

张丹, 鲍军, 李想, 等. 考虑河流生态需水约束的调水规模研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 917-929. ZHANG D, BAO J, LI X, et al. Study on the water transfer scale considering the constraint of river ecological water demand[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 917-929. (in Chinese)

考虑河流生态需水约束的调水规模研究

张丹^{1,2}, 鲍军³, 李想^{1,2}, 尹冬勤⁴, 王芳², 许凤冉², 穆祥鹏²

(1. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 土木水利学院, 西宁 810016; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 水利部建设管理与质量安全中心, 北京 100038; 4. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:为减少以调水和蓄水工程为主体的区域水网建设对生态环境的影响,以大通河为研究对象,筛选 9 种水文学方法计算青石嘴、天堂、享堂 3 个关键控制断面 12 种不同的生态流量过程,基于过去 60 年径流时空分布以及水-能源-生态(water-energy-ecosystem, WEE)纽带模型,开展生态调度计算分析。结果显示:大通河干流河道内生态流量过程沿程增加,青石嘴、天堂、享堂 3 个断面年生态需水总量分别为 1.62 亿~14.54 亿 m³、2.46 亿~22.04 亿 m³ 和 2.88 亿~25.46 亿 m³,且均以 Q₉₀-Q₅₀ 方法为最大, Tennant(10%)方法为最小;在不同生态需水约束下,引大济湟工程调水规模介于 2.25 亿~8.81 亿 m³,占流域多年平均径流量的 7.8%~30.5%;生态需水保障率整体表现为非汛期高于汛期,上游高于下游。兼顾生态环境保护与经济社会发展双重目标,为合理确定调水规模提供技术支撑。

关键词:生态流量;水文学方法;水-能源-生态纽带;调水规模;大通河

中图分类号: TV697.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0089

以引调水和调蓄工程为主体的区域水网,可提升水资源配置能力,改变水资源时空格局和社会经济发展布局,同时不可避免地会影响调出河流的生态水文过程。在生态保护与高质量发展背景下,开展河流生态需水量的合理估算以及引调水和调蓄工程的优化调度研究,确保水源区生态系统质量和稳定性不降级,实现兼顾经济社会效益和生态环境效益目标,具有极其重要的指导意义和应用价值^[1-2]。

河湖生态流量是维系河湖生态功能、控制水资源开发强度的基础性指标^[3]。生态流量的计算方法主要分为水文学方法、水力学方法、栖息地模拟方法和综合方法四大类^[4]。在确定河流生态需水时,一般需要通过开展文献调研和现场调查,明确关键控制断面、重点生态保护对象、生态习性、主要栖息地、需水规律(流速、水深)等信息。受空间、时间、数据有效性或可获性等众多因素限制,不同生态流量计算方法或多或少都存在一定局限性,不具有普遍适用性^[5-6]。其中,水文学方法以监测流量资

料为基础开展计算,通常选定某一时段内天然径流量的某一比例作为生态流量值,具有数据易获取、计算便捷等优势,因而得到广泛应用^[3-4]。不同的水文学方法适用条件不同,计算结果差异很大。即使采用同一种方法,选择不同的数据系列、步长、参数等也会导致计算结果不同。再加上我国河流水系众多,水资源禀赋、生态环境等具有空间异质性,同一条河流不同河段生态流量也呈现较大差异^[7]。目前,对不同生态流量方法计算的结果尚缺少公认的判断标准。

一些学者针对生态调度或调水规模等开展了研究。例如:张泽中等^[8]建立了权衡受水区生态和环境水安全的调水规模计算模型。常文娟等^[9]构建了考虑流域节水、调水的水资源承载能力评判模型,以汉江流域为例,对不同水平年、不同调水规模等情景进行了综合评判;刘寒青等^[10]基于水资源承载力评估以及系统可持续性,对南水北调进京规模进行了分析。白涛等^[11]以官厅水库下游减水河段为

收稿日期: 2023-05-18 修回日期: 2023-09-06 网络出版时间: 2023-09-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230925.1646.008>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243232; U2243239); 国家社会科学基金项目(22BJY066); 国家重点实验室开放基金项目(2023-KF-02); 青海省基础研究计划项目(2022-ZJ-933Q)

作者简介: 张丹(1999—),女,陕西西安人,主要从事河流生态需水及水库生态调度研究。E-mail: zhangdan289@163.com

通信作者: 李想(1986—),男,河南郑州人,正高级工程师,博士,主要从事水资源规划管理研究。E-mail: lixiang@iwhr.com

例,采用频率法计算生态流量,分析了外调水源补给对发电和生态产生的影响;游进军等^[12]构建了二层结构流域生态调度模型,以松花江流域为例,在流域层面水量总体配置基础上对水库进行优化调度。

近年来,水-粮食-能源需求的大幅提升加剧了生态系统的脆弱性,环境压力增加产生的系统外部性反过来又阻碍了水-能源-粮食安全^[13-15]。在水资源领域,纽带研究进一步补充和丰富了水资源综合管理理念,改进了水库调度管理方式,表现为水库调度由追求单用水部门效益最大化转变为多用水部门效益均衡、由局部治理向综合协同治理转型^[5,14]。目前,大多数研究围绕水利工程实施后的经济效益与生态、社会效益之间的权衡展开,把生物多样性的损害或生态需水量的计算以目标函数或者约束条件形式集成在以水-能纽带作为范式构建的水库多目标优化调度模型中,进而计算分析水-能源-生态互馈响应关系^[15]。由于生态流量约束不同,对纽带系统的影响也存在差异,为此本文采用多种方法计算生态流量避免单一方法的不确定性影响^[16-17]。

本文以大通河为研究对象,在明晰其生态水文条件、水利工程特征及水资源利用形势的基础上,筛选 9 种广泛应用的水文学方法计算青石嘴、天堂

和享堂 3 个关键控制断面的生态流量过程,将其纳入大通河流域水资源统一配置,采用水-能源-生态(water-energy-ecosystem, WEE)纽带模型^[5]对比分析不同生态流量过程下引调水和调蓄工程的运行方式、调水规模以及生态流量保障情况。基于本文结果,综合分析河流生态保障、梯级水力发电、水资源利用等优化目标,可为合理确定水资源开发利用上限、调水工程规模及开展环境影响评价等提供技术支撑,达到兼顾生态环境保护与经济社会发展的双重目标。

1 研究区域

大通河为湟水一级支流、黄河二级支流,发源于青海省天峻县托勒南山,流经青海和甘肃两省,在青海省民和县享堂镇附近注入湟水,见图 1。大通河干流全长约 574 km,落差 3 085 m,平均比降 4.55%。大通河流域面积约 1.51 万 km²(36°30' N~38°25' N, 98°30' E~103°15' E),其中,约 86% 的流域面积分布在青海省东北部,另外 80% 以上的流域面积处于海拔 3 000 m 以上,为典型高寒流域。流域径流以冰川融雪和降水为主,多年平均降水量 370~480 mm,降水主要集中在 6 月至 9 月,占全年降水量的 70% 以上,河流冰冻期为 12 月至次年 3 月。

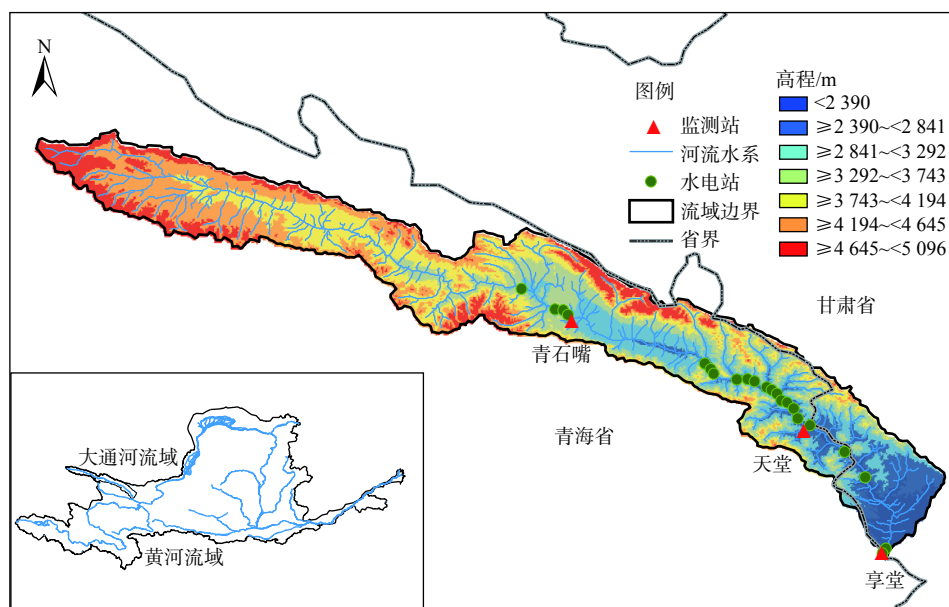


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

大通河流域水资源和水能资源丰富。区域内 3 项调水工程极大程度上保障了西宁—兰州城市群经济社会发展,其中引大(大通河)入秦(秦王川)工程于 1994 年通水,规划年引水量 4.43 亿 m³;引硫(硫磺沟)济金(金昌市)工程于 2003 年通水,规划年

引水量 0.4 亿 m³;引大(大通河)济湟(湟水)工程最初规划年引水量 7.50 亿 m³,其中石头峡水库、调水总干渠、黑泉水库、北干渠一期和二期五大子项目已相继建成,预期西干渠及其配套工程将于近期全面建成^[18-21]。另外,大通河干流已建 22 座水电站,

包括纳子峡和石头峡两座调蓄水库,干流梯级理论蕴藏量约 65.83 万 kW。大通河水资源系统概化见图 2,包括已建 3 项跨流域调水工程,22 座干流梯级水电站,青石嘴、天堂、享堂 3 个关键控制断面,青石嘴、天堂、享堂 3 个关键控制断面。

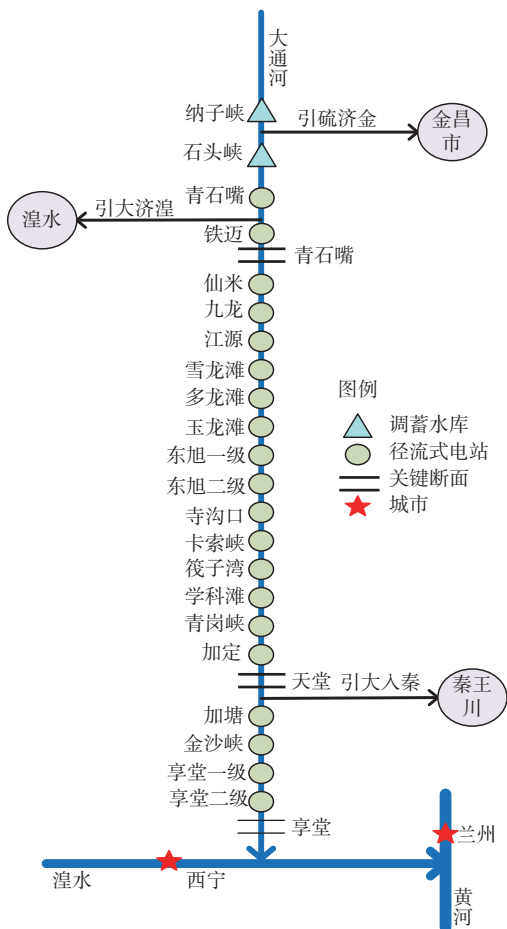


图 2 大通河流域水资源系统概化

Fig. 2 Schematic diagram of the water resource system of Datong River basin

大通河流域涉及黄河上游水源涵养区、祁连山国家公园等许多环境敏感区,生态保护意义十分突出。河流内拥有拟鲑高原鳅、厚唇裸重唇鱼、花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼等重点保护鱼类,它们主要生活在大通河源区及中上游。其中拟鲑高原鳅列入《中国濒危动物红皮书》和《中国物种红色名录》中易危类鱼类,厚唇裸重唇鱼列入《中国物种红色名录》中濒危类鱼类^[22]。随着对大通河水资源和水能资源开发利用,包括大规模调水以及梯级、引水式水电工程开发等,流域内出现了系列生态环境问题,造成了河流生境阻隔、流水生境压缩、水生生物种类减少、资源量下降^[5,21]。胡红云^[23]和杨玉霞等^[24]在 2008 年和 2009 年开展 3 次水生生态系统采样监测调查发现:大通河浮游动植物和底栖动物种类基本稳定,数量有所减少;4 种重点保护鱼类在 3 次

调查中捕捉数量和质量均呈现下降趋势,由于坝下泄水量减少,下游河道鱼类栖息地萎缩,喜流水生活和需流水刺激产卵的厚唇裸重唇鱼、花斑裸鲤和黄河裸裂尻鱼等向下游和支流迁移^[22-25]。因此,亟须实施工程和非工程措施维系河流生态系统稳定性。

2 数据方法

技术路线见图 3。在明晰大通河生态水文条件、水利工程特征及水资源利用形势基础上,确定关键控制断面,筛选多种水文学方法计算生态流量过程,通过构建考虑水资源利用、梯级水力发电、河流生态保障等目标的 WEE 纽带模型^[5],探讨不同生态流量方案下多目标互馈转化关系、引调水和调蓄工程运行方式以及生态流量保障率,基于综合研判确定流域水资源开发上限及调水工程阈值。

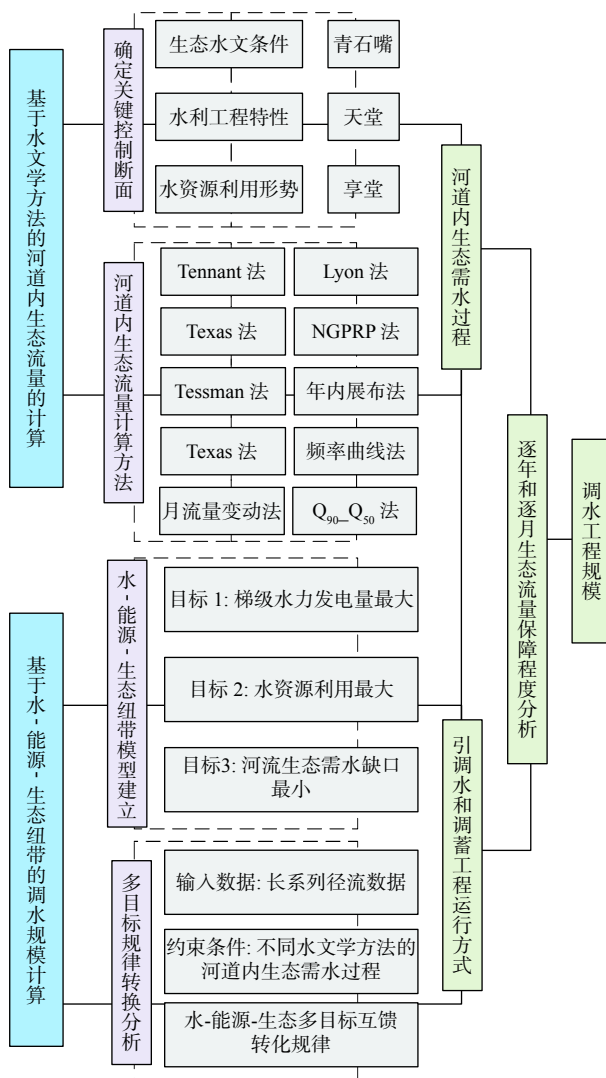


图 3 技术路线

Fig. 3 Methodology framework

2.1 水-能源-生态 (WEE) 纽带模型

大通河干流引调水和调蓄工程运行涉及水力发

电、跨流域调水、本地水利用、生态保障等多个调度目标,为识别不同目标间的互馈响应关系,构建 WEE 模型。为简化计算,这里对各目标进行归一化处理,通过赋予不同权重将多目标问题转化为单目标问题。目标函数数学表达式为

$$\max f = \sum_{k=1}^K \omega'_k f_k / f_{k,\max} \quad (1)$$

式中: k 为目标索引, $k \in [1, K]$; f_k 和 $f_{k,\max}$ 分别为 k 的函数值和最大函数值; ω'_k 为 k 的权重系数。按重要性递增排序,依次考虑了梯级水力发电量最大、水资源利用量最大和河流生态需水量缺口最小 3 个目标,权重分别设置为 1 : 2 : 3,各子目标的计算表达式如下。

梯级水力发电量最大,表达式为

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n E_i(t) \quad (2)$$

水资源利用量最大,表达式为

$$\max f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \omega''_j W_j(t) \quad (3)$$

河流生态需水量缺口最小,表达式为

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \sigma_i(t) \quad (4)$$

式中: t 为时段索引, $t \in [1, T]$; i 为水库索引, $i \in [1, n]$, $n = 22$; $E_i(t)$ 为水库 i 的水电站在时段 t 的发电量, 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$; j 为引水工程(包括本流域取水或跨流域调水)索引, $j \in [1, J]$, $J = 6$; $W_j(t)$ 为引水工程 j 在时段 t 的调水流量, m^3/s ; ω''_j 为引水工程 j 的权重系数,这里考虑本流域取水优先级大于跨流域调水,且引疏济金和引大入秦投运多年,而引大济湟调水规模及方式仍有待论证,为此本流域取水、引疏济金和引大入秦工程调水、引大济湟工程调水权重分别设置为 3 : 2 : 1; $\sigma_i(t)$ 为水库在时段 t 的下泄流量不满足最小下泄流量的部分, m^3/s 。

约束条件主要包括水量平衡约束、水库始末库容约束、水库库容约束、水库下泄流量约束、水电站发电流量约束、水电站出力约束和引水流量约束。

水量平衡约束表达式为

$$S_i(t+1) = S_i(t) + [I_i(t) - R_i(t) - W_j(t)]\Delta t - E_{v_i}(t) \quad (5)$$

式中: $S_i(t)$ 和 $S_i(t+1)$ 为水库 i 在时段 t 初始和终止时刻的库容, 亿 m^3 ; $I_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 的入库流量, m^3/s ; $R_i(t)$ 为水库 i 在时段 t 的下泄流量, m^3/s ; $E_{v_i}(t)$ 为水库 i 在时段 t 的蒸发量, 亿 m^3 。

水库始末库容约束表达式为

$$S_i(1) = S_{i,\text{initial}} \quad (6)$$

$$S_i(T+1) \geq S_{i,\text{final}} \quad (7)$$

式中: $S_{i,\text{initial}}$ 为水库 i 在调度期初的库容, 亿 m^3 ; $S_{i,\text{final}}$ 为水库 i 在调度期末的期望库容, 亿 m^3 。

水库库容约束表达式为

$$S_{i,\min}(t+1) \leq S_i(t+1) \leq S_{i,\max}(t+1) \quad (8)$$

式中: $S_{i,\min}(t+1)$ 和 $S_{i,\max}(t+1)$ 分别为水库 i 在时段终止时刻的最大和最小库容, 亿 m^3 。

水库下泄流量约束表达式为

$$R_i(t) \leq R_{i,\max}(t) \quad (9)$$

$$R_i(t) + \sigma_i(t) \geq R_{i,\min}(t) \quad (10)$$

式中: $R_{i,\max}(t)$ 和 $R_{i,\min}(t)$ 分别为水库 i 在时段 t 的最大和最小下泄流量, m^3/s 。

水电站发电流量约束表达式为

$$0 \leq R'_i(t) \leq R'_{i,\max}(t) \quad (11)$$

式中: $R'_{i,\max}(t)$ 为水库 i 的水电站在时段 t 的最大发电流量, m^3/s 。

水电站出力约束,表达式为

$$0 \leq N_i(t) \leq N_{i,\max}(t) \quad (12)$$

式中: $N_i(t)$ 为水库 i 的水电站在时段 t 的出力, 万 kW ; $N_{i,\max}(t)$ 为水库 i 的水电站在时段 t 的装机容量, 万 kW 。

引水流量约束表达式为

$$0 \leq W_j(t) \leq W_{j,\max}(t) \quad (13)$$

式中: $W_{j,\max}(t)$ 为引水工程 j 在时段 t 的最大引水能力或规划引水流量, m^3/s 。

2.2 基于水文学方法的河流生态需水

为避免单一方法的不确定性,采用国内外文献广泛使用的以及国内标准《河湖生态环境需水计算规范(SL/Z 712—2021)》和《水电工程生态流量计算规范(NB/T 35091—2016)》颁布的若干种水文学方法开展河道内生态流量过程计算,见表 1。考虑河流在不同河段的地质条件、沿程水量、生态环境功能等方面存在差异^[6,26],根据大通河不同河段特点和实际需要,以青石嘴、天堂和享堂 3 个水文站作为关键控制断面,选择 1956—2016 年天然月径流数据作为生态流量计算基础。

2.3 多情景计算分析

采用 9 种水文学方法计算得到 12 种不同的生态流量过程(见表 2),将其作为紧邻断面的上游电站下泄流量控制约束,把 1956—2016 水文年(5 月至次年 4 月)大通河流域径流资料整理为旬步长数据作为 WEE 纽带模型输入条件,采用 LINGO 非线性规划的 Multi-start 求解器进行求解,以 12 种不同生态流量过程作为 12 种不同生态约束计算分析水力发电、水资源利用、生态保护 3 个目标间的互馈响应关系。

表1 基于水文学的生态流量确定方法

Tab. 1 Description of the hydrologically-based environmental flow methods used in the study

方法名称	方法描述	文献
Tennant	取多年平均流量的百分比作为河道内生态流量。一般认为,多年平均流量的10%能够维持水生生物短期生存,30%能够为大多数水生生物提供较好的栖息条件,60%能够为大多数水生生物提供最佳的栖息条件。本文以月为时间尺度,基于Tennant方法(10%、30%和60%)计算逐月生态流量过程。	[27-28]
Texas	考虑了不同生物特性和区域水文特征条件下的月需水量,用长系列天然月径流数据构建各月水文频率曲线,取50%频率对应流量的20%作为生态流量,一般最少数据序列长度为20~30年。	[29-30]
Tessman	考虑不同时段水量特点:若多年月均流量 $\leq 0.4 \times$ 多年年平均流量,取多年月均流量作为当月生态流量;若多年月均流量 $> 0.4 \times$ 多年年平均流量,取 $0.4 \times$ 多年月均流量作为当月生态流量;若 $0.4 \times$ 多年年平均流量 $<$ 多年月均流量 \leq 多年年平均流量,取 $0.4 \times$ 多年年平均流量作为当月生态流量。	[4]、[31]
月流量变动	基于Tessman法改进,多用于全球尺度生态流量的核定:当多年月均流量 $\leq 0.4 \times$ 多年年平均流量,取 $0.5 \times$ 多年月均流量作为生态流量;当多年月均流量 $> 0.8 \times$ 多年年平均流量,取 $0.3 \times$ 多年月均流量作为生态流量;当 $0.4 \times$ 多年年平均流量 $<$ 多年月均流量 $\leq 0.8 \times$ 多年年平均流量,取 $0.45 \times$ 多年年平均流量作为生态流量。	[4]、[31]
Lyon	采用中位数来代替河流多年月均流量,避免了极端值的影响:当多年月均流量 \leq 多年年平均流量,取 $0.4 \times$ 多年月中值流量作为生态流量;当多年月均流量 $> 0.8 \times$ 多年年平均流量,取 $0.5 \times$ 多年月中值流量作为生态流量。	[7]、[32]
NGPRP	综合气候状况以及频率因素,将水文年按照枯、平、丰水年进行分组,取平水年组各月90%频率对应流量分别作为逐月的生态流量。	[4]、[29]
年内展布	取年平均流量的最小值与多年年平均流量的比值作为同期均值比,再与多年月均流量相乘得到月生态流量。	[33]、[37]
频率曲线	用长系列天然月径流数据构建各月水文频率曲线,一般取频率90%或95%对应的月均流量作为对应月份的生态流量。	[4]、[33]
Q ₉₀ _Q ₅₀	将全年分为高流量和低流量季节并基于水文自然频率确定生态流量:当多年月均流量 \leq 多年年平均流量时,构建对应月份水文频率曲线,取频率90%的流量作为生态流量;当多年月均流量 $>$ 多年年平均流量时,取频率50%的月均流量作为生态流量。	[7]、[34-35]

表2 关键控制断面河流生态需水量占比

Tab. 2 Percentage of river ecological water demand at the three control stations

方案编号	生态流量计算方法	关键控制断面	非汛期生态需水量占年生态需水量比例/%	汛期生态需水量占年生态需水量比例/%	年生态需水量/亿m ³	年生态需水量占径流量比例/%	方案编号	生态流量计算方法	关键控制断面	非汛期生态需水量占年生态需水量比例/%	汛期生态需水量占年生态需水量比例/%	年生态需水量/亿m ³	年生态需水量占径流量比例/%
1	Tennant (10%)	青	14.5	85.5	1.62	10.0	7	Lyon	青	10.6	89.4	7.30	45.3
		天	19.6	80.4	2.46	10.0			天	15.2	84.8	11.52	46.8
		享	20.2	79.8	2.88	10.0			享	16.0	84.0	13.20	45.6
2	Tennant (30%)	青	14.5	85.5	4.87	30.0	8	NGPRP	青	13.3	86.7	10.13	62.9
		天	19.6	80.4	7.37	30.0			天	20.6	79.4	16.30	66.3
		享	20.2	79.8	8.64	30.0			享	22.1	77.9	18.66	64.5
3	Tennant (60%)	青	14.5	85.5	9.74	60.0	9	年内展布	青	12.8	87.3	4.28	26.6
		天	19.6	80.4	14.74	60.0			天	18.5	81.5	8.78	35.7
		享	20.2	79.8	17.27	60.0			享	19.3	80.7	9.94	34.4
4	Texas	青	13.2	86.8	2.90	18.0	10	频率曲线(90%)	青	16.8	83.2	10.30	64.0
		天	18.9	81.1	4.61	18.8			天	22.0	78.0	15.12	61.4
		享	19.9	80.1	5.28	18.3			享	23.2	76.8	17.83	61.7
5	Tessman	青	24.6	75.4	7.55	46.9	11	频率曲线(95%)	青	18.9	81.1	9.22	57.2
		天	32.4	67.7	11.79	47.9			天	22.4	77.6	13.47	54.7
		享	33.4	66.6	13.88	48.0			享	24.0	76.0	16.01	55.4
6	月流量变动	青	23.0	77.0	5.51	34.3	12	Q ₉₀ _Q ₅₀	青	8.9	91.1	14.54	90.3
		天	32.8	67.3	8.96	36.4			天	15.1	84.9	22.04	89.6
		享	33.6	66.5	10.48	36.3			享	16.9	83.1	25.46	88.0

注:非汛期指11月—次年4月,汛期指5—10月。

为评价生态调度效果,采用生态流量保障率进行量化表征^[36-37],其定义为在一定时期内河道关键控制断面调度后的流量大于生态需水阈值的时段数与总时段数的比值。本文考虑不同时间尺度,其中生态流量保障率,按年份逐月进行统计,计算生态流量得到保障的月份数与年总月份数(即12月)的比值;月生态流量保障率,按月份逐年进行统计,计算该月份中生态流量得到保障的年份数与总年份数(即60年)的比值。

3 结果分析

3.1 河流生态需水

青石嘴、天堂和享堂3个断面月均流量及9种方法计算的12种不同生态流量过程见图4,年生态需水总量及非汛期和汛期占比情况见表2,可以看出:青石嘴、天堂和享堂3个断面年生态水量分别介于1.62亿~14.54亿 m^3 、2.46亿~22.04亿 m^3 和2.88亿~25.46亿 m^3 ,分别占多年平均径流量的10.0%~90.3%、10%~89.6%和10%~88.0%;不同生态流量过程均能反映出不同断面年内流量变化特征,但由于计算标准和比例不同,不同方法计算结果存在一定差异,且同一方法在不同断面计算结果也存在差异。青石嘴断面生态流量从大到小依次为 $Q_{90_Q_{50}}$ 法>频率曲线法(90%)>NGPRP法>Tennant法(60%)>频率曲线法(95%)>Tessman法>Lyon法>月流量变动法>Tennant法(30%)>年内展布法>Texas法>Tennant法(10%);天堂和享堂断面生态流量从大到小依次为 $Q_{90_Q_{50}}$ 法>NGPRP法>频率曲线法(90%)>Tennant法(60%)>频率曲线法(95%)>Tessman法>Lyon法>月流量变动法>年内展布法>Tennant法(30%)>Texas法>Tennant法(10%);对于任一断面,汛期(5—10月)生态需水量占比大于非汛期(11月—次年4月)生态需水量占比,不同生态流量过程中青石嘴、天堂、享堂3个断面汛期占比分别介于77.0%~91.1%、67.3%~84.9%和66.6%~84.0%,其中,Tessman法和月流量变动法在汛期和非汛期差异最小, $Q_{90_Q_{50}}$ 法和Lyon法在汛期和非汛期差异最为明显,这说明相较于其他方法, $Q_{90_Q_{50}}$ 法和Lyon法在反映流量变化特征方面具有更高的敏感度;对于任一计算方法,越靠近下游断面,非汛期生态需水量占比越高;青石嘴断面生态流量过程上包络线由Tessman法(1—3月)、月流量变动法(4月)、 $Q_{90_Q_{50}}$ 法(5—10月)和频率曲线法(95%)(11—12月)计算

结果构成;天堂和享堂断面生态流量过程上包络线由Tessman法(1—3月和12月)、 $Q_{90_Q_{50}}$ 法(5—10月)和月流量变动法(4月和11月)计算结果构成;3个断面生态流量过程下包络线均由Tennant法(10%)计算结果构成。

3.2 调水工程运行方式及调水规模

不同方案下大通河流域多年平均水资源利用量见图5,引大济湟多年平均引水过程见图6。可以看出:不同方案下大通河流域多年平均水资源利用量介于8.84亿~15.46亿 m^3 ,各方案由大到小依次为方案1>方案4>方案9>方案2>方案6>方案7>方案5>方案11>方案3>方案8>方案10>方案12,方案1水资源利用效益最大,方案12水资源利用效益最小,流域水资源利用量与年生态需水量呈明显的负相关关系;3项引大工程多年平均外调水量介于6.66亿~13.16亿 m^3 ,占流域多年平均径流量的23.1%~45.6%,其中引大济湟多年平均外调水量介于2.25亿~8.81亿 m^3 ,占流域多年平均径流量的7.8%~30.5%,方案1引大济湟工程调水量最大,方案12引大济湟工程调水量最小;不同方案下引大济湟工程的引水过程有一定差异,引水量级自5月开始逐步增加,最终达到或保持在最大引水能力,避免了调度期初大通河无水可蓄造成降低生态用水和外调水保证率以及水能利用效率低的情况发生;随着年生态需水量的增加,引大济湟工程引水增加过程变缓且引水规模有所下降。

3.3 调蓄工程运行方式

不同方案下大通河梯级多年平均发电量见图7,调蓄工程多年平均坝前水位和发电量过程见图8,可以看出:不同方案下大通河梯级多年平均发电量介于13.13亿~18.03亿 $kW\cdot h$,各方案发电量由大到小依次为方案10>方案8>方案12>方案3>方案11>方案5>方案7>方案6>方案9>方案2>方案4>方案1,方案10水能利用效益最大,方案1水能利用效益最小,梯级发电量与年生态需水量呈明显的正相关关系;不同方案下大通河梯级发电量主要集中在汛期(5—10月),占多年平均梯级发电的69.7%~82.7%;不同方案下纳子峡和石头峡水库水位在年内经历一次明显的蓄放过程,当年生态需水量较小时(如方案1、方案4),纳子峡和石头峡在汛末期基本可以蓄满,而当年生态需水量较大时(如方案8、方案10、方案12),一定程度上影响了纳子峡和石头峡的蓄满率,降低了非汛期水资源供给保障水平。

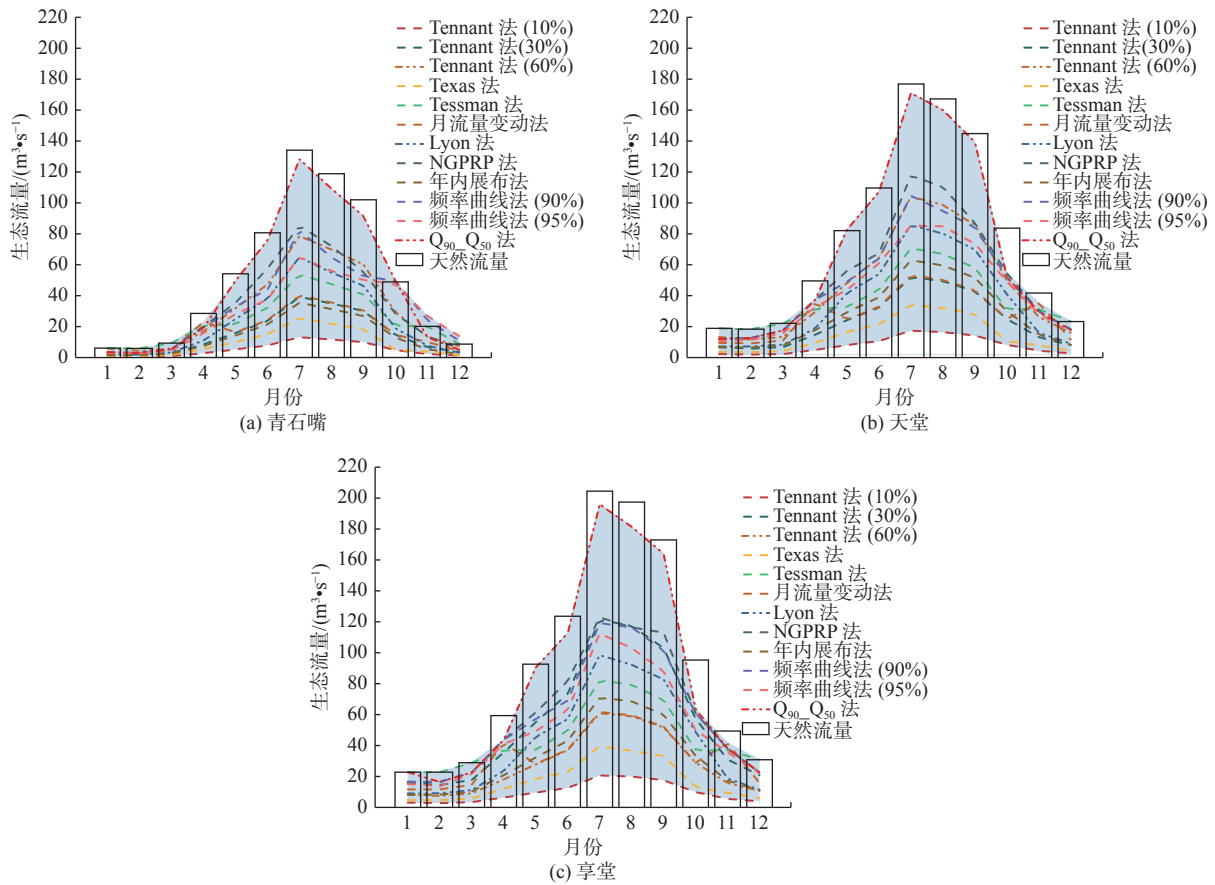


图4 不同水文学方法生态流量过程对比

Fig. 4 Comparison of environmental flows of different hydrologically-based methods

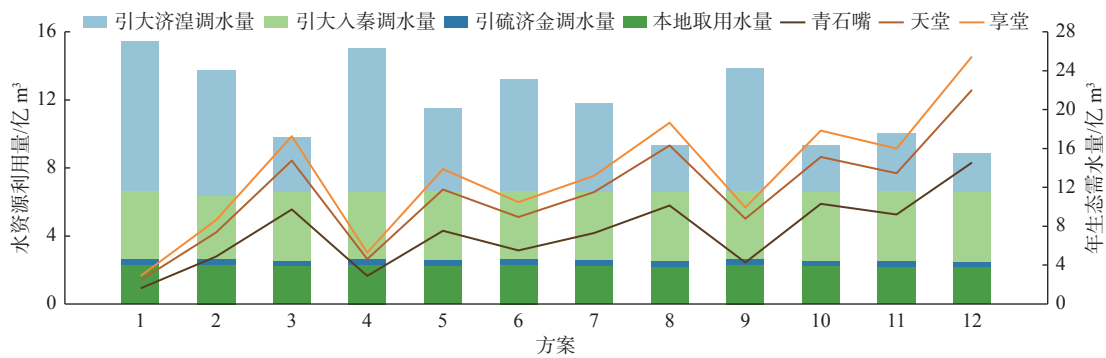


图5 不同方案下大通河流域多年平均水资源利用量

Fig. 5 Annual mean water resources utilization of the Datong River under different scenarios

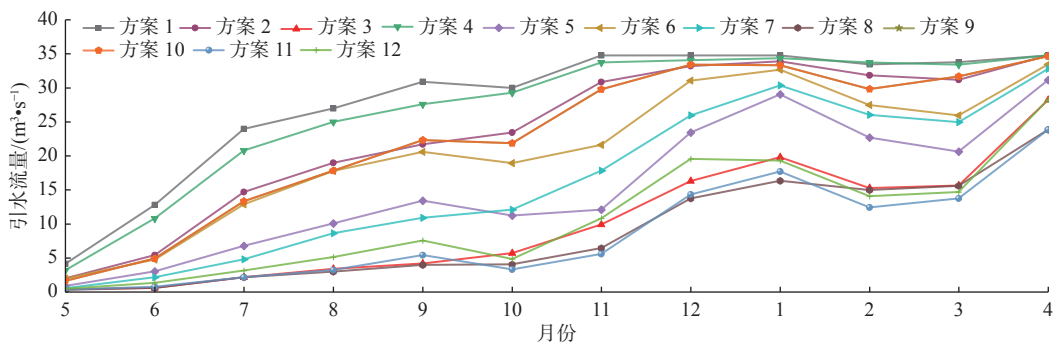


图6 不同方案下引大济湟多年平均引水过程

Fig. 6 Annual mean water transfer amount of the water diversion project from the Datong River to the Huangshui basin under different scenarios

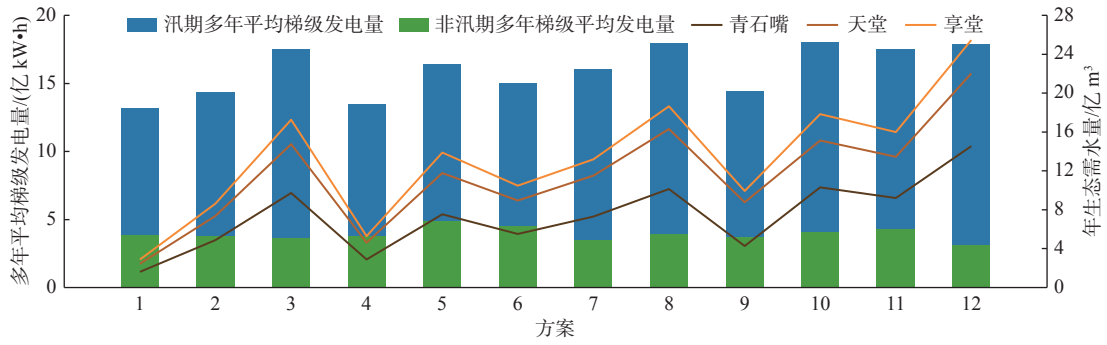


图 7 不同方案下大通河梯级多年平均发电量

Fig. 7 Annual mean power generation of the cascaded hydropower stations on the Datong River under different scenarios

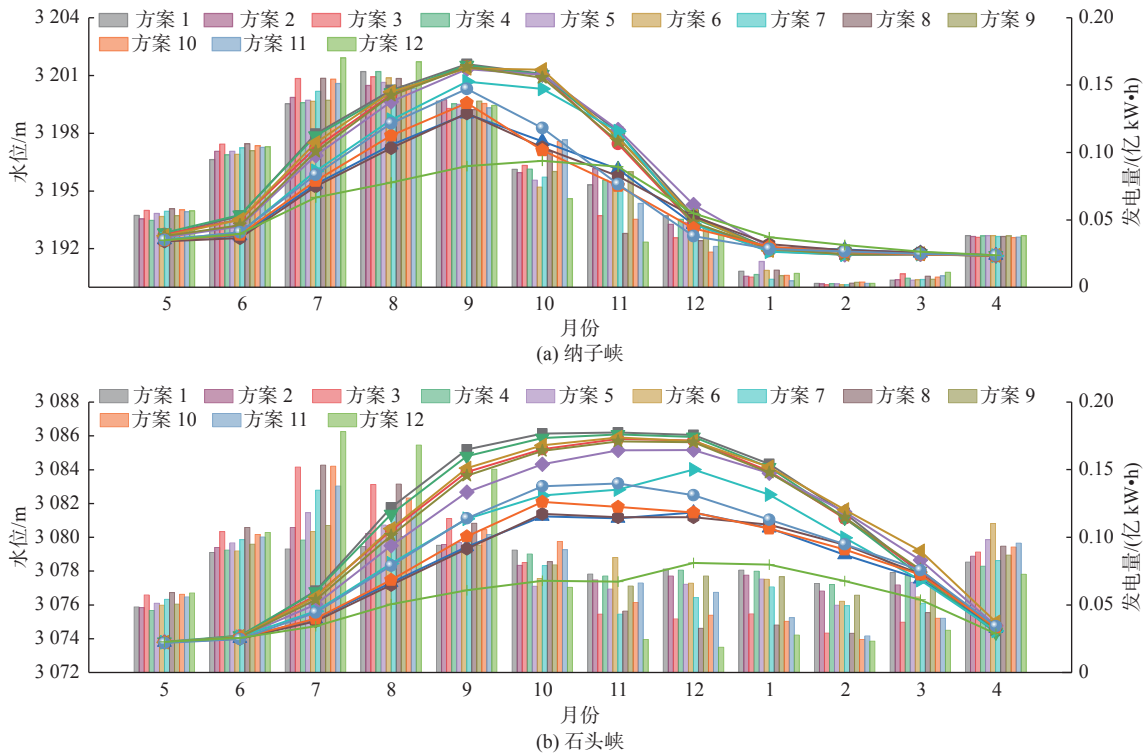


图 8 不同方案下纳子峡和石头峡多年平均坝前水位及发电量过程

Fig. 8 Annual mean fore-bay water level and power generation of the Nazixia and Shitouxia hydropower plants under different scenarios

3.4 生态流量保障

不同方案下关键控制断面逐年和逐月生态流量保障率见图 9 和图 10, 可以看出: 就逐年生态流量保障率而言, 青石嘴和天堂断面介于 25%~100%, 享堂断面介于 0~100%, 方案 1 和方案 4 下各控制断面逐年生态流量保障率表现最佳, 达到 100%, 其他方案下各控制断面逐年生态流量保障率呈明显波动变化, 其中方案 12 下各控制断面逐年生态流量保障率波动最大; 就逐月生态流量保障率而言, 方案 1 和方案 4 下各控制断面逐月生态流量保障率表现最佳, 达到 100%, 除方案 12 以外, 其他方案下各控制断面在汛期 5—8 月生态流量保障率较低, 在非汛期 1—4 月及 9—11 月生态流量保障率较高; 无论是逐年或是逐月生态流量保障率, 都表现为上游大于下

游, 即青石嘴>天堂>享堂; 不同生态流量过程对应不同生境, 生态等级要求越高, 所需生态流量越大, 生态流量保障率越低。

4 讨论

一般认为, 当河道内生态流量不小于天然流量的 10% 时, 河道水生态及两岸陆生生态能够发挥正常功能^[38], 由 Tennant 法(10%)构成生态流量过程下包络线, 符合这一结论, 而 $Q_{90}\text{-}Q_{50}$ 法计算结果远大于其他方法的计算结果, 这与吴昌贤等^[35]、Pastor 等^[32] 评估生态流量时得到的结论一致。郑小康等^[39] 确定了生态环境等级与 Tennant 法的比例关系, 认为大通河年生态需水占多年平均流量的 15%~20% 可满足流域水生生物的最小流量需求, 占

多年平均流量的 40% 以上可为流域水生生物提供最佳的生存条件,基于此得到尕大滩、天堂和享堂断面年生态需水量分别为 0.35 亿~4.68 亿 m^3 、0.68 亿~5.97 亿 m^3 和 0.73 亿~6.82 亿 m^3 。李云成等^[21]分析了大通河流量与水深、水面宽、流速等之间关系,考虑了需水对象生长繁殖对径流条件的要求,得到尕大滩、天堂和享堂断面年生态需水量分别为 6.39 亿、

10.28 亿和 12.23 亿 m^3 。此外,有关单位对引大工程调水规模进行的研究论证^[40-42],其中,大通河总可调水量介于 7.5 亿~14.43 亿 m^3 ,引大济湟工程可调水量介于 2.56 亿~8.16 亿 m^3 。本文得到的 3 项工程调水规模介于 6.66 亿~13.16 亿 m^3 ,引大济湟工程可调水量介于 2.25 亿~8.81 亿 m^3 ,与相关研究论证结果相比量级基本一致。

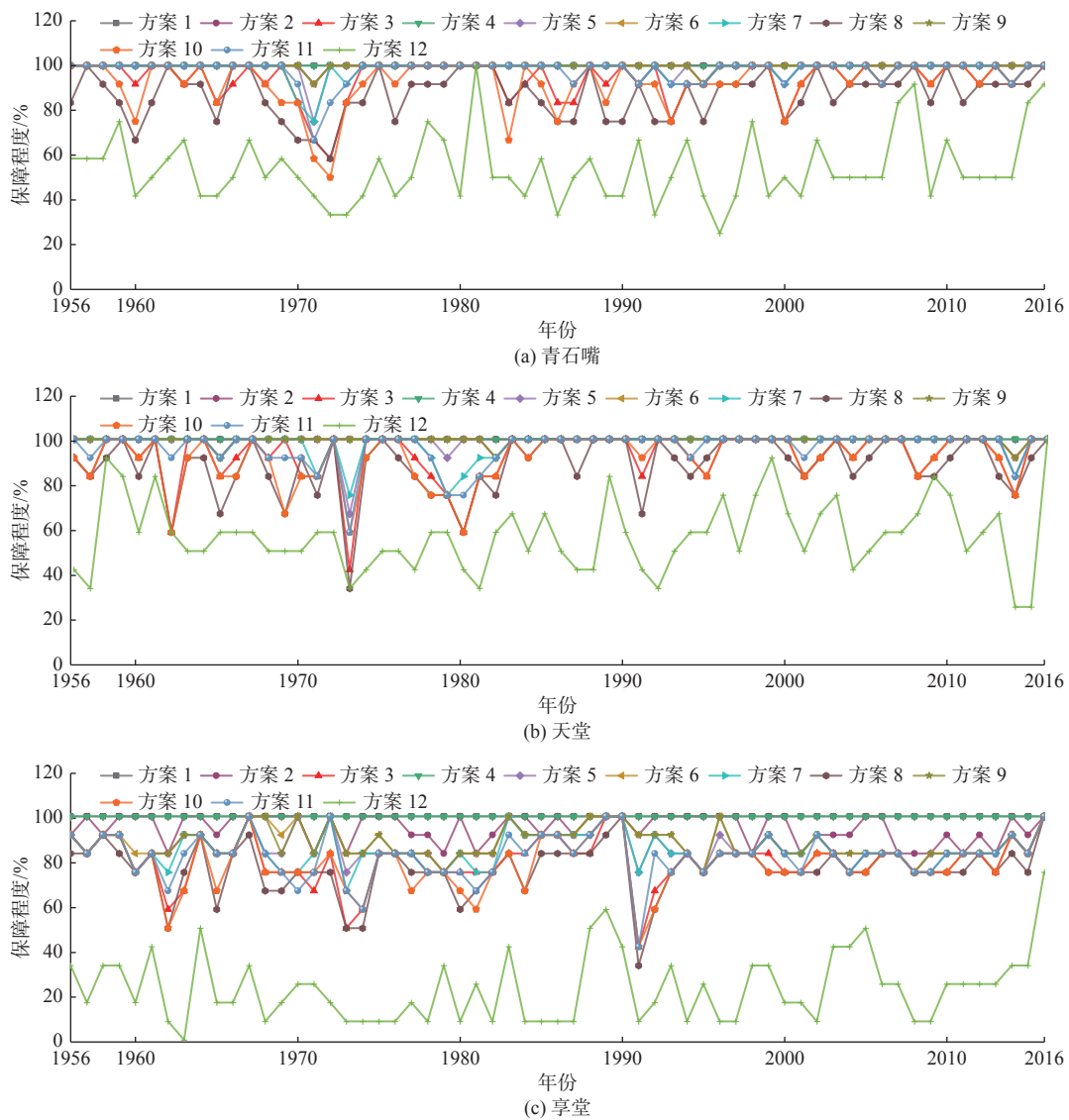


图9 不同方案下关键控制断面逐年生态流量保障率

Fig. 9 Annual guarantee rate of river ecological water demand at the three control stations under different scenarios

未来还需深入开展以下几方面研究:一是本文通过 9 种水文学方法计算了大通河干流青石嘴、天堂和享堂 3 个断面 12 种不同的生态流量过程,但未有针对性地考虑大通河不同河段关键保护物种,同时以月为时间步长坦化了生态需水过程。未来需要进一步收集河流断面形态、水生生物水力偏好等资料,综合考虑水文学、水力学、栖息地模拟等方法,另外需要以日为时间步长考虑流量脉冲等生态需

水过程,基于上述方法结果展开综合分析,进一步确定适用于大通河不同河段的生态需水量及生态调度方案。二是本文在计算调水规模时,以调出区河流生态需水量作为约束,以水资源开发利用量最大作为目标,没有考虑调入区用水需求及工程调蓄能力。未来需要进一步收集调入区社会经济发展、水资源供需关系及配置工程等资料,进一步确定调水规模。三是受气候变暖和人类活动影响,大通河

流域降水、冰川、积雪、冻土等水循环要素改变,造成了径流总量和过程变化。未来需要构建流域水文模型,结合 CMIP6 不同国家、不同模式数据,开展不同升温、碳排放等情景下的径流预估,进一步论证流域水资源可利用量和可调水量。四是本文采用加权法将多目标问题转化为单目标问题求解,

归因于本文各目标的优先顺序明显,即河流生态需水优于水资源利用优于梯级水力发电。未来需要考虑采用种群进化类方法,既可以避免权重设置时的主观性,又可以通过获得多目标问题的帕累托解集,进一步识别不同目标间的互馈响应关系。

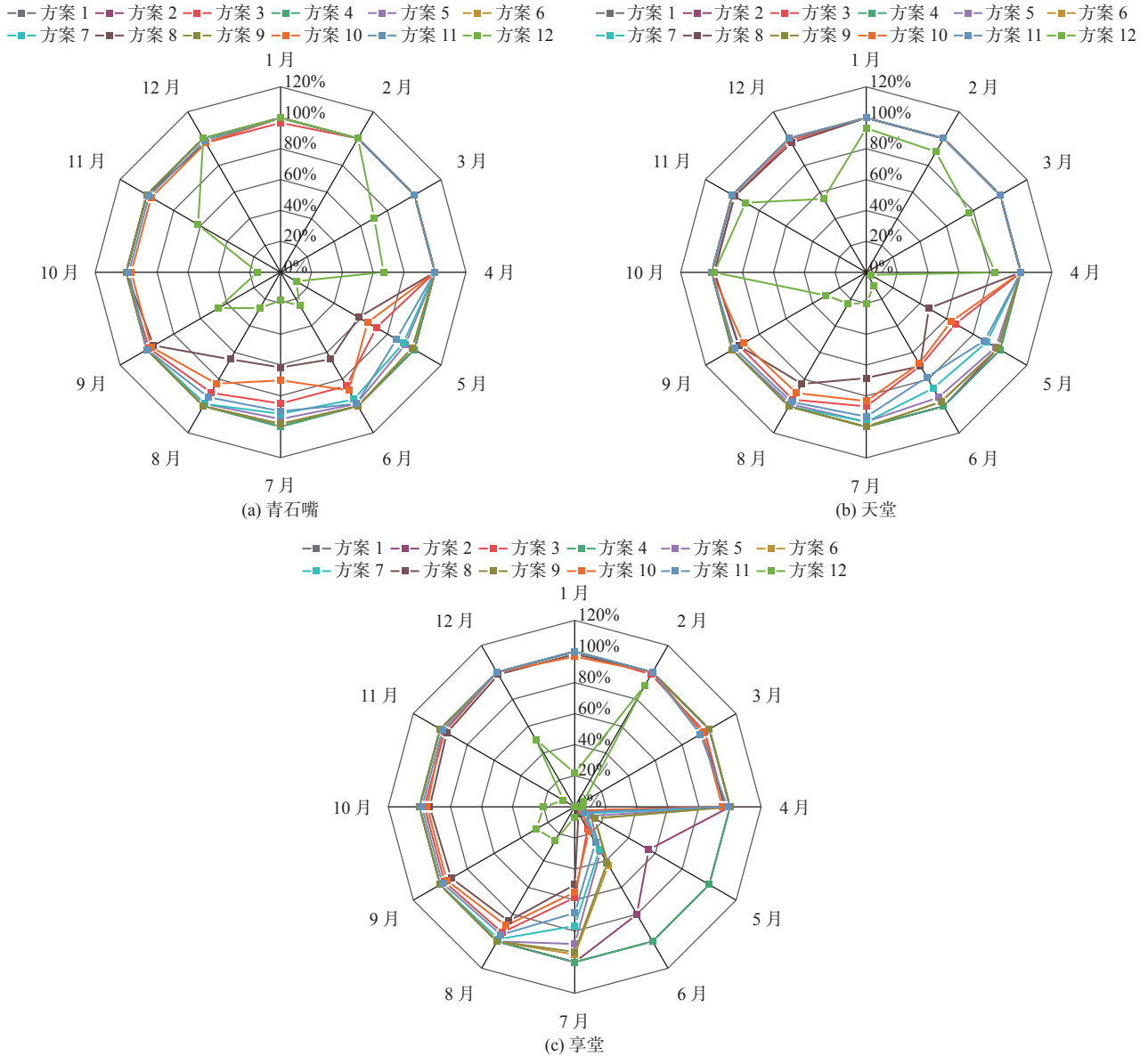


图 10 不同方案下关键控制断面逐月生态流量保障率

Fig. 10 Monthly guarantee rate of river ecological water demand at the three control stations under different scenarios

5 结论

在国家水网建设以及流域生态保护和高质量发展的背景下,本文以大通河流域为例开展河流生态需水约束的调水规模研究,取得主要结论如下:

采用了 9 种常用的水文学方法,计算了 12 种不同的生态流量过程。结果表明,不同的生态流量过程均能够反映关键控制断面流量的年内变化特征,

大通河干流河道内生态流量沿程增加(青石嘴<天堂<享堂),青石嘴、天堂和享堂断面年生态需水量分别介于 1.62 亿~14.54 亿 m^3 、2.46 亿~22.04 亿 m^3 和 2.88 亿~25.46 亿 m^3 ,且均以 Q_{90} - Q_{50} 法年生态需水量为最大、Tennant 法(10%)年生态需水量为最小。

以不同生态流量过程作为约束,以过去 60 年水文过程作为 WEE 纽带模型输入,识别梯级水力发

电、水资源利用、生态保障等多个调度目标的互响应关系。结果表明,大通河流域水资源利用量与年生态需水量呈明显的负相关关系,大通河干流梯级发电量与年生态需水量呈明显的正相关关系。3项引大工程多年平均外调水量介于6.66亿~13.16亿 m^3 ,占流域多年平均径流量的23.1%~45.6%,其中引大济滹多年平均外调水量介于2.25亿~8.81亿 m^3 ,占流域多年平均径流量的7.8%~30.5%。

基于多目标调度结果,开展了青石嘴、天堂、享堂3个断面逐年和逐月生态流量保障率分析。结果表明,青石嘴和天堂断面逐年生态流量保障率介于25%~100%,享堂断面介于0~100%,3个断面逐月生态流量保障率均表现为非汛期大于汛期,由于沿程发生了跨流域调水和本地取用水,上游生态流量保障率大于下游,即青石嘴>天堂>享堂。

参考文献:

- [1] 徐宗学, 庞博, 冷罗生. 河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 757-764. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0077.
- [2] 王浩, 胡鹏. 基于二元视角的河湖生态环境复苏与生态流量保障路径[J]. *中国水利*, 2022(7): 11-15. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.07.015.
- [3] 左其亭, 郭佳航, 李倩文, 等. 借鉴南水北调工程经验构建国家水网理论体系[J]. *中国水利*, 2021(11): 22-24, 21. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2021.11.026.
- [4] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(5/6): 397-441. DOI: 10.1002/rra.736.
- [5] YIN D Q, LI X, WANG F, et al. Water-energy-ecosystem nexus modeling using multi-objective, non-linear programming in a regulated river: Exploring tradeoffs among environmental flows, cascaded small hydropower, and inter-basin water diversion projects. [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 308: 114582. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114582.
- [6] 李原园, 廖文根, 赵钟楠, 等. 新时期强化河湖生态流量管控的总体思路与对策措施[J]. *中国水利*, 2020(15): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2020.15.006.
- [7] 葛金金, 彭文启, 张汶海, 等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法: 以沙颍河周口段为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(2): 75-80. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0036.
- [8] 张泽中, 黄强, 齐青青, 等. 基于受水区生态和环境用水安全的调水规模确定方法[C]//第六届中国水论坛论文集. 2008: 521-526.
- [9] 常文娟, 董鑫, 马海波, 等. 基于耗水视角的水资源承载能力及其支撑流域调水规模研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(9): 8-12, 17. DOI: 10.11988/ckyyb.20191464.
- [10] 刘寒青, 刘静, 赵建世, 等. 基于水资源系统可持续性的南水北调进京规模分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(6): 99-105. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.016.
- [11] 白涛, 徐燕, 孙宪阁, 等. 官厅水库多目标调度规律与方案研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 101-108, 124. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.013.
- [12] 游进军, 薛志春, 林鹏飞, 等. 二层结构的流域生态调度研究 II: 松花江流域生态调度实践与应用[J]. *水利学报*, 2022, 53(1): 11-19. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210260.
- [13] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. *水科学进展*, 2017, 28(5): 681-690. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.05.005.
- [14] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2021.04.002.
- [15] SI Y, LI X, YIN D Q, et al. Evaluating and optimizing the operation of the hydropower system in the Upper Yellow River: A general LINGO-based integrated framework[J]. *Plos One*, 2018, 13(1): e0191483. DOI: 10.1371/journal.pone.0191483.
- [16] 王奕佳, 刘焱序, 宋爽, 等. 水-粮食-能源-生态系统关联研究进展[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(7): 684-693. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.073.
- [17] 陈端, 陈求稳, 陈进. 考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 248-256.
- [18] 白雁翎, 王芳, 刘扬. 大通河上游径流演变及驱动因素定量分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 103-110, 167. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0010.
- [19] 王芳, 王天慈, 白雁翎, 等. 大通河降雨径流关系演变与水资源衰减初步研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(4): 361-370. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200107.
- [20] 康泽璇, 王芳, 刘扬, 等. 基于IHA-RVA法的大通河上中游水文节律变化[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1065-1075. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0105.
- [21] 李想, 王芳, 刘丰等. 流域发电-调水-生态互馈关系研究[C]//中国水利学会, 黄河水利委员会. 中国水利学会2020学术年会论文集第二分册. 中国水利水

- 电出版社,2020:103-113. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.069784.
- [22] 李云成,王瑞玲,姜广艳. 湟水流域水生态保护与修复研究[J]. *水生态学杂志*, 2017, 38(6): 11-18. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2017.06.002.
- [23] 胡红云. 大通河石头峡水电站建设与鱼类保护[J]. *青海环境*, 2008, 18(3): 113-116,122. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2454.2008.03.007.
- [24] 杨玉霞,闰莉,张建军,等. 引大济湟总干渠工程对大通河水生生态环境的影响及对策[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(1): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1278.2012.01.007.
- [25] 张军锋,闫莉,崔玉香,等. 引大济湟调水总干渠工程生态环境影响[J]. *水资源保护*, 2011, 27(5): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2011.05.020.
- [26] 严登华,王浩,王芳,等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探[J]. *水利学报*, 2007, 38(3): 267-273. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.03.003.
- [27] TENNANT D L. Instreamflow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resource[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10. DOI: 10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2.
- [28] 于松延,徐宗学,武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(Z1): 175-179.
- [29] 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 154-159. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.10.027.
- [30] GAUUPP F, HALL J, DADSON S. The role of storage capacity in coping with intra-and inter-annual water variability in large river basins[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(12): 125001. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/125001.
- [31] KURIQI A, PINHEIRO AN, SORDO-WARD A, et al. Flow regime aspects in determining environmental flows and maximising energy production at run-of-river hydropower plants[J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113980. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113980.
- [32] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5041-5059. DOI: 10.5194/hess-18-5041-2014,2014.
- [33] 潘扎荣,阮晓红,徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. *水利学报*, 2013, 44(1): 119-126. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.01.005.
- [34] 倪晋仁,金玲,赵业安,等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. *水利学报*, 2002(10): 1-7. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2002.10.001.
- [35] 吴昌贤,薄岩,黄微尘,等. 黄河干流生态流量赤字及其成因[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 8-16. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0069.
- [36] 彭文启. 生态流量五个关键问题辨析[J]. *中国水利*, 2020(15): 20-25. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2020.15.008.
- [37] 潘扎荣,阮晓红. 淮河流域河道内生态需水保障程度时空特征解析[J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 280-290. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.03.004.
- [38] 徐珊,夏丽华,陈智斌,等. 基于生态足迹法的广东省水资源可持续利用分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(5): 11-15, 98. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.05011.
- [39] 郑小康,侯红雨,付永锋. 基于改进 Tennant 法的湟水流域河道内生态环境需水量分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4): 681-685, 690. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.04.016.
- [40] 中国水利水电科学研究院,青海省水利水电勘测设计研究院. 青海省引大济湟工程规划报告[R]. 2003.
- [41] 黄河水资源保护科学研究院. 青海省引大济湟调水总干渠工程水资源论证报告书[R]. 2009.
- [42] 青海省引大济湟工程建设管理局. 青海省引大济湟工程水资源配置及生态用水调度方案[R]. 2016.

Study on the water transfer scale considering the constraint of river ecological water demand

ZHANG Dan^{1,2}, BAO Jun³, LI Xiang^{1,2}, YIN Dongqin⁴, WANG Fang², XU Fengran², MU Xiangpeng²

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Center of Construction Management & Quality Safety Supervision, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 4. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The construction of a regional water network is a crucial measure to address complex water problems such as the uneven spatial and temporal distribution of water resources, while to achieve the goal of ecological protection and high-quality development. The water network, mainly consisting of water transfer and storage

projects, has changed the pattern of water resources and the eco-hydrological processes of rivers, and has adverse impacts on the ecological environment. The Datong River basin is abundant in water resources and has great potential for hydropower. The three major water transfer projects (from Datong River to Qinwangchuan basin, from Datong River to Jinchang City, and from Datong River to Huangshui River basin) in this region have made great contributions to the economic and social development of the Xining-Lanzhou City cluster. Given that the Datong River basin includes environmentally sensitive areas such as the upper reaches of the Yellow River Reserve and the Qilian Mountain National Park, ensuring ecological safety is important. Unfortunately, some early projects failed to adequately consider environmental protection requirements at the planning stage, resulting in significant changes in river hydrology, including reduced river flows, deteriorating water quality, and declining biodiversity.

On the basis of comprehensive understanding of the eco-hydrological conditions, the characteristics of water transfer and hydropower projects, and the current situation of water resources utilization in the Datong River basin, three key control sections (Qingshizui, Tiantang, and Xiangtang) were determined. Nine widely used hydrologically-based methods were employed to calculate 12 ecological flow processes at the three sections, which were considered in the water resource allocation of the Datong River basin. Furthermore, the Water-Energy-Ecosystem (WEE) Nexus model, which was developed based on multi-objective and nonlinear programming, was used to optimize and compare the operations of different water diversion and storage projects as well as the corresponding ecological flow guarantee rate under 12 different ecological flow processes, with the past 60-year hydrological series as the model input.

The following conclusions can be drawn. (1) The ecological flows were increased from upstream to downstream along the Datong River (Qingshizui<Tiantang<Xiangtang). The annual ecological water demands of the Qingshizui, Tiantang, and Xiangtang sections ranged from 0.162 billion to 1.454 billion m^3 , 0.246 billion to 2.204 billion m^3 , and 0.288 billion to 2.546 billion m^3 , respectively. The annual ecological water demand of the $Q_{90_Q_{50}}$ method was the highest, while that of the Tennant method (10%) was the lowest. (2) There was a significant negative correlation between total water resource utilization of the river basin and annual ecological water demand, whereas there was a significant positive correlation between total power generation of the hydropower system and annual ecological water demand. The annual average water diversion amount of the three projects ranged from 0.666 billion to 1.316 billion m^3 , accounting for 23.1% to 45.6% of the annual average runoff of the river basin. The annual average water transfer amount from the Datong River to the Huangshui River basin ranged from 225 million to 881 million m^3 , accounting for 7.8% to 30.5% of the annual average runoff of the river basin. (3) The annual ecological flow guarantee rate for Qingshizui and Tiantang sections ranged from 25% to 100%, while that for Xiangtang section ranged from 0% to 100%. The monthly ecological flow guarantee rate for the three sections was higher during non-flood season than flood season. The ecological flow guarantee rate was higher in the upstream than in the downstream, resulting from the inter-basin water transfer and local water withdrawal along the Datong River.

This study takes into account the dual objectives of ecological environmental protection and social and economic development, and provides technical support for reasonably determining the water transfer scale.

Key words: ecological flow; hydrologically-based method; water-energy-ecosystem nexus; water transfer scale; Datong River