, 2017, 605: 618-625. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 06. 150.
- [31] YI C, FENG P, JIN J L, LIU L. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved entropy weight method [J]. Entropy, 2018, 20(5): 1-20. DOI: 10. 3390/e20050359.
- [32] XU H S, MA C, LIAN J, et al. Urban flooding risk assessment based on an integrated k -means cluster algorithm and improved entropy weight method in the region of Haikou, China [J]. Journal of Hydrology, 2018. 563: 975-986. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2018. 06. 060.
- [33] 董哲仁. 生态水利工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 429-436. (DONG Z R. Eco-hydraulic engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019: 429-436. (in Chinese))
- [34] 安次区“一河一策”实施方案(龙河)[R]. 廊坊: 廊坊市安次区河长制办公室, 2018. (Implementation plan of “One River, One Policy” in Anci District (Longhe) [R]. Langfang: Langfang Anci District River Chief System Office, 2018. (in Chinese))
- [35] 廊坊市水资源公报[R]. 廊坊: 廊坊市水利局, 2018. (Langfang water resources bulletin [R]. Langfang: Langfang Water Conservancy Bureau, 2018. (in Chinese))
- [36] 廊坊市水生态环境保护“十四五”规划[R]. 廊坊: 廊坊市生态环境局, 2020. (Langfang water ecological environment protection “Fourteenth Five-Year Plan” [R]. Langfang: Langfang Municipal Bureau of Ecology and Environment, 2020. (in Chinese))
- [37] 闫晨丹. 引运济廊水系连通研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (YAN C D. Study on the interconnected river system network in the water diversion project from the North Canal to Langfang City [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese))
- [38] 韩宇平, 王富强, 赵若, 等. 北运河河流生态需水分段法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 25-29. (HAN Y P, WANG F Q, ZHAO R, et al. Sectioning method of ecological water requirement for North Canal [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2014, 35(2): 25-29. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2014. 02. 006.
- [39] 赵进勇, 董哲仁, 杨晓敏, 等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(5): 1-6. (ZHAO J Y, DONG Z R, YANG X M, et al. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(5): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 2017. 05. 001.
- [40] 李景保, 于丹丹, 张瑞, 等. 近 61 年来长江荆南三口水系连通性演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1214-1224. (LI J B, YU D D, ZHANG R, et al. Evolution characteristics of river network of the three estuaries of southern Jing River in the past 61 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1214-1224. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201905021.
- [41] 窦明, 于璐, 靳梦, 等. 淮河流域水系盒维数与连通度相关性研究[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 670-678. (DOU M, YU L, JIN M, et al. Study on relationship between box dimension and connectivity of river system in Huaihe River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 670-678. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20181150.

Water quantity regulation of regional water network based on optimal selection of key gate dam

LIANG Xiao¹, JU Wenhui², SUN Bowen¹, HU Ze¹, GAO Xueping¹, ZHANG Jing³, ZHAO Jinyong³

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100089, China)

Abstract: Uneven distribution of water quantity in regional water network results in cut-off and difficulty in satisfying ecological water demand. Therefore, it is necessary to scientifically formulate a scheme to regulate regional water network. Regula-

ting water quantity by operating gate dams is a critical way, but the selection of different numbers and scales of gate dams will have different effects on the efficiency and effect of regulation results. How to select the key dams ? that may have a greater influence on the regional water network under different objective conditions and realize the efficient regulation of the water quantity.

A gate dam evaluation index system is established which includes 10 indices from the aspect of water quantity, water quality, water ecology, and gate dam management. Taking the regional water network of Fenghe-Yongding River in Langfang as the research object, the AHP-entropy weight method is used to determine the index weight. To select the key gate dams under multi-objective water quantity regulation, the influence ability of each gate dam on the regional water network quantity regulation is evaluated. Considering the gate dams need to adjust the opening to achieve the water regulation target, a hydrodynamic mathematical model is built, and the opening of each key gate dam is set at five grades of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%, and combined into 25 groups of simulation working conditions. Based on the simulation calculation of each working condition, the opening degree of each key dam and the range of water level is determined under the objective of satisfying the regional ecological water demand and flood control safety, and the judgment of the priority of the dam operation by the gate dam evaluation index system is verified.

The composite key index of Yongfeng and Dongzhangwu are the highest, and they are the key gate dams in the regional multi-objective water quantity regulation. The differences between the single key and the composite key index are obvious for some gate dams. In practical application, the operating dam can be selected according to the regulation target. The composite key index can play a good reference role in water quantity regulation under the condition of multi-objective. For operating requirements, the gate and dam whose objective corresponds to a higher key index can be selected more accurately, and the composite key index can be considered at the same time. The opening of two key gate dams is set and combined into 25 working conditions to calculate the hydrodynamic model. Only four of the 25 working conditions meet the requirements of regional water network ecological water demand and flood control safety, and the index of hydraulic connectivity capacity under these four working conditions is relatively high, which is between 0.837 and 0.839.

In conclusion, Yongfeng and Dongzhangwu gate dams are the keys in the target area, and their critical water quantity and composite indices are the highest in the gate dam evaluation index system. When the opening degree of Yongfeng gate dam is 50% to 75%, the opening degree of Dongzhangwu gate dam is 75% to 100%, and the corresponding water level range is 11.30 to 11.95 m and 10.55 to 11.65 m, respectively. It can ensure that each river reach and wetland in the target area and may meet the demand of ecological water level and give consideration to flood control safety. The evaluation index system has a directivity effect on operating gate dams under multi-objective regulation of water. It can reflect the influence degree of gate dams in a single aspect or comprehensive aspect. This method is used to determine the scheduling priority of gate dams. It is of significance reference to reasonably reduce the number of gate dams and improve the efficiency of water regulation.

Key words: regional water network; water quantity regulation; dispatching of gate dam; hydrodynamic model; key gate dam