

南水北调中线渠道综合糙率变化及其应对策略

吴永妍^{1,2}, 钮新强^{1,2}, 孙卫军³, 王磊^{1,2}

(1. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038)

摘要:为辨析南水北调中线工程渠道过流能力变化,基于 2019—2023 年总干渠水位、流量等观测资料,构建了渠道综合糙率率定模型,分析了渠道综合糙率的总体规律及其对总干渠过流能力的影响。结果表明:总干渠沿线各段渠道的综合糙率存在差异,总体呈现上游大于下游的规律,上游段和下游段渠道综合糙率均值分别为 0.0168 和 0.0157;渠道综合糙率可能随运行时间增加而逐渐增大,采取适当的工程维护或改造措施可降低渠道综合糙率;当总干渠输水流量为设计流量时,渠道综合糙率变化导致中线工程漳河倒虹吸上游约 456 km 范围渠道超设计水位。为保障工程输水安全,提出了系统开展总干渠过流能力制约机理及挖潜措施研究、适时开展总干渠全线加大流量输水试验、建立渠道综合糙率实时预测系统等应对策略。

关键词:综合糙率;过流能力;输水安全;南水北调中线工程

中图分类号:TV91 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)01-0049-07

Composite roughness coefficient changes in canal of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project and coping strategies//WU Yongyan^{1,2}, NIU Xinqiang^{1,2}, SUN Weijun³, WANG Lei^{1,2} (1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430010, China; 3. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100038, China)

Abstract: To research the flow capacity changes of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project, a composite roughness coefficient calibration model was established to analyze the overall pattern of the composite roughness coefficient and its impact on the flow capacity based on the observation data of water level and discharge in the main canal from 2019 to 2023. The results show that there are differences in the composite roughness coefficient of each section along the main canal, and the composite roughness coefficient is higher in the upper reach than that in the lower reach, with the mean values of 0.0168 and 0.0157, respectively. The composite roughness coefficient of the canal may gradually increase with the running time, and the value could be reduced by appropriate engineering maintenance or reconstruction measures. The increase of the composite roughness coefficient of the canal causes a change in its flow capacity. The water level upstream Zhanghe inverted siphon section, with a range about 456 km in the middle route exceeds the design value when transporting the designed flow in the main canal. To ensure the safety running of the project, some countermeasures are proposed, including systematically exploring the influence mechanism and potential tapping measures of the flow capacity of the main canal, timely carrying out the water delivery test with enlarged discharge through the main canal, and establishing a real-time prediction system of the composite roughness coefficient in canals.

Key words: composite roughness coefficient; flow capacity; water transport safety; the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

南水北调中线工程是实现我国水资源优化配置的重大战略性基础设施,是国家骨干水网的重要组成部分。中线一期工程自 2014 年 12 月全面通水以来已平稳运行 10 a,累计供水量超 660 亿 m³,在保障沿线城市高质量发展方面发挥了关键作用^[1-2]。目前引江补汉工程已开工建设,工程建成后,中线多

年平均北调水量将由 95 亿 m³ 增加至 115.1 亿 m³,要求中线总干渠部分断面超过设计流量输水的时长从 10%~20% 增加至 50%~60%^[3]。2020 年以来,中线工程多次经历了渠首超设计流量输水过程,出现了局部渠道水位异常偏高,个别输水建筑物附近水位波动较大等现象^[4-5],表明总干渠部分渠段存在

一定的阻水风险,可能对总干渠按 115.1 亿 m³ 调水规模输水造成一定制约。已有研究认为,总干渠输水建筑物实际水头损失总体低于设计分配值^[6]。因此,充分认识和辨析中线总干渠渠道综合糙率变化规律和影响因素,是中线总干渠输水能力提升亟须解决的关键问题。

南水北调中线工程规划设计阶段,学者在大量收集与分析国内外输水渠道糙率取值规范、混凝土输水渠道实测糙率的基础上,结合理论分析得出中线一期工程糙率应为 0.014 9~0.015 4^[7]。考虑到弯道、桥墩阻水等因素的综合影响,工程最终采用的渠道综合糙率设计值为 0.0150。渠道综合糙率体现了多种因素对水流运动的阻力作用,与衬砌壁面粗糙程度、渠道断面变化情况、渠道淤积及藻贝类附着、水流流动条件、渠道使用年限及运行维护条件等多种因素有关^[8-9],具有一定的不确定性^[10],难以采用理论推导和表征。近年来,南水北调东线、胶东调水工程、北疆输水工程等已建明渠调水工程观测研究表明,随着工程运行年限增加,渠道实际综合糙率范围为 0.013~0.019^[11-14]。针对南水北调中线工程,已有研究多集中于典型渠段的渠道综合糙率测算和输水建筑物的水头损失研究^[15-18],尚缺乏在总干渠渠道长期运行条件下对综合糙率时空分布规律的研究,不能满足工程输水能力提升的实际需求。

本文基于南水北调中线 2019—2023 年的观测水位、流量资料,计算总干渠渠首—北拒马河 60 个渠段的渠道综合糙率,分析渠道综合糙率的时空分布及影响因素,研究渠道综合糙率变化对总干渠过流能力的影响,提出应对策略,以期为中线工程输水能力提升和综合效益长久发挥提供参考。

1 研究方法

1.1 输水渠道综合糙率率定

渠道综合糙率通常基于工程实际运行过程中的水位、流量观测数据,采用能量方程推算得到(式(1))。从上游输水建筑物出口渐变段终点至下游输水建筑物进口渐变段起点,选择沿线未布置占用水头建筑物的渠道进行综合糙率率定,取多组计算结果的平均值作为综合糙率率定值。

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{a_1 u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{a_2 u_2^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

其中

$$h_w = h_f + h_i \quad h_f = JS$$

$$J = \frac{1}{2} \left(\frac{u_1^2}{C_1^2 R_1} + \frac{u_2^2}{C_2^2 R_2} \right)$$

$$C_1 = R_1^{1/6} / n \quad C_2 = R_2^{1/6} / n$$

式中: Z_1 、 Z_2 分别为上游和下游计算断面水位; p_1 、 p_2

分别为上游和下游计算断面压强; u_1 、 u_2 分别为上游和下游计算断面平均流速, a_1 、 a_2 分别为上游和下游计算断面动能修正系数,一般情况下取 1.0; h_w 为水头损失; h_f 、 h_i 分别为沿程水头损失和局部水头损失; J 为上下游断面之间的平均水力坡度; S 为上游断面和下游断面间顺水流方向长度; R_1 、 R_2 分别为上游和下游计算断面的水力半径; C_1 、 C_2 分别为上游和下游计算断面的谢才系数; g 为重力加速; γ 为水的容重; n 为渠道糙率。

1.2 调水工程过流能力计算

南水北调中线工程采用了设计流量与加大流量两个流量标准。设计流量为相应渠段长系列流量过程中保证率为 80%~90% 的流量,加大流量为长系列中出现的最大流量。总干渠接近设计流量运行时,流速水头差在输水建筑物水头损失中占比极小,可忽略不计。输水建筑物水头损失测定值可采用建筑物在设计流量附近运行时的进、出口水位实测值之差^[6]。根据总干渠渠道综合糙率率定值和输水建筑物水头损失测定值,从下游向上游逐段推算调水工程通过设计流量时的水面线,分析各渠段上游端断面水位与设计值的差异,得到调水工程过流能力变化。

1.3 水情监测数据来源及选取

南水北调中线总干渠陶岔—北拒马河沿线 61 个节制闸将总干渠划分为 60 个渠段。节制闸处布置了水位计、流量计、开度仪,输水建筑物进、出口布置了水尺,可定时采集水情数据。

水位流量监测数据质量是保证过流能力计算结果可靠性的关键。受到水流条件变化、风浪等外界扰动以及仪器设备观测误差的影响,监测数据在时间和空间维度上不可避免地存在一些异常^[19-21]。此外,采用非恒定流过程的水位、流量实测值计算获得的时均糙率值,比真实糙率值偏大^[22-23]。因此,首先通过对总干渠水情监测数据开展一致性、合理性分析,剔除病态数据,然后选取渠段接近设计流量、处于平稳输水状态下的监测数据。

本文选定平稳输水状态的判断标准为:①渠段节制闸闸门开度保持不变;②渠段节制闸过闸流量基本保持不变,流量数据集的离散系数不超过 0.01;③渠段上游节制闸闸后水位、下游节制闸闸前水位基本保持不变,水位变化幅度不超过 0.03 m;④渠段内分水流量基本维持不变,且尽量未启用退水闸;⑤尽可能选取相邻几个渠段同时稳定的数据,以避免临近渠段闸门调控产生的影响。

2 结果与分析

2.1 渠道综合糙率空间变化规律

总干渠陶岔—北拒马河 60 个渠段的渠道综合

糙率存在一定差异,如图 1 所示。全线渠道综合糙率均值为 0.016 2,均方差为 0.001 4。渠道综合糙率与流量规模有一定关系,总体呈现上游大于下游的规律,上游 30 个渠段的渠道综合糙率均值为 0.016 8,下游 30 个渠段的均值为 0.015 7。渠道综合糙率与渠段内输水建筑物数量、交叉建筑物的阻水率无显著相关关系。

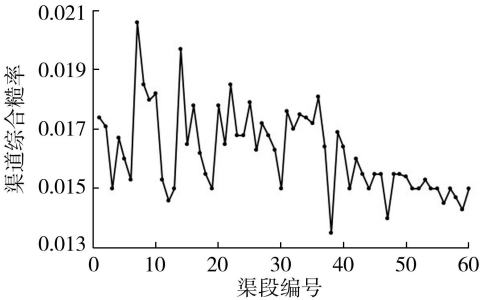


图 1 总干渠各渠段综合糙率空间分布

Fig.1 Spatial distribution of composite roughness coefficient of each section of main canal

总干渠接近甚至超过设计流量输水时,水流处于紊流粗糙区,糙率是水力半径和当量粗糙度的函数:

$$n = \frac{R^{1/6}}{19.55 + 18\lg(R/k_s)} \quad (2)$$

式中: k_s 为当量粗糙度,沿线各渠段当量粗糙度的均值为 0.002 6,均方差为 0.001 84,当量粗糙度沿程的变化幅度可基本忽略不计; R 为水力半径。

渠道综合糙率的空间分布与水力半径有一定关系。总干渠渠道输水流量和水深自上游向下游逐渐减小,水力半径也逐渐减小,渠道糙率相应减小。相同当量粗糙度下,渠首与渠末断面因水力半径差异导致糙率值相差约 0.000 7。

2.2 渠道综合糙率时间变化规律

针对过流能力降低的渠段,选取典型渠段分析渠道综合糙率随时间的变化规律。总体来看,沿线综合糙率偏大的渠道分布在上游 42 个渠段,设计流量为 350~220 m³/s;输水建筑物过流能力降低主要

出现在渡槽、倒虹吸和暗涵^[4-6]。因此,选取十二里河—白河、东赵河—黄金河、澧河—澎河、颍河—小洪河、汤河—安阳河、七里河—白马河共 6 个典型渠段,分析不同设计流量、渠段长度、输水建筑物类型、桥墩柱数量的影响。典型渠段位置如图 2 所示,基本设计参数见表 1。



图 2 典型渠段位置示意图

Fig.2 Location of typical canal sections

典型渠段各年度渠道综合糙率计算结果见图 3。从图 3 可以看出,渠道综合糙率随时间变化,不同渠道综合糙率随时间变化规律有一定差异:①部分渠段的渠道综合糙率随时间增加而逐渐增大,如东赵河—黄金河、七里河—白马河渠段,后者的渠道综合糙率增幅呈逐年变缓的趋势;②个别渠段的渠道综合糙率随时间增加而逐渐减小,如颍河—小洪河渠段,可能是采取了工程维护措施所致;③部分渠段存在渠道综合糙率在个别年份偏高或偏低的情况,如十二里河—白河、澧河—澎河渠段的渠道综合糙率分别在 2022 年、2020 年显著高于其他年份,汤河—安阳河渠段的渠道综合糙率在 2019 年显著低于其他年份。

表 1 典型渠段基本设计参数

Table 1 Basic design parameters of typical canal sections

编号	名称	长度/km	设计流量/(m³/s)	加大流量/(m³/s)	输水建筑物	桥墩柱数量	渐变段数量
6	十二里河—白河	19.41	340~330	410~400	1 座渡槽、3 座倒虹吸	3	3
8	东赵河—黄金河	22.78	330	400	3 座倒虹吸	2	4
11	澧河—澎河	22.61	320	380	1 座渡槽、1 座倒虹吸	0	1
17	颍河—小洪河	20.94	305	365	2 座倒虹吸	2	4
35	汤河—安阳河	28.78	245~235	280~265	1 座渡槽、3 座倒虹吸、1 座暗涵	6	6
42	七里河—白马河	15.18	230~220	250~240	1 座倒虹吸	7	4

注:数据来源于工程设计竣工验收资料。桥墩柱数量指阻水率大于 5% 的桥墩柱数量;渐变段数量指渠道断面发生变化的数量,不含输水建筑物进出口渐变段。

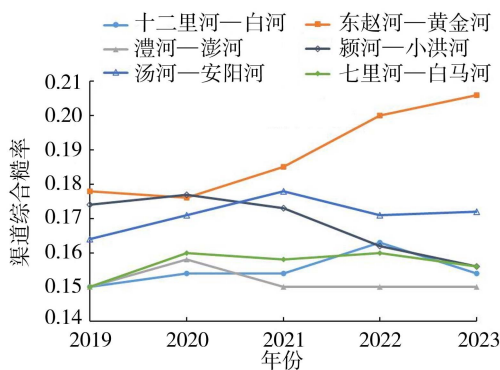


图3 典型渠段渠道综合糙率随时间的变化

Fig. 3 Variation of composite roughness coefficient of typical canal sections over time

2.3 渠道综合糙率影响因素分析

渠道综合糙率变化机理复杂,可能受工程实际断面和设计断面尺寸差异、桥墩柱阻水、渠道淤积及藻贝类附着、渠道衬砌板平整度等多种因素复合影响。

2.3.1 断面尺寸差异影响

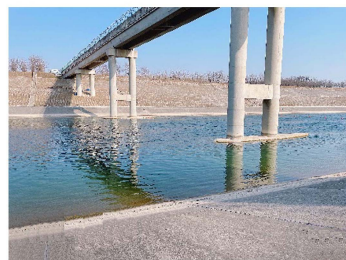
全线渠道综合糙率率定值最大的为白河—东赵河渠段,2019—2023年各年度的率定值分别为0.0200、0.0206、0.0207、0.0206、0.0208,平均值为0.0205。根据形体测量结果,一级马道以下渠道实际断面面积与设计尺寸偏差以及输水建筑物实际断面面积与设计尺寸偏差均不超过1%,表明断面尺寸差异对过流能力影响总体可忽略不计。

2.3.2 桥墩柱阻水影响

总干渠陶岔—北拒马河全线1400余座跨渠建筑物,其中有223座桥墩柱阻水率(桥墩柱阻水面积与渠道过水面积之比)超过5%。工程设计阶段,多家研究机构采用均匀流公式复核了桥墩柱阻水对总干渠过流能力的影响,认为桥墩柱阻水宽度越大,渠道综合糙率越大。考虑到墩柱的阻水影响,工程最终采用的综合糙率设计值为0.015^[24]。中线工程跨渠桥墩基本采用顺水流方向多柱布置,桥墩柱的壅水作用与上游来流条件、输水断面形状、桥墩柱布置形式等有关。复杂条件下,桥墩水力学经验公式计算结果与实际情况有较大差异^[25]。实际输水过程中,对于多柱排架式桥墩,前排墩后的尾流将造成后排墩迎水面的水流结构紊乱,可以用圆柱绕流理论分析。圆柱绕流产生边界层分离后,在墩柱后形成不稳定的尾涡区,尾涡会导致水流呈周期性摆动,增加了水头损失^[26-27],这种现象实质是卡门涡街^[28],涡街脱落变化与圆柱布置形式有关。一方面,水流流动特征在很大程度上取决于圆柱间距的大小,当间距比(两圆柱中心间的距离与圆柱直径之比)超过某一临界值时,下游圆柱阻力系数等流

体力学量将产生突变^[29];另一方面,多柱体之间还存在相互影响^[30]。在桥墩柱的墩数、排数、间距等布置方式一定的情况下,卡门涡街的产生与雷诺数 Re 有关。当 $3 \times 10^2 \leq Re \leq 3 \times 10^5$ 时,会出现有规则的涡街;当 $3 \times 10^5 < Re \leq 3 \times 10^6$ 时,涡街基本消失;当 $Re > 3 \times 10^6$ 时,卡门涡街又会出现。设计流量为均匀流条件下,河北段沙河北倒虹吸(渠段编号50)上游水流雷诺数均超过 3×10^6 ,下游基本不超过 3×10^6 。这与总干渠下游10个渠段渠道综合糙率率定值不超过0.015的结果总体吻合。

选取双泊河—梅河渠段(渠段编号19)说明桥墩柱的阻水影响。该渠段长度为13.23 km,渠道设计流量为 $305 \text{ m}^3/\text{s}$,边坡系数为1:2~1:3.5,底宽为15.0~23.5 m,纵坡为1/24000~1/26000。渠段内阻水的桥墩柱共17座。2020年6月11日至9月28日,工程管理单位以本段为试验段,选取了5座代表性桥梁进行加装导流罩改造,如图4所示。实施改造的5座公路桥柱直径为1.5~1.8 m,单排阻水桥柱包括1柱、2柱、4柱、10柱共4种。对比桥墩柱形态改造前后渠道综合糙率可以得出,桥墩柱形态改造后,渠道综合糙率均值从0.0176降低至0.0150(表2),密集分布的桥墩柱在一定输水流量条件下,产生卡门涡街现象会增加渠段渠道综合糙率。



(a) 2柱阻水桥柱



(b) 10柱阻水桥柱

图4 双泊河—梅河渠段桥墩柱改造情况

Fig. 4 Reconstruction of bridge piers in canal section from the Shuangjihe River to Meihe River

2.3.3 渠道淤积和藻贝类附着影响

根据总干渠泥沙淤积排查结果,沿线渠道淤积厚度为2.09~3.59 mm,极少量泥沙淤积主要分布在输水建筑物和分退水口附近。淤积对总干渠过流能

表 2 桥墩柱形态改造前后渠道综合糙率变化

Table 2 Composite roughness coefficient of canal before and after shape reconstruction of bridge piers

工程条件	上游端 流量/(m ³ /s)	下游端 水位/m	综合 糙率	综合糙 率均值
改造前	259.53	122.42	0.0168	0.0176
	252.22	122.64	0.0184	
改造后	280.26	122.74	0.0168	0.0150
	254.91	122.70	0.0150	
	288.90	122.97	0.0148	
	181.90	122.73	0.0150	

力基本不造成影响。

中线总干渠藻贝类主要附着于渡槽、倒虹吸等输水建筑物表面^[31],明渠段分布相对稀疏。淡水壳菜附着对典型渠道影响远小于渡槽输水建筑物^[32],藻贝类附着不是渠道过流能力下降的主要因素。

2.3.4 渠道衬砌板平整度影响

中线工程总干渠渠道衬砌维护情况总体良好,但随着工程运行时间增加以及地下水位变化、冬季冻胀破坏等原因,渠道衬砌板不可避免地出现了一些局部破坏情况,如裂缝、隆起等,降低了渠道过水表面的平整度,增加了渠道综合糙率。根据资料收集和现场调研,衬砌板隆起高度范围基本为 1~10 cm,局部隆起超过 20 cm。假设衬砌板隆起数量占比 5%,根据均匀流公式估算,当衬砌板平均隆起高度为 3、10、20 cm 时,将分别导致渠道过流能力减少 2.43%、7.64%、13.82%。以淇河—汤河渠段为例(渠段编号 34),该渠段 2021 年 10 月至 2022 年 1 月内陆续完成衬砌修复 30 余处(衬砌板修复过程中未对渠道表面藻贝类进行清理)。渠道衬砌板修复后,综合糙率有所降低,见表 3。

2.4 糙率率定结果偏差分析

渠道综合糙率根据水位、流量观测数据推算得到,不可避免受到测量误差的影响。理论上,糙率率定误差与流量测量误差基本相同^[33-34]。中线工程全线约 90%流量计测量误差在±5%以内,但其对渠道水力学计算的影响仍不可忽视。以十二里河—白河渠段为例,选取 2021 年 6 月 4 日 20:00 至 6 日 4:00 观测数据为基准情景,渠道综合糙率率定值为 0.0150。考虑水位数据±0.05 m 或流量数据±5%的测量误差影响,渠道综合糙率率定值范围为

工程条件	时间	上游端流量/(m ³ /s)	下游端水位/m	综合糙率	糙率均值
修复前	2020-08-10T04:00—2020-08-11T06:00	231.88	95.79	0.0184	0.0181
	2020-06-16T12:00—2020-06-17T08:00	266.53	94.99	0.0180	
	2021-09-23T20:00—2021-09-24T16:00	259.27	94.94	0.0178	
修复后	2022-04-23T12:00—2022-04-25T08:00	222.23	94.68	0.0166	0.0165
	2022-05-13T18:00—2022-05-15T04:00	219.12	94.50	0.0164	

0.0150~0.0185。

2.5 糙率变化对过流能力影响分析

总干渠末端北拒马河暗渠处水位取设计水位 60.30 m,根据渠道综合糙率率定结果,计算总干渠全线设计流量下的水面线。结果表明,漳河—北拒马河渠段(渠段编号 37~60)渠道水位基本不超过设计水位;穿黄—漳河渠段(渠段编号 26~36),在漳河倒虹吸上游约 149 km 范围内的渠道水位超过设计水位 0.09~0.30 m;渠首—穿黄渠段(渠段编号 1~25)约有 307 km 渠道水位超过设计水位,最高超出值可达 0.59 m。全线超设计水位的渠段范围累计 456 km,基本出现在漳河倒虹吸上游,全线水位不超过加大水位。

3 渠道过流能力变化的应对策略

总干渠过流能力是保障中线工程向受水区用户供水的基础。受渠道综合糙率变化影响,总干渠局部范围内过流能力将比设计能力有所降低。提出以下渠道过流能力变化的应对策略:

a. 系统开展总干渠过流能力制约部位及其影响机制研究。南水北调中线一期总干渠从丹江口水库调水,经长约 1432 km 渠线向河南、河北、北京、天津供水,沿线布置渠道、管道、渡槽、倒虹吸、涵洞、隧洞、泵站、节制闸、分水闸、退水闸、保水堰等各类建筑物 2387 座,是一个巨大的系统工程。任何建筑物过流条件变化都可能对工程整体过流能力产生连锁影响。因此,要采用系统论的思想,研究总干渠过流能力的各项影响因素及其影响程度和累积效应,揭示总干渠调水的关键制约渠段,确保实现中线工程长效、安全、平稳运行。建议适时开展总干渠全线加大流量输水试验,为总干渠输水能力关键制约渠段确定提供支撑。

b. 系统开展总干渠过流能力挖潜措施研究,提出总干渠过流能力挖潜的工程改造措施和调度管理措施。为实现总干渠年均调水量 115.1 亿 m³ 目标,在维持总干渠断面不变的情况下,对制约段渠道采取衬砌板修复、桥墩改造等降糙措施,使综合糙率恢复至设计值 0.015;对局部渠段采取渠道加高措施,如将填方渠堤加高培厚,在挖方渠道处增设挡墙等,

确保安全超高满足设计要求;研究局部增加输水断面的技术和经济可行性,并分析工程实施对总干渠安全输水的影响。建议统筹总干渠停水检修时长、检修施工条件、退水条件、备用水源安排等,择机实施总干渠分段停水检修,为渠道过流能力提升改造创造条件。

c. 结合工程智慧化建设,逐步升级总干渠水位、流量监测体系,建立渠道综合糙率实时预测系统,对过流能力异常情况实时预警。输水建筑物的综合性能可能会随着时间的推移而降低^[35],应从长远运行的角度考虑渠道综合糙率的主要影响因子、工程处理措施的预期效果、工程养护方案的经济性等,提出渠道综合糙率的取值,为总干渠过流能力挖潜提供合理的目标。建议引入新技术、新工艺、新设备,开展渠道运维修复,形成适用于中线工程的新质生产力。

4 结 论

a. 总干渠各渠段渠道综合糙率存在一定差异,总体呈现上游大于下游的规律。上游段和下游段渠道综合糙率均值分别为 0.0168、0.0157。

b. 2019—2023 年总干渠渠道综合糙率动态变化,且不同渠段的变化规律存在差异。部分渠段表现出渠道综合糙率随运行时间增加而逐渐增大的趋势;个别渠段的渠道综合糙率降低,可能是采取了一定的工程维护措施所致。

c. 影响渠道综合糙率变化的主要因素有桥墩柱阻水和衬砌板平整度。桥墩柱阻水影响源于卡门涡街的产生,其影响与边界层分离过程有关,涡旋强度及阻力大小受墩柱布置形式、水流条件、渠道断面形状等因素影响。

d. 受渠道综合糙率变化影响,总干渠流量为设计流量时,漳河倒虹吸上游约 456 km 范围渠道超设计水位,但不超过加大水位运行,可能影响工程供水安全。因此,建议适时开展总干渠全线加大流量输水试验,建立渠道综合糙率实时预测系统,系统开展总干渠过流能力制约机理及挖潜措施研究,择机实施总干渠分段停水检修。

参考文献:

[1] 黄进,王伟,田野,等. 南水北调中线工程水源区环境规划对经济高质量发展的影响[J]. 水资源保护,2024,40(4): 148-156. (HUANG Jin, WANG Wei, TIAN Ye, et al. Impact of environmental regulations on high-quality economic development in water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water

Resources Protection, 2024, 40 (4): 148-156. (in Chinese))

[2] 卢丽荣,刘卫东,姚丽华,等. 南水北调中线工程跨区域转让水价成本核算体系研究[J]. 水利经济,2023,41(4):45-52. (LU Lirong, LIU Weidong, YAO Lihua, et al. Study on cost accounting system of trans regional water transfer [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023,41(4):45-52. (in Chinese))

[3] 吴永妍,陈晓楠,陈根发,等. 新形势下南水北调中线工程智慧调度的研究框架思考[J]. 中国水利,2024(4): 67-72. (WU Yongyan, CHEN Xiaonan, CHEN Genfa, et al. Thinking of intelligent regulation of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project under new situation [J]. China Water Resources, 2024 (4): 67-72. (in Chinese))

[4] 蒋莉,孟向阳,陈晓楠,等. 输水流量对渡槽水位波动的影响规律[J]. 水电能源科学,2022,40(10): 148-151. (JIANG Li, MENG Xiangyang, CHEN Xiaonan, et al. Influence mechanism of water flow on water level fluctuation in aqueduct [J]. Water Resources and Power, 2022,40(10):148-151. (in Chinese))

[5] 卢明龙,陈晓楠,刘高雄,等. 槽身长度对南水北调中线工程典型渡槽水位波动现象的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2023(9): 110-114. (LU Minglong, CHEN Xiaonan, LIU Gaoxiong, et al. Research on the influence of trench length on the water level fluctuation of typical aqueducts in the Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(9):110-114. (in Chinese))

[6] 卢明龙,崔巍,陈文学,等. 大型明渠调水工程输水建筑物水头损失测算[J]. 水电能源科学,2023,41(10): 108-110. (LU Minglong, CUI Wei, CHEN Wenxue, et al. Calculation of head loss of large open channel water diversion project [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(10):108-110. (in Chinese))

[7] 王光谦,黄跃飞,魏加华,等. 南水北调中线工程总干渠糙率综合论证[J]. 南水北调与水利科技,2006,4(1): 8-14. (WANG Guangqian, HUANG Yuefei, WEI Jiahua, et al. Identification of roughness-coefficient value for the channel of the South-to-North Water Transfer (Middle Line) Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4 (1): 8-14. (in Chinese))

[8] 卫小丽,章少辉,白美健. 灌区明渠糙率及其计算方法[J]. 节水灌溉,2021(12): 14-20. (WEI Xiaoli, ZHANG Shaohui, BAI Meijian. Open channel roughness of irrigation district and its calculation methods [J]. Water Saving Irrigation, 2021(12):14-20. (in Chinese))

[9] 陈文学,崔巍,何胜男,等. 输水系统糙率率定方法研究[J]. 水利水电技术,2019,50(8): 116-121. (CHEN Wenxue, CUI Wei, HE Shennan, et al. Study on method of

- roughness calibration for water conveyance system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (8): 116-121. (in Chinese))
- [10] 王开,魏加华,王光谦.大型渠道糙率系数设计取值的不确定性影响分析[J].应用基础与工程科学学报, 2008, 16(6): 870-878. (WANG Kai, WEI Jiahua, WANG Guangqian. Uncertainty in design value of roughness coefficient for large scale channel and effects analysis[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(6): 870-878. (in Chinese))
- [11] 田汉功,王子春,刘霞.南水北调胶东干线局部渠段输水能力分析[J].山东水利, 2020 (10): 1-2. (TIAN Hangong, WANG Zichun, LIU Xia. Analysis of water transfer capacity of local sections of Jiaodong line of South-to-North Water Diversion Project [J]. Shandong Water Resources, 2020(10): 1-2. (in Chinese))
- [12] 王颖.则克台(北岸干渠)糙率原型观测与分析探讨[J].陕西水利, 2021 (8): 112-113. (WANG Ying. Prototype observation and analysis of roughness of the north side of Zeketai main canal [J]. Shanxi Water Resources, 2021(8): 112-113. (in Chinese))
- [13] 张雨山,王双银,臧聪敏,等.基于原型观测的输水渠道糙率取值及变化分析[J].水利水电科技进展, 2021, 41 (1): 24-29. (ZHANG Yushan, WANG Shuangyin, ZANG Congmin, et al. Variation analysis of roughness coefficient value for water conveyance channels based on prototype observation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 24-29. (in Chinese))
- [14] 章再兴.北疆供水工程渠道糙率分析[J].水利规划与设计, 2015 (12): 42-45. (ZHANG Zaixing. Analysis of canal roughness of the Water Supply Project in North Xinjiang [J]. Water Resources Planning and Design, 2015 (12): 42-45. (in Chinese))
- [15] 郑和震,马雄威,雷晓辉,等.南水北调中线工程渠道糙率计算方法研究[J].南水北调与水利科技, 2018, 16 (1): 158-163. (ZHENG Hezhen, MA Xiongwei, LEI Xiaohui, et al. Research on computing method for channel roughness of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 158-163. (in Chinese))
- [16] 屈志刚,李政鹏.输水渡槽水位异常波动原因分析与改善措施研究:以南水北调中线工程澧河渡槽为例[J].人民长江, 2022, 53 (4): 189-194. (QU Zhigang, LI Zhengpeng. Causal analysis on water level abnormal fluctuation in aqueduct and improvement measures: case of Lihe aqueduct in Middle Route of South to North Water Transfer Project [J]. Yangtze River, 2022, 53 (4): 189-194. (in Chinese))
- [17] 陈晓楠,白一墨,胡羽蝶,等.南水北调中线工程输水建筑物整流累积效应研究[J].水利水电科技进展, 2024, 44(2): 61-65. (CHEN Xiaonan, BAI Yimo, HU Yudie, et al. Study on cumulative effects of rectification on water conveyance structures in Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 61-65. (in Chinese))
- [18] 李立群,陈晓楠,陈文学.南水北调中线典型输水建筑物表面降糙防护探析[J].中国农村水利水电, 2022 (10): 143-147. (LI Liqun, CHEN Xiaonan, CHEN Wenxue. A probe into the surface roughness reduction and protection of typical water conveyance structures in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(10): 143-147. (in Chinese))
- [19] 陈晓楠,顾起豪,张召,等.南水北调中线总干渠水情数据智能清洗[J].南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22 (3): 436-444. (CHEN Xiaonan, GU Qihao, ZHANG Zhao, et al. Intelligent cleaning of hydrological data in the main canal of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 436-444. (in Chinese))
- [20] 冯志勇,李立群,吴永妍,等.南水北调中线一期工程总干渠输水损失变化规律[J].南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20 (3): 600-609. (FENG Zhiyong, LI Liqun, WU Yongyan, et al. Variation of water loss in the main canal of middle route of South-to-North Water Transfer First Stage Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 600-609. (in Chinese))
- [21] 位文涛,靳燕国,张召,等.南水北调中线工程流量监测站点倒挂数据清洗模型及应用[J].南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20 (6): 1158-1167. (WEI Wentao, JIN Yanguo, ZHANG Zhao, et al. Application of inverted data cleaning for flow monitoring stations in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1158-1167. (in Chinese))
- [22] XIA Xilin, LIANG Qihua, MING Xiaodong, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. Water Resources Research, 2017, 53 (5): 3730-3759.
- [23] 马峰,牛小静,张成,等.集合参数率定功能的一维水动力模型研究[J].水动力学研究与进展, 2024, 39(2): 227-233. (MA Feng, NIU Xiaojing, Zhang Cheng, et al. Study on one-dimensional hydrodynamic model with parameter estimation function [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2024, 39(2): 227-233. (in Chinese))

(下转第 63 页)

(5): 18-25. (TAN Yuxin, WU Duanwei. Waterlogging simulation and drainage countermeasures of Aotou Yuanpan area in Daya Bay based on MIKE URBAN[J]. Pearl River, 2023, 44(5): 18-25. (in Chinese))

[24] 卓小燕,孙翔. 基于 MIKE 模型的城市内涝风险评估与整治方案效果研究[J]. 水利规划与设计, 2023(10): 34-40. (ZHUO Xiaoyan, SUN Xiang. Risk assessment of urban waterlogging based on MIKE model and study on the effect of remediation scheme [J]. Water Resources Planning and Design, 2023(10): 34-40. (in Chinese))

[25] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))

[26] 方煜铭,马旭民,林凯荣,等. 基于 MIKE FLOOD 的深圳市大空港片区暴雨内涝模拟分析[J]. 人民珠江, 2024, 45(5): 88-95. (FANG Yuming, MA Xumin, LIN Kairong, et al. Simulation analysis of rainstorm waterlogging in Shenzhen Dakonggang area based on MIKE FLOOD[J]. Pearl River, 2024, 45(5): 88-95. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-14 编辑:施业)

+++++

(上接第 55 页)

[24] 陈文学,穆祥鹏,崔巍. 南水北调中线工程桥墩壅水特性研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(11): 121-125. (CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, CUI Wei. Study on backwater characteristics of bridge-piers of Mid-Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(11): 121-125. (in Chinese))

[25] 何国建,方红卫,府仁寿. 桥墩群对河道水流影响的三维数值分析[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(3): 345-351. (HE Guojian, FANG Hongwei, FU Renshou. Three-dimensional numerical analysis on water flow affected by piers[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(3): 345-351. (in Chinese))

[26] 武玉涛,任华堂,夏建新. 圆柱绕流研究进展及展望[J]. 水运工程, 2017(2): 19-26. (WU Yutao, REN Huatang, XIA Jianxin. Research progress and prospects on flow across cylinder[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(2): 19-26. (in Chinese))

[27] 刘明潇,王泽众,朱勇杰,等. 大型输水隧洞出口扩散段非稳流态研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 107-116. (LIU Mingxiao, WANG Zezhong, ZHU Yongjie, et al. Unsteady flow in diffusion section at the outlet of large water conveyance tunnel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 107-116. (in Chinese))

[28] 杨小亭,霍跃东,徐孝平. 南水北调中线工程桥墩水力学试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 16-19. (YANG Xiaoting, HUO Yuedong, XU Xiaoping. Hydraulic experimental study of piers for middle route scheme of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Wuhan University of Hydrodynamics & Electric Engineering, 2000, 33(6): 16-19. (in Chinese))

[29] 刘松,符松. 串列双圆柱绕流问题的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2000, 17(3): 260-266. (LIU Song, FU Song. Numerical simulation of flow past two cylinders in tandem arrangement [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2000, 17(3): 260-266. (in Chinese))

[30] 廖俊,景思睿. 高雷诺数下双圆柱绕流的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展. 2001, 16(1): 101-110. (LIAO Jun, JING Sirui. Numerical simulation of flow around two cylinders at high Reynolds number [J]. Journal of Hydrodynamics, 2001, 16(1): 101-110. (in Chinese))

[31] 王玉波,张亚红. 不同流态下淡水壳菜附着能力的影响研究:以南水北调中线沙河渡槽为例[J]. 城镇供水, 2023(增刊1): 119-124. (WANG Yubo, ZHANG Yahong. Study on influence of different flow patterns on the attachment capacity of Limnoperna fortunei: a case study on the Shahe Aqueduct in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. City and Town Water Supply, 2023(Sup1): 119-124. (in Chinese))

[32] 天津大学水利水电工程系. 淡水壳菜附着对典型渠道、输水建筑物(渡槽、倒虹吸)断面糙率的影响及措施建议报告[R]. 天津:天津大学水利水电工程系, 2022.

[33] 杨开林,汪易森. 渠道糙率率定误差分析[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 639-644. (YANG Kailin, WANG Yisen. Error analysis of roughness coefficient calibration for channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 639-644. (in Chinese))

[34] 杨开林,汪易森. 提高渠道糙率率定精度的方法[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 1-4. (YANG Kailin, WANG Yisen. Improvement of calibration precision of channel roughness [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 1-4. (in Chinese))

[35] 王媛,张志慧,任杰,等. 基于动态权重云模型的大型渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 56-63. (WANG Yuan, ZHANG Zhihui, REN Jie, et al. Comprehensive evaluation of large-scale aqueduct safety based on dynamic weight-cloud model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 56-63. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-28 编辑:施业)