

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0105

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.
KANG Z X, WANG F, LIU Y, et al. Analysis of hydrological rhythm change based on IHA-RVA method in the upper and middle reaches of Datong River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1065-1075. (in Chinese)

基于 IHA-RVA 法的大通河上中游水文节律变化

康泽璇, 王芳, 刘扬, 左俊康

(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:为探究大通河上中游天然水文节律受气候变化的影响,选择该区域气候增温迅速的突变时间 1997 年为分界点,基于水文指标及其变化范围评价法(IHA-RVA 法),共选取 32 个指标对杂大滩/青石嘴水文站 1960—1996 年、1997—2016 年 2 个时段的径流过程进行分析,并应用主成分分析法去除冗余指标,优选 8 个代表性指标计算整体的水文改变度。结果表明:1997 年前后水文指标变化较明显的有汛前 5 月份流量减少 24.1%,枯季月份流量(1—3、11 和 12 月份)、年多日最小流量和基流指数显著增大,多项指标增幅大于 80%,发生高度改变;低脉冲次数和历时分别减少 50% 和 85.7%,高脉冲次数减少 2 次,高脉冲历时增加 21.7%。优选的 8 个代表性指标计算出的大通河上中游段的整体水文改变度为 43%,表明在气候变化影响下上中游段总的改变程度达到中等程度,如此大的改变也与大通河源头区的含水层分布有关。

关键词:大通河;气候变化;水文节律;IHA;主成分分析法;水文改变度

中图分类号:TV214;P333

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



河流水文过程是河流生态系统的关键要素,其节律性深刻影响河流的生物过程^[1]。水资源开发与气候变化对水文过程的改变一直是生态水文研究关注的重点^[2-4]。自 20 世纪末 Richter 等^[5-7]提出水文指标及其变化范围评价法(IHA-RVA 法)以来,IHA-RVA 法就成为评价河流水文改变的重要方法^[8-11],如 Shiau 等^[12]用该方法研究修建分水堰对 Chou-Shui Creak 河水文过程的影响,郭文献等^[13]用该方法评价嘉陵江水库建设对水文过程的改变。近年来,IHA-RVA 法也用于分析气候变化引起的水文过程改变:Yang 等^[14]基于该方法评估未来气候变化对非洲尼日尔河水文生态的影响;张如强等^[15]将该方法用于黑河上游,发现各月平均流量、年多日最大流量和流量变化改变率等多项指标呈不同程度增加;张力文^[16]用该方法评价金沙江支流关河的水

文改变情况,发现气候变化是关河径流减少的主要原因。

IHA-RVA 法中 IHA 指标数量众多,部分指标间具有较强的相关性,在评价河流水文过程总体改变程度时会导致数据信息冗余^[17-18]。针对降低 IHA 指标冗余度的方法较多,如主成分分析法(principal component analysis, PCA)、遗传规划算法、互信息法和个体生态学矩阵等^[19-20]。其中,PCA 应用较为广泛,程俊翔等^[20]和江善虎等^[21]均利用 PCA 从 33 个 IHA 指标中筛选出估算洞庭湖出口环境流量和渭河流域的 7 个生态最相关指标(ERHIs),两研究区相同的 ERHIs 为年最小流量出现时间,其余 ERHIs 均不相同,洞庭湖的 ERHIs 为年 90 d 最大流量、年 3 d 最小流量、3 月平均流量、6 月平均流量、流量逆转次数和低脉冲历时,渭河流域的

收稿日期:2022-05-06 修回日期:2022-08-24 网络出版时间:2022-10-14

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221014.1149.006.html

基金项目:水利部水利前期工作投资计划项目(WR0157B162018)

作者简介:康泽璇(1998—),女,河北保定人,主要从事生态水文研究。E-mail: 17332257589@163.com

通信作者:王芳(1965—),女,内蒙古乌盟人,正高级工程师,博士,主要从事生态水文研究。E-mail: wangf@iwahr.com

ERHIs 为流量平均减少率、年 7 d 最大流量、年最大流量出现时间、1 月平均流量、12 月平均流量和高脉冲发生次数。用 ERHIs 替代数量众多的 IHA 指标,抓住最关键的生态水文变量,降低冗余,尽可能保留原始数据的关键信息。

大通河集中有国家级水产种质资源保护区,其所在的祁连山区累积增温 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22]。大通河水文演变的研究^[23-26]主要集中在总径流和枯季基流的演变特征分析上:赵美亮等^[23]发现大通河 1956—2016 年上中游实测径流量以 $0.3\text{ 亿 m}^3/(10\text{ a})$ 的速率上升,同时径流过程存在 22 a 尺度的主周期变化;白雁翎等^[24]研究大通河上游 1960—2016 年的径流演变规律并分割出基流,发现年径流深以 $6.0\text{ mm}/(10\text{ a})$ 的趋势增长,基流总量和占比增加。应用 IHA-RVA 法评价大通河上中游水文过程的变化,旨在更全面地反映气候变化下的水文改变,对大通河生态保护与水资源管理起到一定的支撑作用。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

大通河($36^{\circ}30'\sim 38^{\circ}25'\text{N}$, $98^{\circ}30'\sim 103^{\circ}15'\text{E}$)地处青藏高原的东北边缘,为黄河二级支流,干流段全长 561 km,流域面积约 $15\,130\text{ km}^2$ 。流域多年平均降水量 442.3 mm ,多年平均径流量 28.95 亿 m^3 。尕大滩/青石嘴断面以上河段长 297 km,流域面积 $7\,893\text{ km}^2$,1956—2016 年多年平均实测径流量 16 亿 m^3 。

海拔 3 600 m 以上的中高山区广泛发育冻土和冻岩,面积 $7\,571\text{ km}^2$ 。季节性冻土全区均有分布,河谷区冻结深度 1~2 m,基岩山区冻结深度 2.5 m,一般年融冻期 120 d 左右,其余时间处于封冻期^[27]。强烈的寒冻风化剥蚀作用在源头和上游河谷地带形成了较厚的冻结含水层,地下水有随季节性变化的冻结层上水,支撑源头区发育面积 $1\,878\text{ km}^2$ 的沼泽,也有稳定的冻结层下水^[28],现代河流作用下形成的河流融区发育,因此河流的枯季径流相对较大,占多年平均径流量的 20%。20 世纪 80 年代大通河的冰川面积 40.87 km^2 ,冰川储量 12.5 亿 m^3 ,冰川水资源量 0.352 亿 m^3 ^[29],冰川水资源量占流域径流量仅为 1.2%。

流域内有大通河特有鱼类国家级水产种质资源保护区,保护区主要保护对象为拟鲢高原鳅、厚唇裸重唇鱼、花斑裸鲤和黄河裸裂尻鱼,其他保护物

种包括黄河高原鳅、拟硬刺高原鳅等^[27]。

流域内人口稀少,现有人口 40.65 万人,主要分布在中下游。尕大滩/青石嘴断面以上的纳子峡与石头峡两座大型水库 2014 年建成。水库建成前,本流域的引水在尕大滩/青石嘴断面以下,影响该断面径流的是 2003 年通水的引大济西工程,年设计引水量 0.4 亿 m^3 ,水资源开发利用不到 2%;水库建成后,一直到 2016 年,引大济湟尚未通水。另外,21 世纪以来建成引水电站 41 座,集中分布在门源—天堂段。

选择开发利用影响较小、近天然的上中游段为研究区,即尕大滩/青石嘴断面以上区域。流域概况见图 1。

1.2 数据来源

水文节律分析数据主要基于流域的水文站实测资料开展。大通河上游的尕日得和武松塔拉站所处位置气候寒冷,且枯季径流相对稳定,故枯季径流不进行实测。因此,研究选用尕大滩/青石嘴站 1960—2016 年的实测逐日流量数据,其中,尕大滩站于 2001 年撤站,青石嘴站 1997 年自上游 9 km 处的尕大滩站迁来,将两站的日流量校核后合并使用。截至 2016 年,尕大滩/青石嘴站以上,水资源的开发利用不到 2%,流域所处地区海拔高、人烟稀少,基本排除人类活动的干扰,故分析中认为两站资料是近天然的水文系列,忽略人类活动因素对径流的改变。

1.3 研究方法

IHA-RVA 法是 Richter 等^[5-7]提出的从流量、峰值、发生频率、持续时间、变化速率等方面表征水文过程并评价其改变程度的方法。为减少水文指标冗余度对整体水文改变程度评价的影响,选用主成分分析法优选水文指标。

1.3.1 水文改变指标

IHA 法包含 5 组水文改变指标,共 33 个。考虑尕大滩/青石嘴站无零流量情况,去掉“零流量天数”这一参数,余下 32 个 IHA 指标见表 1。

1.3.2 变化范围法与单指标水文改变度

基于 IHA 指标体系,Richter 等^[6-7]相继于 1997 年提出变化范围法(range of variability approach, RVA),将研究数据分成突变前后 2 个时段进行分析,一般将突变前各个 IHA 指标发生频率为 75% 和 25% 的值作为河流 RVA 生态目标区间的上下限^[6]。

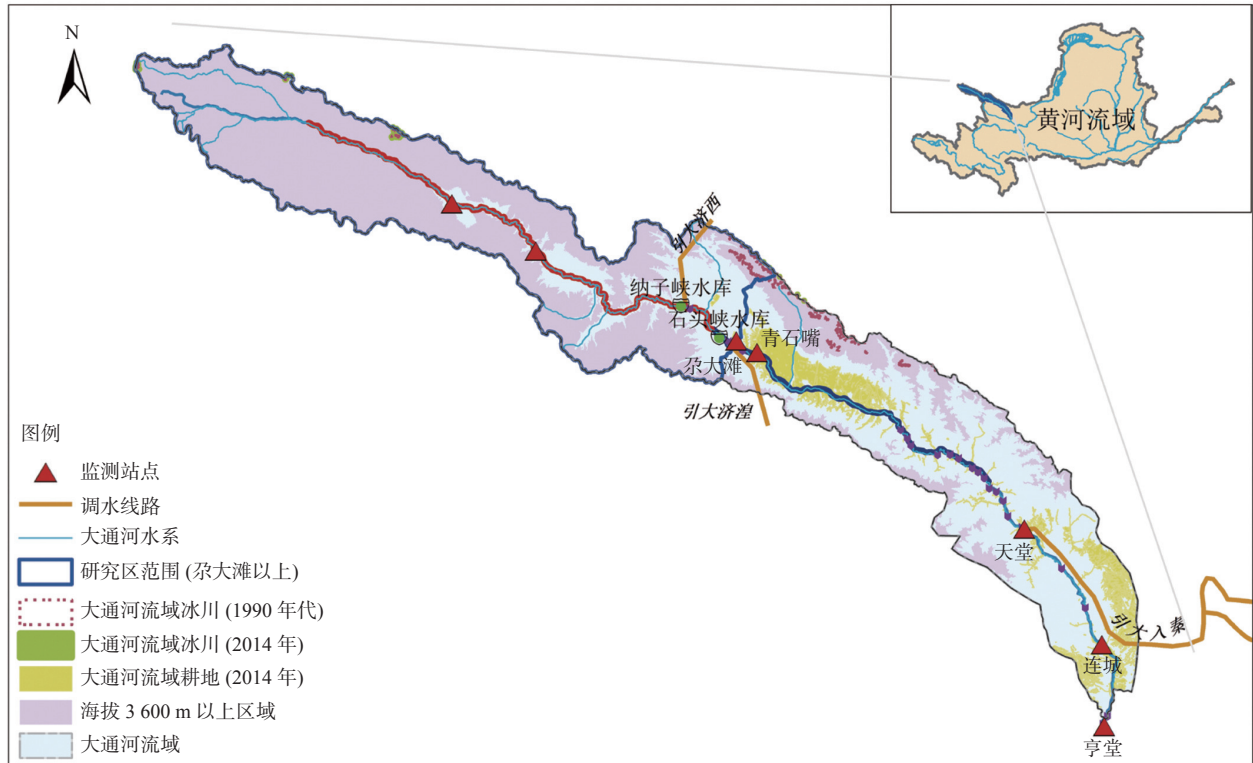


图 1 大通河流域

Fig. 1 Schematic diagram of Datong River basin

表 1 调整后的 IHA 指标体系

Tab. 1 Adjusted IHA indicator system table

组别	指标类别	IHA 指标 (共 32 个)
1	各月流量	各月份流量的中值
2	年极值流量	年最小(1、3、7、30、90 d)流量
		年最大(1、3、7、30、90 d)流量 基流指数
3	年极值流量出现时间	年最小(大)1 d 流量出现时间
4	高低脉冲及历时	年发生低(高)脉冲的次数
		低(高)脉冲的中值持续时间
5	流量变化改变率及频率	日流量上升率中位数
		日流量下降率中位数
		每年日流量变化逆转次数

Richter 等定义了“水文改变度”这个概念,以便定量测算各个 IHA 指标的变化程度,计算公式为

$$D_i = \frac{N_{o,i} - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 为第 i 个指标的水文改变度; $N_{o,i}$ 为突变后第 i 个指标值实际在 25%~75% 范围内的年数; N_e 为突变后第 i 个指标值预期在 25%~75% 范围内的年数 ($N_e = P \times N_T$, P 为突变前在 25%~75% 范围内的年数与突变前总年数的比值, N_T 为突变后的总年数)。

1.3.3 主成分分析法

PCA 法利用降维的思想压缩数据,原则是尽可能多地保留数据原有信息。PCA 将原始的多个变

量转化成几个新的互不相关的综合变量,转化后的变量即为主成分,均是原始变量的线性组合,能够很好地解决多个变量之间的冗余问题。^[20-21] 利用 SPSS 软件实现 PCA 分析,首先为消除量纲的影响,将 32 个 IHA 指标进行标准化,建立指标间的相关性矩阵,之后计算矩阵的特征值和特征向量,得出主成分。最终考虑 Kaiser-Guttman 标准^[30],接受特征值大于 1 且累计贡献率(方差百分比)达到 80% 的主成分,选取被接受的主成分中载荷值最大的指标为代表性指标。

1.3.4 总改变度计算

序列整体的水文改变度计算公式^[12] 为

$$D_0 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2} \quad (2)$$

式中: D_0 为序列整体的水文改变度; N 为去除冗余度的指标数; D_i 为第 i 个指标的水文改变度。将水文改变度分成 3 个等级: $0 < D_0 \leq 33\%$ 为低度改变; $33\% < D_0 \leq 67\%$ 为中度改变; $67\% < D_0 \leq 100\%$ 为高度改变。^[31]

2 结果分析

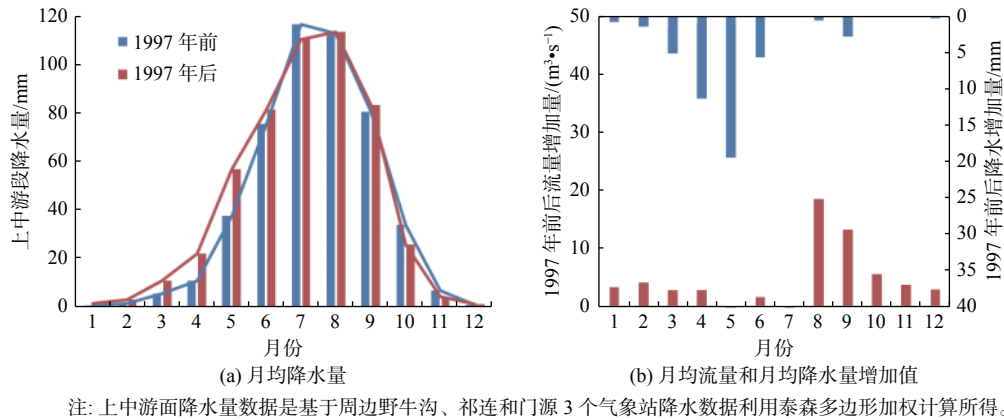
2.1 数据时段的划分

20 世纪 90 年代后期青藏高原气温上升速率加

快,已有研究成果^[22]显示,大通河所在的祁连山区累积增温 2.3 ℃,1997 年后上中游周边野牛沟、祁连和门源 3 个气象站年均气温增温速率是 1997 年前的 10 倍。

随着温度的急剧升高,大通河流域的冻土、冰川与降雨径流关系发生了显著的改变。冻土总体上表现出上限下降、下限上升、融区扩大、活动层厚度增加的变化:河源融区面积较 20 世纪 70 年代

增加了 38.9%^[28],近 20 年冻土活动层厚度增加速率是 0.15 m/(10 a)^[32];冰川面积的变化,1997 年以后的平均面积是 1997 年前的 58%^[24];降雨径流关系的变化,平均降水量 1997 年后比 1997 年前增加了 31 mm,主要发生在汛期前,但是汛前期径流量显著减少,汛后期 1997 年后比 1997 年前径流增加明显^[22]。见图 2。



注:上中游面降水量数据是基于周边野牛沟、祁连和门源 3 个气象站降水数据利用泰森多边形加权计算所得。

图 2 大通河上中游段 1997 年前后月均降水量和月均流量变化

Fig. 2 Changes of mean monthly precipitation and mean monthly discharge in the upper and middle reaches of Datong River before and after 1997

选择 1997 年为气候突变的时间节点,将尕大滩/青石嘴站日流量数据划分成突变前 1960—1996 年、突变后 1997—2016 年 2 个时段进行 IHA 分析。

2.2 代表性指标优选

将长序列的尕大滩/青石嘴站 32 个 IHA 指标计算数据运用 PCA 法进行统计分析后,32 个主成分的特征值和累计贡献率见图 3。前 8 个主成分特征值大于 1,而且累计贡献率达到 82.31%,符合 Kaiser-Guttman 标准,故接受 PC₁~PC₈ 为尕大滩/青石嘴站的主成分。

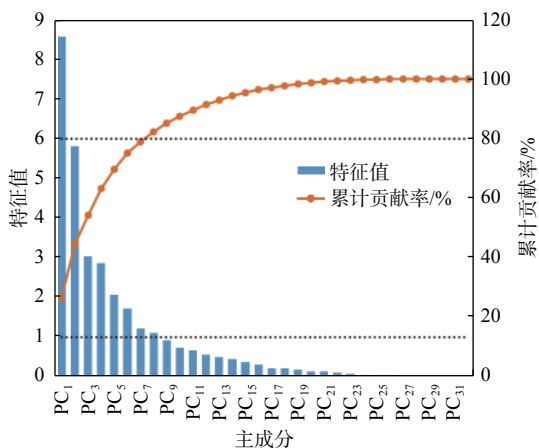


图 3 主成分分析的特征值和累计贡献率

Fig. 3 Eigenvalues and cumulative contribution rates for principal component analysis

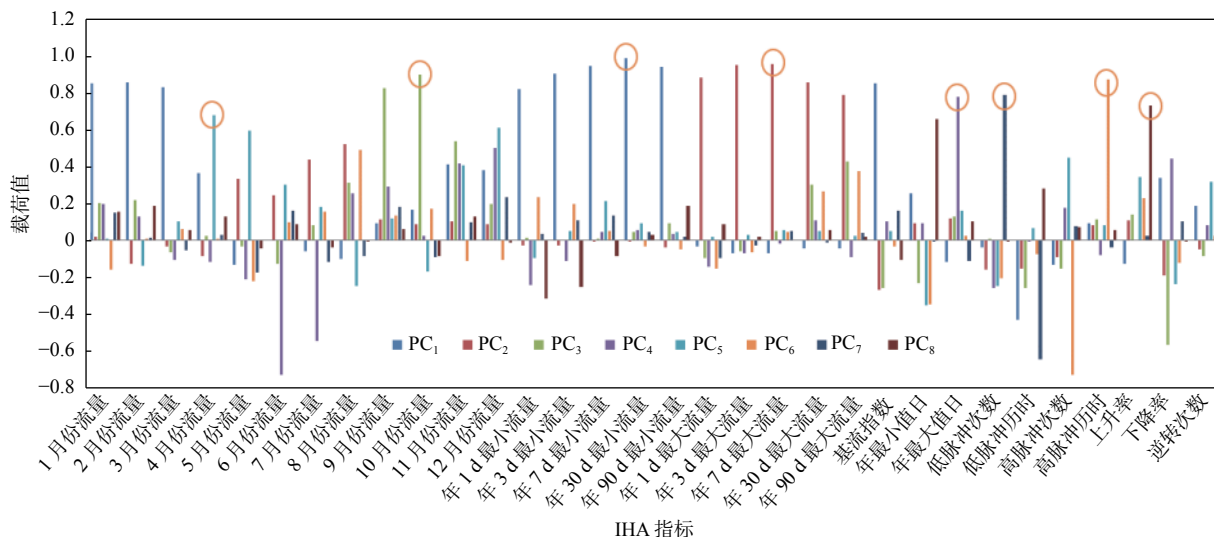
主成分因子载荷值分布情况见图 4,将 PC₁~PC₈ 各自载荷最大值对应的 IHA 指标作为尕大滩/青石嘴站的代表性指标,分别是年均 30 d 最小流量、年均 7 d 最大流量、10 月份流量、年最大值出现时间、4 月份流量、高脉冲历时、低脉冲次数和上升率。

为验证尕大滩/青石嘴站指标优选结果的合理性,将优选出的 8 个代表性指标数据进行相关性分析,指标间的相关系数都很低,见图 5。此外,原始 IHA 指标的 5 个组别中均至少包含 1 个优选出的代表性指标,说明 8 个代表性指标覆盖了描述水文节律的各个方面。

2.3 水文指标变化分析

2.3.1 月中值流量

大通河上中游月中值流量变化及改变度见表 2。各月流量的变化对河流中的水生生物、洪泛平原的植物、水温、含氧量等均会产生影响^[31]。1997 年后,1—3、11 和 12 月份的枯季流量明显增多,改变度均大于 50%,属于中高度改变。其中:1 月份流量增加 87.5%;2 月份流量超过突变前的两倍,改变度高达 90% 和 100%;其余月份改变度为 5%~27%,均属于低度改变。汛前春季 5 月份和汛期 7 月份流量均减少,减少幅度为 24.1% 和 0.9%,4、6 和 8—10 月份流量均增多,变化率在 2%~25%。



注:图中橙色圆圈标注对应各主成分中载荷最大值对应的 IHA 指标。

图 4 主成分因子载荷值分布情况

Fig. 4 Principal component factor loading value distribution

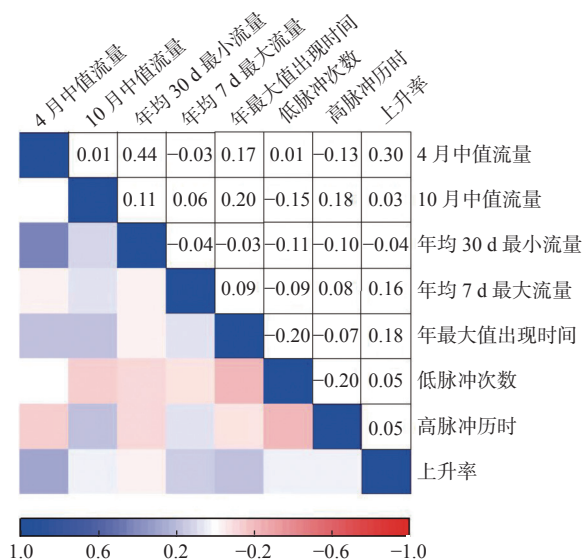


图 5 代表性指标相关性分析结果

Fig. 5 Representative indicators correlation analysis results

2.3.2 年极值流量大小和出现时间

第 2、3 组 IHA 指标变化及改变度见表 3 和表 4。年多日最小流量出现不同程度的增加趋势, 增加幅度均在 80%~105%; 年多日最小流量的水文改变程度均属于高度改变, 其中 3 d、7 d、30 d、90 d 改变度均达到 100%。此处年多日最小流量和第 1 组 IHA 指标中枯季月份中值流量的增加均表明 1997 年后上中游段枯水期流量明显增多, 河段的生态基流得以保持^[33], 能够在一定程度上缓解冬季超低流量带来的化学组分发生改变、溶解氧含量降低、鱼类被捕食、水温升高等负面影响^[13,34], 有助于保护区的珍稀鱼类越冬。枯季径流的高度改变与大通河上中游的含水层有关, 大通河源头区是一个剥蚀盆地, 形成相对较厚的含水层, 调节作用大, 使得大通河

多年平均枯季径流占天然总径流量的 20%, 是一般温带地区河流的 2 倍, 随着温度升高, 整个盆地的融区增加, 冻结层上水通过融区补给冻结层下水, 原本受冻结层上水支撑的沼泽, 面积减少了 42%^[27], 冻结层下水补给河道基流。

年 1 d、3 d 最大流量减少 10% 左右, 年 7 d 最大流量基本不变, 而年 30 d、90 d 最大流量增加近 10%; 年 1 d、7 d 最大流量呈中度改变, 改变度分别为 36.8% 和 47.4%, 其余最大流量均为低度改变, 改变度低于 30%。基流指数增大了将近 1 倍, 改变度为 79%, 属于高度改变。有关年极值流量出现时间的变化, 年最小值出现时间提前了 7 d, 年最大值出现时间提前了 9 d, 均为低度改变, 故影响相对较小。

2.3.3 高低脉冲的频率及历时

高低脉冲次数、历时变化及改变度见表 5 和表 6。高脉冲定义为高于突变前流量 25% 频率的日均流量, 低脉冲定义为低于突变前流量 75% 频率的日均流量。低脉冲次数从 2 次减少到 1 次, 低脉冲历时减少更为显著, 从 49 d 减小到 7 d, 变幅高达 85.7%, 需引起重视。低脉冲次数和历时的改变度为 29.8% 和 50.1%, 属于低度和中度改变。对于大通河特有鱼类来说, 其产卵期前的低脉冲信号基本消失, 且低脉冲次数和历时显著减少, 会影响边滩、小型浅滩的营养物带入河道。^[31]

高脉冲次数减少了 2 次, 减少幅度为 25%, 主要发生在汛前; 高脉冲历时却呈现增加的趋势, 增幅为 21.7%, 主要发生在汛后; 两者的变化幅度相较于

低脉冲来说较小。高脉冲次数和历时的改变度为 1.1% 和 24.2%, 均为低度改变。汛后高脉冲单次历时的增加可能导致两岸植被类型的改变, 可能会对鳅科鱼类的浅滩栖息地产生一定影响。^[35]

表 2 第 1 组 IHA 指标评价结果
Tab. 2 The first group of IHA index evaluation results

IHA 指标	中值/(m ³ ·s ⁻¹)		中值变化率/%	阈值/(m ³ ·s ⁻¹)		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
1 月份流量	3.8	7.2	87.5	3.6	4.8	-90.0	高
2 月份流量	3.5	7.7	117.9	2.7	4.5	-100.0	高
3 月份流量	6.4	9.3	44.5	5.1	7.5	-81.1	高
4 月份流量	22.9	25.8	12.7	17.6	26.2	-26.3	低
5 月份流量	51.5	39.1	-24.1	36.7	64.3	-15.8	低
6 月份流量	58.5	60.2	2.9	47.2	78.6	-15.8	低
7 月份流量	93.2	92.4	-0.9	76.5	132.5	-15.8	低
8 月份流量	78.4	96.9	23.6	68.8	107.8	-15.8	低
9 月份流量	74.3	87.6	17.9	55.6	101.9	5.3	低
10 月份流量	41.1	46.7	13.6	32.3	46.7	-15.8	低
11 月份流量	17.4	21.3	21.9	14.4	19.7	-52.6	中
12 月份流量	6.5	9.6	47.1	5.2	7.7	-79.0	高

表 3 第 2 组 IHA 指标评价结果
Tab. 3 The second group IHA index evaluation results

IHA 指标	中值/(m ³ ·s ⁻¹)		中值变化率/%	阈值/(m ³ ·s ⁻¹)		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
年 1 d 最小流量	2.7	5.0	85.4	2.1	3.2	-89.5	高
年 3 d 最小流量	2.7	5.1	86.5	2.2	3.3	-100.0	高
年 7 d 最小流量	2.9	5.8	102.6	2.3	3.5	-100.0	高
年 30 d 最小流量	3.3	6.6	99.7	2.6	4.0	-100.0	高
年 90 d 最小流量	4.8	8.6	81.4	4.1	5.4	-100.0	高
年 1 d 最大流量	409.5	377.0	-7.9	297.8	551.3	36.8	中
年 3 d 最大流量	336.2	298.3	-11.3	241.9	422.8	26.3	低
年 7 d 最大流量	265.9	268.3	0.9	191.5	335.9	47.4	中
年 30 d 最大流量	161.1	176.0	9.2	124.7	192.0	26.3	低
年 90 d 最大流量	115.2	124.7	8.2	95.1	139.1	15.8	低
基流指数	0.1	0.1	75.5	0	0.1	-79.0	高

注: 基流指数无单位。

表 4 第 3 组 IHA 指标评价结果
Tab. 4 The third group IHA index evaluation results

IHA 指标	中值/d		中值变化率/%	阈值/d		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
年最小值出现时间	33.0	26.0	-21.2	25.5	60.5	-5.3	低
年最大值出现时间	208.0	199.0	-4.3	193.3	223.0	-10.3	低

注: 将每年的 1 月 1 日作为第 1 d, 年极值流量出现情况若一年中有多天具有相同流量, 则记为其出现最早的那一天。

表 5 高低脉冲次数评价结果

Tab. 5 Evaluation results of high and low pulse times

IHA指标	中值/次		中值变化率/%	阈值/次		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
低脉冲次数	2	1	-50.0	1	2	-29.8	低
高脉冲次数	8	6	-25.0	6	10	-1.1	低

表 6 高低脉冲历时评价结果

Tab. 6 Evaluation results of high and low pulse duration

IHA指标	中值/d		中值变化率/%	阈值/d		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
低脉冲历时	49.0	7.0	-85.7	14.0	87.0	-50.1	中
高脉冲历时	5.8	7.0	21.7	4.0	8.8	-24.2	低

高低脉冲的变化主要是由于冻土释水变化改变降雨径流关系所致,汛前5月份降水增加最为显著,但流量减少24.1%,主要是增温使冻土活动层变薄,春季冻土释水本身减少,降水的增加不足以弥补冻土释水的减少量;汛后降水变化不显著,高脉冲历时、流量增加较为明显,主要是源头区盆地平缓,汛期降水大量补给冻结层上水,再通过融区补给冻结层下水,冻结层下水排泄补给河道有一定的滞后性,

而且补给量增加。^[22]

2.3.4 流量变化改变率及频率

上升率、下降率和逆转次数变化及改变度见表7和表8。1997年后,上升率、下降率和逆转次数均有所下降,降幅较小,变化率分别为27.3%、27.3%和6%。改变度也均属于低度改变,上升率、下降率均为15.8%,逆转次数仅为0.8%。

表 7 上升率和下降率评价结果

Tab. 7 Evaluation results of rising rate and falling rate

IHA指标	中值/(m ³ ·s ⁻¹ ·d ⁻¹)		中值变化率/%	阈值/(m ³ ·s ⁻¹ ·d ⁻¹)		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
上升率	1.4	1.0	-27.3	1.0	1.8	-15.8	低
下降率	-2.2	-1.6	-27.3	-2.7	-1.8	-15.8	低

表 8 逆转次数评价结果

Tab. 8 Evaluation result of number of reversals

IHA指标	中值/次		中值变化率/%	阈值/次		水文改变度/%	改变程度
	突变前	突变后		下限	上限		
逆转次数	116	109	-6	94	130	-0.8	低

2.4 整体水文改变度分析

2.4.1 分组指标水文改变度

利用公式(2)计算出的尕大滩/青石嘴站原始32指标的分组指标及整体水文改变度见表9,可知整体发生中度改变,改变度为56%。尕大滩/青石嘴站第1组IHA指标为中度改变,第2组为高度改变,第3、4、5组指标均为低度改变。由此可见,第2组IHA指标即年多日最大最小流量的变化最大,改

变度高达74%。

2.4.2 优选8个指标整体水文改变度

对比分析表9和表10,发现运用PCA方法选取的8个代表性指标同时涵盖了高中低3种改变度,最终计算出的大通河上中游段整体水文改变度为43%,与原始32个指标计算出的56%接近,两种指标评价结果均为中度改变,说明大通河上中游段在气候变化的影响下,总的改变程度达到了中等程度。

反观各指标对整体水文改变度的贡献程度,表 9 中第 2 组 IHA 指标和表 10 中的年均 30 d 最小流量的改变度均最大,说明枯季径流的高度改变对大通河上中游段整体发生中等程度改变的贡献最大;而

枯季径流发生高度改变是因大通河源头区特有盆地的含水层存在,随着融区扩大,冻结层上水和冻结层下水的转化,加剧了径流过程的变化。

表 9 尕大滩/青石嘴站 5 组指标及整体水文改变度

Tab. 9 Five groups of indicators and overall hydrological change at Gadatan/Qingshizui Station

水文站	各组水文改变度/%					整体水文改变度
	各月流量	年极值流量大小	年极值流量出现时间	高低脉冲及历时	流量变化改变率及频率	
尕大滩/青石嘴	55(中)	74(高)	8(低)	32(低)	13(低)	56(中)

表 10 尕大滩/青石嘴站优选代表性指标改变度

Tab. 10 The degree of change of the optimal representative indicators at Gadatan/Qingshizui Station

IHA 指标	水文改变度/%	改变程度
4 月份流量	-26.3	低
10 月份流量	-15.8	低
年均 30d 最小流量	-100.0	高
年均 7d 最大流量	47.4	中
年最大值出现时间	-10.3	低
低脉冲次数	-29.8	低
高脉冲历时	-24.2	低
上升率	-15.8	低
整体水文改变度	43.3	中

3 结论

以大通河近天然的上中游段尕大滩/青石嘴站近 60 年的实测日流量数据为研究对象,选择 1997 年作为增温速率增大的转折点,运用了 IHA-RVA 法分析 1997 年前后各个水文指标的变化情况,并运用 PCA 法优选出 4 月份中值流量、10 月份中值流量、年均 30 d 最小流量、年均 7 d 最大流量、年最大值出现时间、低脉冲次数、高脉冲历时和上升率共计 8 个代表性水文指标,分析整体的水文改变度。结论如下:

4 月份和 10 月份是春季融冰和秋季冻结的月份,直接受气候变化影响,中值流量的改变度分别是 26.3% 和 15.8%,属于低度改变。年均 30 d 最小流量是年多日最小流量(1 d、3 d、7 d 和 90 d)和枯季月份中值流量的代表,变化是最为显著的,改变度达到 100%。

年均 7 d 最大流量是年均多日最大流量(1 d、3 d、30 d 和 90 d)的代表,研究显示 7 d 最大流量中值基本不变,但是落在频率 25%~75% 范围的概率增加,

改变度达到 47%,属于中度改变。年最大值出现时间即年极值流量出现时间平均提前了 7~9 d,为低度改变。

低脉冲次数相当于低于频率 75% 的流量过程出现的次数,从 2 次减少到 1 次,历时从 49 d 减少到 7 d,低脉冲次数和历时的改变度为 29.8% 和 50.1%,属于低度和中度改变。高脉冲历时相当于高于频率 25% 的流量过程持续的时间,从平均 5.8 d 增加到 7 d,改变度为 24.1%,属于低度改变。上升率代表流量变化改变率,变化速率减缓,发生低度改变。

大通河上中游段整体水文改变度为 43%,说明在气候变化影响下上中游段总的改变程度达到了中等程度。如此大的改变度,除增温引起冻土释水乃至降雨径流关系的改变以外,大通河源头区特有盆地的含水层存在,随着融区扩大,冻结层上水和冻结层下水的转化,加剧了径流过程的变化。

参考文献(References):

- [1] ALLAN J D, CASTILLO M M. Stream ecology: Structure and function of running waters[M]. 2nd ed. Netherlands: Springer, 2007.
- [2] 徐宗学,姜瑶. 变化环境下的径流演变与影响研究: 回顾与展望[J]. 水利水运工程学报, 2022(1): 9-18. (XU Z X, JIANG Y. Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: A state-of-the-art review[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 9-18. (in Chinese)) DOI: 10.12170/20210105008.
- [3] 左其亭. 水科学的核心与纽带: 人水关系学[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(1): 1-8. (ZUO Q T. The research core and nexus of water science: Human-water relationship discipline[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(1): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2022.0001.

- [4] 夏军,张永勇,穆兴民,等. 中国生态水文学发展趋势与重点方向[J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 445-457. (XIA J, ZHANG Y Y, MU X M, et al. Progress of ecohydrological discipline and its future development in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 445-457. (in Chinese)) DOI: [10.11821/dlxb202003001](https://doi.org/10.11821/dlxb202003001).
- [5] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174. DOI: [10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x).
- [6] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249. DOI: [10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x).
- [7] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(4): 329-340. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199807/08\)14:43.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:43.0.CO;2-E).
- [8] WEN X, LIU Z, LEI X, et al. Future changes in Yuan River ecohydrology: Individual and cumulative impacts of climate change and cascade hydropower development on runoff and aquatic habitat quality[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 1403-1417. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.309](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.309).
- [9] ABEBE W B, TILAHUN S A, MOGES M M, et al. Hydrological foundation as a basis for a holistic environmental flow assessment of tropical highland rivers in Ethiopia[J]. *Water(Basel)*, 2020, 12(2): 547. DOI: [10.3390/w12020547](https://doi.org/10.3390/w12020547).
- [10] LIN K, LIN Y, XU Y, et al. Inter- and intra- annual environmental flow alteration and its implication in the Pearl River Delta, south China[J]. *Journal of hydro-environment research*, 2017, 15: 27-40. DOI: [10.1016/j.jher.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jher.2017.01.002).
- [11] 武玮,徐宗学,李发鹏. 渭河关中段水文情势改变程度分析[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1124-1137. (WU W, XU Z X, LI F P. Hydrologic Alteration Analysis in the Guanzhong Reach of the Weihe River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(7): 1124-1137. (in Chinese)) DOI: [10.11849/zrzyxb.2012.07.005](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2012.07.005).
- [12] SHIAU J T, WU F C. Assessment of hydrologic alterations caused by Chi-Chi diversion weir in Chou-Shui Creek, Taiwan: opportunities for restoring natural flow conditions[J]. *River Research and Applications*, 2004, 20(4): 401-412. DOI: [10.1002/rra.762](https://doi.org/10.1002/rra.762).
- [13] 郭文献,焦旭洋,周昊彤,等. 嘉陵江水文情势变化及其鱼类影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4): 805-813. (GUO W X, JIAO X Y, ZHOU H T, et al. Hydrological regime alternation and fish influence in Jialing River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(4): 805-813. (in Chinese)) DOI: [10.11870/cilyzyyhj2202204008](https://doi.org/10.11870/cilyzyyhj2202204008).
- [14] YANG T, CUI T, XU C, et al. Assessing the impacts of climate change on flow regime alteration in an African river using a new IHA method[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 156: 68-79. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2017.07.006](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.07.006).
- [15] 张如强,刘俊国,冒甘泉,等. 基于改进RVA法的黑河上游水文情势变化分析[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(1): 29-38. (ZHANG R Q, LIU J G, MAO G Q, et al. Flow regime alterations of upper Heihe River based on improved RVA[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(1): 29-38. (in Chinese)) DOI: [10.13866/j.azr.2021.01.04](https://doi.org/10.13866/j.azr.2021.01.04).
- [16] 张力文. 金沙江支流关河流域水文情势分析[D]. 北京:北京林业大学, 2021. (ZHANG L W. Analysis of hydrological situation in Guanhe basin, a tributary of Jinsha River[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.(in Chinese)) DOI: [10.26949/d.cnki.gblyu.2021.000582](https://doi.org/10.26949/d.cnki.gblyu.2021.000582).
- [17] CLAUSEN B, BIGGS B J F. Flow variables for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2000, 237(3-4): 184-197. DOI: [10.1016/S0022-1694\(00\)00306-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00306-1).
- [18] OLDEN J D, POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes[J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 101-121. DOI: [10.1002/rra.700](https://doi.org/10.1002/rra.700).
- [19] YANG Y C, CAI X M, HERRICKS E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W4412. DOI: [10.1029/2006WR005764](https://doi.org/10.1029/2006WR005764).
- [20] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 生态最相关水文指标的优选及其在洞庭湖环境流量估算中的应用[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(5): 1235-1245. (CHENG J X, XU L G, JIANG J H. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrologic indicators and its application for environmental flow calculation in Lake Dongting[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(5): 1235-1245. (in Chinese)) DOI: [10.18307/2018.0507](https://doi.org/10.18307/2018.0507).
- [21] 江善虎,刘亚婷,任立良,等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J/OL]. *水资源保护*, 2022-02-17. (JIANG S H, LIU Y T, REN L L, et al. Attribution analysis of the eco-hydrological regime evolution in Weihe River basin under changing environment[J/OL]. *Water Resources Protection*, 2022-

- 02-17.(in Chinese))
- [22] 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. (WANG F, WANG T C, BAI Y L, et al. The relationship evolution of rainfall and runoff and preliminary study of water resource attenuation[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(4): 361-370. (in Chinese)) DOI: [10.13244/j.cnki.jiwhr.20200107](https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20200107).
- [23] 赵美亮,曹广超,曹生奎,等.1956—2016年大通河温度和降水及其与径流变化的关系[J].*水土保持研究*, 2021, 28(3): 111-117. (ZHAO M L, CAO G C, CAO S K, et al. Temperature and precipitation and their relationship with runoff change in Datong River from 1956 to 2016[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 111-117. (in Chinese)) DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2021.03.013](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.03.013).
- [24] 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. (BAI Y L, WANG F, LIU Y. Quantitative analysis of runoff evolution and driving factors in the upper reaches of Datong River[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 103-110,167. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0010](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0010).
- [25] 王大超.大通河径流变化特征及其影响因素探析[D].兰州:兰州大学,2019. (WANG D C. Runoff variation characteristics for Datong River and its influencing factors[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.(in Chinese))
- [26] 董军,胡进宝,魏国孝.大通河流域径流变化及特征分析[J].*水资源与水工程学报*, 2018, 29(6): 7580,87-80,87. (DONG J, HU J B, WEI G X. Analysis of runoff variation and characteristics in Datong River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(6): 7580,87-80,87. (in Chinese)) DOI: [10.11705j.issn.1672-643X.2018.06.11](https://doi.org/10.11705j.issn.1672-643X.2018.06.11).
- [27] 王芳,李想,刘扬,等.引大济湟可调水量分析[R].北京:中国水利水电科学研究院,2020. (WANG F, LI X, LIU Y, et al. Analysis of adjustable water volume from Datong River to Huangshui[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower, 2020.(in Chinese))
- [28] 王振兴.高原冻土退化条件下区域地下水循环演化机制研究:以大通河源区为例[D].北京:中国地质科学院,2020. (WANG Z X. Study on the evolution mechanism of regional groundwater circulation under the condition of plateau permafrost degradation: A case study of the Datong River source area [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2020. (in Chinese)) DOI: [10.27744/d.cnki.gzgdgk.2020.000001](https://doi.org/10.27744/d.cnki.gzgdgk.2020.000001).
- [29] 杨针娘.祁连山冰川水资源[J].*冰川冻土*, 1988(1): 36-46. (YANG Z N. Glacier water resources of Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988(1): 36-46. (in Chinese))
- [30] JACKSON D A. Stopping rules in principal components analysis: A comparison of heuristical and statistical approaches[J]. *Ecology(Durham)*, 1993, 74(8): 2204-2214. DOI: [10.2307/1939574](https://doi.org/10.2307/1939574).
- [31] 武心嘉,葛金金,戚晓明,等.基于RVA法的沙颍河周口段水文情势评价[J].*南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 71-80. (WU X J, GE J J, QI X M, et al. Assessment of flow regime of Zhoukou Section based on RVA method[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5): 71-80. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0112](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0112).
- [32] 程国栋,赵林,李韧,等.青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J].*科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795. (CHENG G D, ZHAO L, LI R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795. (in Chinese)) DOI: [10.1360/TB-2019-0191](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0191).
- [33] 程俊翔,徐力刚,姜加虎.水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J].*水资源保护*, 2018, 34(6): 24-32. (CHENG J X, XU L G, JIANG J H. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(6): 24-32. (in Chinese)) DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2018.06.04](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2018.06.04).
- [34] 岳思羽,李怀恩,成波.河道生态基流的功能与价值构成研究[J].*水利水电技术*, 2020, 51(11): 138-144. (YUE S Y, LI H E, CHENG B. Study on the functions and value composition of ecological base flow[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(11): 138-144. (in Chinese)) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2020.11.017](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2020.11.017).
- [35] 薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 189-196. (XUE L Q, ZHANG H, ZHANG L C, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2017, 45(3): 189-196. (in Chinese)) DOI: [10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.001](https://doi.org/10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.001).

Analysis of hydrological rhythm change based on IHA-RVA method in the upper and middle reaches of Datong River

KANG Zexuan, WANG Fang, LIU Yang, ZUO Junkang

(*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: River hydrological rhythm reflects the dynamic changes in natural characteristics of water flow and is the key element of the river ecosystem. Recently, the rapid warming of the Qinghai Tibet Plateau has changed the hydrological rhythm of rivers to a certain extent. There is a national aquatic germplasm reserve in Datong River, and the Qilian Mountain area where it is located has an increase of 2.3 °C cumulative temperature. Therefore, exploring the changes in hydrological rhythm in the upper and middle reaches of Datong River under climate change has great significance and can play a supporting role in the ecological protection and water resources management of Datong River.

There is evidence of the temperature rise rate on the Qinghai Tibet Plateau in the late 1990s. The data of meteorological stations around the upper and middle reaches of Datong River show that the average annual temperature increase rate after 1997 is 10 times before 1997. With the rapid increase in temperature, the relationship between frozen soil, glaciers, and rainfall runoff in Datong River basin has significantly changed. Based on the IHA-RVA method, the abrupt change time of rapid climate warming in the region in 1997 was selected as the dividing point. A total of 32 indicators were selected to analyze the runoff process in 1960-1996 and 1997-2016 for Gadatan / Qingshizui hydrological station. The principal component analysis method was used to remove redundant indicators, and 8 representative indicators were selected to calculate the overall hydrological change.

The results show that: (1) April and October are the months of ice melting and freezing, which are directly affected by climate change. The change degree of median flow is 26.3% and 15.8%, respectively, belonging to slight change. The annual minimum flow of 30 d is representative of the annual minimum flow (1 d, 3 d, 7 d, and 90 d) and the median flow in dry season months. The change is significant, and the change degree reaches 100%. (2) The annual average maximum flow in 7 d is representative of the annual average multi-day maximum flow (1 d, 3 d, 30 d, and 90 d). The median value of the maximum flow in 7 d, and is unchanged, but the probability of falling increases between 25% and 75%, and the degree of change reaches 47%, which is a moderate change. The occurrence time of the annual maximum value, i.e. the occurrence time of the annual extreme flow, is averagely advanced by 7 to 9 d, which is a low change. (3) The number of low pulses is equivalent to the number of flow processes below 75% of the frequency, which is reduced from 2 to 1, and the duration is reduced from 49 d to 7 d. The change degree of the number and duration of low pulses is 29.8% and 50.1%, belonging to low and moderate change. The duration of a high pulse is equivalent to the duration of the flow process which is 25% higher than the frequency, increasing from an average of 5.8 d to 7 d, and the degree of change is 24.1%, which belongs to a low degree of change. The rising rate represents the change rate of flow change. The change rate slows down and low-degree changes occur. (4) The overall hydrological change degree of the upper and middle reaches of Datong River is 43%, indicating that the overall change degree of the upper and middle reaches under the influence of climate change has reached a medium level. With the expansion of the melting area, the transformation of water on the frozen layer and water in the frozen layer intensifies the change in the runoff process.

Key words: Datong River; climate change; hydrological rhythm; IHA; principal component analysis; hydrological change degree