

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0061

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 Z Y, LI L Q, WU Y Y, 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)

南水北调中线一期工程总干渠输水损失变化规律

冯志勇¹,李立群²,吴永妍¹,黄会勇¹,王磊¹

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司水利规划院,武汉 430010;2. 南水北调中线干线工程建设管理局,北京 100038)

摘要:为研究已建大型引调水工程运行期输水损失变化,以南水北调中线一期工程为对象,利用水量平衡原理计算得到 6 个典型渠段 2018—2021 年不同时间尺度下的输水损失变化过程,并与输水损失经验公式计算结果进行对比。结果表明:不同计算时空尺度下的渠段输水漏损流量结果差异较大,但沿程输水损失率差异较小;入渠流量规模是影响渠段输水漏损流量的主要因素,蒸发量、降雨和冰期冻融等也是造成中线总干渠输水损失时空变化的重要因素,因此仅考虑渠底渗漏损失不能有效反映中线总干渠输水损失变化过程。

关键词:南水北调中线工程;总干渠;输水损失;水量平衡;空间变化

中图分类号:TV67 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



长距离调水工程输水损失是水量计量、水量调度计划编制的关键参数^[1-3]。研究确定输水工程输水损失,对实现精准调度、确保供水安全、提高调度管理水平具有重要意义^[4-5]。

渗漏被认为是造成渠道输水损失的主要原因之一。目前计算渠道渗漏的方法主要有现场试验^[6]、经验模型^[7]和数值模拟^[8-9]等 3 类,其中经验模型所需参数较少,使用较为简便,得到了广泛的应用^[10-15],如《灌溉规划规范》(GB/T 50509—2009)^[10]推荐采用考斯加可夫公式计算渠道渗漏损失,该公式考虑了防渗措施和地下水顶托对渠道渗漏损失的影响。谢崇宝等^[12]将随机理论引入渠道渗漏计算中,建立了渠道渗漏损失随机模型,分析了某大型引黄灌区不同轮灌组对渗漏损失的影响。肖雪等^[13]以新疆伊犁喀什河下游灌区为例,评估了几种常见的渠道渗漏损失公式的计算精度。廖相成等^[14]考虑了输水过程中渠床土壤湿润程度变化,建立了渠道渗漏损失动态计算模型,验证结果显示,在实际运行过程中动态计算输水损失更为合理。已有研究从影响渠道

渗漏的不同因素出发,提供了确定渠道输水损失的经验方法,这对于调水工程规划设计阶段是适用的。然而在工程实际运行过程中,受蒸发、降雨等气候条件变化和地下水入渗等工程条件变化等多个因素影响,渠道输水损失多呈现出较为明显的时空变化过程,尤其对于长距离大型调水工程^[16-17]。

南水北调中线一期工程自 2014 年 12 月正式通水以来,北调水量不断增加,截至 2021 年 11 月累计调水超 430 亿 m³,在促进经济社会发展和生态环境保护方面发挥了重要作用。中线工程规划设计阶段提出陶岔渠首至北京团城湖的水利用系数为 0.84^[18]。实际运行监测数据表明,总干渠实际输水损失和规划设计值存在一定差异,因此有必要研究中线总干渠输水损失变化规律,为实现精准调度和后续工程高质量发展提供参考。

以南水北调中线一期工程为例,基于工程实际运行观测资料,采用水量平衡原理计算中线总干渠典型渠段不同时段输水损失,分析其变化规律,研究不同渠道渗漏经验公式的适用性,并初步分析中线

收稿日期:2021-11-13 修回日期:2022-03-02 网络出版时间:2022-03-17

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220316.1202.004.html

基金项目:长江勘测规划设计研究有限责任公司水利规划院自主研发项目(CZ2019Z04;CX2019Z01)

作者简介:冯志勇(1992—),男,重庆璧山人,工程师,博士,主要从事水利工程规划与设计。E-mail:fengzhiyong@cjsjy.com.cn

总干渠输水损失变化的主要影响因素。

1 计算方法

1.1 水量平衡法

根据水量平衡原理,计算渠段某一时段的输水损失

$$S_L = \frac{(Q_{in} - Q_{out} - Q_{fen} - Q_{tui})\Delta t + V_1 - V_2}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: S_L 为研究时段内渠段输水漏损流量, m^3/s ; Δt 为研究时段时长, s ; Q_{in} 、 Q_{out} 分别为渠段入渠流量和出渠流量, m^3/s ; Q_{fen} 和 Q_{tui} 分别为研究时段内渠段分水流量和退水流量, m^3/s ; V_1 和 V_2 分别为研究时段初始和终止时刻渠段蓄水体积, m^3 ,根据实测水位采用分段求和法计算得到。用输水漏损流量除以入渠流量,可得无量纲化参数输水损失率为

$$R_L = \frac{S_L}{Q_{in}} \quad (2)$$

1.2 经验公式法

渠道输水损失与渠底土壤性质、渠道防渗措施和渠道输水条件等因素有关^[19]。现行的经验公式主要有以下4种^[20]:

Davison-Wilson 公式:

$$S_L = 0.45C_1 \frac{P_w L}{4 \times 10^6 + 3650\sqrt{u}} \times H_w^{1/3} \quad (3)$$

式中: P_w 为湿周, m ; L 是渠道长度, m ; u 为渠道流速, m^3/s ; H_w 为渠道水深, m ; C_1 是计算参数,取值与渠道衬砌类别有关。

莫里兹公式:

$$S_L = 1.154 \times 10^{-5} C_2 L \sqrt{Q/u} \quad (4)$$

式中: Q 为渠道流量, m^3/s ; C_2 是与土壤类型有关的计算参数;其他符号含义同前。

Molesworth 公式:

$$S_L = 0.001C_3 L P_w \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (5)$$

式中: A 为渠道过水断面面积, m^2 ; B 为渠段水面宽度, m ; C_3 是与土壤特性有关的系数;其他符号含义同前。

考斯加可夫公式:

$$S_L = 1 \times 10^{-5} a L Q^{1-m} \quad (6)$$

式中: a 和 m 分别为渠床土壤透水系数和透水指数;其他符号含义同前。当考虑地下水顶托和渠道衬砌防渗影响后,式(6)表示为

$$S_L = 1 \times 10^{-5} r \beta a L Q^{1-m} \quad (7)$$

式中: r 为地下水顶托修正系数; β 为防渗折减系数。

2 研究范围及数据选取

2.1 典型渠段选择

南水北调中线工程共布置有63个节制闸,将总干渠划分为64个渠段,不同渠段的设计参数和布置型式具有一定的相似性,因此可选择典型渠段开展输水损失研究。为排除退水流量计算误差对输水损失计算的影响,首先在黄河以南和黄河以北选择无退水闸分布渠段,分别为玉带河—北汝河渠段和北易水—坟庄河渠段。此外,中线一期工程年度水量调度计划及水量调度时,以陶岔渠首、刁河渡槽进口、草墩河渡槽进口及岗头隧洞进口作为主要控制断面,因此,选择刁河—湍河、黄金河—草墩河、蒲阳河—岗头渠段作为典型渠段。结合分布位置和工程特性,选择牯牛河—沁河作为典型渠段以全面分析总干渠沿线不同区域输水损失变化。6个典型渠段的分布位置见图1,对应渠段工程参数见表1。

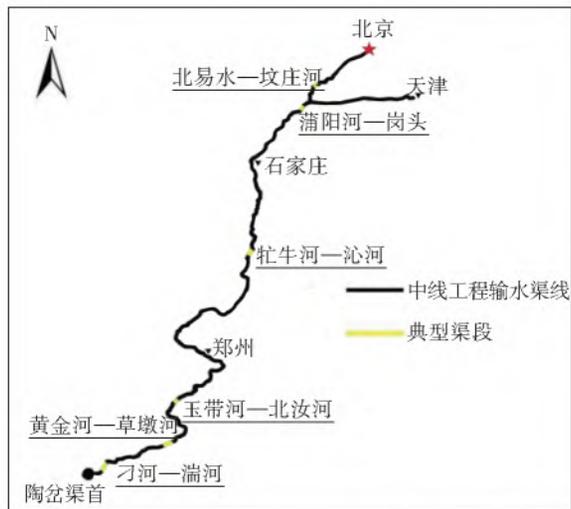


图1 南水北调中线工程典型渠段分布

Fig. 1 Distribution of typical canal sections in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

表1 南水北调中线工程典型渠段工程参数

Tab. 1 Characteristics of typical canal sections of MR-SNWTP

典型渠段	距渠首距离/km	渠段长/km	设计流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	设计水位/m
刁河—湍河	14.3	21.8	350	145.7~146.8
黄金河—草墩河	159.9	21.8	330	136.0~137.3
玉带河—北汝河	266.6	13.9	315	128.3~129.6
牯牛河—沁河	761.1	21.4	230~235	88.9~90.4
蒲阳河—岗头	1085.0	27.1	125~135	66.0~68.6
北易水—坟庄河	1157.6	14.7	60	62.0~62.8

2.2 数据选取

实测数据的真实性和可靠性是采用水量平衡法计算渠段输水损失的关键。研究收集了2018年1月—2021年4月南水北调中线总干渠典型渠段首

尾节制闸每 2 h 的过闸流量、闸前水位、闸后水位数据,以及沿线各分、退水口门流量数据,并对流量和水位监测数据进行一致性检验,剔除因断电等造成的监测值跳变。同时根据已有率定成果^[21]对中线节制闸

过闸流量进行修正,以减少测流误差对渠段输水损失计算的影响。由于中线总干渠沿线退水闸缺少长序列流量监测资料,其流量过程采用过闸流量公式计算。典型渠段 2018—2021 年运行参数见表 2。

表 2 2018—2021 年南水北调中线工程典型渠段运行参数

Tab. 2 Operating parameters of typical canal sections of MR-SNWTP from 2018 to 2021

典型渠段	平均分水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	平均退水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	入渠流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	出渠流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	闸前水位/m
刁河—湍河	1.02	0.23	97.0~388.2	96.5~372.9	145.3~146.4
黄金河—草墩河	0	0.42	96.7~357.5	95.4~350.8	135.7~136.9
玉带河—北汝河	0	0	97.1~339.5	96.6~345.3	127.9~129.0
牯牛河—沁河	4.41	0	68.7~249.5	67.4~248.8	88.5~89.3
蒲阳河—岗头	1.68	0	32.9~134.1	32.5~133.3	64.9~66.5
北易水—坟庄河	0	0	0.94~69.07	0.87~70.65	58.4~62.3

3 计算结果

3.1 输水损失时空变化规律

基于运行观测资料,计算南水北调中线工程

各典型渠段不同时段内的输水损失。计算结果表明,不同时间尺度下的渠段输水损失计算结果差异较大,渠段输水损失存在明显时空变化见图 2。

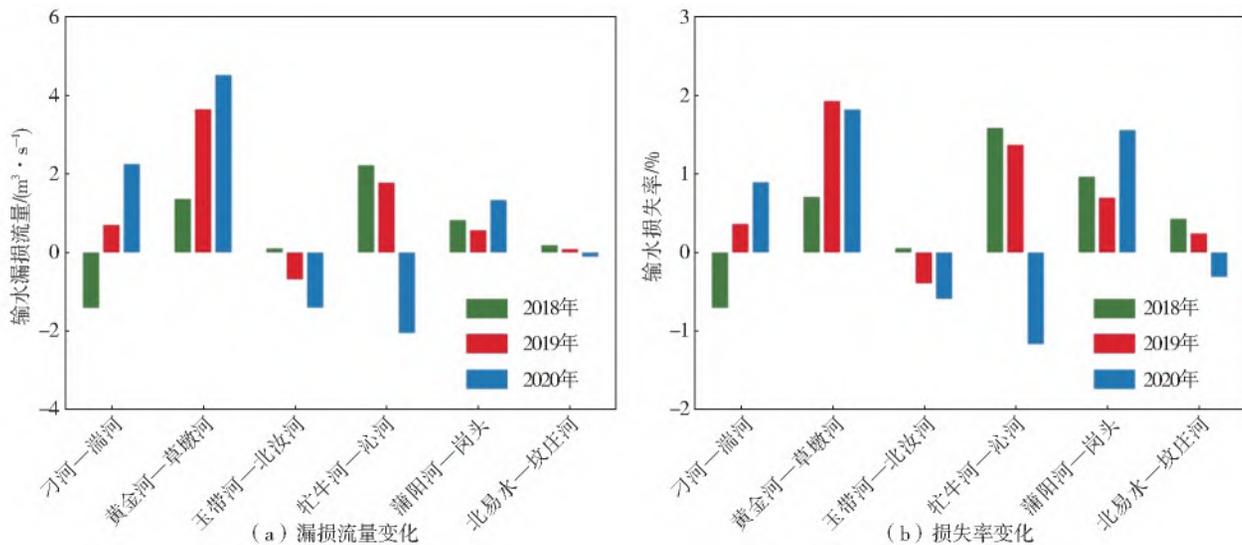


图 2 南水北调中线典型渠段年均输水损失变化

Fig. 2 Variation in annual average water loss in typical canal sections of MR-SNWTP

从年均输水损失大小来看:黄河以南黄金河—草墩河渠段 2018—2020 年年均输水损失均大于 0,平均输水漏损流量为 $3.17 \text{ m}^3/\text{s}$,对应输水损失率为 $0.71\% \sim 1.93\%$;黄河以北蒲阳河—岗头渠段 2018—2020 年年均输水损失均大于 0,由于入渠流量规模小于黄金河—草墩河渠段,平均输水漏损流量较小,为 $0.91 \text{ m}^3/\text{s}$,但输水损失率与黄金河—草墩河渠段接近,为 $0.70\% \sim 1.56\%$;刁河—湍河和牯牛河—沁河渠段 2018—2020 年年均输水损失有正有负,平均输水漏损流量接近,分别为 $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$,但由于刁河—湍河渠段入渠流量规模较大,其平均输水损失率仅为

0.18% ,小于牯牛河—沁河渠段的 0.6% ;北易水—坟庄河渠段输水损失较小,2018—2020 年年均输水漏损流量的平均值仅为 $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$,对应输水损失率为 0.12% ;玉带河—北汝河渠段 2018—2020 年年均输水损失以负为主,平均输水漏损流量为 $-0.66 \text{ m}^3/\text{s}$,对应输水损失为 -0.31% 。

从年均输水损失变化来看:2018—2020 年刁河—湍河和黄金河—草墩河渠段年均输水漏损流量表现出逐渐增加态势,分别从 2018 年的 $-1.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.36 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐渐增加至 2020 年的 $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $4.51 \text{ m}^3/\text{s}$;而玉带河—北汝河和牯牛河—沁河渠段年均输水损失则表现出逐年减小的态势,年均输水

漏损流量分别从 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小至 $-1.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $-2.05 \text{ m}^3/\text{s}$; 蒲阳河—岗头渠段 2018—2020 年年均输水漏损流量先减小后增加; 北易水—坟庄河渠段 2018—2020 年年均输水漏损流量呈逐渐减小趋势。受年际间入渠流量变化影响, 2018—2020 年黄金河—草墩河渠段输水损失率的变化过程有别于输水漏损流量, 表现为 2020 年输水损失率小于 2019 年结果, 其他渠段输水损失率年际变化趋势与输水漏损流量一致。

2018—2020 年不同典型渠段的月均输水损失变化也存在差异, 详见图 3。黄河以南渠段月均输水漏损流量变化整体大于黄河以北渠段, 但两者月

均输水损失率的变化幅度基本相当, 表明渠段输水漏损流量与入渠流量规模有关, 即入渠流量越大, 渠段输水漏损流量越大。黄河以南玉带河—北汝河渠段 2018—2020 年月均输水损失呈明显季节性变化, 7—10 月月均输水漏损流量的平均值为 $-2.27 \text{ m}^3/\text{s}$, 其余月份输水漏损流量的平均值为 $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ 。该渠段月均输水损失率变化幅度较月均输水漏损流量变化幅度小, 但也表现出汛期输水损失明显小于其余月份输水损失的特点。黄金河—草墩河渠段 2018—2020 年月均输水漏损流量较大, 最大月均输水漏损流量为 9 月的 $4.91 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应输水损失率也最大, 为 1.98% 。

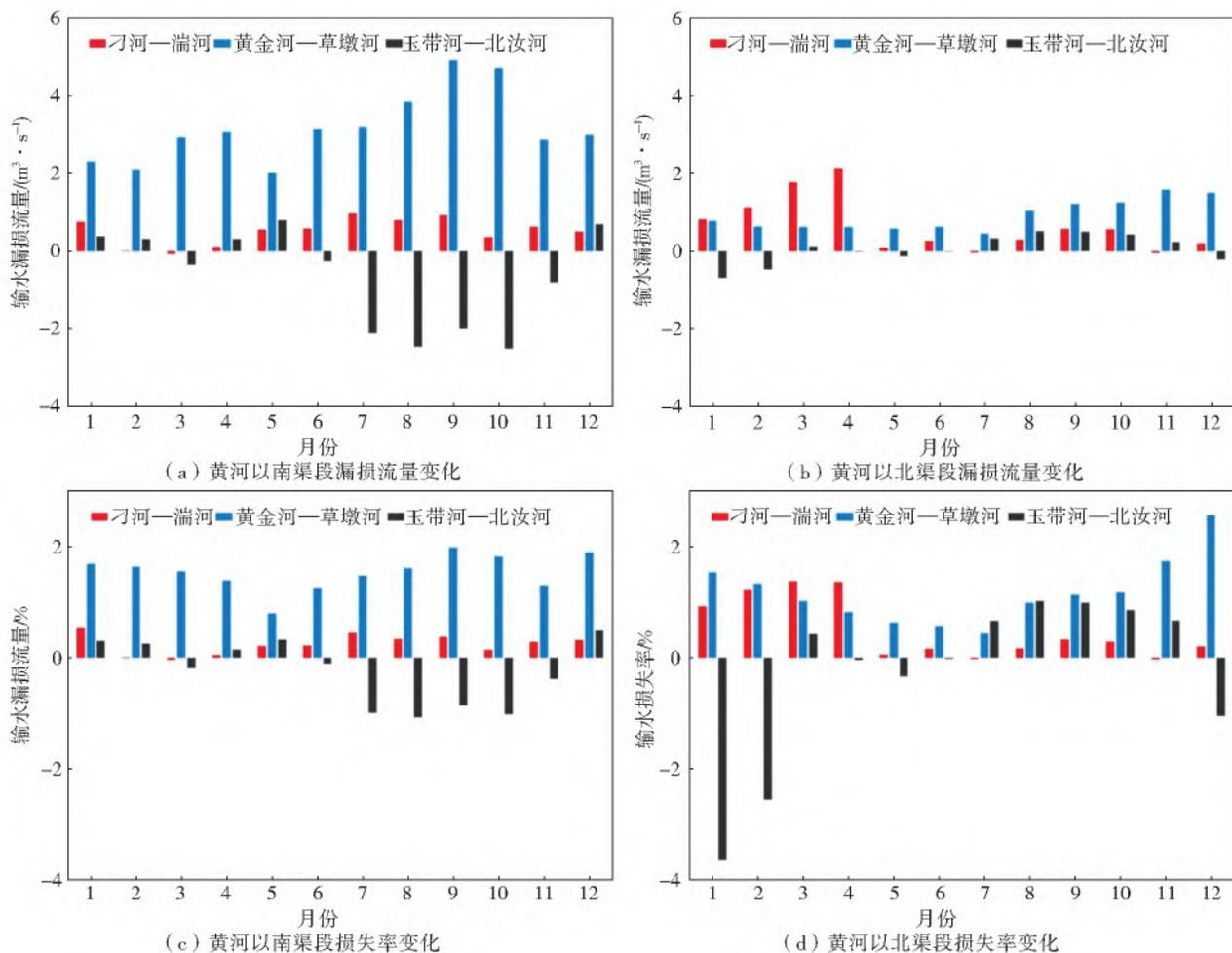


图 3 南水北调中线典型渠段月均输水损失变化

Fig. 3 Variation in monthly average water loss in typical canal sections of MR-SNWTP

黄河以北牯牛河—沁河渠段月均输水损失变化较大, 表现为 2018—2020 年 1—4 月月均输水漏损流量明显大于其余月份。蒲阳河—岗头渠段和北易水—坟庄河渠段月均输水漏损流量的变化幅度均较小, 分别为 $0.45 \sim 1.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $-0.68 \sim 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由于入渠流量规模较小, 当转换为输水损失率时, 两个渠段的输水损失变幅明显增加。

基于实测数据序列, 计算各典型渠段 2018 年 1 月—2021 年 4 月逐日输水漏损流量。采用 db 4 小波对计算结果进行 6 层小波分解, 对第 6 层低频系数进行重构, 得到典型渠段输水漏损流量的主要变化过程, 见图 4。不同渠段的逐日输水漏损流量变化存在明显差异。刁河—湍河渠段 2018—2021 年逐日输水漏损流量整体表现出逐渐增加的态势

($p < 0.01$)。黄金河—草墩河渠段逐日输水漏损流量在 2019 年 5 月前在 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近波动,随后快速增加,在 2019 年 9 月达到最大,后波动减小至 2019 年 5 月前水平。玉带河—北汝河渠段逐日输水漏损流量

在 2018 年 4—6 月、2018 年 9—12 月、2019 年 6—12 月和 2020 年 3—12 月这 4 个时段内变化较大,第 1 个时段内输水漏损流量先增大、后减小,后 3 个时段输水漏损流量均表现出先减小、后增大的变化特点。

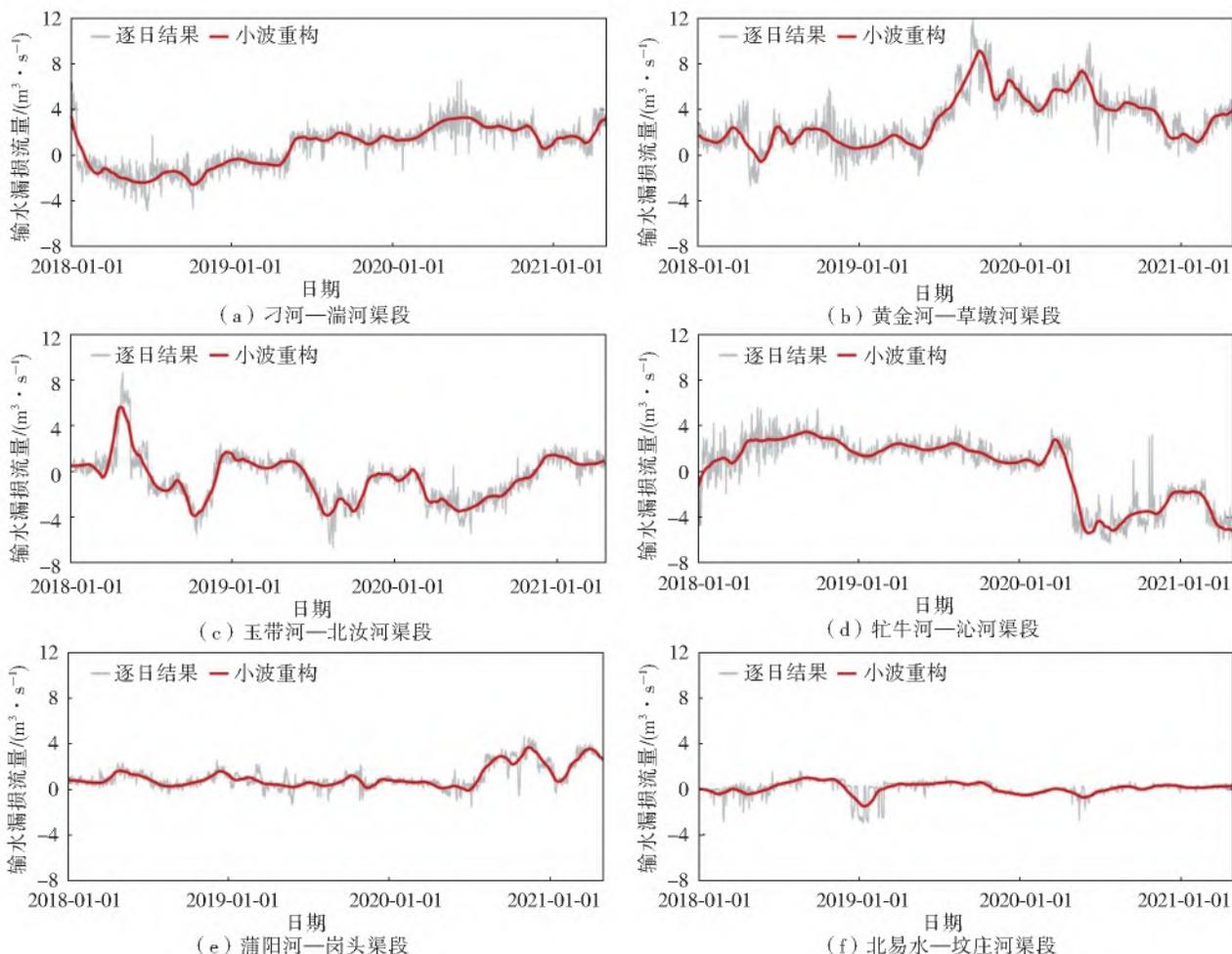


图 4 南水北调中线典型渠段逐日输水损失变化

Fig. 4 Variation in daily average water loss in typical canal sections of MR-SNWT

黄河以北渠段 2018—2021 年逐日输水漏损流量变幅较黄河以南渠段相对较小,牯牛河—沁河和蒲阳河—岗头渠段逐日输水漏损流量在 2020 年 4 月前变幅较小,平均值分别为 $1.91 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$,随后两个渠段的输水漏损流量发生较大变化,分别表现出减小和增加态势。北易水—坟庄河渠段 2018—2021 年逐日输水漏损流量变幅相对较小,但在 2018 年 12 月—2019 年 3 月也发生较为明显的波动。

3.2 不同输水损失计算方法对比分析

采用 4 种经验公式,分别计算中线总干渠典型渠段的输水漏损流量。根据典型渠段工程特性,结合相关文献,式(3)、式(4)、式(5)中的计算参数 C_1 、 C_2 、 C_3 分别取值为 1、0.34、 $0.0015^{[20]}$ 。南水北调中线总干渠沿线地质条件差异较大,为简便起见,认

为沿线渠床土质为重黏壤土,式(7)中的渠床土壤透水系数和透水指数分别取 1.30 和 0.35^[10],同时考虑防渗和地下水顶托对输水损失的影响,式(7)中的防渗折减系数和地下水顶托修正系数分别取 0.1 和 0.5^[10],其他计算参数如水深、湿周、过水断面面积等根据渠道运行监测数据和工程设计参数计算得到。采用经验公式计算得到的 6 个典型渠段的输水漏损流量与采用水量平衡法计算得到的输水漏损流量的对比结果见表 3。

不同方法计算得到的渠段输水漏损流量差异较大。考虑了流速或流量等水力因素变化影响的 Davison-Wilson 公式、莫里兹公式和 Molesworth 公式计算得到的渠段输水损失随时空变化,输水漏损流量方差在 $0.01 \sim 0.44 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其中: Molesworth 公式由于未考虑渠道防渗措施对输水损失的折减效

应,计算得到的6个典型渠段输水漏损流量均值和变幅均较其他3种经验方法结果明显偏大;Davison-Wilson公式计算得到的输水漏损流量均值在部分渠段与采用水量平衡法得到的结果接近,如牯牛河—沁河渠段和北易水—坟庄河渠段,但计算变

幅明显小于水量平衡法计算结果;考斯加可夫公式由于未考虑水力因素变化对输水损失的影响,各典型渠段计算的输水漏损流量为恒定值,尽管在刁河—湍河渠段与水量平衡法结果一致,但该公式无法反映渠段输水损失随时间的变化过程。

表3 经验公式与水量平衡法计算的渠道输水漏损流量对比

Tab. 3 Comparison between calculated water loss by using empirical canal water loss formula and calculated results derived from the principle of water balance

单位: m^3/s

典型渠段	水量平衡法		Davison-Wilson 公式		莫里兹公式		Molesworth 公式		考斯加可夫公式	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
刁河—湍河	0.64	1.92	0.26	0.01	1.39	0.05	3.98	0.22	0.64	0
黄金河—草墩河	3.11	2.39	0.32	0.03	1.48	0.09	4.71	0.44	0.61	0
玉带河—北汝河	-0.56	2.04	0.16	0.01	0.85	0.04	2.47	0.19	0.38	0
牯牛河—沁河	0.25	2.85	0.23	0.02	1.19	0.06	3.43	0.25	0.48	0
蒲阳河—岗头	1.04	1.03	0.14	0.01	0.97	0.09	2.17	0.25	0.42	0
北易水—坟庄河	0.06	0.64	0.08	0.01	0.52	0.05	1.16	0.16	0.14	0

采用水量平衡法计算得到的渠段输水损失是考虑了蒸发、渗漏、降雨等多种因素影响的广义输水损失,这与基于渗漏理论推导得到的渠段输水损失经验公式明显不同,这是导致水量平衡法结果与经验公式结果差异较大的主要原因。此外,已有渠道渗漏经验公式中的计算参数是根据特定环境下的实测渗漏损失率定得到的,参数有一定适用范围。当输水工程渠段内水深、流速、流量等运行环境条件与初始条件差异较大时,采用经验公式估算得到的输水损失可能较真实情况出现明显偏差。

3.3 输水损失变化因素分析

上述计算结果显示,黄河以南渠段输水漏损流量大小和变幅均大于黄河以北渠段,但两者输水损失率间的差异较小,说明渠段输水漏损流量与入渠流量规模关系密切,入渠流量越大,渠段输水漏损流量越大,入渠流量规模不同是导致中线总干渠输水漏损流量沿程差异的重要原因。此外,计算结果还表明同一渠段不同时期的输水损失也有明显差异。鉴于中线总干渠采用混凝土衬砌,外加铺设防渗土工膜进行防渗处理,渠底渗透系数相对较小^[22],因此可能存在外部因素导致中线总干渠渠段输水损失发生明显时空变化。下面分别从自然条件、工程运行条件变化和测流误差等3方面来阐述外部因素对渠段输水损失的影响。

3.3.1 自然条件变化

南水北调中线工程总干渠输水渠线全长1432 km,自南向北途经豫、冀、京、津4省(直辖市),沿线

自然气象条件复杂多变。Ma等^[16]采用Penman蒸发模型模拟了蒸发影响下中线总干渠输水损失变化,发现渠段输水损失由北向南逐渐减少,黄河以北渠段输水损失月际变化明显小于以南渠段,这与本文采用水量平衡法计算得到的输水漏损流量结果一致,说明蒸发变化是导致南水北调中线渠段输水损失变化的重要因素之一。

降雨通过坡面入汇使得入渠流量增加,也是导致中线总干渠输水损失变化的重要因素。玉带河—北汝河渠段2018—2021年计算输水漏损流量与邻近宝丰气象站降雨量的对比结果(图5)显示:2018年6—10月、2019年6—9月和2020年5—9月这3个汛期时段内该渠段附近降雨量明显偏大,对应时段内的计算输水漏损流量基本小于0;而其余降雨量较小时段内的计算输水漏损流量基本大于0,说明降雨量变化也会导致中线总干渠渠段输水损失变化。此外,冰期冻融也是影响中线总干渠黄河以北渠段输水损失的重要因素,这主要表现为北易水—坟庄河渠段2018年12月—2019年3月冰期计算输水漏损流量发生较为明显的波动。

3.3.2 工程运行条件变化

渠道运行水位或入渠流量变化通过改变渠段内水体接触面积,导致输水损失发生变化。南水北调中线工程已稳定运行多年,渠段内水深、湿周等水力条件总体变幅较小,但2020年4—6月实施了首次加大流量输水试验,大流量输水条件下渠段水力条件发生明显变化,可能导致输水损失相应发生变

化^[23]。如黄金河—草墩河渠段 2020 年大流量输水试验前的输水漏损流量与入渠流量基本成正相关关系($R^2=0.49, p<0.01$),而在大流量输水试验期间,该渠段输水漏损流量随入渠流量快速增加($R^2=0.54, p<0.01$)(图 6),表明大流量输水试验

等输水工程运行调度变化也可能造成渠段输水漏损流量变化。此外,南水北调中线部分渠段边坡地下水埋深较小,内外压力差可能导致地下水反渗进入总干渠,也是导致中线渠段输水损失随时空变化的原因之一^[24]。

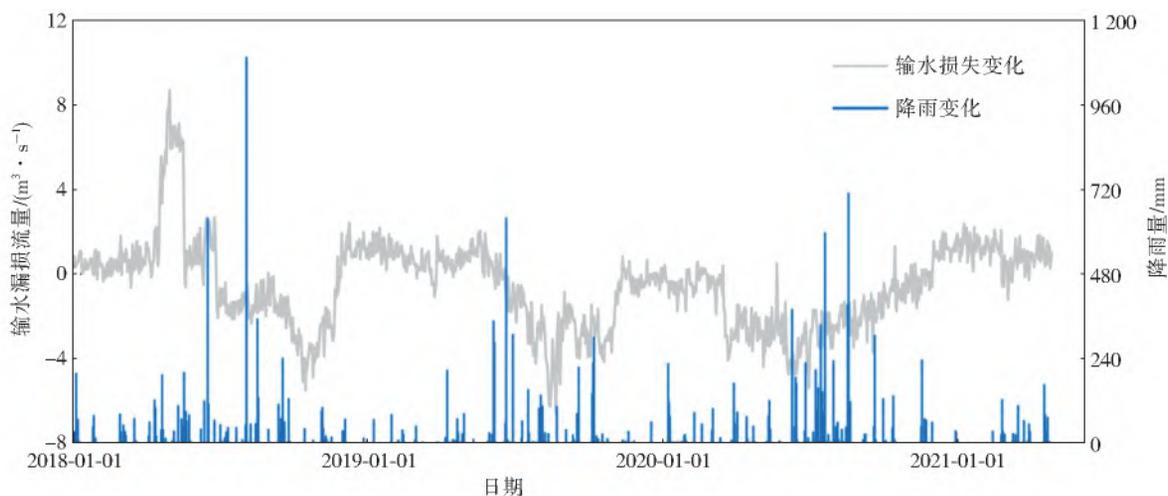


图 5 玉带河—北汝河渠段 2018—2021 年逐日输水损失与降雨量的关系

Fig. 5 The relationship between daily average water loss and precipitation in the canal section from Yudahe to Beiruhe from 2018 to 2021

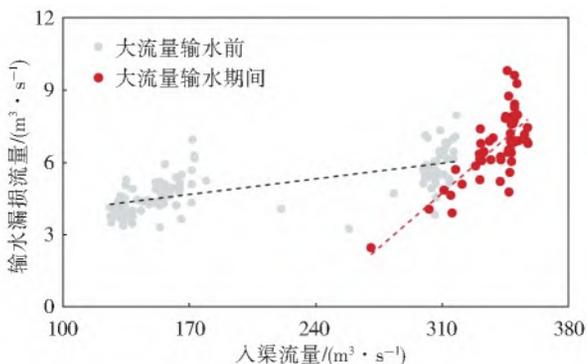


图 6 黄金河—草墩河渠段大流量输水试验前后计算输水漏损流量与入渠流量的关系

Fig. 6 The relationship between calculated water loss and inlet discharge before and after the experiment of large discharge of water transfer in the canal section from Huangjinhe to Caodunhe

3.3.3 测流误差

实测流量、水位数据的准确性和一致性直接影响采用水量平衡公式计算渠段输水损失的精度。测流误差的来源可以分为系统误差和偶然误差,已有研究报告显示中线总干渠各节制闸流量计均已经过率定^[21],系统误差较小,但偶然误差难以避免,可能会对渠段输水损失计算造成较大影响^[25]。例如当假定入渠、出渠流量实测值存在 3% 的偶然误差时,基于蒙特卡洛模拟,采用水量平衡公式计算得到的 2019 年 4 月 6 日—7 月 15 日北易水—坟庄河渠段的输水漏损流量 90% 置信区间的变化范围为 $-2.59 \sim 3.51 \text{ m}^3/\text{s}$,与时段内平均输水漏损流量

$0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ 差异较大,因此在采用水量平衡法计算渠段输水损失时,应对多次计算结果进行平滑处理,以消除偶然误差对渠段输水损失计算结果的影响。

4 结论

采用水量平衡法计算南水北调中线工程典型渠段 2018—2021 年不同时段的输水损失。计算结果显示不同时间尺度下的渠段输水损失计算结果差异较大,黄河以南渠段输水漏损流量大小和变幅均大于黄河以北渠段,但两者输水损失率差异较小,表明入渠流量规模是影响渠段输水漏损流量的重要因素。

采用 4 种输水损失经验公式计算了各典型渠段输水漏损流量。计算结果表明经验公式计算结果与水量平衡公式计算结果差异较大,这是因为水量平衡公式计算得到的输水损失是输水工程运行期多种外部因素影响下的广义输水损失,仅考虑渠底渗漏的输水损失经验公式难以有效模拟其变化过程。

蒸发量变化、降雨、冰期冻融是导致南水北调中线总干渠输水损失变化的重要外部因素。大流量输水等工程运行条件变化也会引起渠段输水损失变化,而测流偶然误差直接影响了渠道输水损失的计算精度。

参考文献(References):

[1] 仲志余,刘国强,吴泽宇.南水北调中线工程水量调度

- 实践及分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 95-99, 143. (ZHONG Z Y, LIU G Q, WU Z Y. Analysis and practices of water regulation in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 95-99, 143. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.20180015.
- [2] 黄会勇. 南水北调中线总干渠水量调度模型研究及系统开发[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HUANG H Y. Study of water supply and control model for Middle Route Main Canal of South-to-North Water Transfer First Stage Project and software system development[D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [3] 刘子慧, 黄会勇, 吴永妍, 等. 输水工程水力学模拟与控制[M]. 武汉: 长江出版社, 2020. (LIU Z H, HUANG H Y, WU Y Y, et al. Hydraulic simulation and control of water conveyance engineering[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2020. (in Chinese))
- [4] 张帆, 蔡宴朋, 郭萍, 等. 灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 140-147. (ZHANG F, CAI Y P, GUO P, et al. Method for estimating trunk and branch canal leakage in irrigation districts and its application in optimal allocation of water resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 140-147. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.04.017.
- [5] MOHAMMADI A, PARVARESH RIZI A, ABBASI N. Field measurement and analysis of water losses at the main and tertiary levels of irrigation canals; Varamin Irrigation Scheme, Iran [J]. Global Ecology and Conservation, 2019(18): e00646. DOI: 10.1016/j.gecco.2019.e00646.
- [6] 傅建国. 静水法在黄河下游灌区渠道测渗中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S1): 88-91. (FU J G. Application of hydrostatic method in channel seepage measurement in the irrigation area of the lower reaches of the Yellow River [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S1): 88-91. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2019029.
- [7] 罗玉峰, 崔远来, 郑祖金. 河渠渗流量计算方法研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 444-449. (LUO Y F, CUI Y L, ZHENG Z J. Research progress on methods of quantifying seepage from rivers and canals[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 444-449. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2005.03.023.
- [8] 张健, 魏占民, 张金丁, 等. 渠道土壤含水率的时空变化及渗漏模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 86-92. (ZHANG J, WEI Z M, ZHANG J D, et al. Numerical simulation of spatiotemporal variation in exfiltration and moisture content in the proximal soil of channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 86-92. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2019371.
- [9] 顾喜贵. 西北某灌区渠道渗漏数值试验分析研究[J]. 水科学与工程技术, 2020, 222(4): 21-25. (GU X G. Numerical analysis of canal leakage in an irrigation area in northwest China [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2020, 222(4): 21-25. (in Chinese)) DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2020.04.07.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50509—2009 灌溉规划规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50509-2009. Code for irrigation areas programming [S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 谢崇宝, LANCE J M, 崔远来, 等. 大中型灌区干渠输配水渗漏损失经验公式探讨[J]. 中国农村水利水电, 2003(2): 20-22. (XIE C B, LANCE J M, CUI Y L, et al. Discussion on the empiric formula for water-transportation-and-allocation seepage loss of main canal of large-and-middle-sized irrigation district [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(2): 20-22. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2003.02.009.
- [12] 谢崇宝, LANCE J M, 许迪, 等. 大中型灌区支渠系统区域渗漏损失的随机模型[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 55-59. (XIE C B, LANCE J M, XU D, et al. Stochastic model for assessment of regional seepage of branch canal system in large-medium sized irrigation district [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9): 55-59. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2003.09.010.
- [13] 肖雪, 王修贵, 谭丹, 等. 几种计算渠道渗漏损失的经验公式比较[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 365-371. (XIAO X, WANG X G, TAN D, et al. Comparison of empirical formulas for calculating canal seepage loss [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(3): 365-371. (in Chinese)) DOI: 10.14188/j.1671-8844.2016-03-008.
- [14] 廖相成, 胡铁松. 基于输水损失动态变化特性的渠系优化配水模型研究[J]. 水利学报, 2021, 52(7): 850-861. (LIAO X C, HU T S. Study on optimal water

- distribution of canal system based on dynamic change characteristics of water conveyance losses[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(7): 850-861. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200828.
- [15] 周玉琴,石佳,万昕. 渠道衬砌状况对渠系水利用系数的影响分析[J]. *节水灌溉*, 2021, (8): 52-55, 61. (ZHOU Y Q, SHI J, WANG X. Analysis of the influence of canal lining condition on water utilization coefficient of canal system[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 52-55, 61. (in Chinese))
- [16] MA Y J, LI X Y, WILSON M, et al. Water loss by evaporation from China's South-North Water Transfer Project[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 206-215. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.086.
- [17] CHEN Y L, TIAN L D. Canal surface evaporation along the China's South-to-North Water Diversion quantified by water isotopes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146388. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146388.
- [18] 长江勘测规划设计研究院. 南水北调中线一期工程可行性研究总报告[R]. 2005. (Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. General report on feasibility study of the Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project[R]. 2005. (in Chinese))
- [19] 郑世宗,贾宏伟,崔远来. 渠道输水效率影响因素及其规律[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(6): 77-79, 83. (ZHENG S Z, JIA H W, CUI Y L. Influencing factors and laws on canal water conveyance efficiency[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(6): 77-79, 83. (in Chinese)) DOI: 10.7631/j.issn.1672-3317.2013.06.020.
- [20] 克拉茨 D B. 灌溉渠道衬砌[M]. 北京:水利出版社, 1980. (KRATZ D B. *The irrigation canal lining*[M]. Beijing: China Hydraulic Press, 1980. (in Chinese))
- [21] 黄河水利委员会河南水文水资源局. 南水北调中线干线工程节制闸处流量计率定成果报告[R]. 2019. (Henan Bureau of Hydrology and Water Resources of Yellow River Conservancy Commission. Report on flow meter calibration results at control gate of main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project[R]. 2019. (in Chinese))
- [22] 王春燕,余梁蜀,马斌,等. 复合土工膜在南水北调工程中的防渗应用[J]. *水利科技与经济*, 2009, 15(8): 738-739, 746. (WANG C Y, YU L S, MA B, et al. Composite geomembrane's anti-seepage application in SNWD[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2009, 15(8): 738-739, 746. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2009.08.037.
- [23] 王才欢,王伟,侯东梅,等. 大型输水渡槽水流超常波动成因分析与对策[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(2): 46-52. (WANG C H, WANG W, HOU D M, et al. Abnormal water waves in large-scale conveyance aqueduct: Causes and countermeasures[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(2): 46-52. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20200406.
- [24] 长江勘测规划设计研究院. 南水北调中线一期工程陶岔一沙河南段地下水复核报告[R]. 2011. (Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Groundwater review report of Taocha-Shahenan section of the Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project[R]. 2011. (in Chinese))
- [25] MARTIN C A, GATES T K. Uncertainty of canal seepage losses estimated using flowing water balance with acoustic Doppler devices[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 746-761. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.074.

Variation of water loss in the main canal of Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project

FENG Zhiyong¹, LI Liqun², WU Yongyan¹, HUANG Huiyong¹, WANG Lei¹

(1. *Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China*; 2. *Management Bureau of Trunk Canal of Middle Route Project of South-to-North Water Transfer, Beijing 100038, China*)

Abstract: The main task of water dispatching of long-distance water transfer projects is to properly determine the amount, process, and scope of water transfer based on overall considering the water input and storage situation of headwater area and the water demand in the water receiving area, of which the water loss is the key parameter in organizing the water dispatching plan, and directly affects the dispatching accuracy. Therefore, there is a great significance to achieve accurate dispatching, ensure water supply safety, and improve dispatching management level. However, previous studies mainly focus on the calculation methods of canal seepage, little was known about the variation of water loss during the operation period of long-distance water transfer

projects.

By integrating the synchronized flow and water level measurements data, the variation process of water loss in the six typical canal sections of the Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project over the annually-averaged, monthly-averaged, and daily-averaged timescales from 2018 to 2021 was calculated based on the principle of water balance, and the calculated water loss was also compared to the results of four empirical canal water loss methods including Davison-Wilson, Mauriz, Molesworth, and Kostikov methods to evaluate the performance and applicability of empirical methods in estimating water loss in long-distance water transfer projects.

The results showed that the water loss of the Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project exhibited pronounced spatiotemporal variations. The magnitude and change amplitude of loss discharge in the southern canals of the Yellow River were larger than that of the northern canals, but there was a minor difference in loss rate between them, indicating that the amount of inflow canal discharge is the main factor affecting the canal water loss discharge. The calculated water loss by empirical methods varied greatly. Specifically, the averaged water loss calculated by the methods of Davison-Wilson and Kostikov was in good agreement with the average results by the principle of water balance in part of typical canals, but the change magnitude of their results within canal was much smaller. The calculated canal water loss by the method of Molesworth is significantly greater than the results of other methods as this method underestimated the effect of anti-seepage measures on canal water loss. Overall, the calculated water loss by the empirical method deviated from calculated results by the principle of water balance, suggesting that the change process of water loss of the Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project can not be effectively reflected by only considering canal seepage. The impacts of external factors including natural condition changes, operating condition changes, and measurement error on canal water loss were analyzed preliminarily, and the results indicated that evaporation variation, precipitation, and freezing and thawing during the ice period were crucial factors triggering spatial and temporal variations of water loss of the Middle Route of South-to-North Water Transfer First Stage Project. The adjustment of the water dispatching plan affects canal water loss by changing the water contact area in the canal section. Besides, the measurement errors may greatly affect the calculated results of canal water loss when applying the principle of water balance.

The calculated water loss of the current study illustrated that it is necessary to consider the dynamic process of water loss, especially in the long-distance water transfer projects where meteorological and engineering operating conditions exhibited significant variation along the canal.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Transfer Project; main canal; water loss; water balance; spatial variation