

丁启慧, 贾美蓉, 丁相毅, 等. 青海湖流域主要河流的生态需水[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 575-584. DING Q H, JIA M R, DING X Y, et al. Ecological water demand of major rivers in Qinghai Lake basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 575-584. (in Chinese)

青海湖流域主要河流的生态需水

丁启慧¹, 贾美蓉², 丁相毅², 刘家宏²

(1. 青海省水文水资源测报中心, 西宁 810001;

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)

摘要: 为确保流域生态系统健康发展, 实现水资源合理配置, 基于青海省水文水资源测报中心实测布哈河口站和刚察站 1961—2020 年长时间序列数据, 通过三性审查验证数据符合计算条件, 径流量通过滑动 T 检验法和 Mann-Kendall(M-K) 检验法进行趋势变化分析和径流突变检验。采用 Tennant、近 10 年最枯月平均流量法、90% 保证率月平均流量法和年内展布法计算布哈河与沙柳河河道内生态需水量。以改进的 Tennant 评价标准和满足度对 4 种方法进行对比分析, 结果表明: 年内展布法计算布哈河生态需水量较为合理, 90% 保证率月平均流量法计算沙柳河生态需水量较为合理, 最终得出布哈河年平均生态需水量为 38.4 亿 m^3 , 沙柳河年平均生态需水量为 14.12 亿 m^3 。

关键词: 生态需水; 青海湖流域; 水文学方法; 布哈河; 沙柳河

中图分类号: TV11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2024.0059

河流生态需水是在特定时间和空间条件下为满足河流生态系统诸项功能所需水量的总称^[1], 是维系河湖生态功能的基础性指标^[2]。国内外河道内生态需水量计算主要分为水文学分析法、水力学法、整体分析法和栖息地模拟法^[3-7]。近年来国内专家对部分河道使用不同的计算方法进行生态流量计算: 刘玉婷等^[8]采用 Tennant 法^[9]计算研究区河流生态需水, 为内陆河区域的生态需水量合理配置提供科学依据, 然而 Tennant 法是基于经验的简化方法, 可能不适用于所有类型的河流; 葛金金等^[10]使用不同的水文学方法计算得出 Lyon 法在计算沙颍河这类季节性河流的适宜生态流量结果最为合理; 侯婷娟等^[11]采用 Qp 法、Tennant 等 5 种方法对比计算出逐月频率算法结果较为适合于资水河道内生态需水量; 潘扎荣等^[12]以多年月均径流过程进行年内过程计算, 弥补了传统水文学方法水文指标中以特定百分率和保证率的局限性进行生态需水量计算的不足; 基于潘扎荣等所提出的方法, 研究者^[13-15]根据流域特征设置不同的同期均值比对该方法进行了改进; Zhang 等^[16]提出了一种独立于人类活动

的城市河流生态需水量计算方法; 马佳丽等^[17]基于长时间序列构建岱海生态需水模型, 计算出生态需水动态变化情况; 马育军等^[18]在 2010 年采用改进的生态水力半径法对青海湖流域生态需水量进行分析, 然而计算方法单一, 不能比较得出其他水文学方法的适用性。

Luo 等^[19]研究发现近几年青海湖水位总体表现为先下降后上升的过程, 流域内径流量在夏季达到最高值, 短期来看, 青海湖面积增加有利于当地生态环境, 但是也存在一定的问题: 冰雪融水增加会导致当地降雨量特别是极端降水的增加, 诱发山洪等灾害, 破坏生态环境。目前研究中的水文学方法针对青海湖流域主要河流生态需水分析研究较少且水文学方法应用范围较窄, 故本研究针对布哈河和沙柳河先通过三性审查和径流变化趋势与突变分析保证实测资料适用于两个河道生态流量计算, 并采用 Tennant 法、近 10 年最枯月平均流量法、90% 保证率月平均流量法和年内展布法 4 种水文学方法对青海湖流域主要河流生态需水进行计算, 同时以改进的 Tennant 评价等级标准^[20]和满足度分

收稿日期: 2023-12-05 修回日期: 2024-04-08 网络出版时间: 2024-06-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240601.2211.002>

基金项目: 青海省重点研发与转化计划项目(2022-SF-143); 国家自然科学基金重大项目(52192673)

作者简介: 丁启慧(1983—), 男, 青海湟源人, 高级工程师, 主要从事地表水文、降水、蒸发等研究。E-mail: 42111404@qq.com

通信作者: 贾美蓉(2000—), 女, 四川绵阳人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: jmr18011101452@163.com

析^[21-22]对计算结果进行评价,比较得出最适合用来计算青海湖流域主要河流生态需水的水文学方法,最后得出布哈河和沙柳河两条河道内逐月所需要的平均需水量。研究结果将有利于深入了解布哈河和沙柳河生态需水年内变化机理,为河流生态修复和水资源管理提供重要的科学参考依据。

1 研究区域概况

青海湖流域属于高原半干旱高寒气候,处于我国东部季风区、西北部干旱区和西南部高寒区的交汇地带,并因其自身的湖泊效应影响,寒冷季长,温凉期短,没有明显的四季之分,流域总面积 29 661 km²,分布在北纬 36°15'~38°20'和东经 97°50'~101°20'^[22],河流集水面积 1.787 8 万 km²,径流量 13.434 亿 m³。流域内主要的河流为布哈河和沙柳河,其中:布哈河位于海西州天峻县,河口附近地区,发源于疏勒南山沙果林那穆吉木岭南坡,从西北向东南流入青海湖,流域面积 14 384 km²,河长 286 km,流域内水文气象站为布哈河口站,位于布哈河下游天峻县;沙柳河位于海北州刚察县境内,发源于大通山的克塞尼哈,流域面积约 1 500 km²,河长 106 km,流域内水文气象站为刚察站,位于沙柳河下游刚察县^[23-24]。青海湖流域内裸鲤作为青海湖湖泊生态系统中的水生生物,其动态变化受水量影响明显,水资源量的空间分布和水理化指标间接影响了裸鲤的洄游、卵场分布和生存环境,导致裸鲤自然繁殖能力下降,以至于长期以来裸鲤资源量恢复缓慢。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

本次研究选取青海湖流域内布哈河口站和刚察站 1961—2020 年长系列年径流量等数据,该数据来源于青海省水文水资源测报中心。

2.2 三性审查

在数据应用前对青海湖流域地区资料进行可靠性、一致性、代表性审查。一致性是指资料记载的洪水数据是在一致的流域条件下形成的,即各洪水形成的基本条件未发生显著变化^[25]。水文资料的代表性分析,主要是通过对系列资料的周期性、稳定性和代表期分析来揭示系列对总体的代表程度。周期性一般采用模比系数差积曲线法来反映,一个系列资料有丰水期、平水期、枯水期,这个资料系列就比较完整^[25-26]。模比系数差积曲线法基本特点为

曲线上的一个完整上升段表示一个丰水期,一个完整的下降段则表示一个枯水期,曲线上一个数值小范围波动段则表示一个平水期。稳定性一般用模比系数累积平均值曲线来反映,一个系列资料模比系数累积平均值计算到一定年限,以后的数值波动幅度较小并趋近于 1,根据曲线能清楚看到达到一定稳定程度,就可以确定该资料系列具有稳定性。代表期是指水文站径流资料系列通过周期性和稳定性检验后,可选择该资料系列的时间段作为此河流的代表期。模比系数差积与模比系数累积平均值曲线法公式分别为

$$Z_i = Z_{i-1} - 1 + (K_i - 1) \quad (1)$$

$$\bar{K}_i = \frac{1}{i} \sum_{n=1}^i K_i \quad (2)$$

式中: Z_i 为系列第 i 年的差积值; K_i 为第 i 年系列资料与多年平均系列资料的比值; \bar{K}_i 为模比系数累积平均值。

2.3 径流变化趋势与突变分析

采用滑动 T 检验法进行径流量变化趋势分析,利用 Mann-Kendall 检验法对布哈河口与刚察站进行径流突变检验^[27]。滑动 T 检验法对于有 n 个样本量的时间序列 x ,人为设置某一时刻为基准点,基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 ,方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 ,平均值分别为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ,总序列方差为 s 。定义统计量:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3)$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4)$$

2.4 研究方法

2.4.1 Tennant 法

Tennant 法^[5]是以实测资料为基础构建河宽、水深和流速等参数关系的生态需水量综合计算方法。通过将流量设定为河流多年平均流量的一定百分比来推荐不同季节的流量范围,一般取多年平均流量的 10%~30% 作为生态基流。Tennant 法的具体取值要求见表 1。青海湖流域鱼类产卵育幼期为 5—8 月,一般用水期为 9 月—翌年 4 月,根据《河湖生态环境需水计算规范》(SL/T 712—2021)要求,水资源短缺、用水紧张的地区,生态基流应在表 1“好”之下取值,本研究中采用一般用水期取多

年平均径流的 10%, 鱼类产卵育幼期取多年平均径流的 20%。Tennant 法强调了考虑季节性流量变化的重要性, 但是在复杂的水域系统中可能需要更详细的研究和数据支持。

表 1 Tennant 法对不同河道生态环境状况评价

Tab. 1 Evaluation of ecological status of different river channels by Tennant method

不同流量占比对应的生态环境评价等级	推荐的流量与多年平均流量百分比	
	一般用水期 (9月—翌年4月)	鱼类产卵育幼期 (5—8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	10	10
极差	0~10	0~10

2.4.2 近 10 年最枯月平均流量法

近 10 年最枯月平均流量法是以近 10 年数据作为计算依据, 将河流近 10 年最枯月平均流量作为生态流量, 这个平均值被用作评估河流在极端干旱条件下能够维持的最低流量水平。它可以帮助规划者和管理者了解在极端情况下河流的水文行为。虽然近 10 年最枯月平均流量法提供了对历史极端情况的洞察, 但在气候变化的影响下, 不充分反映未来的水文变化。

2.4.3 90% 保证率月平均流量法

90% 保证率法月平均流量法以 1961—2020 年水文站长时间径流量水文观测资料, 采取保证率 90% 所对应月均流量作为各月的生态流量。该方法考虑到了极端干旱等不利条件, 有助于确保即使在不利的水文年份, 也能满足基本的水需求。通过分析 90% 保证率, 可以评估在极端干旱情况下可能出现的水资源短缺风险, 有助于制定相应的应对策略, 但是不能考虑到由于气候变化等因素导致的未来流量变化。

2.4.4 年内展布法

年内展布法主要考虑年内径流的动态需求以及河流的基本生态功能所需要的径流条件。根据第 i 月 j 年的月径流量 q_{ij} , 计算第 i 月的多年平均月径流

量 \bar{q}_i , 求得多年平均月径流量 \bar{Q} , 然后根据各月历史最小径流量求出最小年均径流量 \bar{Q}_{\min} , 得到均值比 η , 再根据各月多年平均月径流量按比值进行分配, 最终得出河道内基本生态需水量 Q_i 。其计算公式为

$$\bar{Q} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{q}_i \quad (5)$$

$$\bar{q}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_{\min} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} q_{\min(i)}; q_{\min(i)} = \min(q_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$\eta = \bar{Q}_{\min} / \bar{Q} \quad (8)$$

$$Q_i = \bar{q}_i \times \eta \quad (9)$$

所提出的 4 种生态流量计算方法: Tennant 法通过设定河流最小环境流量需求, 以保护生态系统的健康, 是一种简便易行的方法, 适用于初步评估和一般水资源丰富地区的规划。近 10 年最枯月平均流量法则专注于分析近 10 年中每年最干旱月份的流量, 用以评估极端干旱条件下河流的最低流量, 适合于应对气候变化带来的极端情况。90% 保证率月平均流量法则通过长期历史数据确定在 90% 时间内可达到的流量, 旨在提供保守的水资源管理和风险评估, 适合于规划和管理水资源的可持续利用。年内展布法侧重于在一年内不同时间段的水资源分配和优化使用, 适用于综合性的水资源管理和规划, 特别是在需要考虑季节性变化和灵活调整水资源分配的情况。

2.4.5 Tennant 评价

Tennant 法的流量标准考虑了当地气候和水生生物的生活习性, 符合当地实际条件^[14]。但是由于青海湖流域内布哈河和沙柳河河道内的主要鱼类(青海湖裸鲤 *Gymnayspris g.przewalskii*, 别名湟鱼)的洄游期与设定的时间范围标准不同, 对 Tennant 法的标准进行改进, 针对青海湖鱼类主要洄游期设定一般用水期时间为 9 月—翌年 4 月, 鱼类产卵期育幼期时间为 5—8 月。最小生态流量标准和最大生态流量标准根据改进后的 Tennant 法作为评价标准确定, 其中, 最小生态流量标准等级为极差, 最大生态流量标准为最大。评价标准见表 1。

2.4.6 生态需水满足度评价

生态流量满足度^[22]是指在一段时间内, 河道内流量大于生态流量阈值的时长与总时长的比值, 以月平均流量进行生态流量保证程度分析, 能够较好地反映河流生态系统缺水的实际情况。采用

1961—2020 年系列逐日实测径流量数据计算布哈河和沙柳河河道内的生态需水,按照每月 60 年来的生态需水量进行年统计,针对不同一般用水时期和产卵期统计生态需水保障程度,该月份的多年生态需水保障程度为得到保障的月份数与总月份数比值,公式为

$$S_i = \frac{D_i}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Sgn}(\bar{Q}_{ij} - Q_{ij})}{n} \times 100\% \quad (10)$$

其中

$$\text{Sgn}(\bar{Q}_{ij} - Q_{ij}) = \begin{cases} 1, & \text{当 } \bar{Q}_{ij} - Q_{ij} \geq 0 \\ 0, & \text{当 } \bar{Q}_{ij} - Q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_i 为控制断面第 i 月的多年生态需水保障程度, %; D_i 为控制断面第 i 月生态需水得到保障的年份数; n 为统计年份数; Q_{ij} 为第 j 年第 i 月的实测月径流量, m^3/s ; \bar{Q}_{ij} 为第 j 年第 i 月的生态需水流量, m^3/s 。

3 结果分析

3.1 三性审查结果分析

布哈河口站和刚察站具有 1961—2020 年长期观测资料,且监测方式与资料整编方式均符合国家标准,资料系列完整、翔实可靠,精度满足要求。青海湖流域主要河流为天然河道,人类活动强度低,无水库等大型水利设施的影响,下垫面条件未发生显著变化^[28-29],符合一致性条件要求。布哈河口水文站和刚察水文站为河流下游控制站,也是入青海湖的控制站。本次采用 1961—2020 年水文资料,具有 60 年系列,远大于《水利水电工程水文计算规范》(SL 278—2020)要求的 30 年系列,径流模比系数差积曲线图 1 和图 2 表示两站均有一个完整的上升段、完整的下降段、数值小范围波动段,故系列中包含了丰、平、枯水年组,说明资料系列具有周期性和代表期,符合资料系列的代表性要求。

根据两站 1961—2020 年逐月径流资料,绘制 1—12 月径流模比系数累积均值过程线,见图 3 和图 4,随着系列长度的增加,其数值波动变幅逐渐达到稳定并趋于 1,说明两站径流 1961—2020 年逐月径流资料具有较好的稳定性,符合资料系列的代表性要求。

3.2 径流变化趋势与突变结果分析

根据滑动 T 检验法,由图 5、6 所示布哈河和沙柳河径流量整体均呈现上升趋势。通过 Mann-

Kendall(M-K)检验实测径流变化趋势,得到布哈河口站年平均径流量 $|Z|$ 值为 2.3,通过了 95% 的显著性检验,线性倾向率为 0.27,呈显著上升趋势,见表 2。刚察站年平均径流的 $|Z|$ 值为 3.16,大于 2.58,通过了 99% 的显著性检验,线性倾向率为 0.08,呈显著上升趋势,见表 2。利用 M-K 突变检验方法对实测 1961—2020 年径流数据做突变检验,取 UF 和 UB 曲线交点处作为突变点,取显著水平 $\alpha = 0.05$,结果见图 7、8。由图 7 可知,布哈河口站突变点发生于 2014 年,在 1961—2008 年径流量呈现显著上升趋势,在 2009—2014 年径流量呈不显著上升趋势,2014—2020 年径流量呈不显著下降趋势。由图 8 可知,刚察站突变点发生于 2008 年,1961—2003 年径流量呈显著上升趋势,2004—2015 年呈不显著上升趋势,2016 年 2020 年年径流量呈不显著下降趋势。根据 4 种水文学方法中径流量与生态流量之间的关系,两站径流量整体呈现上升趋势,使所用水文学计算方法得出的生态需水量计算值有所增加。

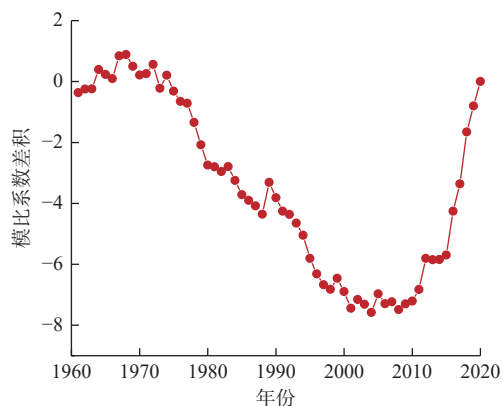


图 1 布哈河口站径流模比系数差积曲线

Fig. 1 Difference product curve of runoff modulus ratio coefficient of Buhahekou station

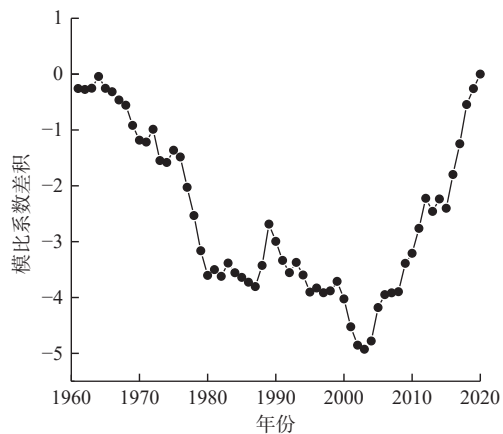


图 2 刚察站径流模比系数差积曲线

Fig. 2 Difference product curve of runoff modulus ratio coefficient of Gangcha station

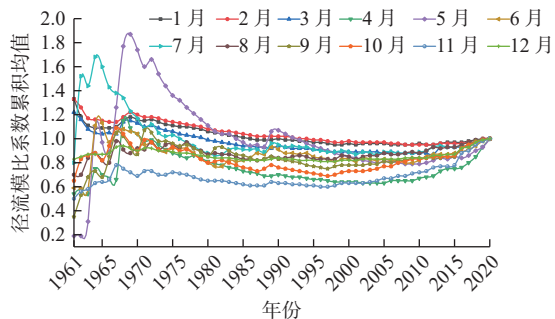


图3 布哈河口站径流模比系数累积均值过程线

Fig. 3 Accumulative mean process line of runoff modulus ratio coefficient at Buhahekou station

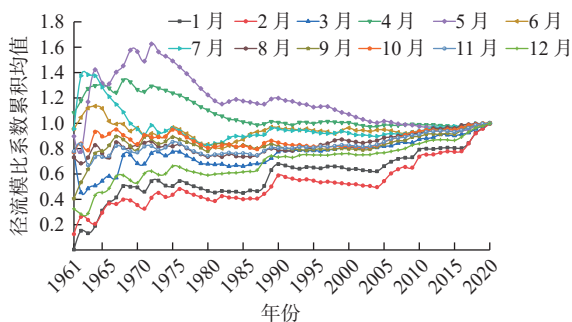


图4 刚察站径流模比系数累积均值过程线

Fig. 4 Accumulative mean process line of runoff modulus ratio coefficient at Gangcha station

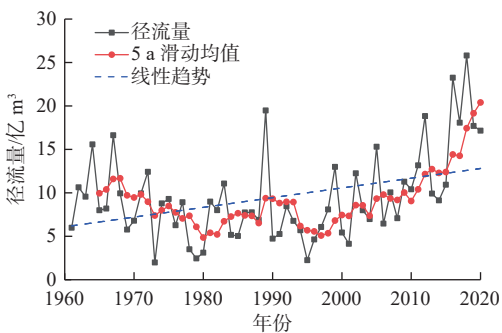


图5 布哈河口站径流量

Fig. 5 Runoff of Buhahekou station

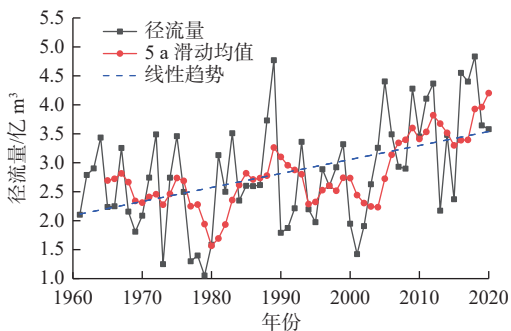


图6 刚察站径流量

Fig. 6 Runoff of Gangcha station

生态流量逐月比较见图9和图10,每月所需生态流量结果见表3,并以Tennant法对两个河道生态环境状况进行评价,分析结果如下:

表2 布哈河口站和刚察站1961—2020年径流Mann-Kendall检验分析

Tab. 2 Mann-Kendall test analysis of runoff in Buhahekou station and Gangcha station from 1961 to 2020

站点	年平均径流/(m ³ ·s ⁻¹)	Z	斜率	敏感性	趋势
布哈河口站	30.118	2.3	0.27	P<0.1	↑
刚察站	8.849	3.16	0.08	P<0.1	↑

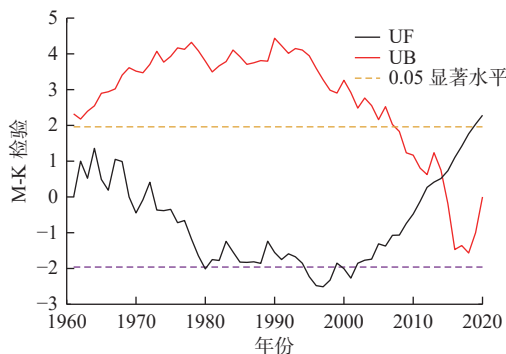


图7 布哈河口站径流量M-K突变检验

Fig. 7 M-K mutation test of runoff at Buhahekou station

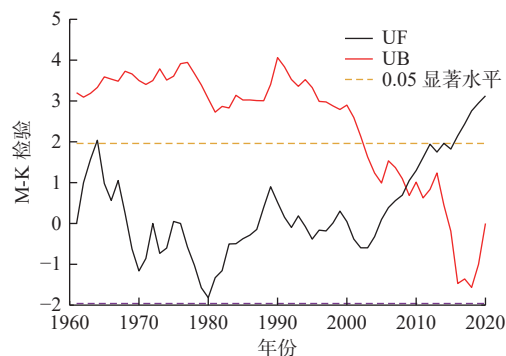


图8 刚察站径流量M-K突变检验

Fig. 8 M-K mutation test of runoff at Gangcha station

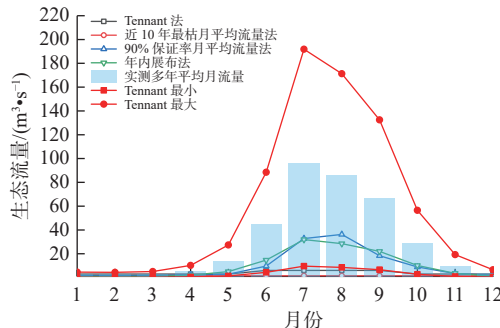


图9 布哈河口站河道内生态流量逐月比较

Fig. 9 Month-by-month comparison of in-channel ecological flows at the Buhahekou station

3.3 生态需水量分析

根据4种不同计算方法分析,布哈河和沙柳河

布哈河:Tennant法在6—9月计算所得生态流量均低于Tennant法最小生态流量标准。近10年

最枯月平均流量法得到的生态流量最小,但是各月生态需水量相同,不符合河流年内丰平枯变化实际情况,且在 5—10 月近 10 年最枯月平均流量法和 Tennant 法均小于 Tennant 法最小相应月份生态流量。90% 保证率月平均流量法和年内展布法生态流量年内变化趋势基本一致。年内展布法在一般用水期 9 月至翌年 5 月,布哈河生态需水量均占多年平均径流量 35% 以上,评价结果为非常好,此时河流的河宽、水深及流速能够为水生生物提供良好的生存条件,在产卵期 5 月至 8 月,生态需水量均占多年平均径流量 33% 以上,评价结果为中,河道径

流能够满足鱼类产卵育幼的最低需求。

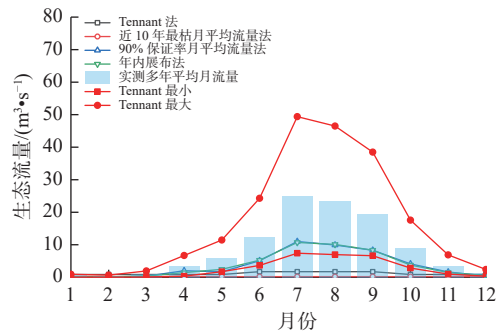


图 10 刚察站河道内生态流量逐月比较图

Fig. 10 Monthly comparison of in-channel ecological flows at Gangcha station

表 3 布哈河和沙柳河 4 种方法计算每月所需生态流量

Tab. 3 Ecological flows calculated by four methods for the Buha River and Shaliu River

单位: 亿 m³

月份	Tennant 法		近 10 年最枯月平均流量法		90% 保证率月平均流量法		年内展布法	
	布哈河生态流量	沙柳河生态流量	布哈河生态流量	沙柳河生态流量	布哈河生态流量	沙柳河生态流量	布哈河生态流量	沙柳河生态流量
1	2.99	0.86	1.57	0.20	1.82	0.10	0.91	0.20
2	2.99	0.86	1.57	0.20	1.71	0.07	0.86	0.14
3	2.99	0.86	1.57	0.20	1.86	0.35	0.99	0.41
4	2.99	0.86	1.57	0.20	2.28	2.01	1.91	1.43
5	5.99	1.73	1.57	0.20	2.80	1.68	5.00	2.45
6	5.99	1.73	1.57	0.20	9.66	5.09	14.70	5.25
7	5.99	1.73	1.57	0.20	32.80	11.00	31.90	10.70
8	5.99	1.73	1.57	0.20	36.27	9.91	28.50	10.10
9	2.99	0.86	1.57	0.20	18.38	8.30	22.00	8.32
10	2.99	0.86	1.57	0.20	8.91	4.13	10.20	3.75
11	2.99	0.86	1.57	0.20	3.40	1.63	3.54	1.47
12	2.99	0.86	1.57	0.20	1.94	0.40	1.26	0.51

沙柳河: Tennant 法在 7—10 月计算所得生态流量均低于 Tennant 法最小生态流量标准。近 10 年最枯月平均流量法生态流量最小,各月生态需水量相同,不符合河流年内丰平枯变化实际情况,在 4—11 月份近 10 年最枯月平均流量法和 Tennant 法均小于 Tennant 法最小相应月份生态流量标准。90% 保证率月平均流量法和年内展布法生态流量年内变化趋势也基本一致,90% 保证率月平均流量法在一般用水时期和产卵育幼期,评价结果均为好,生态需水量均占多年平均径流量 20% 以上,年内展布法在一般用水期 9 月至翌年 4 月,沙柳河生态需水量均占多年平均径流量 40% 以上,评价结果为极好,此时河流的河宽、水深及流速能够为水生生物提供良好的生存条件,在产卵期 5—8 月,生态需水量均占多年平均径流量 43% 以上,评价结果为好。

3.4 满足度分析

将 4 种计算方法得出的生态流量过程与实际流量过程进行比较,由图 11、12 可知,布哈河和沙柳河采用近 10 年最枯月平均流量法满足度较高,但是生态流量一致,不符合河流年内丰平枯变化实际情况。

Tennant 法。布哈河 12 月—翌年 4 月满足程度都较低,低于 60%。沙柳河 1—3 月满足程度都较低,均低于 60%,且波动较大,生态需水满足程度不稳定。

近 10 年最枯月平均流量法。两布哈河和沙柳河满足程度均较高,均在 2 月份达到最低。

90% 保证率月平均流量法。根据布哈河和沙柳河在不同月份的生态需水满足程度分析:布哈河其他月份均达到 70% 以上,但是在 4 月和 5 月较低,满足程度低于 70%,生态需水未达到满足,河流的生态需水供需矛盾最为突出。沙柳河其他月份均

达到 80% 以上,但是在 2 月份达到最低,满足程度在 60%~70% 内。

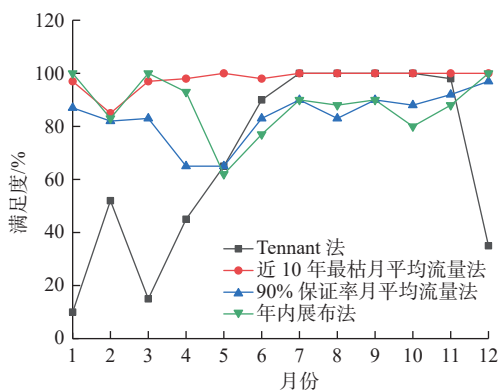


图 11 布哈河口站逐月满足度对比分析

Fig. 11 Month-by-month comparative analysis of satisfaction at Buhahokou station

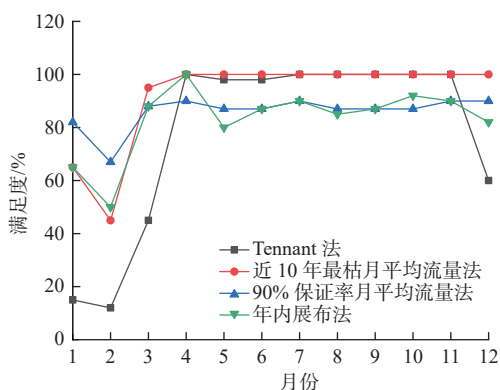


图 12 刚察站逐月满足度对比分析

Fig. 12 Month-by-month comparative analysis of the degree of satisfaction at Gangcha station

年内展布法。布哈河全年生态需水满足程度均在 70% 以上,其中在 5 月份的生态需水满足度较低,为 71%。沙柳河在 2 月份生态需水满足程度仅为 45%,用水供需矛盾突出。

根据生态需水量分析及满足度分析得到,布哈河生态需水计算更适宜使用年内展布法,沙柳河生态需水计算更适宜使用 90% 保证率月平均流量法,可为上游生态调度计算及生态保护提供参考。为进一步分析布哈河与沙柳河部分月份满足度较低情况,根据布哈河口站和刚察站降雨量与生态需水量,布哈河使用年内展布法在 5 月份满足度较低,这可能是由于该段时期中上游地区自然与人为耗水较多^[18],沙柳河在 2 月份达到最低,可能是由于自然降水减少。

3.5 讨论

合理管理和保护生态流量不仅是生态保护的需,也是实现可持续水资源管理和应对气候变化挑

战的关键。本文基于 4 种生态流量计算方法,分析计算出青海湖流域布哈河和沙柳河年均值生态流量以及月均值生态流量值。

布哈河流域: Tennant 法部分月份低于 Tennant 法最小生态流量标准;近 10 年最枯月平均流量法各月生态需水量相同,不符合河流年内丰平枯变化实际情况;90% 保证率月平均流量法计算所得生态流量均高于 Tennant 法最小生态流量标准;年内展布法计算所得生态需水量在一般用水期和产卵期评价结果为中以上,满足水生生物需水条件。

沙柳河流域: Tennant 法部分月份低于 Tennant 法最小生态流量标准;近 10 年最枯月平均流量法各月生态需水量相同,同样不符合河流年内丰平枯变化实际情况;年内展布法计算所得生态需水量在 2 月份生态需水满足程度较低;90% 保证率月平均流量法计算所得生态流量在一般用水期和产卵期评价结果均为好以上。

综合以上流域各生态需水计算方法优缺点,年内展布法为布哈河计算生态需水量更具有代表性,90% 保证率月平均流量法为沙柳河计算生态需水量更具有代表性。计算结果有利于深入了解布哈河和沙柳河年内生态需水状况,能为制定有效的水资源管理策略和行动计划提供重要的科学依据。此外,在满足度分析时,因为生态流量月均值采用每日累计平均值进行计算,尺度较粗,并且本文仅考虑了水文学方法在布哈河和沙柳河的应用。后续研究可以从水文、水力学、栖息地等方法进行更为精确的分析,同时考虑青海湖裸鲤等鱼类,从不同的角度完善生态流量计算方法。

4 结论

本文基于布哈河口站和刚察站 1961—2020 年实测径流数据,采用滑动 T 检验法对径流进行变化趋势分析并采用 Mann-Kendall 检验法对布哈河口与刚察站进行径流突变检验,采用三性审查方法验证数据的可靠度。最后对比 4 种生态流量计算方法,分析计算出青海湖流域布哈河和沙柳河年均值生态流量以及月均值生态流量值,具体结论如下:

近 10 年最枯月平均流量法年内月变化一致,不符合年内丰枯变化过程,计算结果不符合实际要求。

Tennant 法在布哈河和沙柳河生态流量计算时,有部分月份低于 Tennant 最小评价指标范围,计算结果不符合要求。

综合需水量和生态需水满足度分析,年内展布法为布哈河计算生态需水量更具有代表性,90%保证率月平均流量法为沙柳河计算生态需水量更具有代表性。

布哈河 5 月份生态需水满足程度较低,沙柳河 2 月份生态需水满足程度较低。应考虑该月份的水资源上下游供需矛盾问题,做出更合理的水资源调度。

根据年内展布法计算的布哈河和 90% 保证率月平均流量法计算的沙柳河河道内生态需水量:布哈河在 7 月生态需水量最大,为 31.90 亿 m^3 ,2 月份最小,为 0.86 亿 m^3 ;沙柳河在 7 月生态需水量最大,为 11.00 亿 m^3 ,2 月份最小,为 0.07 亿 m^3 。

参考文献:

- [1] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002,33(9):14-19. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2002.09.003.
- [2] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0089.
- [3] 杜龙飞,侯泽林,李彦彬,等.城市河流生态需水量计算方法研究[J].人民黄河,2020,42(2):34-37,47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.02.007.
- [4] 黄奕龙,张利萍.基于鱼类栖息地法的城市河流生态需水评估:以深圳市观澜河为例[J].环境污染与防治,2016,38(8):55-58. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.08.012.
- [5] 刘丹,邢琼琼,郭欣欣,等.基于生态水力半径法的贾鲁河生态需水量计算[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):105-110. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2018.01.17.
- [6] 中华人民共和国水利部.河湖生态环境需水计算规范:SL/T 712—2021[S].北京:中国水利水电出版社.
- [7] 童心,刘冀,彭涛,等.基于水文学法的雅砻江中游河段生态流量研究[J].人民长江,2022,53(8):58-64,93. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.08.009.
- [8] 刘玉婷,许继军,刘思敏,等.长江上游地区生态需水量变化研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(8):120-131. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.012.
- [9] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10. DOI: 10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2.
- [10] 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.nsbdqk.2019.0036.
- [11] 侯婷娟,高耶.资水河道内生态需水量研究[J].水文,2019,39(5):40-44,60. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180193.
- [12] 潘扎荣,阮晓红,徐静.河道基本生态需水的年内展布算法[J].水利学报,2013,44(1):119-126. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.01.005.
- [13] 雷付春.改进的年内展布方法在干旱区河流生态基流量计算的适用性研究[J].水利规划与设计,2019(11):37-39,117. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2019.11.010.
- [14] 朱晔,方红远,王铨洁,等.改进的年内展布法在河流生态需水计算中的应用[J].中国农村水利水电,2021(10):105-109. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.10.016.
- [15] 赵然杭,彭玳,王好芳,等.基于改进年内展布计算法的河道内基本生态需水量研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):114-119. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0104.
- [16] ZHANG C, WAN Z, JING Z, et al. Calculation of ecological water requirements of urban rivers using a hydrological model: A case study of Beiyun River [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121368. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121368.
- [17] 马佳丽,刘东伟,王杰,等.基于长时间序列(1975—2020年)生态耗水的岱海动态生态需水分析[J].湖泊科学,2022,34(1):207-219. DOI: 10.18307/2022.0117.
- [18] 马育军,李小雁.生态水力半径法改进及其在青海湖流域的应用[J].科技导报,2011,29(17):22-28. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.17.001.
- [19] LUO Z, LIU J, ZHANG S, et al. Research on climate change in Qinghai Lake basin based on WRF and CMIP 6[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4379. DOI: 10.3390/rs15184379.
- [20] 李计生,于海超,张扬,等.基于Tennant改进法的讨赖河生态流量分析与评价[J].节水灌溉,2020,(8):72-75,81. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2020.08.014.
- [21] 褚俊英,严登华,周祖昊,等.基于综合功能辨识的

- 城市河湖生态流量计算模型及应用[J]. *水利学报*, 2018, 49(11): 1357-1368. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20180691](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20180691).
- [22] 任涵璐, 李永庆. 基于满足度分析的永定河生态水量及修复策略[J]. *吉林水利*, 2021(7): 30-36. DOI: [10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2021.07.006](https://doi.org/10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2021.07.006).
- [23] 何灼伦. 青海湖流域河流泥沙变化及影响分析[J]. *人民黄河*, 2020, 42(10): 23-28. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2020.10.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2020.10.005).
- [24] 陈治荣, 曹广超, 陈克龙, 等. 基于GIS的青海湖流域水生生态功能分区[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(1): 67-72. DOI: [10.11988/ckyyb.20210893](https://doi.org/10.11988/ckyyb.20210893).
- [25] 詹道江, 徐向阳, 陈元芳. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [26] 赵建生. 水文资料系列的代表性分析[J]. *内蒙古水利*, 2013(6): 18-19.
- [27] 葛金金, 张汶海, 渠晓东, 等. 湄公河下游生态水文情势变化研究[J]. *人民长江*, 2022, 53(6): 27-32. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.06.004](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.06.004).
- [28] 周一飞, 陈慧颖, 张淑兰, 等. 基于SWIM模型模拟气候变化对青海湖布哈河流域水文过程的影响[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(2): 208-214. DOI: [10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.02.016](https://doi.org/10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.02.016).
- [29] 刘吉峰. 气候变化和人类活动双重胁迫对青海湖流域水文过程与湖泊水位变化影响的模拟研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2006.

Ecological water demand of major rivers in Qinghai Lake basin

DING Qihui¹, JIA Meirong², DING Xiangyi², LIU Jiahong²

(1. Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining 810001, 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)

Abstract: Ecological water demand is proposed in the context of the increasing contradiction between human social water use and natural ecosystem water use, which is the basic basis and key to ecological water use control and regional ecological environment restoration, and at the same time, it is also the amount of water needed to ensure the structural integrity of the ecosystem, the normal functioning of the function, and the stability of the ecological process, which can be divided into ecological water demand of the rivers, wetlands, lakes and other ecological water demand. In order to ensure the healthy development of the ecosystem of Qinghai Lake basin and realize the rational allocation of water resources, it aims to provide an important reference basis for the ecological restoration of rivers and water resources management in Qinghai Lake basin.

Based on the measured long time series data from 1961 to 2020 at Buhahekou station and Gangcha station of Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, the runoff volume was subjected to trend change analysis and runoff mutation test by sliding *T*-test and Mann-Kendall test, and the data were verified to be suitable for the study of ecological water demand of Qinghai Lake basin through the triple-sex review. The ecological water demand within the channels of the Buha and Shaliu Rivers was calculated using Tennant, the mean flow of the deadliest month in the last 10 years, the mean flow of the month with 90% guarantee rate, and the intra-annual spreading method. The four methods were compared and analysed with the improved Tennant evaluation criteria and satisfaction degree. The calculation results obtained that it is more reasonable to calculate the ecological water demand of Buha River by the method of intra-annual spreading, and it is more reasonable to calculate the ecological water demand of Shaliu River by the method of 90% guaranteed monthly average flow rate.

The following conclusions are drawn: The average flow rate method of the deadliest month in the past ten years has consistent monthly changes within the year, which is not in line with the process of abundance and depletion changes within the year, and the calculation results are not in line with the practical requirements. Tennant method in the ecological flow calculation of Buha River and Shaliu River, some months are lower than the range of Tennant minimum evaluation index, and the calculation results do not meet the requirements. In the analysis of comprehensive water demand and ecological water demand satisfaction, the intra-annual spreading method is more representative for calculating the ecological water demand for Buha River, and the monthly average flow rate method with 90% guarantee rate is more representative for calculating the ecological water demand for Shaliu River.

The degree of satisfaction of ecological water demand of Buha River in July is low, and the degree of satisfaction of ecological water demand of Shaliu River in February is low. The contradiction between upstream and downstream supply and demand of water resources in that month should be considered to make a more reasonable water resources scheduling. According to the ecological water demand in the channel of Shaliu River calculated by Buha River and 90% guarantee rate monthly average flow method, Buha River has the largest ecological water demand in July, $31.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the smallest ecological water demand in February, $0.86 \times 10^8 \text{ m}^3$; Shaliu River has the largest ecological water demand in July, $10.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the smallest ecological water demand in February, $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Key words: ecological water demand; Qinghai Lake basin; hydrological method; Buha River; Shaliu River



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部