

Water Resources Management of Kaidu River Using Ecological Baseflow Analysis

Yuqi Ma¹, Junzheng Wang¹, Yong Cheng¹, Zhaoxia Ye², Chenggang Zhu², Honghua Zhou^{2,3*}

¹Bayinguoleng Water Resources Management Department of Xinjiang Trarim River Basin Authority, Korla Xinjiang

²State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi Xinjiang

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: *zhouhh@ms.xjb.ac.cn

Received: Aug. 2nd, 2019; accepted: Aug. 23rd, 2019; published: Sep. 10th, 2019

Abstract

In view of the important role of the water resources regulation of Kaidu River for the production, life and ecology of Yanqi basin, how to ensure the ecological baseflow and stable ecological function of Kaidu River is a key scientific problem for the water resources management. This study compared the results of ecological baseflow of the Kaidu River calculated from four methods. It was shown that the ecological baseflow was $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ in dry season (from October to March) and was $7.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ in flood season (April - September). Considering the ecological function of the Kaidu River, the allocation measures of annual water resources under different runoff conditions and water levels (1047.5 m, 1046.5 m and 1045.5 m) of Bosten Lake are suggested, which would help in the scientific water resources management in future.

Keywords

Ecological Baseflow, Kaidu River, Bosten Lake, Water Resources Management

基于生态基流分析的开都河水资源调度管理研究

马玉其¹, 王军政¹, 程 勇¹, 叶朝霞², 朱成刚², 周洪华^{2,3*}

¹新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局, 新疆 库尔勒

²中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

³中国科学院大学, 北京

Email: *zhouhh@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 2019年8月2日; 录用日期: 2019年8月23日; 发布日期: 2019年9月10日

作者简介: 周洪华, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区生态水文过程研究。

*通讯作者。

文章引用: 马玉其, 王军政, 程勇, 叶朝霞, 朱成刚, 周洪华. 基于生态基流分析的开都河水资源调度管理研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(5): 445-455. DOI: 10.12677/jwrr.2019.85051

摘要

开都河的水资源调度对焉耆盆地生产、生活和生态起着重要的作用,因此如何确保其生态基流、稳定生态功能是流域水资源科学管理面临的关键科学问题。本文采用多方法计算了开都河的生态基流,确定了年内枯水期(10月~次年3月)生态基流应为 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,丰水期(4~9月)生态需水量为 $7.30 \times 10^8 \text{ m}^3$;考虑到开都河的生态功能,还提出了为确保博斯腾湖处于海拔1047.5 m、1046.5 m和1045.5 m不同水位背景下,在丰、平、枯年和极枯年,开都河宝浪苏木入博斯腾湖的水量管理方案和措施。

关键词

生态基流,开都河,博斯腾湖,水资源管理

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河流生态基流是指为了防止河道水体断流,维持河流水体的基本形态及河流水体基础生态功能所应具有的最小流量[1][2]。生态基流是河流综合管理与水电工程项目环境影响评价时需要重点关注的指标,对维持河流基本的生态结构和功能、保护水生生物健康具有重要意义,已成为水资源综合管理中亟需解决的问题之一[3][4]。基于河湖生态基流的流域生态流量调度管理,特别是枯水期生态基流保障与生态流量调度方案研究,对于提升流域河湖水资源科学调配与管理水平、构建山水林田湖生命共同体、确保流域生态系统健康和经济社会可持续发展具有重要意义[5][6][7][8]。

开都河是新疆维吾尔自治区的一条以冰雪融水和雨水混合补给为主的内陆河流,是开都河流域最大、最重要的一条河流,对焉耆盆地 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的生产、生活和生态建设所需的水资源起着决定性作用,对河流沿途的生态系统健康维系也起着关键性意义。因此,计算分析开都河的生态基流,研究确保生态基流的流域水资源调度措施,可为加强流域水资源统一调度,科学保障生产用水、城乡居民生活用水及流域生态用水,确保流域水资源可持续利用与管理提供科技支撑。

2. 研究区概况和研究方法

2.1. 研究区概况

开都河发源于天山中部的艾尔宾、依连哈比尔尕、那拉提、科克铁克等山脉,位于中天山南麓,流域介于 $82^{\circ}52' \sim 86^{\circ}55'E$ 、 $41^{\circ}47' \sim 43^{\circ}21'N$ 之间,流域东西长300 km,南北宽170 km,河道全长560 km(图1)。开都河经出山口后,流经和静、焉耆、博湖三县,最终注入焉耆盆地的最低洼地——博斯腾湖,其中,出山口以上流域面积约 $1.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。开都河多年平均径流量 $35.31 \times 10^8 \text{ m}^3$,4~9月丰水期径流量占全年径流量的73.8%,10~3月枯水期径流量占全年径流量的26.2%。流域多年平均径流深:巴音布鲁克以上143.2 mm、巴音布鲁克至萨恨图亥187.1 mm,萨恨图亥至大山口214.3 mm。

2.2. 研究方法

河流生态基流的估算方法最先始于20世纪40年代末期的美国,到20世纪70年代后得到了快速发展,目

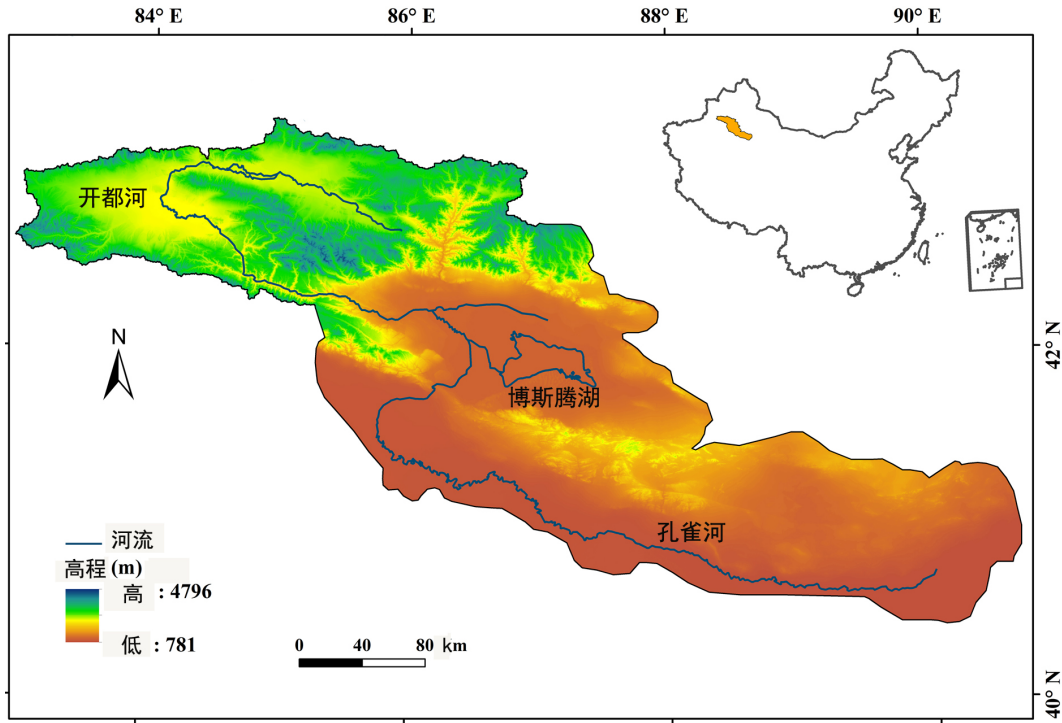


Figure1. Sketch map of the study area
图 1. 研究区示意图

前已形成了多达 207 种计算方法[9]。本研究采用了相对比较成熟、应用较为广泛、且适用于水文监测数据资料较为匮乏的干旱区的四种典型水文学方法进行生态基流的计算，以期探讨适用于开孔河流域生态基流的最佳水文学计算方法。

2.2.1. 改进的 Tennant 法

Tennant 法是依据观测资料而建立起来的流量和栖息地质量之间的经验方法[10]。该方法是建立在干旱半干旱地区永久性河流的基础上，判别栖息地环境优劣的推荐基流标准在平均流量的 10%~200% 范围内设定，如表 1，且该方法只需历史流量资料，使用简单、方便，容易将计算结果和水资源规划相结合，具有宏观的指导意义，可以在生态资料缺乏的地区使用。

Table 1. Base flow standard recommended by Tennant method
表 1. Tennant 法推荐的基流标准

栖息地的定性描述	基流标准(年平均天然流量百分数)	
	枯水期(10~翌年 3 月)	丰水期(4~9 月)
最大	200	200
最佳	60~100	60~100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中	10	30
差或最小	10	10
极差	0~10	0~10

采用 Tennant 法要求选择受人类活动干扰较少的时期, 且具有 10 年以上可利用的观测数据。开都河大山口为河流出口, 以上区域受人类活动干扰少, 符合 Tennant 法的使用条件, 因此选择 1972~2016 年共 45 年径流数据进行生态流量的计算。本研究考虑到干旱区河流径流量的季节性变化较大, 用单一的生态基流无法满足河道不断流的客观需求, 而改进后的 Tennant 可以针对不同的月份计算生态基流, 便于流域管理部门对水资源的季节性管理。因此采取典型年内的季节径流量进行时段划分, 对照 Tennant 法推荐的基流标准, 得到特定河流不同月份不同栖息地要求的生态基流标准值。典型年的选取方法是对年径流量的模比系数(模比系数 $K = \text{某一年径流量} / \text{多年平均径流量}$)进行计算, 选择模比系数最接近 1.0 的年份作为典型年[11]。

2.2.2. 典型年型划分法

年型划分方法如表 2, 是采用距平百分率法进行丰、平、枯水典型年的划分[11], 距平百分率的计算公式为:

$$E = \frac{Q_i - Q_n}{Q_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E (%)为断面的距平百分比; $Q_i(10^8 \text{ m}^3)$ 为第 i 年平均径流量; $Q_n(10^8 \text{ m}^3)$ 为断面多年平均径流量。

Table 2. Criteria for dividing wet, mean and dry years

表 2. 丰、平、枯水年划分标准

年型	丰水年	平水年	枯水年	
			偏枯水年	特枯水年
距平百分率 E (%)	$E > 10$	$-10 \leq E \leq 10$	$-20 < E \leq -10$	$E < -20$
频率分析 P (%)	$P \leq 37.5$	$37.5 < P \leq 62.5$	$62.5 < P \leq 87.5$	$P > 87.5$

《水文基本术语和符号标准》(GB/T50095-2014)。

本文以距平百分率最接近-20%的年份作为枯水年的典型年, 取该典型年最枯月径流量作为最小生态需水量, 换算成流量即为生态基流。

2.2.3. 最小月平均流量法

最小月平均流量法的计算公式为[11]:

$$W = \frac{T}{n} \sum_{n=1}^n \min Q_{ij} \times 10^{-8} \quad (2)$$

式中: W 为河流基本生态需水量, 亿 m^3 ; Q_{ij} 为第 i 年第 j 月的平均流量, m^3/s ; T 为换算系数, 其值为 $31.536 \times 10^6 \text{ s}$; n 为统计年数。根据《制定地方水污染排放标准的技术原则和方法》(GB3839-83)规定, 对于一般河流采用近 10 年最枯月平均流量[12], 本研究将最小月平均流量法改为最小月平均流量近 10 年平均值法。

2.2.4. NGPR 法

NGPR 法(Northern Great Plains resource program)是将水文年分为枯水年、平水年和丰水年, 取平水年组 90% 保证率流量作为最小流量[12] [13] [14]。其优点是考虑了枯水年、平水年和丰水年的差别, 综合了气候状况以及可接受频率因素, 但缺乏生物学依据。本文采用频率接近 90% 年份的最小流量月份的月平均流量作为生态基流。

3. 开都河生态基流量确定

3.1. 基于改进 Tennant 法的开都河生态基流分析

1972~2016 年大山口站年平均径流量为 $35.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。经计算, 2005 年是模比系数最接近 1.0 的年份, 确

定为典型年, 包含 2005 年 4 月至翌年 3 月。根据开都河实际用水情况, 将生态需水划分为丰水期(4~9 月)和枯水期(10~翌年 3 月), 这与 Tennant 法推荐的基流标准中的需水期划分完全吻合。考虑到开都河大山口至宝浪苏木段河损较为严重, 将一般用水期的生态基流提高到 20% 的标准, 鱼类产卵育幼期的生态基流保持在 30% 的标准, 并由此计算出全年不同月份不同栖息地要求的生态基流标准值。

计算结果表 3 显示, 枯水期(一般用水期, 10 月~翌年 3 月)的平均生态基流为 15.60 m³/s, 对应最小生态需水量为 2.47 × 10⁸ m³; 丰水期(鱼类产卵育幼期, 4~9 月)的平均生态基流为 46.15 m³/s 可, 对应的最小生态需水量为 7.30 × 10⁸ m³, 全年生态基流为 30.88 m³/s, 对应的最小生态需水量为 9.77 × 10⁸ m³。

Table 3. Ecological base flow standard and minimum ecological water demand at Dashankou of the Kaidu River
表 3. 开都河大山口断面生态基流标准与最小生态需水量

月份	4	5	6	7	8	9	平均
生态基流(m ³ /s)	31.2	28.2	40.5	51.6	64.5	60.9	46.15
最小生态需水量(10 ⁸ m ³)	0.81	0.76	1.05	1.38	1.73	1.58	1.22
月份	10	11	12	翌年 1 月	翌年 2 月	翌年 3 月	平均
生态基流(m ³ /s)	21.2	17.1	12.8	15.1	13.5	13.9	15.60
最小生态需水量(10 ⁸ m ³)	0.57	0.44	0.34	0.40	0.34	0.37	0.41

3.2. 基于年型划分法的开都河生态基流分析

结合表 4 开都河 1972~2016 年每年的距平百分率和丰平枯水年划分标准表 2, 1974、1977、1984、1986 年为特枯水年, 1999~2002、2010 年为丰水年, 其余年份为平水年至偏枯年。其中 1984 年的距平百分率为-20.49%, 接近最低标准-20%, 选取 1984 年中最枯月的平均径流量作为最小生态需水量。统计结果显示, 1984 年最枯月为 2 月, 月平均径流量为 1.08 × 10⁸ m³, 以此作为最小生态需水量, 换算成流量为 3.42 m³/s, 即为生态基流。

Table 4. Division of wet, mean, dry year from 1972-2016
表 4. 1972~2016 年丰、平、枯年型划分表

年份	距平百分率 E(%)	年型	年份	距平百分率(%)	年型
1972	6.54	平水年	1995	-17.51	偏枯年
1973	-0.86	平水年	1996	14.80	平水年
1974	-26.04	特枯年	1997	5.25	平水年
1975	-16.63	偏枯年	1998	16.16	平水年
1976	-7.33	平水年	1999	36.83	丰水年
1977	-21.17	特枯年	2000	42.37	丰水年
1978	-15.18	偏枯年	2001	20.29	丰水年
1979	-17.66	偏枯年	2002	61.20	丰水年
1980	2.48	平水年	2003	4.60	平水年
1981	-15.93	偏枯年	2004	-1.33	平水年
1982	-5.00	平水年	2005	1.15	平水年
1983	-19.05	偏枯年	2006	13.90	平水年
1984	-20.49	特枯年	2007	7.81	平水年

Continued

1985	-18.15	偏枯年	2008	5.93	平水年
1986	-30.50	特枯年	2009	8.60	平水年
1987	-5.28	平水年	2010	24.67	丰水年
1988	-9.76	平水年	2011	14.13	平水年
1989	-5.69	平水年	2012	-8.43	平水年
1990	-15.26	偏枯年	2013	-13.22	偏枯年
1991	-3.51	平水年	2014	-14.35	偏枯年
1992	-2.93	平水年	2015	5.95	平水年
1993	-9.88	平水年	2016	11.13	平水年
1994	17.34	偏枯年			

3.3. 基于最小月平均流量近 10 年平均值的开都河生态基流分析

1972~2016 开都河径流量统计表 5 显示,近 10 年每年最小月流量出现的月份不尽相同,1 月份出现了 4 次,其次是 2 月和 12 月,最小月平均流量为 45.82 m³/s,根据公式(2),计算得到开都河河流最小生态需水量为 14.45 × 10⁸ m³。

Table 5. Lowest monthly flow of Kaidu River in recent 10 years

表 5. 开都河近 10 年每年最小月流量

年份	最枯月份	流量(m ³ /s)
2007	11	52.9
2008	2	43.5
2009	1	55.71
2010	1	43.83
2011	2	49.50
2012	12	45.93
2013	12	50.62
2014	1	40.75
2015	2	36.78
2016	1	38.72
平均		45.82

3.4. 基于 NGPR 法的开都河生态基流分析

采用 90% 保证率最小月平均流量法统计表 6 显示,1977 年是频率最接近 90% 的年份,该年份最小流量值出现在 1 月,该月平均径流量为 1.14 × 10⁸ m³,以此作为最小生态需水量,换算成流量为 3.61 m³/s,即为生态基流。

Table 6. Runoff frequency at Dashankou hydrological station of the Kaidu River from 1972 to 2016

表 6. 1972~2016 年开都河大山水文站径流频率统计

年份	频率(%)	年份	频率(%)	年份	频率(%)
1972	33.17	1988	70.02	2004	50.65

Continued

1973	49.56	1989	60.88	2005	44.90
1974	94.47	1990	80.85	2006	20.06
1975	83.18	1991	55.78	2007	30.64
1976	64.64	1992	54.41	2008	34.42
1977	89.65	1993	70.27	2009	29.13
1978	80.72	1994	15.32	2010	8.03
1979	84.82	1995	84.58	2011	19.73
1980	41.88	1996	18.74	2012	67.11
1981	82.02	1997	35.85	2013	77.10
1982	59.27	1998	16.85	2014	79.22
1983	86.87	1999	2.25	2015	34.39
1984	88.80	2000	1.17	2016	24.53
1985	85.56	2001	11.95	平均	84.58
1986	97.22	2002	0.09		
1987	59.92	2003	37.23		

通过比较上述 4 种方法，发现年型划分法和 NGPR 法的结果较为接近，且偏小；而改进的 Tennant 法和最小月平均流量多年平均值法的结果偏大。河流的最小生态水量计算结果首先必须能确保河道不断流，考虑到干旱区河流向下河段下泄过程中由于河道渗流和强烈蒸发导致的水量损失(河损)较大[15]，如果生态水量小于河损，则河流无法维系，因此最小生态基流需要略大于河损。鉴于大山口至宝浪苏木河段 2000~2016 年的平均河损量为 $4.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，最大为 2009 年的 $9.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，为验证最小生态需水量计算结果的可行性，进一步分别对四种方法的结果与河损进行了比较，如表 7。结果表明，大山口水文站按照 Tennant 法和最小月平均流量多年平均值法估算的最小生态需水量下泄水量在无任何引水的情况下，即使出现最大河损，也能够保证至宝浪苏木不断流，但最小月平均流量多年平均值法的结果剩余水量较多，而改进的 Tennant 法的计算结果可以细化到每月及旬生态基流，便于流量年内调控。采取年型划分法和 NGPR 法的结果下泄水量，则无法满足河道损耗。因而，本研究认为将采取改进的 Tennant 法的结果确定为最小生态需水量更为合理。即，枯水期(10 月~次年 3 月)的最小生态需水量为 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；鱼类产卵育幼的丰水期(4~9 月)的最小生态需水量为 $7.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

Table 7. Ecological water demand and base flow from modified Tennant, annual classification, minimum monthly average flow and NGPR methods

表 7. 改进 Tennant 法、年型划分法、最小月平均流量法及 NGPR 法计算下的生态需水和生态基流

	最小生态需水(10^8 m^3)	生态基流(m^3/s)	河损(10^8 m^3)	最小生态需水 - 河损(10^8 m^3)
改进的 Tennant 法	丰水期 7.30 枯水期 2.47 全年合计 9.77	丰水期 46.15 枯水期 15.60		5.12
年型划分法	1.08	3.42	平均 4.65 最大 9.13	-3.57
最小月平均流量法	14.45	45.82		9.8
NGPR 法	1.14	3.614		-3.51

4. 基于生态基流的开都河水资源调控措施

开都河是开都-孔雀河流域地表水主要的产汇流河流, 提供了波斯腾湖入湖水量的 85%。根据对波斯腾湖水位、水质、防洪及水生态综合研究结果确定, 波斯腾湖的适宜生态水位为海拔 1046.5 m, 最低水位为海拔 1045.5 m, 汛限水位为海拔 1047.5 m。因此, 在开都河生态流量管理中, 除了保障开都河不断流和生态系统健康基本需求的生态基流外, 还需要在不同来水频率下, 特别是平水和枯水情况下保障相应的入湖水量, 以调控波斯腾湖能够始终保持在 1045.5~1047.5 m (海拔) 之间, 保障湖泊的生态安全。

4.1. 开都河的入湖水量及供水管理

在开都河平水年份, 波斯腾湖水位可在夏季保持一个较低水位 1045.5~1046 m 间, 冬季恢复水位, 维持在生态适宜水位 1046.50 m, 偏枯水年和特枯年湖泊水位不低于临界最低水位 1045.50 m。在波斯腾湖处于高水位 (1047.5 m) 运行时, 则需增大区域用水指标, 减少入湖水量, 反之, 则相应减少区域用水, 保证入湖水量。具体水量调度如表 8。

在波斯腾湖 1047.50 m 高水位背景下, 开都河在丰水、平水及偏枯年份, 均可以“三条红线”规定开都河地表水最高用水指标($10.70 \times 10^8 \text{ m}^3$)供水, 在 25%、50%、75% 和 90% 频率下, 宝浪苏木节点的入湖水量分别控制在 $28.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $23.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $19.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $18.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

在波斯腾湖 1046.50 m 适宜水位背景下, 开都河流域供水在丰水年可按照红线地表水用水指标供水, 其余年份可执行开都河多年供水平均指标($9.80 \times 10^8 \text{ m}^3$)供水, 在各不同频率下, 宝浪苏木入湖水量分别控制在 $28.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $24.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $20.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $18.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

在波斯腾湖水位处于临界最低水位 1045.5 m 的情景下, 开都河流域用水只有当丰水年情景下, 方能以多年平均用水指标供水($9.80 \times 10^8 \text{ m}^3$), 其余年份则相应递减, 保证宝浪苏木入湖水量在各频率下分别控制在 $29.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $25.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $22.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $21.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

丰水年开都河供水在遵照不高于“三条红线”地表水最高供水量和保证波斯腾湖入湖水量需求的前提下, 则应利用开都河地表供水置换地下水开采, 以改善流域地下水超采的局面。丰水年对于完成全年地表水指标的用水单位, 可以给予供水指标 5%~10% 的生态用水奖励。

Table 8. Water consumption and inflow to Bosten Lake from Kaidu River under different guaranteed rates and water levels of lake
表 8. 不同保证率及湖泊水位背景下开都河流域耗水及入湖水量

保证率	序号	25%	50%	75%	90%
总来水(包括开都河、黄水沟和清水河)	1	42.87	37.64	33.58	31.89
开都河水系河损	2	5.83	5.78	5.72	5.67
1047.50 m	3	10.70	10.70	10.70	9.80
博湖不同水位背景下开都河流域供水管理	4	10.70	9.80	9.80	9.80
1045.50 m	5	9.80	8.82	7.84	7.35
宝浪苏木至入湖地下水反向补给估算	6	2.00	2.00	2.00	2.00
1047.50 m (1-2-3 + 6)	7	28.34	23.16	19.17	18.42
博湖不同水位背景下宝浪苏木入湖水量	8	28.34	24.06	20.07	18.42
1046.50 m (1-2-4 + 6)					
1045.50 m (1-2-5 + 6)	9	29.24	25.04	22.52	21.36

4.2. 开都河丰水期流量管理

依据多年来水频率分析以及下游湖泊水位,在大山口若来水符合丰水年研判,应按照流量管理方案,在汛期来临之前,提前实施开都河与博斯腾湖调水管理。为配合博斯腾湖“夏放冬蓄”的水位管理方案,建议疏浚解放一渠过流能力至 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,依据来水情况在 3~5 月开始由开都河第二枢纽经解放一渠向孔雀河供水,8 月底以后停止这一通道过水。同时,结合加大对地下水的管理,加大向孔雀河灌区的地表水供水和生态补水。通过此举,配合博斯腾湖夏季下调水位的调配方案实施;其次,改善向孔雀河灌区供水的水质,减少孔雀河灌区土壤积盐;第三,为丰水年的洪水期分洪以及向相思湖湿地泄洪做好准备。

4.3. 开都河枯水期流量管理

枯水期,开都河流域的生态基流需优先保证生活用水,确保生态基本需水,保障粮食生产合理需水,优化配置生产经营用水,统筹流域内用水与跨流域调水。通过对开都-孔雀河流域河流生态流量与湖泊生态水位的科学管理,协调流域和区域水资源统筹调配,加强流域水资源统一调度,严格实行水量调度服从防洪抗旱调度、电调服从水调、区域水量调度服从流域水量调度,确保开都-孔雀河与博斯腾湖维系水生态及水环境良好状态的基本生态用水需求,保障博斯腾湖的生态环境安全。为此,枯水期开都河的生态流量调度措施具体如下:

4.3.1. 电调服从水调,确保开都河生态基流

在枯水年特别是特枯年份,需要确保开都河的生态基流在大山口平均不低于 $30.88 \text{ m}^3/\text{s}$,对应年最小生态径流量在大山口不低于 $9.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。特别是要确保枯水年中相对枯水期的 10 月至翌年 3 月的生态基流在大山口平均不低于 $15.60 \text{ m}^3/\text{s}$,对应的这一时段在大山口最小生态径流量应保证 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,以确保开都河河道不断流,年内枯水期的各月生态基流标准和各月最小生态需水量和枯水年 4~9 月丰水期生态基流参照表 3。上游各电站的运行管理要切实执行“电调服从水调”的原则,尤其在枯水年以及枯水年的年内相对枯水期,利用开都河流域上游察汗乌苏电站、柳树沟电站、大山口一、二级电站、小山口一、二、三级电站调整水库蓄水调峰时间,保证在枯水年和枯水期大山口向下游河道下泄生态径流量在枯水年相对丰水期 4~9 月不小于 $7.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,年内枯水期 10 月~翌年 3 月不少于 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4.3.2. 合理调配枯水年用水,保障入湖水量

针对不同的博斯腾湖水位背景,枯水年需要合理保障开都河流域的用水,在博斯腾湖 1047.50 m 水位背景下,开都河流域在偏枯年份(采用典型频率 75%)供水按照 $10.70 \times 10^8 \text{ m}^3$,特枯年(采用典型频率 90%)供水 $9.80 \times 10^8 \text{ m}^3$,宝浪苏木入湖水量为 $19.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $18.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,配合以出湖水量调度,逐步降低湖泊水位。

在博斯腾湖 1046.50 m 适宜生态水位背景下,开都河流域供水在偏枯年和特枯年按照近 30 年开都河多年供水平均指标 $9.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 供水,宝浪苏木入湖水量控制在 $20.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $18.42 \times 10^8 \text{ m}^3$;而当博斯腾湖水位处于最低水位 1045.50 m 的情景下,开都河流域在偏枯年和特枯年份,需要相应减少区域地表水供水,供水分别按照近 30 年以来开都河多年平均供水的 75% 和 70% 供应,保证宝浪苏木入湖水量在 $22.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $21.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 8)。

4.3.3. 强化枯水期水资源监管调配,保障流域水生态安全

在枯水期尤其需要进一步强化水资源的监管,实行地下水与地表水统一管理。除了合理配置地表水资源外,应强化对地下水的监控管理,确保开都河流域地下水开采不超过红线规定 $3.87 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的指标上限。

配合博斯腾湖水位运行管理,各水电站和水库在枯水年应低水位运行,蓄水时段调整到夏季(4~9 月),山区各水库在 10 月以后至翌年 3 月,逐步将调节库容的水量下泄至河道,确保满足流域河道年内枯水期的生态基流,保障开都河不断流以及河流水生态系统健康,并且保障博斯腾湖入湖水量,保证湖水水位不低于最低水位

1045.50 m 的前提下,在冬季能上升并恢复至 1046.50 m。强化对开都河各河段枯水期水质监测,确保枯水期河水水质整体好于Ⅲ类水。

5. 结论

1) 通过比较改进的 Tennant 法、年型划分法、最枯月平均流量多年平均值法和 NGPR 法计算的生态基流量发现,开都河采用改进的 Tennant 法最小生态需水量更为合理,即枯水期(10 月~次年 3 月)的最小生态需水量为 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$; 鱼类产卵育幼的丰水期(4~9 月)的最小生态需水量为 $7.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2) 依据开都河的生态基流计算结果,结合开都河的生态功能特征,提出了开都河在不同的丰、平、枯年份下、在确保博斯腾湖不同水位情景下的水资源调配管理措施,为开都河流域未来不同径流情景下和不同入湖保证目标下的水资源可持续、科学管理提供了切实可行的理论和应用指导。

基金项目

国家自然科学基金项目(U1703101)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100303)和新疆自然科学基金项目(2017D01A79)。

参考文献

- [1] ARMBRUSTER, J. T. An infiltration index useful in estimating low-flow characteristics of drainage basins. *Journal of Research of the United States Geological Survey*, 1976, 4(5): 533-538.
- [2] 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.
YAN Denghua, WANG Hao, WANG Fang, et al. Frame of research work on ecological water demand and key topics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(3): 267-273. (in Chinese)
- [3] 刘昌明. 中国 21 世纪水供需分析: 生态水利研究[J]. *中国水利*, 1999(10): 18-20.
LIU Changming. Water supply and demand analysis in China in the 21st century: Ecology and water conservancy research. *China Water Resources*, 1999(10): 18-20. (in Chinese)
- [4] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2016, 14(6): 401-411.
CHEN Ang, SUI Xin, LIAO Wengen, et al. Review study on in stream ecological base flow in China. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2016, 14(6): 401-411. (in Chinese)
- [5] CHEN, A., SUI, X., WANG, D. S., et al. River ecosystem health assessment and implications for post-project environmental appraisal in China. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 692: 8-12. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.692.8>
- [6] 董哲仁. 河流生态系统结构功能模型研究[J]. *水生态学杂志*, 2008, 1(5): 1-7.
DONG Zheren. The research on structure and function model of river ecosystem. *Journal of Hydroecology*, 2008, 1(1): 1-7. (in Chinese)
- [7] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. *水利学报*, 2009, 40(2): 129-137.
DONG Zheren. Framework of research on fluvial ecosystem. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(2): 129-137. (in Chinese)
- [8] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550-559.
DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong, et al. Holistic conceptual model for the structure and function of river ecosystems. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 550-559. (in Chinese)
- [9] THARME, R. E. A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 2003, 19(5-6): 397-441.
<https://doi.org/10.1002/rra.736>
- [10] TENNANT, D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. In: ORSBORN, J. F., Allman, C. H. *Instream flow needs*. Bethesda: American Fisheries Society, 1976: 359-373.
[https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- [11] 魏雯瑜, 刘志辉, 冯娟, 等. 天山北坡呼图壁河生态基流量估算研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(6): 92-96.
WEI Wenyu, LIU Zhihui, FENG Juan, et al. A study of the estimation of the Hutubi River ecological base flow in the north slope of the Tianshan Mountains. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(6): 92-96. (in Chinese)
- [12] 张远. 黄河流域坡高地与河道生态环境需水规律研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京师范大学, 2003.

- ZHANG Yuan. Research on the ecological and environmental water requirements of the high land and river channel in the Yellow River Basin. PhD Dissertation. Beijing: Beijing Normal University, 2003. (in Chinese)
- [13] DUNBAR, M. J., GUSTARD, A., ACREMAN, M. C., et al. Overseas approaches to setting river flow objectives. R and D Technical Report W6-161. Environmental Agency and NERC, 1998.
- [14] 张强, 崔瑛, 陈永勤. 基于水文学方法的珠江流域生态流量研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1828-1837.
ZHANG Qiang, CUI Ying and CHEN Yongqin. Evaluation of ecological in stream flow of the Pearl River basin, south China. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1828-1837. (in Chinese)
- [15] 雷雨. 塔里木河干流上中游河损与断面来水关系分析[J]. 水利技术监督, 2019, 147(1): 187-192.
LEI Yu. Relationship analysis between run-off loss and water flow in the upper and middle Tarim River. Technical Supervision in Water Resources, 2019, 147(1): 187-192. (in Chinese)