

大通河流域生态流量确定及预警方案研究

张文睿¹, 孙栋元¹, 曹晓萱², 杨俊³, 周敏¹, 赵文琦¹

(1. 甘肃农业大学 水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 黄河水利委员会河南水文水资源局, 河南 郑州 450003; 3. 甘肃省水利厅水土保持中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 生态流量是维护河流生态健康和功能的重要基础和保障。以大通河流域青石嘴站、天堂站、连城站、享堂站的长序列径流资料作为基础数据, 采用基流比例法、Tennant法、最枯月平均流量多年平均值法、90%保证率法和7Q10法计算大通河流域生态流量, 同时研究流域生态流量预警方案和预警流量控制指标。结果表明: 基流比例法计算结果更具全面性和合理性, 可以反映各年际各时段的流域生态流量; 大通河流域生态流量的流量范围为多年平均流量的11%~35%, 相应的青石嘴站、天堂站、连城站和享堂站的生态流量分别为5.57~17.73 m³/s、8.68~27.61 m³/s、9.08~28.88 m³/s和9.39~29.89 m³/s, 经过保障度分析, 各水文站全年生态流量保障度达到90%; 依据确定的生态流量, 将生态预警划分为蓝色预警、橙色预警、红色预警3个等级, 并制定预警方案, 该方案可以提高流量监测的可靠性和准确性, 优化水库调度, 维护生态环境健康。

关键词: 生态流量; 预警方案; 水文学法; 基流比例法; 大通河流域

中图分类号: TV213.4; X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0100-10

Ecological base flow determination and early warning scheme of the Datong River

ZHANG Wenrui¹, SUN Dongyuan¹, CAO Xiaoxuan², YANG Jun³, ZHOU Min¹, ZHAO Wenqi¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Henan Hydrology and Water Resources Bureau of the Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

3. Soil and Water Conservation Center of Gansu Provincial Water Resources Department, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Safeguarding the ecological base flow is the basic requirement of maintaining the ecological health and functions of rivers. Based on the long series runoff data of Qingshizui, Tiantang, Liancheng and Xiangtang stations in the Datong River Basin, the base flow proportion method, Tennant method, the multi-year average of the driest monthly average flow method, 90th percentile method and 7Q10 method were combined to calculate the ecological base flow of the Datong River Basin. Meanwhile, the early warning scheme and flow control indicators were investigated accordingly. The results show that the calculation results of base flow proportion method is more comprehensive and reasonable, and can reflect the ecological base flow of the basin in each interannual period. According to the calculation, the range of ecological base flow in the Datong River Basin is determined to be 11%–35% of the annual average flow, and the ecological base flow of Qingshizui, Tiantang, Liancheng and Xiangtang stations is 5.57–17.73, 8.68–27.61, 9.08–28.88 and 9.39–29.89 m³/s, respectively. Furthermore, the assurance degree of annual base flow obtained from the guarantee degree analysis reaches 90%. Then, according to the determined ecological base flow, the ecological early warning is categorized into three levels of blue warning, orange warning and red warning, based on which the early warning scheme is formulated to improve the reliability and accuracy of flow monitoring and optimize reservoir scheduling in the meantime.

Key words: ecological base flow; early warning scheme; hydrological method; base flow proportion

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-10-01

基金项目: 甘肃省高等学校青年博士基金项目(2022QB-070); 甘肃农业大学科技创新基金项目(GAU-QDFC-2021-16); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015); 甘肃省水利厅水资源费项目(甘水资源发[2022]94号)

作者简介: 张文睿(2001-), 女, 甘肃山丹人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面研究。

通讯作者: 孙栋元(1978-), 男, 甘肃民乐人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的教学和科研工作。

method; the Datong River Basin

1 研究背景

生态流量是维系河湖生态功能、维护河湖水生态健康的有力保障,同时是统筹流域生活、生产和生态用水以优化配置水资源的重要基础。目前国内外学者针对生态流量的研究大体包括3个方面,分别为相关概念解释、内涵理解、研究方法对比和改进。学者们关于生态流量提出了许多相关概念,包括环境需水、基本生态需水、枯水流量、最小生态需水量、生态环境需水量、城市生态需水量、湿地生态需水量、干旱区生态需水量、湖泊生态需水量、最小下泄流量和生态基流等^[1-2]。对生态流量的内涵,许多学者从不同角度进行了解释,吕宝阔^[3]从水环境层面认为生态流量包括维持河道生态环境和与河道相连的湖泊、地下水、湿地、河口等系统的流量;刘玉晶^[4]从用水结构层面认为生态流量维系着河湖生态功能、统筹着“三生”用水、控制着水资源开发强度、关系着水安全和生态文明;武明亮^[5]考虑了河道和水生物层面,提出河流生态流量是维持或者保障河流形态、河道结构功能、生物群落结构和功能不被破坏的最小流量。而关于生态流量的研究方法或计算方法有很多,各有其优缺点,如:蒙大拿法计算简便但没有考虑生态要素;流量历时曲线法计算灵活,可以体现各月份径流特征,但是缺乏频率设定时的资料;7Q10法不适用于受人类活动影响较大的河道;Texas法受地域影响较大;湿周法受河道形状、断面形式的影响较大;R2Cross法融合了多门学科,但没有考虑季节的影响^[6-7],而基流比例法相比于以上方法较适用于生态流量的研究^[8]。

总体来看,生态流量衍生的相关概念较多,概念的界定并不清晰,具体的研究侧重点也各有差异。本文对于大通河流域生态流量的研究侧重于探讨维持河流生态系统运转和水库水电站工程运行的基本流量,即生态基流量,又名生态基流,用于确保河道枯水期不发生河流断流或河流萎缩^[9]。对于生态流量的研究方法也多种多样,其中水文学法应用普遍,所需基础资料容易获得,故本文选用水文学法作为主要研究方法。除此之外,引入基流比例法用于分析年内和年际的生态基流变化趋势,并讨论该方法在大通河流域生态流量研究中的适用性。

大通河流域地处我国西北地区,流域内修建了引大济湟和引大入秦等调水工程,这些工程对水环境和水文情势产生了一定的影响^[10]。目前对于大

通河生态流量的研究相对较少,以往的研究也仅侧重于水文健康评价和水资源调度方面。为保证大通河流域的水文特征和水生态环境的健康发展,本文在综合前人研究的基础上,选取大通河流域青石嘴站、天堂站、连城站、享堂站4个水文站的长序列径流资料作为基础数据,采用基流比例法、Tennant法、最枯月平均流量多年平均值法、90%保证率法和7Q10法计算各水文站的生态流量,并依据确定的生态流量划分生态预警等级和方案,从而为流域河流健康研究和水生态保护提供技术支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

大通河发源于青海省海西蒙古族藏族自治州天峻县祁连山脉东段托莱南山的岗格尔肖合力冰峰东麓和大通山之间的沙果林那穆吉木林,向东南流经木里盆地、江仓盆地、默勒盆地、门源盆地,在门源县克图以下逐渐转南东流,再转南流至民和县享堂与湟水汇合^[11-12]。大通河干流总长度为560.7 km,流域面积为15 130 km²,地形狭长,干流两岸支流水系呈羽毛状均匀分布^[13],流域概况如图1所示。流域内共设青石嘴站、天堂站、连城站、享堂站4个水文站,其中,青石嘴水文站至连城水文站河段为中游,较大支流多分布于左岸;连城水文站至大通河河口为下游,具有西北黄土高原气候特点。各水文站信息及特征值如表1所示。大通河中下游人口较为密集,水资源的利用形式以工农业生产和生活用水为主。由于大通河流域地处我国西北地区的生态过渡带,生态环境十分脆弱,并且随着大通河流域经济社会的发展以及对河道、水资源开发力度的不断加大,大通河河道水生态保护面临着巨大挑战。

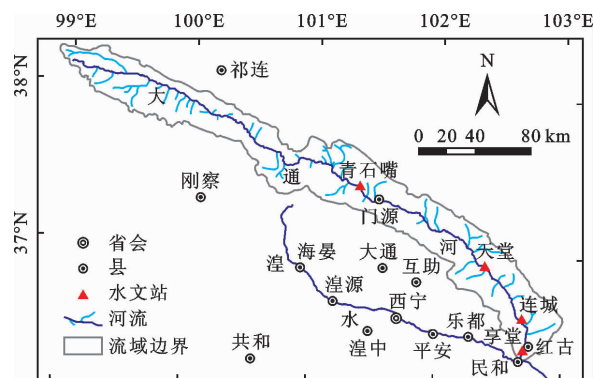


图1 大通河流域概况图

表 1 大通河流域各水文站信息及特征值

水文站	地理位置(经纬度)	所属流域水系	设站位置	多年平均径流量/ 10^8 m^3	至河口距离/ km	集水面积/ km^2
青石嘴站	101°19'E, 37°18'N		大通河上游	16.20	372	8011
天堂站	102°19'E, 36°47'N	黄河流域	大通河中游	24.82	255	12574
连城站	102°37'E, 36°27'N	湟水水系	大通河中游	26.10	100	13914
享堂站	102°38'E, 36°15'N		大通河下游	27.41	40	15126

2.2 数据来源

采用大通河流域青石嘴、天堂、连城、享堂 4 个水文站长系列实测月径流资料进行分析,其中青石嘴站选取 1956–2016 年(共 61 a)径流数据,天堂站和连城站选取 1977–2020 年(共 44 a)径流数据,享堂站选取 1977–2019 年(共 43 a)径流数据,所有数据均来自于甘肃省水文部门。

2.3 计算方法

国内外对于生态流量的计算方法包括 4 类,即水文学法(历史流量法)、水力学法、生境模拟法、整体法。水文学法是对简单水文指标的计算方法,不同方法所计算的流量值对应河道内不同生态流量标准,常用方法有蒙大拿法、流量历时曲线法、7Q10 法、RVA(range of variability approach)法^[14]、Texas 法、BF(basic flow)法、NGPRP(Northern Great Plains resources program)法、基本流量法、最小月平均流量法、ABF(aquatic base flow)法、基本生态需水量法^[15];水力学法利用曼宁公式对流域中流量和水力学要素建立联系,进行生态流量计算,常用方法有湿周法、水力半径法、R2Cross 法;生境模拟法是水力学的进一步发展,该方法既考虑了流域内生物所处的环境要素,又考虑了河流的水力学条件,常用方法有 IFIM(in-stream flow increment methodology)法、CASIMIR(computer aided simulation model for instream flow requirements in regulated streams)法、PHABSIM(physical habitat simulation system)法;整体法是国内外研究的主要方向,该方法主要考虑关注多种河流生态系统之间的服务功能与确定环境流量,常用方法有 HEA(habitat equivalency analysis)法、水文-生态响应关系法、BBM(building block methodology)法,另外,还有运用水文模型估算河道生态流量和应用河流无脊椎动物分类与预测系统的方法。本文采用基流比例法、Tennant 法、最枯月平均流量多年平均值法、90% 保证率法和 7Q10 法对流域生态流量进行计算分析,并以此确定生态流量预警方案。

2.3.1 基流比例法 基流比例法将多年径流资料

划分为丰水年、平水年、枯水年和特枯水年 4 种年型,进一步又将年内划分为丰水期、平水期、枯水期和特枯水期 4 个水文期,具体计算过程如下。

(1) 年型划分。年型一般可用频率曲线法和距平百分率法进行划分,考虑到样本数量对计算结果的影响,基流比例法通常采用距平百分率法进行划分计算,其公式为^[16–17]:

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

式中: E 为监测断面距平百分率,%; Q_i 和 Q_a 分别为监测断面第 i 年的平均流量和监测断面平均流量, m^3/s 。定义 $E > 20\%$ 为丰水年, $-20\% < E < 20\%$ 为平水年, $-60\% < E < -20\%$ 为枯水年, $E < -60\%$ 为特枯水年。

(2) 基流比例。由于丰水年河道内流量较大,生态流量对应的占多年平均流量百分数相对较小,故将丰水年视为计算起点,根据各年型的平均流量比值确定平水年、枯水年和特枯水年的基流比例计算公式为:

$$T_{i+1} = \alpha \cdot T_i \quad (2)$$

$$\alpha = 1 + \mu \left(\frac{Q_i}{Q_{i+1}} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: T_i 为监测断面第 i 年型的基流比例,%; $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示丰水年,平水年,枯水年和特枯水年; α 为比例倍数; Q_i 为第 i 种年型的平均流量, m^3/s ; μ 为消减系数,反映了河流的丰枯特性,一般取 $\mu = 0.4$ 。

(3) 生态基流。生态基流为各个时段平均流量与其基流比例相乘所得,计算公式为:

$$S_i = Q_i \cdot T_i \quad (4)$$

式中: S_i 为监测断面第 i 年的生态基流, m^3/s 。

2.3.2 蒙大拿法(Tennant 法) 蒙大拿法(Montana 法)又名 Tennant 法^[18],该方法设立流量与水生栖息地环境情况之间的经验关系,并计算出年内不同时间段平均流量的 10% 和 30% 作为生态流量^[19],其公式为:

$$Q_j = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n Q_{ij} \tag{5}$$

式中: Q_j 为第 j 月的生态流量, m^3/s ; n 为统计年数; k 为径流比例; Q_{ij} 为第 i 年第 j 月的平均流量, m^3/s 。

将水生态环境健康发展与河道流量的关系分为极限或最大、最佳范围、极好、很好、良好、一般或极差、差或最小、极差 8 个等级标准^[20],并根据一般用水期和鱼类产卵育幼期,分别取相应时段年平均流量的 10% 和年平均流量的 30% 作为生态基流。

2.3.3 最枯月平均流量多年平均值法 该方法是将最枯月实测多年流量的平均值作为河流最小生态流量,计算公式为^[21]:

$$Q_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \min Q_{ij} \tag{6}$$

式中: Q_b 为河流最小生态流量, m^3/s ; Q_{ij} 为第 i 年第 j 月的平均流量, m^3/s ; n 为统计年数。

2.3.4 90% 保证率法 90% 保证率法最初起源于美国的 7Q10 法,于 1970 年传入我国并进行了改进^[22],该方法适用于水量较少而开发利用率较高的河流^[23],可以用于河流纳污能力计算。90% 保证率法是采用 P-Ⅲ型曲线对多年最枯月平均流量进行频率分析,90% 保证率下最枯月平均流量即为生态流量。

2.3.5 7Q10 法 7Q10 法指的是 90% 保证率下最

枯连续 7 d 的平均流量,但由于我国河流流量年内年际变化大,连续 7 d 最枯平均流量的要求过于严苛,因此国内学者改进为最近 10 年最枯月平均流量,其公式为:

$$Q_j = \frac{\sum_{i=1}^n \min Q_{ij}}{n} \tag{7}$$

式中: Q_j 为第 j 月的生态流量, m^3/s ; n 为统计年数; Q_{ij} 为第 i 年第 j 月的平均流量, m^3/s 。

3 结果与分析

3.1 基流比例法计算分析

(1) 各年型生态基流计算。根据大通河流域 4 个水文站多年平均流量数据,采用距平百分率法计算得到研究时段内 4 个水文站年型划分及流量特征值,见表 2。由表 2 可以看出,4 个水文站均为平水年年份居多,由于其距平百分数均大于 -60%,所以不存在特枯水年。

根据蒙大拿法中河流流量与河道生态健康之间的关系,设定各水文站丰水年生态基流比例为 20%^[24],依据前文基流比例和生态基流公式,计算得到平水年、枯水年的基流比例和生态基流量,结果见表 3,研究时段内各水文站年实测平均流量与生

表 2 研究期内各水文站的年型划分及流量特征值

水文站	年型划分	年份	各年型平均流量 $Q_i / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	比例系数	多年平均流量 $Q_a / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
青石嘴站	丰水年	1958、1964、1967、1981、1983、1988、1989 1956、1957、1959、1961 - 1963、1965、1966、1968 - 1972、1974 - 1977、	68.89	1.00	50.63
	平水年	1982、1984 - 1987、1990、1992、1993、1995、1996、1998 - 2000、 2002 - 2016	50.70	1.14	
	枯水年	1960、1973、1978 - 1980、1991、1994、1997、2001	35.69	1.17	
天堂站	丰水年	1983、1989、2003	109.74	1.00	78.88
	平水年	1977、1978、1981、1982、1984 - 1988、1990、1992 - 2002、2004 - 2020	78.39	1.16	
	枯水年	1979、1980、1991	54.25	1.18	
连城站	丰水年	1983、1988、1989、1993、2001、2003	102.74	1.00	82.52
	平水年	1977、1978、1981、1982、1984 - 1987、1990、1992、1994 - 2000、2002、 2004 - 2020	81.53	1.10	
	枯水年	1979、1980、1991	62.71	1.12	
享堂站	丰水年	1981、1983、1988、1989、1993、2003	118.00	1.00	85.40
	平水年	1977 - 1980、1982、1984 - 1987、1990、1992、1994 - 2000、2002、2004 - 2014、2016 - 2019	81.50	1.18	
	枯水年	1991、2001、2015	64.40	1.11	

态基流变化趋势见图 2。

由表 3 可以看出,从丰水年到枯水年各水文站生态基流占多年平均流量的比例稳定在 18% ~ 28% 之间;由图 2 可知,各水文站的多年平均径流量远高于生态流量,并且生态流量随着多年平均径流量的增大或减小而同步变化。

表 3 基流比例法对各水文站各年型生态基流量计算表

计算项目	青石嘴站			天堂站			连城站			享堂站		
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年
平均流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	68.89	50.70	35.69	109.74	78.39	54.25	102.74	81.53	62.71	118.00	81.50	64.40
基流比例 $T/\%$	20.00	22.87	26.72	20.00	23.20	27.33	20.00	22.10	24.75	20.00	23.58	26.08
生态基流量 $S/(m^3 \cdot s^{-1})$	13.78	11.59	9.54	21.95	18.19	14.83	20.55	18.02	15.52	23.60	19.39	16.71
占多年平均流量比例/ $\%$	27.22	22.89	18.84	27.83	23.06	18.80	24.90	21.84	18.81	27.60	22.67	19.54

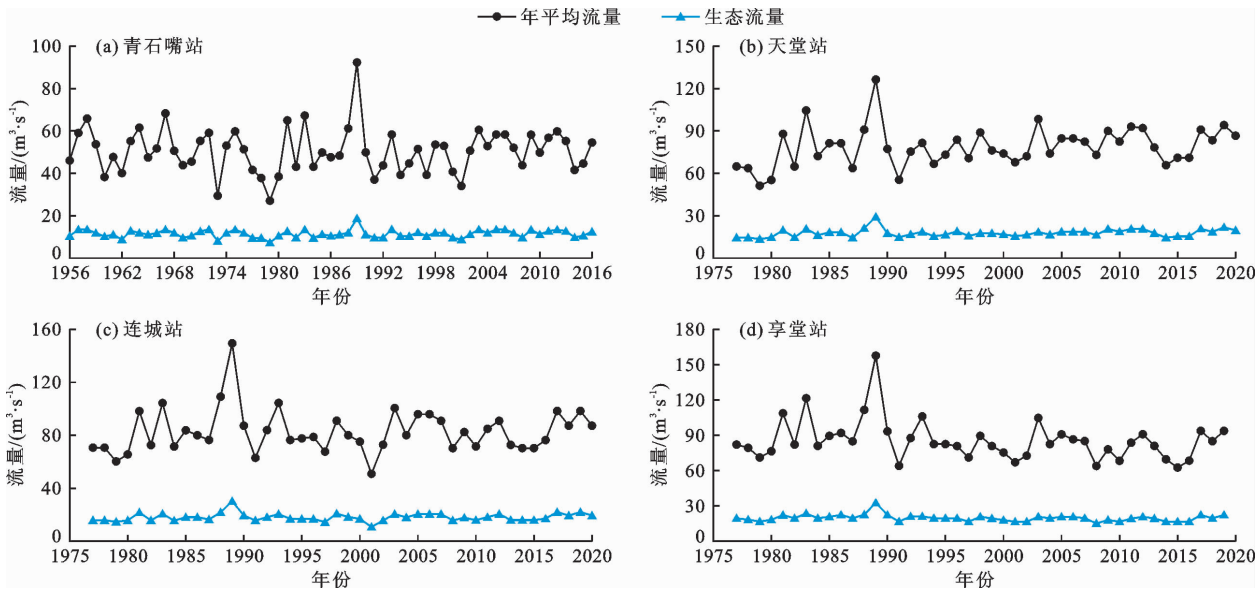


图 2 研究时段内各水文站年实测平均流量与生态流量变化趋势

表 4 基流比例法对各水文站年内各水文期生态基流计算表

水文站	水文期	丰水年			平水年			枯水年		
		平均流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均生态基流量 $S/(m^3 \cdot s^{-1})$	占多年平均流量比例/ $\%$	平均流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均生态基流量 $S/(m^3 \cdot s^{-1})$	占多年平均流量比例/ $\%$	平均流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	平均生态基流量 $S/(m^3 \cdot s^{-1})$	占多年平均流量比例/ $\%$
青石嘴站	丰水期(7-9月)	168.02	33.60	66.36	115.91	26.51	52.36	79.79	21.32	42.11
	平水期(4-6、10-11月)	58.52	11.70	23.11	45.69	10.45	20.64	45.82	12.24	24.18
	枯水期(12-3月)	6.15	1.23	2.43	7.53	1.72	3.40	5.68	1.52	3.00
天堂站	丰水期(7-9月)	295.20	59.04	74.85	162.37	37.68	47.77	109.60	29.41	37.28
	平水期(4-6、10月)	120.00	24.00	30.43	78.08	18.11	22.96	56.90	15.55	19.71
	枯水期(11-3月)	32.90	6.58	8.34	25.34	5.88	7.45	18.90	5.17	6.55
连城站	丰水期(7-9月)	227.86	45.57	55.22	171.30	37.86	45.88	127.13	31.53	38.21
	平水期(5-6、10月)	116.93	23.39	28.34	85.26	18.84	22.83	69.62	17.27	20.93
	枯水期(11-4月)	33.09	6.62	8.02	30.18	6.67	8.08	27.03	6.70	8.12
享堂站	丰水期(7-9月)	276.50	55.30	65.52	172.00	40.56	47.49	126.90	33.09	38.75
	平水期(5-6、10月)	125.80	25.16	29.46	87.00	20.51	24.02	77.10	20.11	23.55
	枯水期(11-4月)	34.80	6.96	8.15	32.60	7.69	9.00	26.70	6.96	8.15

(2)年内各水文期生态基流计算。首先确定各水文站年内的丰水期、平水期和枯水期,再计算各水文期的平均流量,并按照年际基流量比例计算各年型相应的生态基流,计算结果见表 4,各水文站不同年型年内逐月生态基流及多年平均流量变化过程见图 3。表 4 中的计算结果表明,径流量越小则生态基流的变化范围也越小,并且从丰水期到枯水期的生态基流所占多年平均流量的比例范围远大于年际生态基流的变化范围;由图 3 可知,各水文站不同年型逐月生态基流与多年平均流量的变化趋势大体一

致,但不完全相同。

3.2 Tennant 法计算分析

根据 Tennant 法河流生态健康状况 8 个等级标准计算出的各水文站非汛期和汛期不同生态健康状况下的生态流量,以及按照多年平均流量的 10% (非汛期)和 30% (汛期)比例计算出的各水文站生态流量分别如表 5、6 所示。由表 6 可知,Tennant 法计算的青石嘴、天堂、连城和享堂 4 个水文站的生态流量分别为 1.61 ~25.38 m³/s,3.45 ~36.39 m³/s,8.61 ~38.25 m³/s,3.84 ~39.57 m³/s。

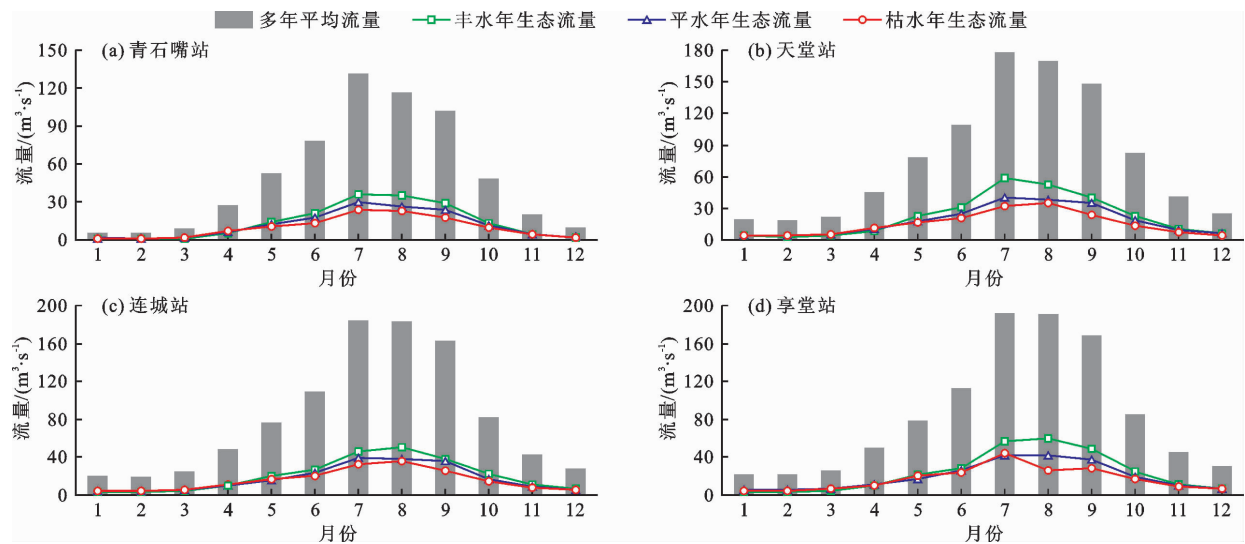


图 3 各水文站不同年型逐月生态流量及多年平均流量变化过程

表 5 按 Tennant 法推荐的不同生态健康状况计算的生态流量

生态健康状况	推荐流量标准/%	一般用水期(非汛期 10 – 次年 3 月)/(m ³ · s ⁻¹)				鱼类产卵青幼期(汛期 4 – 9 月)/(m ³ · s ⁻¹)			
		青石嘴站	天堂站	连城站	享堂站	青石嘴站	天堂站	连城站	享堂站
极限或最大	200	32.20	68.98	72.20	76.80	169.20	242.62	25.5	263.80
最佳范围	60 ~	9.66 ~	20.69 ~	21.66 ~	23.04 ~	50.76 ~	72.79 ~	76.5 ~	79.14 ~
	100	16.10	34.49	36.10	38.40	84.60	121.31	127.50	131.90
极好	40	6.44	13.80	14.44	15.36	33.84	48.52	51.00	52.76
很好	30	4.83	10.35	10.83	11.52	25.38	36.39	38.25	39.57
良好	20	3.22	6.90	7.22	7.68	16.92	24.26	25.50	26.38
一般或极差	10	1.61	3.45	3.61	3.84	8.46	12.13	12.75	13.19
差或最小	10	1.61	3.45	3.61	3.84	8.46	12.13	12.75	13.19
极差	<10	<1.61	<3.45	<3.61	<3.84	<8.46	<12.13	<12.75	<13.19

表 6 按 Tennant 法推荐的 10% (非汛期)和 30% (汛期)比例计算的生态流量

水文站	资料系列	系列长度/a	多年平均流量/(m ³ · s ⁻¹)	非汛期生态流量/(m ³ · s ⁻¹)	汛期生态流量/(m ³ · s ⁻¹)
青石嘴站	1956 – 2016 年	61	50.63	1.61	25.38
天堂站	1977 – 2020 年	44	78.88	3.45	36.39
连城站	1977 – 2020 年	44	82.52	8.61	38.25
享堂站	1977 – 2019 年	43	85.40	3.84	39.57

3.3 最枯月平均流量多年平均值法计算分析

最枯月平均流量多年平均值法是计算长系列资料下径流量最小月份的平均流量,目的是维持河道的生态环境,使得河流的径流量基本稳定于一个特定的值,防止发生河流断流、生态环境恶化等现象。按照该方法计算的各水文站生态流量见表7,如表7所示,青石嘴站、天堂站、连城站和享堂站生态流量分别为4.60、18.70、19.81和20.70 m³/s。

3.4 90%保证率法计算分析

90%保证率法是将90%保证率下对应的最枯月的平均流量作为生态流量。根据大通河流域实测平均流量数据,按照该方法计算得到的青石嘴站、天堂站、连城站和享堂站的生态流量分别为2.50、

13.70、14.35、14.70 m³/s,占多年平均流量的比例分别为3.95%、17.37%、17.39%、17.21%。

3.5 7Q10法计算分析

7Q10法现今演变为以最近10年最枯月平均流量作为河流生态流量^[25],按照该方法的计算结果见表8。由表8可知,计算得出的青石嘴站、天堂站、连城站和享堂站的生态流量分别为0.10、16.10、14.00和10.20 m³/s。

3.6 各方法计算结果对比与分析

将基流比例法、最枯月平均流量多年平均值法、Tennant法、90%保证率法、7Q10法计算得出的青石嘴站、天堂站、连城站、享堂站的生态流量列于表9,以便进行对比分析。

表7 按最枯月平均实测流量法计算的各水文站生态流量

水文站	资料系列	系列长度/a	多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	生态流量/(m ³ ·s ⁻¹)	占平均流量比例/%
青石嘴站	1956-2016年	61	50.63	4.60	9.09
天堂站	1977-2020年	44	78.88	18.70	23.71
连城站	1977-2020年	44	82.52	19.81	24.01
享堂站	1977-2020年	43	85.40	20.70	24.24

表8 按7Q10法计算的各水文站生态流量

水文站	资料系列	系列长度/a	多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	生态流量/(m ³ ·s ⁻¹)	占平均流量比例/%
青石嘴站	2006-2016年	10	50.63	0.10	0.20
天堂站	2010-2020年	10	78.88	16.10	7.73
连城站	2010-2020年	10	82.52	14.00	16.97
享堂站	2009-2020年	10	85.40	10.20	11.94

表9 不同方法计算的各水文站生态流量比较

计算方法		青石嘴站		天堂站		连城站		享堂站	
		生态流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占平均流量 比例/%	生态流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占平均流量 比例/%	生态流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占平均流量 比例/%	生态流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	占平均流量 比例/%
基流比例法	年际-各年型	9.54~13.78	18.84~27.22	14.83~21.95	18.80~27.83	15.52~20.55	18.81~24.90	16.71~23.60	19.54~27.60
	丰水期	21.32~33.60	42.11~66.36	29.41~59.04	37.28~74.85	31.53~45.57	38.21~55.22	33.09~55.30	38.75~65.52
	平水期	10.45~12.24	20.64~24.18	15.55~24.00	19.71~30.43	17.27~23.39	20.93~28.44	20.11~25.16	23.55~25.16
	枯水期	1.23~1.72	2.43~3.40	5.17~6.58	6.55~8.34	6.62~6.70	8.02~8.12	6.96~7.69	6.96~8.15
Tennant法	汛期	25.38	49.97	36.39	46.13	38.25	46.35	39.57	46.33
	非汛期	1.61	3.18	3.45	4.37	8.61	10.43	3.84	4.49
最枯月平均流量法		4.60	9.09	18.70	23.71	19.81	24.01	20.70	24.24
90%保证率法		2.50	3.95	13.70	17.37	14.35	17.39	14.70	17.21
7Q10法		0.10	0.20	16.10	7.73	14.00	16.97	10.20	11.94

由表9可以看出,基流比例法计算所得的生态基流范围几乎涵盖了其他各方法的计算结果,并且可满足Tennant法的推荐流量,还涵盖了各年型和相应水文期的基流量,所以采用基流比例法计算生态流量比

较合理;90%保证率法和7Q10法的计算结果偏小,小于Tennant法推荐的河道流量下限,所以其计算结果只适用于维护河道免受水质污染。为了使得大通河流域可以维持河道的基本形态和基本生态功能,保证

水生态系统基本功能正常运行,并考虑 Tennant 法推荐的汛期和非汛期生态流量范围,确定大通河流域生态基流的流量范围为多年平均流量的 11% ~ 35%,相应青石嘴站、天堂站、连城站和享堂站的生态流量分别为 5.57 ~ 17.73 m³/s、8.68 ~ 27.61 m³/s、9.08 ~ 28.88 m³/s、9.39 ~ 29.89 m³/s。

选取各水文站的典型水文年,青石嘴站选取丰水年 1989 年、平水年 1990 年、枯水年 2001 年;天堂站选取丰水年 2003 年、平水年 2020 年、枯水年 1991 年;连城站选取丰水年 2003 年、平水年 2020 年、枯水年 1991 年;享堂站选取丰水年 2003 年、平水年 2019 年、枯水年 2015 年,按上述确定的各水文站生态流量计算生态基流的保障度,即实际径流满足生态需水的程度,得出各水文站全年保障度均高于 90%,说明所确定的生态流量较为合理。

3.7 生态预警方案确定

根据大通河流域水资源特点以及工程调控、检测和预警处置能力等,结合其抗旱应急调度方案,设置大通河生态流量预警等级为蓝色、橙色和红色预警。蓝色预警代表生态流量满足状况良好、橙色预警代表断面生态流量基本满足,但接近轻度破坏状态;红色预警代表断面生态流量受到破坏,需要采用调度运行或其他措施来确保生态流量达标^[26]。根据《水利部水利水电规划设计总院关于印发 2019 年重点河湖生态流量(水量)保障实施方案编制及实施有关技术要求的通知》^[27],各等级预警阈值做如下划分:生态流量目标值的 120% 为蓝色预警等级;生态流量目标值的 100% 为橙色预警等级;生态流量目标值的 80% 为红色预警等级。结合大通河流域青石嘴、天堂、连城和享堂 4 个水文站的来水、取水情况以及水文站分布情况,制定各水文站生态流量预警实时响应措施,不同预警等级的各水文站预警流量控制指标如表 10 所示。

当断面流量出现蓝色预警时,应密切关注水库出库流量、水电站下泄流量以及断面流量情况,不再增加控制断面以上取水口门用水,加强断面流量监测,尽可能保障断面流量不再减小;当出现橙色预警时,应适当加大水库下泄流量,减少取水,保障断面流量不再继续减少并逐步回升;当出现红色预警时,应减少或关闭取水,确保红色预警尽快解除并恢复至断面生态基流指标。生态流量监测预警系统和机制的建设提高了流量监测的可靠性和准确性,同时优化了水库调度,可以及时落实生态环保要求,维护生态环境健康^[28]。

表 10 大通河流域 4 个水文站预警流量控制指标 m³/s

水文站	水文期	生态流量	蓝色预警	橙色预警	红色预警
青石嘴站	丰水期	17.72	21.26	17.72	14.18
	枯水期	5.57	6.68	5.57	4.46
天堂站	丰水期	27.61	33.13	27.61	22.09
	枯水期	8.68	10.42	8.68	6.94
连城站	丰水期	28.88	34.66	28.88	23.10
	枯水期	9.08	10.90	9.08	7.26
享堂站	丰水期	29.89	35.87	29.89	23.91
	枯水期	9.39	11.27	9.39	7.51

4 讨 论

研究结果显示,运用基流比例法计算出的生态流量范围几乎可以涵盖其他各计算方法所得结果,此结论与丁智慧等^[29]关于淮河干流阜阳段生态流量估算研究中的结论一致,证明采用基流比例法计算生态流量有较强的适用性。一般认为,当河道生态基流大于正常流量的 10% 时,河道水生态及两岸陆生生态才能发挥正常功能^[30],本文采用基流比例法计算得出的生态基流占多年平均流量的比例均大于 10%,符合这一结论。另外,本研究得出自上游到下游的水文站生态流量逐渐增大,其原因在于大通河流域下游水电站分布较多,而上游水电站分布较少,所以为了保证下游水电站正常运行,所需生态流量远高于上游。

随着生态流量研究的发展,生态水文学理论逐渐与生态水利实践相结合,自然生态与人工生态复合系统的研究方向已转变为对生态基流的适应性管理和水文模型的优化等方面。而目前国内对于生态流量的研究仍然存在不足的方面,为此提出以下展望用于后续研究:

(1)理论体系有待完善^[31]。水文过程和生态系统响应越来越复杂,受气候变化和人类活动的影响不断加剧,确定出由种群动态变化或者人类通过外力引起生态系统发生变化而最终造成水文变化的临界点是解决系统耦合协调的重要途径。由于鱼类种群的多样性和丰度、水环境优劣、河道水力要素等监测较为繁琐,在指标选取、参数率定等方面均较为困难,所以需要有一个高度统一概括的体系。

(2)计算模型有待改进。生态流量的传统计算方法都具有一定的片面性,如蒙大拿法的普适性比较差,只适用于生态优先度不高的地区。考虑到生

物种群在不同时段对流量的适宜程度不同,可以采用典型年的数据代替多年平均数据,确定标准时需要综合考虑生物多样性、完整性以及河道生态健康^[32]。除此之外,生态流量估算数据的需求日趋旺盛,并且已从单一水文、水力要素的计算向维护生态系统完整性方向发展,这对数据方面提出了更高的要求。由此可见,模型优化改进是提高计算数据精确度和全面性的一个主要方法。

(3)生态预警的监测有待强化。生态预警包括对区域生态承载力、区域生态环境质量现状以及变化趋势、人类活动对生态环境负面影响的预警。由于河道流量时刻变化,准确地确定一条河流的生态流量较为困难,因而由监测系统确定河道健康状况尤为重要。我国西北地区的生态环境脆弱、预警方案单一,需要综合对大气、土壤、人类居住环境、工农业开发环境进行预警,采取客观科学的预警指标,并提出相应的处理解决方案^[33]。

5 结 论

基于大通河流域不同水文站多年实测径流资料,运用多种方法计算生态流量,通过对比分析计算结果确定适当的生态流量范围,并验证了保障程度,得出以下主要结论:

(1)基流比例法相比较于 Tennant 法、最枯月平均流量多年平均值法、90% 保证率法、7Q10 法更具全面性,所得生态流量范围可以较好地代表其他方法的计算结果,并通过年型划分可以更加明确各年份和各水文期的生态预警方案。

(2)计算大通河流域青石嘴、天堂、连城、享堂 4 个水文站的生态流量,从空间分布来看,青石嘴站生态流量明显小于其他水文站,呈现上游生态流量小于下游生态流量的总体趋势。

(3)通过综合考虑各方法的适用性,最终确定大通河流域各水文站生态流量分别为:青石嘴站丰水期 $17.72 \text{ m}^3/\text{s}$,枯水期 $5.57 \text{ m}^3/\text{s}$;天堂站丰水期 $27.61 \text{ m}^3/\text{s}$,枯水期 $8.68 \text{ m}^3/\text{s}$;连城站丰水期 $28.88 \text{ m}^3/\text{s}$,枯水期 $9.08 \text{ m}^3/\text{s}$;享堂站丰水期 $29.89 \text{ m}^3/\text{s}$,枯水期 $9.39 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流域年平均径流量均可以满足生态流量,生态流量与径流量呈现出一致的变化趋势。通过保障度分析,所确定的各水文站生态流量保障度均可以达到 90% 以上。

(4)基于生态流量划分为生态蓝色预警、橙色预警和红色预警 3 个等级,当发生生态流量预警时,应采取相应措施合理防范河道脱水、断流现象,以维

护生态环境健康。

参考文献:

- [1] 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):1-11.
- [2] 高华永,代兴兰.黄泥河流域河道生态流量研究[J].人民珠江,2012,33(3):42-44.
- [3] 吕宝阔.辽河流域中下游平原区干流河道生态流量研究[J].人民黄河,2021,43(S2):96-97.
- [4] 刘玉晶.滦河生态流量目标研究及保障对策建议[J].海河水利,2021(6):28-32.
- [5] 武明亮.生态基流计算方法的研究综述[J].内蒙古水利,2019(11):52-53.
- [6] 于昊含,李超超,包淑萍,等.基于多种水文学法的泾河生态基流估算[J].甘肃科技,2021,37(19):34-40.
- [7] 罗小勇,邱 凉.汉江流域控制断面生态基流量的确定[J].人民长江,2011,42(2):108-111.
- [8] GAO Cheng, HAO Manqiu, SONG Lianghong, et al. Comparative study on the calculation methods of ecological base flow in a mountainous river[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022: 931844. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.931844>
- [9] 成 波,李怀恩.河道生态基流生态经济价值及其时间变化研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(3):94-102.
- [10] 张金艳.大通河流域河流水文健康评价及生态流量研究[D].西安:西北大学,2021.
- [11] 刘赛艳,黄 强,解阳阳,等.大通河流域上游径流变化特征与突变分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):219-226.
- [12] 沈延青,白 涛,姬宏伟.大通河流域梯级电站的运行管理分析[J].集成电路应用,2021,38(11):258-259.
- [13] 李小荣.大通河跨流域引水和梯级水电站建设对径流的影响分析[J].地下水,2017,39(4):134-136.
- [14] 张志广,金 奔,李克锋,等.基于 RVA 法的河流生态基流过程研究[J].水利水电技术,2017,48(9):155-160.
- [15] 姚云泽,姜翠玲,万福涛.基于多种水文学方法的滦河典型断面生态基流研究[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):941-949.
- [16] 栾清华,刘 存,张 俊,等.基于基流比例法的洋河干流生态基流估算[J].水利水电技术,2018,49(6):101-108.
- [17] 韦雨婷,逢 勇,罗 缙.清河干流生态基流计算分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):151-155.
- [18] 牛 夏,王启优.疏勒河流域生态需水量研究[J].人民长江,2016,47(22):21-25.
- [19] 刘中培,李 鑫,窦 明,等.淮河干流河南段基本生态流量保证率研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(2):50-54+71.
- [20] 门宝辉,刘昌明.Tennant 法计算标准的修正及其应用[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):479-482.

- [21] 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.
- [22] 马玲,李润杰,黄佳盛,等. 格尔木河生态基流研究[J]. 水力发电,2022,48(9):28–33+44.
- [23] 孟慧颖. 河流生态基流的计算方法及其适用性分析[J]. 科技传播,2013,5(9):135+127.
- [24] 李梦瑶,付兴涛. 汾河中游河道生态流量分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):45–53.
- [25] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展,2006,17(3):430–434.
- [26] 刘悦忆,朱金峰,赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. 水力发电学报,2016,35(12):23–34.
- [27] 王添. 吉林省东辽河、伊通河、饮马河生态需水及其保障措施研究[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [28] 李远军. 乌江梯级水电站生态流量在线监测及实时预警功能的开发和应用[J]. 红水河,2021,40(5):99–102.
- [29] 丁智慧,王振龙,朱永华. 淮河干流阜阳段生态基流估算研究[J]. 人民黄河,2020,42(5):103–107.
- [30] 武会先,吕洪予. 确定河流生态需水量的方法[J]. 人民黄河,2006,28(6):12–13.
- [31] 普剑红. 论生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 广东科技,2014,23(2):171–172.
- [32] 黄康,李怀恩,成波,等. 基于Tennant方法的河流生态基流应用现状及改进思路[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):103–110.
- [33] 范小杉,何萍,徐杰,等. 我国生态环境预警研究进展[J]. 环境工程技术学报,2020,10(6):996–1006.

(上接第99页)

- [30] 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.
- [31] 王华辉. 珠三角城市环境保护规划指标体系比较[J]. 广东化工,2021,48(24):109–112.
- [32] KONG Yang, HE Weijun, YUAN Liang, et al. Decoupling analysis of water footprint and economic growth: A case study of Beijing–Tianjin–Hebei Region from 2004 to 2017[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(23): 4873.
- [33] 李胜双. 金塔盆地水资源承载力分析及其调控模式研究[D]. 兰州:兰州大学,2017.
- [34] 陈刚,韦晓慧. 粤港澳大湾区背景下珠三角城市群经济一体化与城市关联分析[J]. 长安大学学报(社会科学版),2020,22(1):58–69.
- [35] 陈磊,乔昌凯,夏琳琳,等. 广东省新型城镇化时期生活用水变化及驱动机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):273–280.
- [36] 欧阳怡然. 珠三角城市群水–能源–粮食–经济协调性时空演变分析[D]. 广州:广东工业大学,2021.

