

天山南坡季节河流——黄水沟生态流量阈值分析

李江¹, 徐永波¹, 牛英¹, 朱成刚^{2*}

¹新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局, 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

收稿日期: 2023年8月8日; 录用日期: 2023年9月14日; 发布日期: 2023年10月12日

摘要

科学确定内陆河流生态流量阈值是保障干旱区水生态安全和生态环境健康的重要基础。基于1980~2020年实测径流资料, 采用水文学多种方法, 对新疆开都河流域黄水沟的生态流量和下游生态水量阈值分段进行分析显示, 作为典型的干旱区山溪性季节河流, 黄水沟山区段为长流水河段, 应保障其生态基流以保护山区水生态; 出山口以下季节性河段依据生态保护目标科学确定适宜生态水量更为合理。基于 Q_p 法确定的黄水沟水文站断面的年内丰水期(5~10月)生态流量为 $3.90 \text{ m}^3/\text{s}$, 年内枯水期(11月~翌年4月)生态流量 $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$; 结合黄水沟水文站至入博斯腾湖河段多年平均河损, 以及黄水沟防洪和黄水沟下游生态环境保育需求, 计算分析确定入博斯腾湖南大闸断面年内丰水期多年平均最小入湖生态水量为 0.20 亿m^3 。

关键词

干旱区, 内陆河, 生态流量, 径流, 水文学方法

Analysis of Ecological Flow Threshold of Seasonal River—Huangshuigou in the Southern Slope of the Tianshan Mountains

Jiang Li¹, Yongbo Xu¹, Ying Niu¹, Chenggang Zhu^{2*}

¹Xinjiang Tarim River Basin Authority of China, Korla Xinjiang

²State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang

Received: Aug. 8th, 2023; accepted: Sep. 14th, 2023; published: Oct. 12th, 2023

作者简介: 朱成刚(1976-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事干旱区水资源可持续利用及生态环境保护与修复研究。

*通讯作者 Email: zhuchg@ms.xjb.ac.cn

文章引用: 李江, 徐永波, 牛英, 朱成刚. 天山南坡季节河流——黄水沟生态流量阈值分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 519-529. DOI: 10.12677/jwrr.2023.125057

Abstract

It is an important basis to scientifically determine the ecological instream flow of inland rivers for ensuring water-ecological security and eco-environmental health in arid areas. Based on the measured runoff data from 1980 to 2020, the ecological instream flow and the downstream basic ecological water requirement of the Huangshuigou River in the Kaidu River Basin of Xinjiang were analyzed by various hydrological methods. As a typical seasonal mountainous river in arid area, mountainous section of Huangshuigou River upstream is a long-flowing river section, and its ecological base flow should be guaranteed to protect the upstream water ecology. It is more suitable to scientifically determine the basic ecological water requirement according to the goal of ecological protection in the seasonal lower reaches. Based on the Q_p method, the ecological instream flow of the upstream section at Huangshuigou hydrological station is $3.90 \text{ m}^3/\text{s}$ during the flood season of the year (May-October) and $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$ in the dry season (November-April) of the year. Considering the average annual river loss from the Huangshuigou hydrological station to the section of the river flows into the Bosten Lake, as well as the flood control safety and the ecological and environmental conservation needs of the lower reaches of the river, the average annual minimum ecological water volume in the flood season is not less than 0.20 billion m^3 .

Keywords

Arid Regions, Inland River, Ecological Instream Flow, Runoff, Hydrological Method

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

生态流量是河流综合管理与水利工程建设环境影响评价、河湖长制考核监督重点关注的指标，对维持河流基本的生态功能、保护水生态系统和沿河生态环境具有重要意义。自提出以来，“生态基流”、“生态需水”、“最小生态需水量”、“生态环境需水量”等涉及生态流量的不同概念在国内学者的不同研究中被先后讨论[1] [2] [3]，环境需水(Environmental Water Requirements) [4]、环境流量(Environmental Flow)、最小可接受流量(Minimum Acceptable Flow)、枯水期流量(Low Flow)、最小流量(Minimum Flow)等概念[5] [6] [7]也出现在国外基于不同流域和生态目标的相关研究中。尽管名称和概念略有差异，但是各研究均一致认为，生态流量阈值或目标的科学确定是河流水资源可持续利用和管理的重要基础[8]，关系河流生态系统稳定[9]、水安全[10] [11]和人类经济社会发展所依托的自然生态系统健康，一些学者分别就生态流量阈值和目标计算确定的方法进行了充分的探讨[12] [13] [14]，并就不同流域和不同环境影响下的河流生态流量开展了广泛研究[15] [16] [17]。

水资源是干旱区各类生态系统相互关联的纽带和影响干旱区生态系统稳定最为关键的因子。加之干旱区陆地生态系统对气候变化响应敏感[18] [19]，升温速率远高于全球平均水平[20] [21]，这将加速干旱区山区冰川消融退缩，加剧水资源的波动和不确定性，导致区域水资源分布格局发生变化[22]。科学确定干旱区内陆河流的生态流量阈值对于保障流域山水林田湖草沙生命共同体健康发展尤为重要。而干旱区诸多径流量不大的内陆河多为山溪性季节河流，源于山区由多条洪沟或者溪流汇集，坡降大、水流急、汛期河流水源补给相对丰富，旱季河槽水少甚至干涸[23]，河流径流随季节变化显著，使得一些生态流量阈值确定方法在山溪性季节河流中适用性不佳[24]。许多干旱区季节性河流不同河段、不同季节水文情势差异显著，这给科学确定干旱区季节性内陆河生

态流量阈值带来了更大挑战，常常难以依据统一规范分析确定。选择干旱区典型山溪性季节河流就其生态流量阈值的确定开展相关研究和分析具有切实的意义。

2. 研究区概况及数据、方法

2.1. 研究区及河流概况

黄水沟发源于中天山的天格尔山南坡，属雨雪混合补给的山溪性季节河流，为新疆开都河流域中诸小河流中水量最大的一条河流，位于新疆巴音郭楞蒙古自治州和静县境内(图 1)，其地理位置处于 $85^{\circ}55'\sim 86^{\circ}54'E$ ， $42^{\circ}12'\sim 43^{\circ}09'N$ 。流域东西最宽处相距 80.1 km，南北最长处相距 106.1 km，河流长 186 km 左右，其中，黄水沟出山口以上河长 110 km，集水面积 4311 km^2 ，河流在出山口以下的夏尔乌逊分洪闸分为东、西两支，西支注入开都河，东支长约 66 km，由西北流向东南从波斯腾湖西北角注入湖泊。黄水沟流域高山区发育现代冰川 84 条，总面积 23.80 km^2 ，冰川总储量 0.6831 km^3 。出山口后山前洪积扇区域，河道变宽流速变缓，洪水携带的砾石、泥沙在此大量堆积，为河流洪水、径流的散失区。河流出山口以上为长流水河段，出山口后流入绿洲直至波斯腾湖河段为季节性河段，仅洪水季节有水可达波斯腾湖。

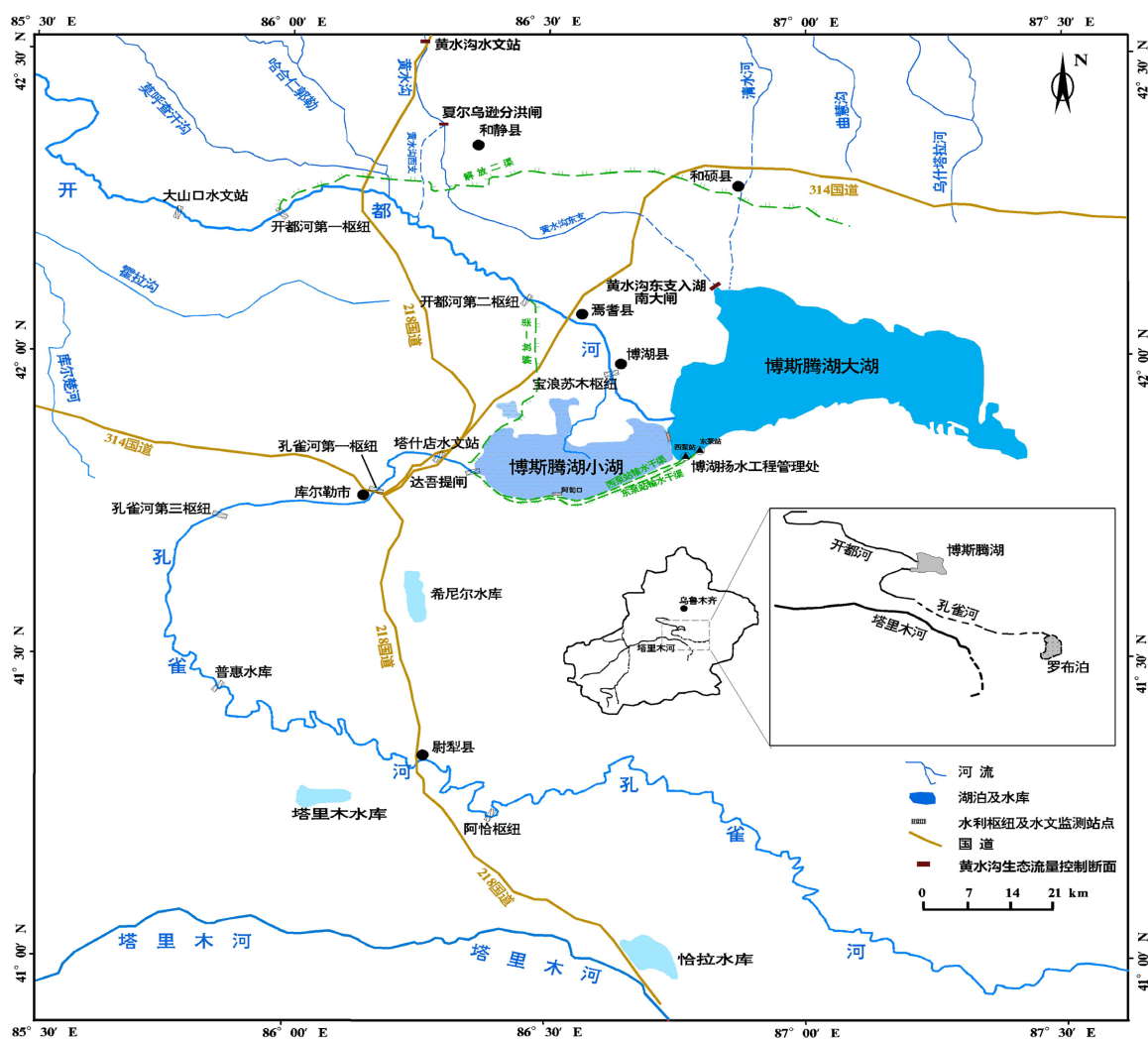


Figure 1. Geographical location of Huangshuigou watershed

图 1. 黄水沟区域地理位置图

2.2. 水文数据来源及分析方法

本工作所用的径流数据为黄水沟水文站的实测值，黄水沟水文站为出山口水量监测控制站，地理坐标 85°44'E、40°13'N，属国家重点水文站，建站于 1955 年 5 月，监测至今，本次所用径流数据选择 1956~2020 年数据为基础分析资料，计算 1980~2020 年与 1956~2000 年黄水沟水文站多年平均天然径流量发现，与 1956~2000 年相比，1980~2020 年多年平均径流量增加了 14.08%，考虑到全球气候变化下温升效应导致干旱区内陆河流径流增加的趋势，为更准确反应黄水沟现状水文情势，确定采用 1980~2020 年实测径流资料作为计算数据序列。运用 SPSS13.0、Excel 等软件，分析出山口水文站径流量的年际和年内变化特征，绘制径流量丰枯变化的距平累积曲线，判断过去 40 年径流量的丰枯阶段，绘制来水频率和径流量曲线(P-III 曲线)，计算不同水文频率对应的径流量，采用典型保证率计算对应水文频率年下的来水量(丰水年 25%保证率，平水年 50%保证率，枯水年 75%保证率，特枯水年 90%保证率)。

2.3. 生态流量计算方法

河流生态流量的计算方法主要包括水文学方法、水力学方法、生态栖息地模拟法和整体分析法等[3][12]。其中，水文学方法应用最为广泛。常用的有 Tennant 法、 Q_p 法、NGPRP 法、流量历时曲线法、最枯月流量法、7Q10 法、Texas 法、最小月平均流量法等，本研究基于多年径流监测数据，采用 Q_p 法、Tennant 法、年型划分法(典型水文频率年法)、最枯月平均流量多年平均值法等四种方法计算分析黄水沟的生态流量阈值。

3. 结果与分析

3.1. 生态保护目标与控制断面的确定

河流生态流量(水量)管理保护目标的不同直接决定了相应目标下生态环境需水量的不同，依据黄水沟的河流自然属性、径流特征、区域社会经济发展状况及河流自然生态环境特征，确定黄水沟生态流量(水量)管理保护目标为 2 个层次。第一层次是保障黄水沟出山口以上长流水河段全年不断流，其目标是保护这段河道内生态环境，维持河流水体的基本形态，保证河流成为一个连续体。以此保证黄水沟提供的生态系统服务功能与水源供给，维持黄水沟的生态系统健康，黄水沟水文站作为考核控制断面。第二层次目标是保障黄水沟出山口后至入博斯腾湖南大闸河段汛期阶段性地恢复水流，并依据自身流域水资源供需特征，保障其进入博斯腾湖的生态水量，南大闸作为考核控制断面。

3.2. 黄水沟水文情势特征

1980~2020 年来黄水沟径流量年际变化整体表现升 - 降 - 升的变化趋势，径流量总体呈增加态势，伴随全球升温，黄水沟山区来水量增加趋势显著，增幅达每 10 年 0.35 亿 m^3 ，特别是 1990 年之后，水量增加尤甚。黄水沟水文站近 40 年平均年径流量 3.24 亿 m^3 ，其中，近 10 年年均径流量最大，达到 3.56 亿 m^3 (图 2)。每年 5~10 月为黄水沟的年内丰水期，5~10 月多年平均径流量 2.56 亿 m^3 ，占多年平均年径流量 3.24 亿 m^3 的 79.01%。其中，径流量最大的为夏季的 6~8 月，该时段多年平均径流量 1.83 亿 m^3 ，占多年平均年径流量的 56.48%。每年 11 月~翌年 4 月为年内枯水期，该时段多年平均径流量为 0.68 亿 m^3 ，占多年平均年径流量的 20.99% (图 3)。当保证率为 10%、25%、50%、75%和 90%情况下，黄水沟出山口的年径流量分别为 4.84 亿 m^3 、3.81 亿 m^3 、2.95 亿 m^3 、2.36 亿 m^3 和 2.03 亿 m^3 (表 1)。1980 年以来的过去 40 余年，黄水沟的径流量丰枯变化大体分为 4 个阶段，即 1980~1995 年的枯水阶段，平均年径流量 2.54 亿 m^3 ；1996~2002 年的丰水阶段，平均年径流量 4.74 亿 m^3 ；2003~2014 年的平水 - 枯水阶段，平均年径流量 2.80 亿 m^3 ；2015~2020 年的丰水阶段，平均年径流量 4.27 亿 m^3 (图 4)。

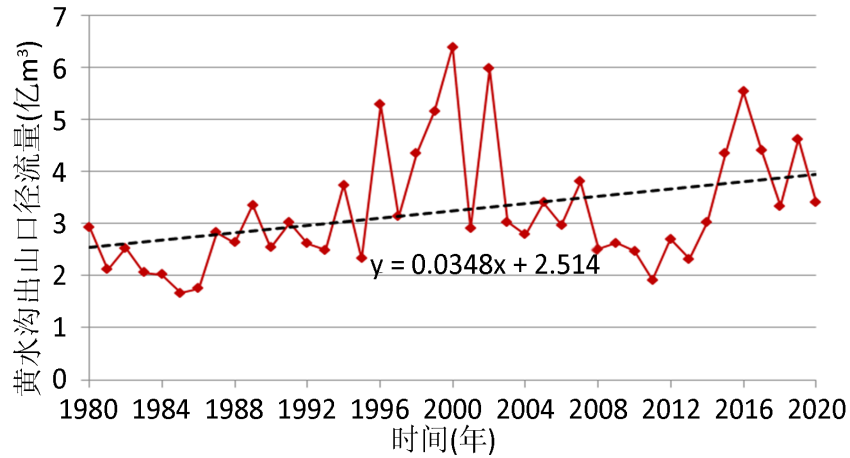


Figure 2. Annual variation of runoff at Huangshuigou hydrological station from 1980 to 2020

图 2. 黄水沟水文站 1980~2020 年径流量年际变化

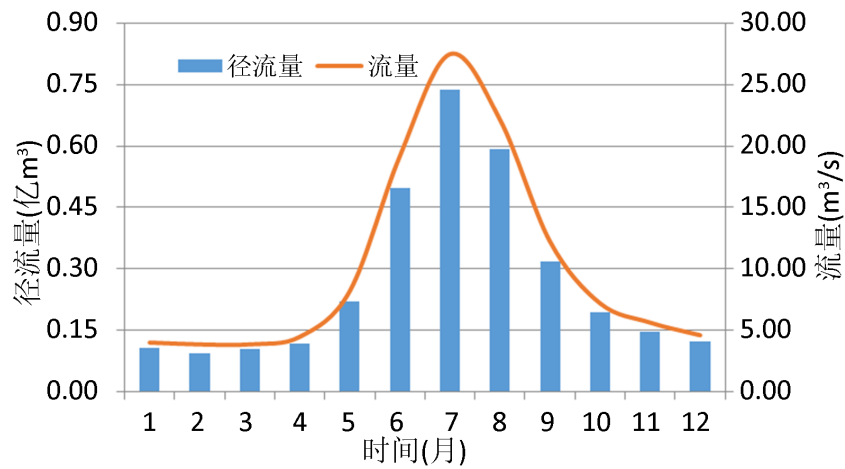


Figure 3. Annual variation of runoff at Huangshuigou hydrological station

图 3. 黄水沟水文站径流量年内变化

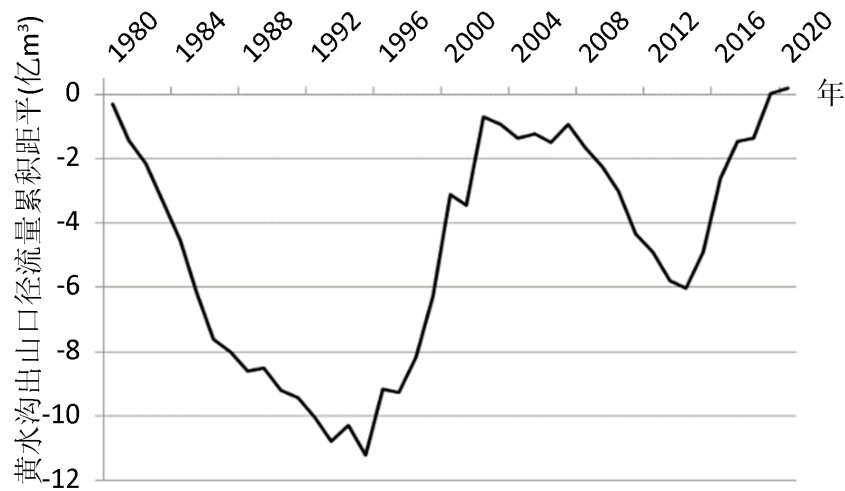


Figure 4. Runoff cumulative offset curve of Huangshuigou hydrological station

图 4. 黄水沟水文站径流量累积距平曲线

Table 1. Design annual runoff with different frequencies of Huangshuigou hydrological station (Unit: 10^8 m^3)
表 1. 黄水沟水文站不同频率设计年径流量(单位: 亿 m^3)

| 站名 | 数据年代系列 | 年均径流量 | Cv | Cs/Cv | 不同保证率 P (%)设计值 | | | | |
|--------|-----------|-------|------|-------|----------------|------|------|------|------|
| | | | | | 10 | 25 | 50 | 75 | 90 |
| 黄水沟水文站 | 1980~2020 | 3.24 | 0.37 | 4.11 | 4.84 | 3.81 | 2.95 | 2.50 | 2.03 |

3.3. 基于不同方法的黄水沟生态流量阈值计算与确定

1) 基于 Q_p 法计算的黄水沟水文站断面基本生态流量

基于实测流量, 采用 90%保证率的 Q_p 法进行统计(表 2), 结果显示丰水期(5~10 月) 90%频率对应的流量为 $3.90 \text{ m}^3/\text{s}$, 以此作为黄水沟水文站断面丰水期基本生态流量目标, 日下泄水量 33.70 万 m^3 ; 年内枯水期(11 月至翌年 4 月) 90%频率对应流量为 $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 以此作为 Q_p 法确定的黄水沟水文站控制断面枯水期基本生态流量, 对应的日最小生态水量为 21.25 万 m^3 。

2) 基于 Tennant 法计算的黄水沟水文站断面基本生态流量

1980~2020 年黄水沟水文站平均流量为 $10.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据黄水沟实际来水情况, 确定黄水沟水文站断面基本生态流量时以河流多年月平均流量 20%的标准确定丰水期基本生态流量目标, 基本生态流量为 $2.04 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应的日最小生态水量为 17.63 万 m^3 ; 以河流多年月平均径流 10%的标准确定黄水沟水文站断面枯水期基本生态流量, 流量目标为 $1.02 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应的日最小生态水量为 8.81 万 m^3 。

Table 2. Mean monthly discharge (m^3/s) and frequency (%) of the section of Huangshuigou hydrological station in different years
表 2. 黄水沟水文站断面不同年丰枯期最枯月平均流量(m^3/s)及频率(%)分析计算表

| 年 | 丰水期(5~10月) | | 枯水期(11月~次年4月) | | 年 | 丰水期(5~10月) | | 枯水期(11月~次年4月) | |
|------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | 最枯月平均流量(m^3) | 频率% | 最枯月平均流量(m^3) | 频率% | | 最枯月平均流量(m^3) | 频率% | 最枯月平均流量(m^3) | 频率% |
| 1980 | 5.71 | 50.00% | 3.09 | 50.00% | 2001 | 7.97 | 14.29% | 4.58 | 14.29% |
| 1981 | 5.02 | 71.43% | 2.85 | 71.43% | 2002 | 9.99 | 7.14% | 4.06 | 7.14% |
| 1982 | 5.20 | 64.29% | 2.50 | 64.29% | 2003 | 7.57 | 16.67% | 4.59 | 16.67% |
| 1983 | 4.64 | 78.57% | 2.44 | 78.57% | 2004 | 5.63 | 54.76% | 4.24 | 54.76% |
| 1984 | 3.91 | 88.10% | 2.80 | 88.10% | 2005 | 5.17 | 69.05% | 3.89 | 69.05% |
| 1985 | 3.38 | 95.24% | 2.50 | 95.24% | 2006 | 6.22 | 40.48% | 3.88 | 40.48% |
| 1986 | 3.16 | 97.62% | 1.85 | 97.62% | 2007 | 3.68 | 90.48% | 3.73 | 90.48% |
| 1987 | 4.66 | 76.19% | 2.23 | 76.19% | 2008 | 6.11 | 42.86% | 3.84 | 42.86% |
| 1988 | 5.60 | 57.14% | 2.47 | 57.14% | 2009 | 5.57 | 59.52% | 4.17 | 59.52% |
| 1989 | 7.33 | 21.43% | 2.60 | 21.43% | 2010 | 4.81 | 73.81% | 3.13 | 73.81% |
| 1990 | 4.27 | 83.33% | 2.90 | 83.33% | 2011 | 4.01 | 85.71% | 2.96 | 85.71% |
| 1991 | 5.21 | 61.90% | 2.67 | 61.90% | 2012 | 5.85 | 47.62% | 3.17 | 47.62% |
| 1992 | 5.18 | 66.67% | 3.60 | 66.67% | 2013 | 4.50 | 80.95% | 3.76 | 80.95% |
| 1993 | 3.66 | 92.86% | 3.34 | 92.86% | 2014 | 6.00 | 45.24% | 3.19 | 45.24% |
| 1994 | 7.17 | 23.81% | 2.92 | 23.81% | 2015 | 10.00 | 4.76% | 3.61 | 4.76% |
| 1995 | 6.45 | 33.33% | 3.68 | 33.33% | 2016 | 5.69 | 52.38% | 3.27 | 52.38% |

Continued

| | | | | | | | | | |
|------|------|--------|------|--------|------|-------|--------|------|--------|
| 1996 | 7.17 | 26.19% | 3.51 | 26.19% | 2017 | 9.04 | 11.90% | 3.03 | 11.90% |
| 1997 | 6.98 | 28.57% | 4.16 | 28.57% | 2018 | 6.45 | 38.10% | 4.54 | 38.10% |
| 1998 | 6.96 | 30.95% | 3.88 | 30.95% | 2019 | 12.50 | 2.38% | 3.00 | 2.38% |
| 1999 | 6.45 | 35.71% | 4.08 | 35.71% | 2020 | 7.47 | 19.05% | 5.23 | 19.05% |
| 2000 | 9.34 | 9.52% | 4.90 | 9.52% | | | | | |

3) 基于典型水文频率年法计算的黄水沟水文站断面生态流量

由黄水沟水文站 1980~2020 年逐年径流的距平百分率(见表 3), 近 41 年期间黄水沟丰枯转化较为频繁。其中 1992 年的距平百分率为-19.33%, 为最接近-20%距平的年份, 选取 1992 年中最枯月 3 月的平均流量 3.60 m³/s 作为黄水沟水文站断面基本生态流量目标。对应日水量为 31.10 万 m³。

Table 3. Classification of abundant, flat, dry year from 1980 to 2020 in Huangshuigou
表 3. 黄水沟 1980~2020 年丰、平、枯年型划分

| 年份 | 距平百分率 E/% | 年型 | 年份 | 距平百分率 | 年型 |
|------|-----------|-----|------|---------|-----|
| 1980 | -9.66% | 平水年 | 2001 | -10.50% | 偏枯年 |
| 1981 | -34.77% | 特枯年 | 2002 | 84.25% | 丰水年 |
| 1982 | -21.97% | 特枯年 | 2003 | -6.56% | 平水年 |
| 1983 | -36.52% | 特枯年 | 2004 | -13.86% | 偏枯年 |
| 1984 | -37.49% | 特枯年 | 2005 | 4.94% | 平水年 |
| 1985 | -48.44% | 特枯年 | 2006 | -8.38% | 平水年 |
| 1986 | -45.87% | 特枯年 | 2007 | 17.60% | 丰水年 |
| 1987 | -12.75% | 偏枯年 | 2008 | -22.47% | 特枯年 |
| 1988 | -18.62% | 偏枯年 | 2009 | -18.87% | 偏枯年 |
| 1989 | 3.53% | 平水年 | 2010 | -23.61% | 特枯年 |
| 1990 | -21.58% | 特枯年 | 2011 | -40.99% | 特枯年 |
| 1991 | -6.73% | 平水年 | 2012 | -16.54% | 偏枯年 |
| 1992 | -19.33% | 偏枯年 | 2013 | -28.48% | 特枯年 |
| 1993 | -23.20% | 特枯年 | 2014 | -6.65% | 平水年 |
| 1994 | 15.42% | 丰水年 | 2015 | 34.16% | 丰水年 |
| 1995 | -28.07% | 特枯年 | 2016 | 70.82% | 平水年 |
| 1996 | 63.15% | 丰水年 | 2017 | 36.15% | 平水年 |
| 1997 | -3.32% | 平水年 | 2018 | 2.80% | 平水年 |
| 1998 | 34.09% | 丰水年 | 2019 | 42.65% | 丰水年 |
| 1999 | 59.21% | 丰水年 | 2020 | 4.94% | 平水年 |
| 2000 | 97.14% | 丰水年 | | | |

4) 基于最枯月平均流量多年平均值法计算的黄水沟水文站断面生态流量

选择近 10 年最枯月平均流量的平均值作为基本生态流量标准, 据统计, 近 10 年每年最枯月流量出现的月

份不尽相同, 2月份和1月份分别出现了3次, 其次是11月和3月, 最枯月平均流量多年平均为 $3.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为本方法确定的黄水沟水文站基本生态流量目标, 日下泄水量 30.93 万 m^3 。

5) 黄水沟水文站生态流量阈值的确定

综合看, Q_p 法、典型年法和最枯月平均流量多年平均值法确定的黄水沟生态流量及其对应的生态水量较为接近, Tennant法确定的黄水沟水文站基本生态流量总体偏小。考虑到 Q_p 法能够对黄水沟丰、枯不同时段的基本生态流量进行分别确定, 更符合山溪性季节河流的丰枯实情, 本研究选择 Q_p 法计算的结果作为黄水沟水文站断面基本生态流量的目标, 即丰水期(5~10月)黄水沟水文站控制断面基本生态流量不小于 $3.90 \text{ m}^3/\text{s}$, 日下泄水量不少于 33.70 万 m^3 ; 年内枯水期(11月至翌年4月)黄水沟水文站控制断面基本生态流量不小于 $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应的日最小生态水量不少于 21.25 万 m^3 。

3.4. 黄水沟入博斯腾湖南大闸断面入湖最小生态水量分析

博斯腾湖是我国最大的内陆淡水湖, 在区域生态功能中发挥着不可替代的作用。博斯腾湖北部诸小河流是湖泊入湖水量的重要组成部分, 其中, 黄水沟是诸小河流中水量最大的一条河流, 保障黄水沟入博斯腾湖生态水量对博斯腾湖出入湖水量平衡、湖泊北部水体循环和湖泊水环境改善均有重要意义。

1) 黄水沟出山口以下沿程径流损失

黄水沟出山口后流经约 11.30 km 的山前冲洪积扇至夏尔吾逊分洪闸, 之后沿黄水沟东支继续在山前冲洪积扇段河床流动约 6.70 km 后流过279县道后进入绿洲平原区, 整个 18 km 左右的黄水沟山前冲洪积扇段河床宽阔, 河槽由上而下渐变宽浅, 河床底部遍布卵石、砾石, 河道纵坡约 13.6% , 水流分散, 以辫状河为主要特征, 是黄水沟河水渗漏损失集中的区段。经不同季节四次野外不同区段实测计算黄水沟出山口至河流进入绿洲平原的冲洪积扇河段每公里水量损失率 2.88% (区段水量损失率 28.67%)。由于黄水沟中、下游河段缺乏水文监测断面以及水文监测资料, 且近十余年多呈断流状态, 难以通过实测资料对其河损进行有效评估。黄水沟与开都河、孔雀河同位于开都-孔雀河流域, 河流在进入绿洲平原区后的地形地貌与地理特征、绿洲经济社会发展模式和气候较为相似。故选择开都河与孔雀河绿洲区相似河段监测资料径流沿程损失计算成果作为参照。开都河自出山口进入绿洲至宝浪苏木枢纽入博斯腾湖河段河损率多年平均为 11.73% ; 孔雀河自第二枢纽后进入绿洲至第三枢纽河段每公里径流损失率为 0.35% , 以每公里 0.35% 河损率计算黄水沟进入绿洲平原区至入博斯腾湖 34.8 km 河段总河损率约 11.49% , 与开都河绿洲平原区河段基本相当, 说明所取的参照河段河损结构合理, 故黄水沟绿洲平原区河段区间河损率采用每公里 0.35% 。

2) 黄水沟下游湿地生态需水

结合近30年遥感影像和野外湿地调查, 黄水沟下游湿地(以下称黄水沟湿地)面积多年平均约 35.50 km^2 , 湿地内以芦苇为主, 零星分布有小片水域。黄水沟湿地生态需水量的估算主要以其耗水量计。主要包括水面蒸发和植物蒸腾耗水等, 这两项消耗减去区域降水即为净耗水需水量, 就是黄水沟湿地的生态需水量, 由于湿地下沉积了厚层的淤泥, 且多年以来已经与地下水基本实现了平衡, 故这里将湿地下渗量忽略。湿地蒸散消耗总量和降水总量与湿地区域面积有关。考虑到黄水沟湿地以芦苇分布为主, 水域面积较少, 所以对其生态需水量按芦苇生长期和非生长期分别计算, 生长期只考虑芦苇植被蒸腾耗水, 非生长期只考虑湿地的水面蒸发耗水。利用适线法原理绘制年降水量频率曲线(P-III型分布曲线), 从年降水量频率曲线中分别找出频率为 25% 、 50% 、 75% 和 90% 对应的值, 即为不同水平年降水量设计值; 再根据典型年选择原则, 从实测数据中选择典型代表年, 以年降水量计算缩放系数(缩放系数 = 年降水量设计值/降水量实测值), 用各缩放系数乘以相应的典型年各月降水量, 即得不同保证率的设计降水量年内分配。借鉴降水量频率曲线分析方法得到不同保证率的设计年蒸发量和月蒸发量。

依据水平衡公示求得湿地植物5~9月份蒸腾需水量在丰水年(计算取 $P = 25\%$)、平水年(计算取 $P = 50\%$)、偏枯水年(计算取 $P = 75\%$)、特枯水年(计算取 $P = 90\%$)植物蒸腾需水量分别为 0.318 亿 m^3 , 0.305 亿 m^3 、 0.287 亿 m^3 和 0.268 亿 m^3 , 黄水沟湿地非植物生长季(1~3月和10~12月)扣除降水后水面蒸发需水量在 25% 、 50% 、

75%和90%频率下分别为0.111亿 m³、0.109亿 m³、0.102亿 m³、0.101亿 m³，黄水沟湿地年平均生态需水量在四个水文频率年下分别为0.429亿 m³、0.414亿 m³、0.389亿 m³和0.369亿 m³(表4)。

3) 黄水沟东支入博斯腾湖生态水量阈值目标确定

基于不同保证率下黄水沟水文站径流量、黄水沟流域水资源供需关系和黄水沟出山口以下河段径流损失估算，基于黄水沟出山口以下的水量平衡关系表(表5)，结果显示：黄水沟出山口水文站在25%、50%、75%和90%不同保证率下的设计径流分别为3.81亿 m³、2.95亿 m³、2.5亿 m³、2.03亿 m³，多年平均3.24亿 m³，黄水沟流域的国民经济用水“三条红线”地表水用水量指标为1.573亿 m³，引水后，黄水沟在保障西支按照多年平均断面来水量的10%作为生态基流下泄后，其余水量均由夏尔乌逊分洪闸溢流堰向黄水沟东支下泄，在25%、50%、75%和90%不同频率下夏尔乌逊断面下泄东支水量分别是1.488亿 m³、0.870亿 m³、0.546亿 m³、0.208亿 m³(表5)，黄水沟东支径流在流经绿洲和保障下游湿地生态需水后，在25%、50%、75%和90%不同频率下流入博斯腾湖南大闸断面处径流量分别为0.644亿 m³、0.213亿 m³、0.005亿 m³、-0.219亿 m³，即只有在黄水沟流域来水处于丰水(P=25%)和平水年(P=50%)时，水量在国民经济用水和流域下游湿地生态需水后，能保障在南大闸断面入博斯腾湖生态水量为0.644亿 m³和0.213亿 m³，保证率在75%的偏枯水年，水量在保障黄水沟下游湿地生态需水后基本无水入湖，而90%保证率的特枯水年份，无法保障黄水沟东支入博斯腾湖水量。综合分析，黄水沟东支在南大闸断面入博斯腾湖生态水量目标宜不低于0.20亿 m³，保证率为50%。

Table 4. Ecological water requirement of Huangshuigou wetland in different years (10⁸ m³)

表4. 不同丰枯水平年黄水沟湿地生态需水量(亿 m³)

| | 丰水年(25%) | 平水年(50%) | 偏枯年(75%) | 特枯年(90%) |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 黄水沟湿地植被生长季蒸腾需水(5~9月) | 0.318 | 0.305 | 0.287 | 0.268 |
| 黄水沟湿地非植物生长季扣除降水后的水面蒸发需水量(1~3月和10~12月) | 0.111 | 0.109 | 0.102 | 0.101 |
| 黄水沟湿地年平均生态需水量 | 0.429 | 0.414 | 0.389 | 0.369 |

Table 5. The design runoff with different frequency of Huangshuigou hydrologic station during the annual flood period (May-October) (10⁸ m³)

表5. 黄水沟水文站年内丰水期(5~10月)不同频率设计径流量(10⁸ m³)

| | 平均径流量 | 不同保证率 P (%)设计值 | | | |
|----------------------|---|----------------|-------|-------|--------|
| | | 25% | 50% | 75% | 90% |
| 黄水沟水文站 | 3.24 | 3.81 | 2.95 | 2.5 | 2.03 |
| 黄水沟区间引水三条红线指标 | 1.573 | | | | |
| 区间距离 | 黄水沟水文站至黄水沟夏尔乌逊闸 11.3 km | | | | |
| 区间径流损失率 | 每公里 2.88% | | | | |
| 黄水沟夏尔乌逊闸断面 | 1.198 | 1.608 | 0.990 | 0.666 | 0.328 |
| 非泄洪情况下分洪闸后东、西支分水比例 | 黄水沟西支按照夏尔乌逊闸断面多年平均来水量的10% (0.12亿方)下泄，其余水量由黄水沟东支下泄 | | | | |
| 黄水沟东支夏尔乌逊闸下泄 | | 1.488 | 0.870 | 0.546 | 0.208 |
| 区间距离 | 黄水沟东支夏尔乌逊闸至昆金公路桥 41.8 km | | | | |
| 区间径流损失率 | 黄水沟东支夏尔乌逊闸后前 7 km 每公里损失 2.88%，后 34.8 km 每公里损失 0.35% | | | | |
| 昆金公路桥(自此桥后黄水沟进入下游湿地) | | 1.073 | 0.627 | 0.394 | 0.150 |
| 黄水沟湿地生态需水 | | 0.429 | 0.414 | 0.389 | 0.369 |
| 黄水沟东支入博斯腾湖南大闸 | | 0.644 | 0.213 | 0.005 | -0.219 |

4. 主要结论

1) 黄水沟为干旱区典型的山溪性季节河流, 应依据不同河段实际水文情势确定不同的生态保护目标, 对于山区长流水河段应选择出山口水文断面作为控制断面确定山区河段的最小生态流量阈值, 以保障山区河段水生态; 对于中下游季节性河段, 可依据实际需求选择合理断面确定适宜的最小生态水量阈值。

2) 以保障黄水沟水文站以上河道不断流作为基本保护目标, 则需保证黄水沟水文站按照不低于基本生态流量的流量下泄, 即年内丰水期(5~10月)黄水沟水文站控制断面基本生态流量不小于 $3.90 \text{ m}^3/\text{s}$, 日下泄水量不少于 33.70 万 m^3 ; 年内枯水期(11月至翌年4月)黄水沟水文站控制断面基本生态流量不小于 $2.46 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应的日最小生态水量不少于 21.25 万 m^3 。

3) 黄水沟水文站(1980~2020年)多年平均径流量为 3.24 亿 m^3 , 巴音郭楞蒙古自治州最严格水资源管理规定的黄水沟“三条红线”地表水国民经济用水指标为 1.573 亿 m^3 , 基于不同丰枯频率年情景下黄水沟的来水情况与供需水, 综合分析确定黄水沟入博斯腾湖南大闸断面基本生态水量目标为不小于 0.20 亿 m^3 , 在流域来水保证率好于 50%背景下应保障这一入湖生态水量, 此时, 不仅可以满足黄水沟出山口站的基本生态流量, 同时可以保障黄水沟流域以其为水源的国民经济社会发展基本用水。

基金项目

本项目由新疆自然科学基金重点项目(2021D01D01), 干旱区典型绿洲水资源变化与水土资源匹配和优化配置研究项目(E344910401)资助。

参考文献

- [1] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507-514.
WANG Xiqin, LIU Changming and YANG Zhifeng. Research advance in ecological water demand and environmental water demand. *Advances in Water Science*, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese)
- [2] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 7-10.
XU Zongxue, WU Wei and YU Songyan. Ecological baseflow: Progress and challenge. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4): 7-10. (in Chinese)
- [3] 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 instream ecological baseflow in China. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2016, 14(6): 401-411. (in Chinese)
- [4] ABBASPOUR, M., NAZARIDOUST, A. Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: An ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*, 2007, 64(2): 161-169.
<https://doi.org/10.1080/00207230701238416>
- [5] POFF, N. L., MATTHEWS, J. H. Environmental flows in the anthropocene: Past progress and future prospects. *Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 667-675. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.006>
- [6] DAKOVA, S., UZUNOV, Y. and MANDADJIEV, D. Low flow—The river's ecosystem limiting factor. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 167-174. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00101-4)
- [7] GLEICK, P. H. Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579.
[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0571:WICPTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0571:WICPTS]2.0.CO;2)
- [8] 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. Analysis of water supply and demand in China in the 21st century. *China Water Resources*, 1999(10): 18-20. (in Chinese)
- [9] 魏健, 潘兴瑶, 孔刚, 等. 基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 64-76.
WEI Jian, PAN Xingyao, KONG Gang, et al. Study on ecological restoration of water-deficient rivers based on ecological water supplement method. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(1): 64-76. (in Chinese)
- [10] 田若谷, 李怀恩, 刘铁龙. 河道生态基流保障引起的农业损失量计算[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 111-116.
TIAN Ruogu, LI Huaen and LIU Tielong. Calculation of agricultural loss caused by river ecological basic flow protection. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(5): 111-116. (in Chinese)

- [11] 成波, 李怀恩, 黄康, 等. 基于河道生态基流保障的农田生态系统服务价值损失量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4): 255-260.
CHENG Bo, LI Huaen, HUANG Kang, et al. Study on the farmland ecosystem services value loss based on the river ecological base flow protection. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(4): 255-260. (in Chinese)
- [12] 徐宗学, 李鹏, 侯昕玥. 河道生态基流理论基础与计算方法研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 119-127.
XU Zongxue, LI Peng and HOU Xinyue. Theoretical basis and estimation method for ecological baseflow. *Yellow River*, 2019, 41(10): 119-127. (in Chinese)
- [13] 杨露, 侯精明, 王盼, 等. 基于高效高精度栖息地模型的生态流量研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(1): 77-85.
YANG Lu, HOU Jingming, WANG Pan, et al. Study on ecological flows based on high-efficiency and high-accuracy habitat model. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(1): 77-85. (in Chinese)
- [14] 涂晶晶, 陈森林, 艾学山, 等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 99-105.
TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow. *Water Resources Protection*, 2015, 31(1): 99-105. (in Chinese)
- [15] 阿膺兰, 胡鹏, 曾庆慧, 等. 基于底栖动物响应特征的洮儿河生态流量目标适应性分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 253-260.
A Yinglan, HU Peng, ZENG Qinghui, et al. Adaptability analysis of ecological flow based on response characteristics of benthos in the Taoer River. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 253-260. (in Chinese)
- [16] 南军虎, 刘一安, 陈垚, 等. 裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 189-197.
NAN Junhu, LIU Yian, CHEN Yao, et al. Reconstruction of biological habitat and ecological flow estimation in curving cut-off river channel. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 189-197. (in Chinese)
- [17] 季小兵, 马玉其, 王新友, 等. 基于 1960-2018 年实测径流与水文学方法的开都河生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(6): 17-23, 30.
JI Xiaobing, MA Yuqi, WANG Xinyou, et al. Analysis of ecological instream flow of Kaidu River based on hydrological methods and measured runoff data from 1960 to 2018. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(6): 17-23, 30. (in Chinese)
- [18] CANADELL, J. G., MOONEY, H. A., BALDOCCHI, D. D., et al. Commentary: Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multi-technique approach for improved understanding. *Ecosystems*, 2000, 3(2): 115-130.
<https://doi.org/10.1007/s100210000014>
- [19] CHEN, Y. N., LI, Z., FAN, Y. T., et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of Northwest China. *Environmental Research*, 2015, 139: 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.029>
- [20] 徐新良, 王靓, 蔡红艳. “丝绸之路经济带”沿线主要国家气候变化特征[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1742-1753.
XU Xinliang, WANG Liang and CAI Hongyan. Spatial-temporal characteristics of climate change in the Silk Road Economic Belt. *Resources Science*, 2016, 38(9): 1742-1753. (in Chinese)
- [21] 王会军, 唐国利, 陈海山, 等. “一带一路”区域气候变化事实、影响及可能风险[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 1-9.
WANG Huijun, TANG Guoli, CHEN Hanshan, et al. The Belt and Road region climate change: Facts, impacts and possible risks. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(1): 1-9. (in Chinese)
- [22] Yao, T. D., Bolch, T., Chen, D., et al. The imbalance of the Asian water tower. *Nature Review Earth & Environment*, 2022, 3: 618-632. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00299-4>
- [23] 赖锡军, 汪德权. 山溪性河流水动力学耦合模型研究[J]. 河海大学学报, 2002, 30(3): 57-60.
LAI Xijun, WANG Deguan. Study on hydraulic coupling model for mountainous rivers. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2002, 30(3): 57-60. (in Chinese)
- [24] 朱敏翔, 杨柳, 杨超, 等. Tennant法在河流生态基流计算中的适用性探讨——以福建省东南沿海地区为例[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 59-64.
ZHU Minxiang, YANG Liu, YANG Chao, et al. Applicability of Tennant method in rivers in southeast coastal areas of Fujian Province. *Yangtze River*, 2020, 51(4): 59-64. (in Chinese)