

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtq.2021.0123

王彪,姚旭初,石维新,等. 永定河山峡段生态补水过程渗漏特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1208-1216.
WANG B, YAO X C, SHI W X, et al. Ecological water supplement leakage characteristics in the canyon section of Yongding River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1208-1216. (in Chinese)

永定河山峡段生态补水过程渗漏特征

王彪,姚旭初,石维新,魏红,袁鸿鹄,邵惠芳

(北京市水利规划设计研究院,北京 100048)

摘要:以 2019 年和 2020 年春、秋两季共 3 次永定河生态补水的水文观测数据为基础,结合河道内砂石坑渗漏试验,并综合考虑补水时过流通道和水文地质条件等因素,分析永定河山峡段生态补水过程的渗漏特征。结果表明:3 次生态补水期间,永定河山峡段渗漏损失率逐渐降低,渗漏损失率范围在 20%~30%;落坡岭水库至下苇甸电站为现状永定河山峡段重点渗漏段,渗漏损失流量占山峡段渗漏损失流量的约 60%;下苇甸电站至三家店拦河闸段由于河道减渗仅占山峡段的约 10%;官厅水库至落坡岭水库段占山峡段的约 30%。研究成果可为永定河山峡段生态治理与修复工程方案制定以及常态化生态补水的水资源配置提供依据。

关键词:永定河;山峡段;生态补水;渗漏损失流量;渗漏损失率

中图分类号:TV213;P641.25 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



永定河是海河流域七大水系之一^[1-2],素有“小黄河”之称,是北京的母亲河^[3-4]。1954 年,官厅水库于永定河干流的官厅山峡入口处建成,用于控制永定河的径流量,山峡段即是指从官厅水库坝下到三家店拦河闸段^[5]。进入 21 世纪以来,为了解决永定河生态环境问题^[6-9],国家和地方各级部门做了大量工作。2007 年,国务院批复了《永定河干流水量分配方案》,规定了永定河干流在山西、河北两省的出境下泄流量,但受气候条件和人类活动影响,北京市入境水量远低于规定的水量^[10]。2009 年,北京市水务局会同相关部门编制了《永定河绿色生态走廊建设规划》^[11],对山峡段、城市段和郊野段分别进行了规划,并提出了山峡段以河道生态基流和水源地保护为主线的水生态保护与修复体系。2016 年底,国家发改委等部门联合印发《永定河综合治理与生态修复总体方案》,提出对永定河全流域进行系统治理,将其恢复成为“流动、绿色、清洁、安全”的河;2017 年《北京市永定河综合治理与生态修复实施方

案》,提出山峡涵养区主要承担防治水土流失的功能。近年来,由于采取地下水压采限采、再生水回补^[12]、河道修复治理^[13]、生态补水^[14]等措施,永定河河道开始复流,生态环境逐步改善^[11]。

河流生态补水是指通过补充受损生态系统缺失的环境因子——水,改善、修复、恢复生态系统结构、功能及自我调节能力,使其继续为人类创造良好的、健康的生存环境,促进人类社会的可持续发展^[15],是一种水资源调控^[16]和生态恢复^[17]的重要方式。从 2016 年起,永定河开始实施生态补水。受水文地质条件影响,在补水过程中会产生相当一部分的渗漏水量^[11],而该渗漏水量通常是地下水补给的重要来源^[18],是水资源合理配置以及制定生态补水规划的重要基础。目前,关于地表水渗漏量的计算以及渗漏特征的研究已经形成了一系列的理论与方法。卢胜勇^[19]对河北省山前平原区河道渗漏特征进行了分析,并分别研究了上游来水量、过水过程历时及地下水埋深与单位河长渗漏率的关系,并建立了线

收稿日期:2021-04-12 修回日期:2021-08-30 网络出版时间:2021-09-02

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20210902.1131.002.html

基金项目:北京市自然科学基金项目(Z160001);北京市科技计划项目(Z161100004516015;Z121100000312036)

作者简介:王彪(1989—),男,河北雄安新区人,工程师,主要从事地下水数值模拟研究。E-mail:wangbiao0312@163.com

性回归模型。梁永平等^[20]通过对娘子关泉域桃河岩溶渗漏段上下断面 14 次洪峰过程测流结果进行分析,建立了河流来水量与渗漏量间的非线性方程,结合河流来水量大小、水量在时间上的动态分布特征和计算过程中所采用的时间尺度对河流渗漏量的影响进行了讨论。朱仲元等^[21]以实测水位资料和试验数据为基础,从年径流量、日平均流量、河道水位等角度研究了西辽河的侧向渗漏规律。王涛等^[22]通过数值模拟得出灵渠秦堤发生渗漏的主要原因水位高差大、渗流途径短、砂卵石层及灰岩中的岩溶裂隙渗透性强。张广朋^[23]通过研究得出在不同来水频率下塔里木河干流上中游河段耗水量、渗漏水量及单位河长渗漏水量均呈现递减趋势,并结合达西定律,厘清了不同来水条件下河床渗漏水量。党跃军^[24]根据不同断面测流数据建立了晋祠泉域汾河干流古交段不同渗漏段上游断面流量及渗漏系数关系模型,分析了各渗漏段渗漏规律,推算了渗漏量。高喆等^[25]基于对不同流量级下河

道过水面积的遥感解译,建立不同断面日均流量与过水面积的关系,并结合气象观测资料,利用水量平衡法对正义峡—狼心山河段的蒸发量和渗漏量进行了分割计算。但以上研究均是以多期次、长序列数据开展的渗漏特征研究,未对具体补水模式下的河流渗漏特征展开分析。

本文拟针对 2019 年和 2020 年共 3 次生态补水具体模式下的永定河山峡段渗漏特征进行分析,为该地区优化水资源配置、制定科学合理的补水方案提供前期基础性支持。

1 研究区概况

1.1 流域概况

永定河流域位于 $112^{\circ}\text{E}\sim 117^{\circ}45'\text{E}$, $39^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}20'\text{N}$ ^[26],是海河流域的一级支流,同时也是我国北方典型的缺水型河流^[27]。永定河发源于内蒙古和山西,流域总面积 4.7万 km^2 ,其中北京境内流域面积约 $3\ 168\text{ km}^2$ ^[28]。永定河山峡段位置见图 1。



图 1 永定河山峡段

Fig. 1 The canyon section of Yongding River

1.2 气象水文

永定河流域属温带大陆性季风气候,多年平均气温为 $12.35\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量约 513 mm ,平均相对湿度为 57% ,年潜在蒸发量为 $1\ 890\text{ mm}$,汛期降水量占全年总降水量的 $75\%\sim 85\%$ 。山峡段为山地侵蚀型构造地貌,地势北高南低,平均坡度 3.1% ,海拔落差较大,河道蜿蜒回转^[29],全长约 108 km ,区间面积 $1\ 600\text{ km}^2$ ^[30],水力坡降在 0.003 左右,水流速度较大,大部分河床底部宽度在 $70\sim 100\text{ m}$,过

流断面面积相对较小。

1.3 水文地质条件

永定河山峡段地下水属于西山岩溶地下水系统,其河道沿线基岩主要分为 3 段:官厅水库至雁翅段以蓟县系雾迷山组白云岩为主,地下水类型为岩溶-裂隙水;雁翅至色树坟段(不含落坡岭水库)以侏罗系髻髻山组砂页岩及凝灰岩为主,地下水类型为碎屑岩裂隙水,地层透水性及富水性均较差;色树坟至三家店段以寒武-奥陶系灰岩为主,

地下水类型为石灰岩岩溶水,地层厚度较大,埋藏深度不一,受九龙山—香峪大梁向斜及永定河断裂的切割影响,该段基岩中溶洞、溶隙强发育,并

且可能存在与第四系地下水直接接触的“天窗”区^[11],故该段河道渗透性强^[31]。永定河山峡段地质剖面示意图见图 2。

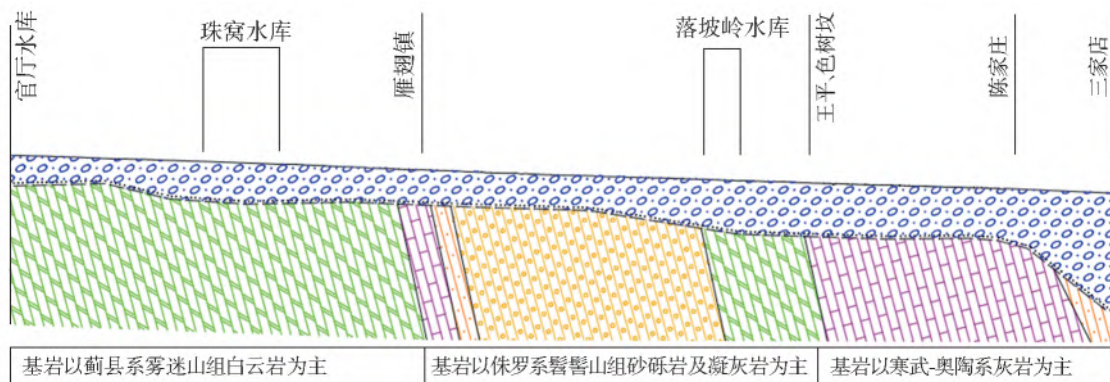


图 2 永定河山峡段地质剖面

Fig. 2 Geological profile of the canyon section of Yongding River

2 永定河生态补水概况

2.1 2019 年试验性补水

永定河试验性补水于 2019 年 3 月 14 日启动,补水过程按官厅水库下泄流量和过流路线大致分为 4 个阶段:第 1 阶段从 3 月 14 日至 4 月 13 日,下泄流量逐渐攀升至 30 m³/s;第 2 阶段从 4 月 14 日至 5 月 8 日,下泄流量稳定在 30 m³/s,水流没有走落坡岭水库至下苇甸电站之间的河道,而从两地之间的发电输水隧洞过流;第 3 阶段从 5 月 9 日至 6 月 7 日,下泄流量为 40 m³/s;第 4 阶段为 6 月 7 日以后,该阶段为小流量放水,流量平均在 10 m³/s 左右。除第 2 阶段外,其他各阶段均全程从河道过流。

2.2 2020 年春季补水

2020 年春季补水从 4 月 20 日起,至 5 月 12 日水头到达崔指挥营市界。本次生态补水根据官厅水库下泄流量分为 4 个阶段:第 1 阶段从 4 月 20 日至 4 月 26 日,流量稳定在 40 m³/s;第 2 阶段从 4 月 27 日至 4 月 29 日,流量逐日增加约 20 m³/s 至 100 m³/s;第 3 阶段从 4 月 30 日至 5 月 13 日,流量稳定在 100 m³/s;第 4 阶段为 5 月 14 日以后,流量维持在 5~6 m³/s。

2.3 2020 年秋季补水

2020 年秋季补水自 10 月 14 日起至 10 月 30 日止,此次补水按下泄流量分为 3 个阶段:10 月 14 日至 10 月 19 日,流量 40 m³/s;10 月 20 日至 10 月 24 日,流量 80 m³/s;10 月 25 日至 10 月 29 日,流量 30 m³/s。

3 山峡段河道渗漏特征分析

3.1 数据来源与处理

本次研究收集到了生态补水期间的永定河山峡

段沿线典型水文观测断面的过水流量^[32],用于分析河道渗漏损失量。具体数据包括:2019 年 3 月 14 日至 2019 年 7 月 15 日官厅水库(坝下)、落坡岭水库、下苇甸电站和三家店拦河闸处的水文观测数据,2020 年 4 月 20 日至 2020 年 5 月 13 日官厅水库(坝下)和三家店拦河闸处的水文观测数据,2020 年 10 月 14 日至 2020 年 10 月 31 日官厅水库(坝下)、落坡岭水库和三家店拦河闸处的水文观测数据。

在补水过程中,净水面蒸发量占总渗漏损失水量的比例很小,故本次研究忽略蒸发和降水的影响。生态补水初期水头在河道内的演进需要经过 3 至 7 天的时间,下文的渗漏损失流量计算值为考虑了该段时间影响的单位时间内的渗漏损失水量。

3.2 河道渗漏损失率及渗漏损失流量分析

利用均衡法计算河道渗漏水量,公式为

$$\Delta W = W_u - W_d \quad (1)$$

式中: ΔW 为河道渗漏损失水量, m³; W_u 为上游断面的下泄水量, m³; W_d 为下游断面的入流量, m³。

将利用上述均衡法计算得到的河道渗漏损失水量占上游断面下泄水量的比例定义为渗漏损失率,公式为

$$\lambda = \frac{\Delta W}{W_u} \quad (2)$$

式中: λ 为渗漏损失率,其他符号意义同公式(1)。

定义 ΔQ 为渗漏损失流量,公式为

$$\Delta Q = \Delta W / T \quad (3)$$

式中: T 为渗漏的持续时间, s。

利用以上各式按不同下泄流量分时段计算 3 次生态补水时段永定河山峡段河道渗漏损失率和渗漏损失流量,结果见表 1。

表 1 永定河山峡段河道渗漏损失流量及渗漏损失率

Tab. 1 Leakage loss flow and loss rate in the canyon section of Yongding River

补水次别	计算时段	下泄流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\Delta W/\text{亿 m}^3$	$\Delta Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda/\%$	备注
2019 年试验性补水	3月14日—4月13日	10~25	0.257 7	9.62	45.26	
	4月14日—5月8日	30	0.077 5	3.59	12.00	大流量集中补水阶段
	5月9日—6月7日	40	0.211 2	8.15	21.06	
	3月14日—6月7日	10~40	0.546 9	7.36	24.61	小计
	6月8日—7月25日	10	0.253 8	6.12	56.95	小流量维持补水阶段
	3月14日—7月25日	10~40	0.800 0	6.91	29.99	合计
2020 年春季	4月20日—4月26日	40	0.139 2	23.01	59.40	
	4月27日—4月29日	60~100	0.054 0	20.85	24.32	大流量集中补水阶段
	4月30日—5月13日	100	0.211 7	17.50	17.88	
	4月20日—5月13日	40~100	0.405 0	19.53	24.67	合计
2020 年秋季	10月14日—10月19日	40	0.066 3	12.79	41.17	
	10月20日—10月24日	80	0.051 8	11.98	16.62	大流量集中补水阶段
	10月25日—10月29日	30	0.014 4	3.34	8.49	
	10月14日—10月29日	30~80	0.132 4	9.58	20.62	合计

从表 1 可见,3 次补水受过流历时和下泄流量不同的影响,渗漏损失流量和损失率各不相同,按时间顺序 3 次补水的渗漏损失率 λ 分别为 29.99%、24.67% 和 20.62%,呈逐渐减小趋势,范围为 20%~30%。若仅考虑 3 次生态补水的大流量集中补水阶段,不考虑 2019 年 6 月 8 日后的小流量持续补水阶段,则 2019 年生态补水渗漏损失率降为 24.61%,3 次的 λ 较为接近,范围为 20%~25%。

3 次补水初始阶段的 λ 在整个补水时段均最大,分别为 45.26%、59.40% 和 41.17%,后期由于土壤含水率和地下水水位升高,地表水和地下水之间的水力梯度降低, λ 降低。2020 年的两次补水,在初

始 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 的下泄流量后,分别采用了流量先小后大和先大后小两种补水方式,但渗漏损失率均为先大后小,春季时为 24.32% 和 17.88%,秋季时为 16.62% 和 8.49%。2019 年下泄流量为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 λ 为先小后大,分别为 12.00% 和 21.06%,这是由于在流量为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,水流从落坡岭至下苇甸电站之间的隧洞通过,降低了渗漏量。

根据 2019 年放水流量监测数据,绘制了官厅水库下泄流量与山峡段渗漏损失流量关系曲线,见图 3.4。从图中可以看出,山峡段河道的渗漏损失流量与官厅水库下泄流量之间无明显相关关系。

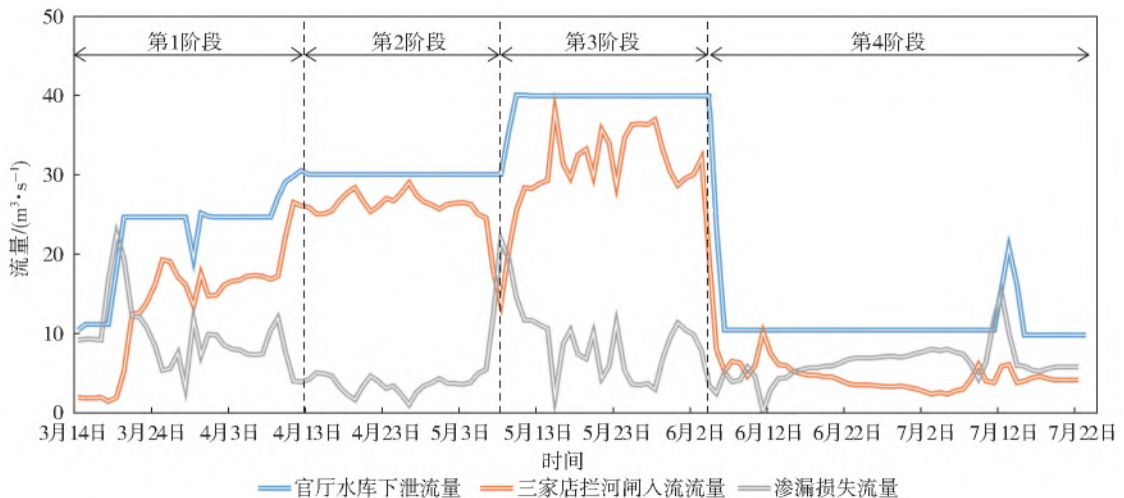


图 3 2019 年试验性补水不同阶段渗漏损失流量历时曲线

Fig. 3 Leakage loss flow curve at different stages in 2019

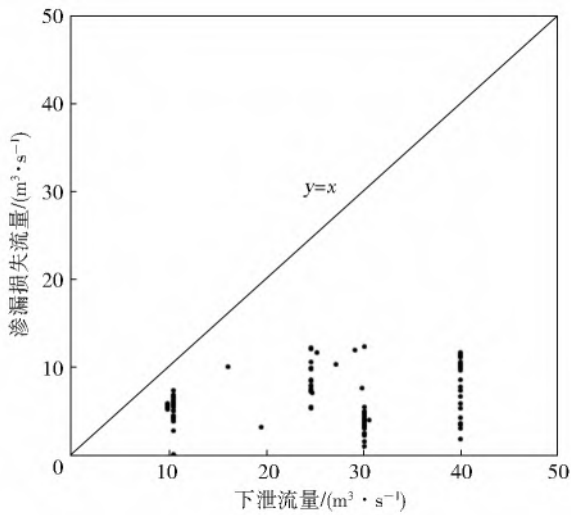


图 4 2019 年试验性补水山峡段渗漏损失流量与官厅下泄流量关系

Fig. 4 Relationship between leakage loss flow and Guanting discharge of experimental water replenishment in the canyon section of Yongding River

3.3 重点渗漏河段分析

根据收集到的水文监测断面的情况,将永定河山峡段划分为官厅水库(坝下)至落坡岭水库段(A段)和落坡岭水库至三家店拦河闸段(B段),再将落

坡岭水库至三家店拦河闸段进一步细分为落坡岭水库至下苇甸电站段(B₁段)和下苇甸电站至三家店拦河闸段(B₂段)。A段长 76 km,B段长 32 km,其中 B₁段长 15 km,B₂段长 17 km。分别分析各段的渗漏特征。

3.3.1 2019 年试验性补水分析

根据本次生态补水流量监测数据,分时段分别计算 A、B 两段的渗漏损失流量,并得出每段渗漏损失流量占山峡段的比例,见表 2。

从表 2 可以看出:第 1 阶段和第 4 阶段 A 段渗漏损失流量占总渗漏损失流量的比例分别为 28.2%和 26.5%,而 B 段该比例分别为 71.8%和 73.5%,两个阶段渗漏特征相似;第 2 阶段 A 段所占比例为 76.0%,而 B 段仅占 24.0%,这是由于 B₁段水流从输水隧洞通过,经现场调查发现 B₂段河道大部分采取了防渗处理措施,导致 B 段渗漏量大幅下降;第 3 阶段恢复从河道过流,B 段渗漏损失流量占山峡段的 61.0%。将从河道过流期间作为整体考虑,则 A 段渗漏损失流量占山峡段的 30.7%,B 段占 69.3%。

表 2 2019 年试验性补水分段渗漏损失流量

Tab. 2 Leakage loss flow in each section of experimental replenishment in 2019

计算时段	下泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	ΔQ _{山峡} / (m ³ ·s ⁻¹)	ΔQ _A / (m ³ ·s ⁻¹)	A 段比例/ %	ΔQ _B / (m ³ ·s ⁻¹)	B 段比例/ %	备注
3月14日—4月13日	10~25	9.62	2.71	28.2	6.91	71.8	第1阶段
4月14日—5月8日	30	3.59	2.73	76.0	0.86	24.0	第2阶段
5月9日—6月7日	40	8.15	3.18	39.0	4.97	61.0	第3阶段
6月8日—7月25日	10	6.12	1.62	26.5	4.51	73.5	第4阶段
3月14日—4月13日 5月9日—7月25日	10~40	7.68	2.36	30.7	5.32	69.3	完全河道过流阶段

如果假定第 2 阶段水完全从河道过流,A 段渗漏损失流量 2.73 m³/s 占山峡段的比例采用在河道过流期间的平均值 30.7%,则山峡段整体渗漏损失流量为 8.89 m³/s,B 段渗漏损失流量为 6.16 m³/s;而水从隧洞过流时 B 段渗漏损失流量为 0.86 m³/s,由于隧洞内不会产生渗漏损失,故该值也即 B₂段的渗漏损失流量,由此可得 B₂ 渗漏损失流量占 B 段的 14.0%,占山峡段的 9.7%,而 B₁ 段渗漏损失流量占 B 段的 86%,占山峡段的 59.6%。

第 2 阶段水从隧洞过流时,利用 B₁ 段河道内的 3 个已有砂石坑进行入渗速率观测(坑内水为第 1 阶段放水所蓄),观测时间从 4 月 18 日至坑内水完全渗漏完,各渗坑观测数据见表 3。

利用补水期间的遥感监测数据圈定 B 段的平均水面面积为 1.1 km²,经计算,B 段的渗漏损失流量为 6.37 m³/s,这与前述假定情况下得到的 B 段渗漏损失流量接近。

表 3 B₁ 河段内砂石坑入渗速率观测数据

Tab. 3 Observation data of infiltration rate of gravel pit in B₁ reach

坑内地层岩性	入渗速率范围/(m·d ⁻¹)	平均入渗速率/(m·d ⁻¹)	全段平均入渗速率/(m·d ⁻¹)
卵、漂石	0.53~0.79	0.60	0.50
卵、漂石	0.70~0.88	0.83	
卵石夹淤积黏性土	0.01~0.16	0.06	

3.3.2 2020年秋季补水分析

2020年秋季补水期间山峡段 A、B 两分段渗漏损失流量情况见表 4。从表 4 可见,2020 年秋季

补水期间,A 段渗漏损失流量占山峡段的 30.2%, B 段占 69.8%,结果与 2019 年试验性补水结果接近。

表 4 2020 年秋季补水分段渗漏损失流量

Tab. 4 Leakage loss flow of experimental replenishment in autumn 2020

计算时段	下泄流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\Delta Q_{\text{山峡}} /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\Delta Q_{\text{A}} /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	比例/ %	$\Delta Q_{\text{B}} /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	比例/ %	备注
10月14日—10月19日	40	12.79	4.16	32.5	8.63	67.5	第1阶段
10月20日—10月24日	80	11.98	3.16	26.4	8.82	73.6	第2阶段
10月25日—10月29日	30	3.34	1.11	33.2	2.23	66.8	第3阶段
10月14日—10月29日	30~80	9.58	2.89	30.2	6.69	69.8	全过程

3.3.3 重点渗漏河段分析

从 2019 年试验性补水和 2020 年秋季补水的分析结果看,A 段渗漏损失流量占山峡段渗漏损失流量的 30%,B 段占 70%,其中,B₁ 段占 60%,B₂ 段(现状河道做了减渗处理)占 10%。但从河段长度看,A 段占山峡段全长的 70%,而 B 段占 30%,其中,B₁ 段占 14%,B₂ 段占 16%。

从以上数据可以看出,B 段河长为 A 段的 43%,但其渗漏损失流量却为 A 段的约 2.3 倍,这是由于 B 段位于前述寒武-奥陶系灰岩地层,且地层受九龙山—香峪大梁向斜及永定河断裂的切割影响,基岩中溶洞、溶隙强发育,并且可能存在与第四系地下水直接接触的“天窗”区,导致该段河道渗透性强,渗漏损失流量较大,构成了该渗漏特征的水文地质条件内因,其中,B₁ 段河长仅为 A 段河长的 20%,但其渗漏损失流量却为 A 段的 2 倍,故 B₁ 段(落坡岭水库至下苇甸电站段)为现状永定河山峡段河道主要渗漏段,这是由于 B₂ 段现状河道做了减渗处理,是形成该渗漏特征的外因。

4 结 论

(1)按时间顺序,3 次生态补水期间,永定河山峡段渗漏损失率逐渐减小,渗漏损失率范围为 20%~30%,即三家店拦河闸收水率为 70%~80%。

(2)受水文地质条件和河道减渗措施的综合影响,落坡岭水库至下苇甸电站段为现状永定河山峡段重点渗漏段,渗漏损失流量占山峡段渗漏损失流量的 60%;而下苇甸电站至三家店拦河闸段仅占山峡段的 10%,虽然该段也位于灰岩强渗漏段,但现状河道已做了减渗处理;官厅水库(坝下)至落坡岭水库段占山峡段的 30%。

参考文献(References):

[1] HOU L, PENG W Q, QU X D, et al. Runoff changes

based on dual factors in the upstream area of Yongding River basin[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 28(1): 143-152. DOI: 10. 15244/pjoes/81701.

[2] YU Y L, MA M Y, ZHENG F D, et al. Spatio-temporal variation and controlling factors of water quality in Yongding River replenished by reclaimed water in Beijing, north China[J]. Water, 2017, 9(7): 453. DOI: 10. 3390/w9070453.

[3] DAI D, SUN M D, LYU X B, et al. Evaluating water resource sustainability from the perspective of water resource carrying capacity: A case study of the Yongding River watershed in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(17): 21590-21603. DOI: 10. 1007/s11356-020-08259-5.

[4] HU H Z, MAO X M, YANG Q. Development of a groundwater flow and reactive solute transport model in the Yongding River alluvial fan, China[J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 13(2): 371-384. DOI: 10. 1007/s11707-018-0718-8.

[5] 李洁,孙寓姣,尹萌,等. 永定河山峡与城市段微生物群落结构季节变化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 257-264. (LI J, SUN Y J, YIN M, et al. Seasonal variations in microbial community structure in Yongding River[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural science), 2020, 56(2): 257-264. (in Chinese)) DOI: 10. 12202/j. 0476-0301. 2020066.

[6] WANG L, WANG Z J, KOIKE T, et al. The assessment of surface water resources for the semi-arid Yongding River basin from 1956 to 2000 and the impact of land use change[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(9): 1123-1132. DOI: 10. 1002/hyp. 7566.

[7] 龚秀英. 新中国成立后永定河北京段的治理分析[J]. 北京水务, 2020(1): 54-59. (GONG X Y. Analysis of the governance in Yongding River of Beijing since the founding of the People's Republic of China[J]. Beijing Water, 2020(1): 54-59. (in Chinese)) DOI: 10. 19671/

- j. 1673-4637. 2020. 01. 012.
- [8] 于森,王明玉,刘佳,等. 人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 626-634. (YU S, WANG M Y, LIU J, et al. Comprehensive assessment on ecosystem restoration of water-deficient rivers with artificial recharge[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2): 626-634. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2013. 02. 031.
- [9] DAI D, XU X Q, SUN M D, et al. Decrease of both river flow and quality aggravates water crisis in north China: A typical example of the upper Yongding River watershed[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(7). DOI: 10. 1007/s10661-020-08371-6.
- [10] 杨柠. 永定河引黄生态补水长效机制初步探索[J]. 水利发展研究, 2020, 20(2): 13-16. (YANG N. Preliminary study on the long-term mechanism of ecological water supplement for the Yellow River from Yongding River [J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(2): 13-16. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2020. 02. 004.
- [11] 胡立堂,郭建丽,张寿全,等. 永定河生态补水的地下水水位动态响应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 5-11. (HU L T, GUO J L, ZHANG S Q, et al. Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 5-11. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 202008027.
- [12] JIANG B, WONG C P, LU F, et al. Drivers of drying on the Yongding River in Beijing[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519 (Pt. A): 69-79. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 06. 033.
- [13] 顾斌杰. 永定河(北京段)生态修复及其效果评价[D]. 北京: 清华大学, 2016. (GU B J. Analysis and effect evaluation of the Yongding River(Beijing section) ecosystem restoration [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese))
- [14] 杨勇,谷健芬,李元春. 永定河长时放水条件下的入渗能力及影响范围分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(6): 29-35. (YANG Y, GU J F, LI Y C. Analysis on infiltration capacity and influence range of Yongding River under the condition of long-time discharge [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(6): 29-35. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; GCKC. 0. 2019-06-005.
- [15] 邢梦雅,陈星,周铿,等. 基于生态补水的水环境改善效果评价体系[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 64-66, 85. (XING M Y, CHEN X, ZHOU E, et al. Study on evaluation system of improvement of water environment based on ecological water supplement[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 64-66, 85. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2016. 01. 010.
- [16] 王强,叶维丽,刘雅玲,等. 中国北方城市内河水资源综合利用与调配方案研究:以胶州市城市内河为例[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(6): 96-100. (WANG Q, YE W L, LIU Y L, et al. Research on ecological water transfer and comprehensive utilization of water resource for urban rivers in northern China: Taking urban rivers in Jiaozhou as an example[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(6): 96-100. (in Chinese)) DOI: 10. 15985/j. cnki. 1001-3865. 2015. 06. 018.
- [17] 史贵君,全晓辉,汪银龙,等. 城市高度建成区河道生态补水治理方案研究[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 75-80, 134. (SHI G J, TONG X H, WANG Y L, et al. Study on ecological compensation scheme of rivers in urban built-up area[J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 75-80, 134. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2020. 04. 012.
- [18] HU H Z, MAO X M, YANG Q. Impacts of Yongding River ecological restoration on the groundwater environment: Scenario prediction[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-15. DOI: 10. 2136/vzj2018. 06. 0121.
- [19] 卢胜勇. 河北省山前平原区河道渗漏特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(A2): 114-118. (LU S Y. The characteristics of channel leakage in the mountain front plain area in Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(A2): 114-118. (in Chinese))
- [20] 梁永平,石东海,李纯纪,等. 岩溶渗漏河段来水量与渗漏量间关系测试研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 19-26. (LIANG Y P, SHI D H, LI C J, et al. Test and research on the relationship between runoff and leakage on a karst percolation zone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 19-26. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2011. 02. 004.
- [21] 朱仲元,刘廷玺,王清宇,等. 西辽河侧向渗漏研究[J]. 内蒙古水利, 1994(4): 47-51. (ZHU Z Y, LIU T X, WANG Q Y, et al. Study on lateral seepage of Xiliao River [J]. Inner Mongolia Water Resources, 1994(4): 47-51. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; NMSL. 0. 1994-04-015.
- [22] 王涛,贾洪彪,刘立志,等. 灵渠秦堤渗漏特征及防渗治理成效分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(3): 144-148. (WANG T, JIA H B, LIU L Z, et al. Analysis of seepage characteristic and seepage prevention effectiveness of the Qin Dike of the Ling Canal[J]. Yellow River, 2016, 38

- (3): 144-148. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2016. 03. 039.
- [23] 张广朋. 塔里木河干流上中游河床沉积物渗透系数及渗漏水量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. (ZHANG G P. Study on hydraulic conductivity and leakage water of riverbed in upper and middle stream of Tarim River [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. Y3101290.
- [24] 党跃军. 晋祠泉域汾河干流古交段河道渗漏分析研究[J]. 水文, 2016, 36(2): 62-66. (DANG Y J. Analysis of leakage in Gujiao Reach of Fenhe River in Jinci Spring basin [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(2): 62-66. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2016. 02. 012.
- [25] 高喆, 李凯, 周润田, 等. 黑河干流正义峡—狼心山段蒸发渗漏量计算[J]. 人民黄河, 2019, 41(7): 28-32. (GAO Z, LI K, ZHOU R T, et al. Study on segmentation of evaporation and leakage of Zhengyixia-Langxinshan reach of Heihe River [J]. Yellow River, 2019, 41(7): 28-32. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2019. 07. 007.
- [26] 崔文彦, 刘得银, 梁舒汀, 等. 永定河流域水生态环境质量综合评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(2): 23-28. (CUI W Y, LIU D Y, LIANG S T, et al. Comprehensive evaluation of aquatic ecological quality in the Yongding River basin [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(2): 23-28. (in Chinese)) DOI: 10. 15928/j. 1674-3075. 2020. 02. 004.
- [27] 王立明, 李文君. 永定河山区河流生态水量现状及亏缺原因分析[J]. 海河水利, 2017(2): 25-28. (WANG L M, LI W J. Analysis of the current situation and the reasons of the shortage of ecological water in Yongding River mountain area [J]. Haihe Water Resources, 2017(2): 25-28. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-7328. 2017. 02. 009.
- [28] 张士锋, 刘晓菲, 李瑞, 等. 永定河北京段生态需水量研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(2): 108-119. (ZHANG S F, LIU X F, LI R, et al. Study on environmental flow in Beijing section of Yongding River [J]. Journal of Water Resources Research, 2016, 5(2): 108-119. (in Chinese)) DOI: 10. 12677/JWRR. 2016. 52014.
- [29] 李朋杰. 永定河平原城市段生态需水及其水源优化配置研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. (LI P J. Study on optimal allocation of ecological water requirement and water source in the urban section of Yongding River plain [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2018. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. D01533821.
- [30] 门宝辉, 林春坤, 李智飞, 等. 永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 52-56, 92. (MEN B H, LIN C K, LI Z F, et al. Application of flow duration curve method in calculating instream minimum ecological water demand in Guanting Gorge of Yongding River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 52-56, 92. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2012. 02052.
- [31] 秦大军, 孙杰, 郭艺, 等. 永定河对北京西山岩溶水和玉泉山泉的影响[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 162-169. (QIN D J, SUN J, GUO Y, et al. Impacts of Yongding River on the Xishan karst aquifer and Yuquan Spring in Beijing, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 162-169. (in Chinese)) DOI: 10. 13544/j. cnki. j. 2019-006.
- [32] 北京市水务局. 城市河湖水情[Z]. <http://nsbd.swj.beijing.gov.cn/cshhsq.html>. (Beijing Municipal Bureau of Water Affairs. Water regime of urban rivers and lakes [Z]. <http://nsbd.swj.beijing.gov.cn/cshhsq.html>. (in Chinese))

Ecological water supplement leakage characteristics in the canyon section of Yongding River

WANG Biao, YAO Xuchu, SHI Weixin, WEI Hong, YUAN Honghu, SHAO Huifang

(Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: Yongding River is one of the seven major water systems in the Haihe River basin. The canyon section refers to the section from the dam of Guanting reservoir to the Sanjiadian barrage. Affected by the reduction of rainfall and the impoundment of the upstream Guanting reservoir, the runoff of Yongding River is reduced and the flow below Sanjiadian is cut off. To restore the ecological environment of Yongding River basin, the state and local governments have taken a series of measures such as ecological water replenishment. The ecological water replenishment has been carried out three times in 2019 and 2020 in Yongding River. The leakage characteristics of the canyon section of Yongding River are analyzed and summarized under the specific mode of the three ecological water replenishment, to provide preliminary basic support for optimizing the allocation of water resources and formulating a scientific and reasonable water replenishment scheme.

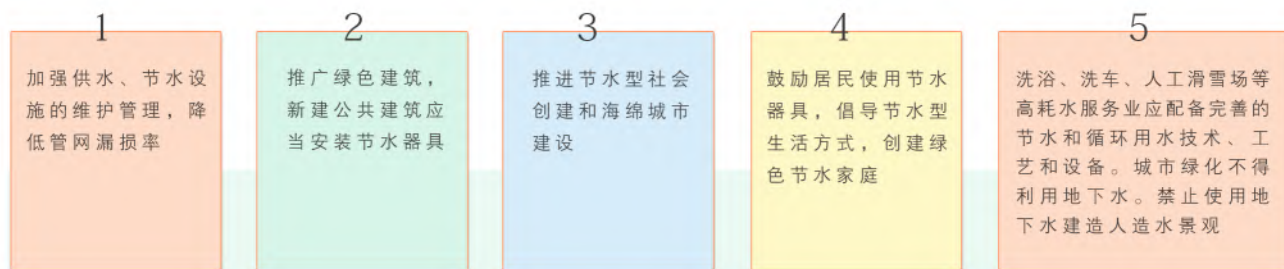
According to the different flow paths of ecological water replenishment and the discharge flow of the upstream section, the process of three ecological water replenishment is divided into different stages, and then the canyon section is further divided in-

to three small sections based on collected flow of hydrological observation stations. Using the flow balance method, the leakage loss rate and leakage loss flow of each small section in each stage are calculated, and the proportion of leakage in each small section in the canyon section is obtained to analyze the causes of the leakage characteristics.

Under the influence of different flow duration and discharge flow, the leakage loss flow and loss rate are different. The leakage loss rates of three water replenishments are 29.99%, 24.67% and 20.62% respectively, showing a gradually decreasing trend. There is no obvious correlation between the leakage loss flow of the channel in the gorge section and the discharge flow of the Guanting reservoir. The length from Guanting reservoir (under the dam) to Luopoling reservoir is about 70% of the canyon section and the leakage loss flow accounts for about 30%. The length from the Loupuling reservoir to the Sanjiadian barrage is about 30% of the canyon section and the leakage accounts for about 70%. The length of the section from Loupuling reservoir to Xiaweidian hydropower station is about 14% of the canyon section and the leakage accounts for about 60%. The length from Xiaweidian hydropower station to the Sanjiadian barrage is about 16% of the canyon section and the leakage accounts for about 10%.

The leakage loss rate of the three ecological recharges gradually decreases, ranging from 20% to 30%, i. e. the water recovery rate of the Sanjiadian barrage is 70%~80%. The section from Luopoling reservoir to Xiaweidian hydropower station is the main leakage section of the current canyon section of Yongding River, and its leakage loss flow accounts for about 60% of the canyon section. This section is located in the Cambrian Ordovician limestone stratum. Affected by the cutting of Jiulong Mountain-Xiangyu Daliang syncline and Yongding River fault, the karst caves and fissures in the bedrock are strongly developed, and there may be a "skylight" area in direct contact with the Quaternary groundwater, resulting in strong river permeability and large leakage loss flow, which constitute the internal cause of the hydrogeological conditions of the leakage characteristics. The external cause of the leakage characteristics is the river channel from Xiaweidian hydropower station to Sanjiadian barrage.

Key words: Yongding River; canyon section; ecological water supplement; leakage flow; leakage loss rate



——《河北省节约用水条例》城镇节水部分摘录