

梯级水库群运行后寸滩枯水径流水文变异特性研究

张燃钢¹ 胡江² 徐炜² 杨胜发² 张鹏^{2*}

(1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
2 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

【摘要】:为定量分析梯级水库群蓄水运行后对寸滩枯水期(11~4月)水文变异特性的影响,采用水文变异指标法和变化范围法(IHA/RVA)对1954~2021年寸滩站枯水期日平均流量序列的水文变异特征进行了分析,并采用重标极差R/S法对IHA指标的趋势性进行了分析。结果表明:(1)梯级水库运行后,寸滩枯水期有11个IHA指标发生高度改变,4个指标发生中度改变,9个指标发生低度改变;主要表现为枯水期月均流量和最小流量不断提升;极大流量和极小流量的发生时间提前;流量逆转次数增加。(2)水库群运行前所有IHA指标表现为无偏游走或均值回复的两种状态;而库群运行后有9个指标转变为有偏游走的持续发展趋势。(3)未来寸滩枯水期1、2月流量、最小30d流量、最大流量和流量逆转次数将持续增加;极大和极小流量发生时间将呈均值回复的发展趋势。

【关键词】: IHA-RVA R/S 水库群 寸滩站 径流特征

【中图分类号】: TV211.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2022)010-2176-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202210007

水利工程枢纽的建设,在发挥防洪和兴利功能的同时,势必会改变流域内的水文径流情势,对下游枯水期的航运、灌溉、发电、生态等有着重要的影响^[1,2]。20世纪末开始,长江上游流域干支流河道上逐渐修建了大型水库。目前长江上游梯级水库的修建和水资源的开发仍在继续,预计到2025年长江上游流域水库群总调节库容将达到680亿m³,认识枯水期径流水文变异特性,对于下游生产实践有重要的指导意义。针对水库运行对下游水文情势的影响,国内外学者开展了较多研究。Richer等^[3]在1996年提出了IHA法(Indicators of Hydrologic Alteration),用于统计分析人类活动对于河川径流和生态影响,该方法提出了33个水文指标,全面的对水文变异进行了定量评价。随后又提出了RVA法^[4,5](Range of Variability Approach),用于定量分析水文指标的变异程度,并采用该方法对Colorado河的水文变异程度进行了分析,结果发现受上游支流筑坝影响,Colorado河下游的最大1d流量、极小流量发生时间等水文指标发生了显著的变异。国内学者采用该方法对长江流域的水文变异特性开展了大量研究,如段唯鑫等^[6]和郭文献等^[7]采用该方法对宜昌站进行了分析,发现受三峡和长江上游水库群的影响,宜昌站的水文情势发生了显著的改变。陈昌春等^[8]和曹艳敏等^[9]采用IHA/RVA法分别对修水和湘江的水文变异特征进行了分析,发现上游大型水库的运行不仅改变了下游流域枯水期的水文情势,同时造成了下游生态环境的变异。目前,研究区

¹收稿日期:2021-11-02; 修回日期:2022-01-04

基金项目:三峡后续工作科研项目(SXHXGZ-2021-1)

作者简介:张燃钢(1995~),男,博士研究生,主要研究方向为河流动力学。E-mail:zhangrangang2021@163.com

*通讯作者 E-mail:zhangpenghh@cqjtu.edu.cn

域多集中在长江中下游，而针对长江上游水库群蓄水运行后的水文变异特性研究尚未开展。

本文以寸滩水文站枯水期历史流量序列为基础，通过 IHA/RVA 法分析了其上游水库群影响下，寸滩站径流水文指标的改变程度。并通过重标极差 R/S 法对 IHA 指标进行分析，预测指标未来的变化趋势。

1 研究区域和数据选取

1.1 研究区域

选取寸滩站上游作为研究区域，对寸滩站上游的水库群进行研究(图 1)。其中双江口水库预计 2024 年开始蓄水，暂不对其进行研究。碧口水库由于其库容小，调度能力较弱且距离寸滩站地理位置较为偏远，影响范围有限，因此不考虑碧口水库运行对于寸滩站径流的影响。白鹤滩水库和两河口水库分别从 2021 年 4 月 6 日和 9 月 29 日开始蓄水，对寸滩枯水期径流影响作用尚未体现，所以也不将白鹤滩水库和两河口纳入考虑范围。故最终选取寸滩站上游共 16 座可调节大型水库进行研究，16 座水库总库容为 614.39 亿 m^3 ，占三峡水库枯水期入库总流量的 38%，水库具体起蓄时间以及库容见表 1。

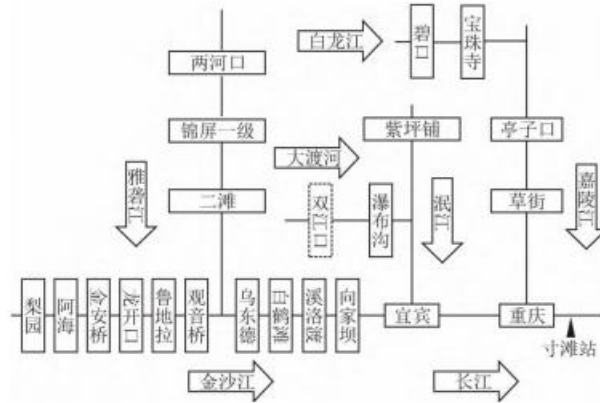


图 1 寸滩站上游梯级水库群分布

表 1 水库库容和起蓄时间

起蓄时间 (年)	水库名称	总库容 (亿 m^3)	起蓄时间 (年)	水库名称	总库容 (亿 m^3)
1998	二滩	58.00	2013	向家坝	51.63
	宝珠寺	25.50		鲁地拉	17.18
2006	紫坪铺	11.12		亭子口	40.67
				梨园	8.05
2008	瀑布沟	53.32		溪洛渡	126.70
2010		22.18		观音岩	22.50
	草街			锦屏一级	79.90
2011	阿海	8.85	2016	金安桥	9.13
2012	龙开口	5.58	2020	乌东	74.08

1.2 数据选取

以寸滩水文站 1954~2021 年的日平均流量过程资料为水文数据基础,取每年的 11 月至次年 4 月的日平均流量数据作为枯水期的径流资料。由于选取的 16 座可调节水库群都在 1998 年之后起蓄(表 1),故以 1998 年作为时间节点,将流量序列划分为受水库群影响前和影响后的两个时间段,用于水库群运行前后的对比分析。

2 研究方法

2.1 IHA-RVA 水文指标法

IHA(Indicators of Hydrologic Alteration)法和 RVA(Range of Variability Approach)法是由 Richter 等提出的一种分析人类活动对于河川径流和生态影响的统计方法。其根据水文全年流量长序列计算出 33 个具有代表性的水文特性指标,各指标计算方法见文献^[3]。RVA 法以 IHA 分析指标为基础,根据流域是否受到人类活动影响,将 IHA 计算指标分为影响前的天然径流指标和影响后的径流指标。通过设定指标阈值(一般取 75%和 25%),对比分析时间、频率、流量值、变化率等指标,计算得到天然指标的指标变化改变程度。指标改变度的计算公式如下

$$D_i = \left| \frac{Y_{oi} - Y_f}{Y_f} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_{oi} = \{x_i | I_{0.25}^i \leq x_i \leq I_{0.75}^i\} \quad (2)$$

$$Y_f = P \cdot Y_T \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots$; D_i 为第 i 个 IHA 水文指标的改变程度, $D_i \leq 0.33$ 为表示 IHA 指标发生了低度改变, $0.33 < D_i \leq 0.66$ 表示中度改变, $D_i > 0.66$ 表示高度改变; Y_{oi} 为第 i 个 IHA 指标在受影响后仍然落在 RVA 阈值变化范围内的年份数; x_i 为第 i 个 IHA 水文指标; $I_{0.25}^i$ 为第 i 个 IHA 水文指标受影响前阈值为 25%处的平均值; $I_{0.75}^i$ 为第 i 个 IHA 水文指标受影响前阈值为 75%处的平均值; Y_f 为在受影响后 IHA 预期落在 RVA 阈值变化范围的年分数; P 为期望系数取 0.5; Y_T 为影响后的总年数。

2.2 综合 IHA 指标的 R/S 分析法

重标极差 R/S 分析方法由英国水文专家 Hurst^[10]于 1951 年提出, Hurst 通过研究尼罗河水库流量和蓄水量之间的关系,发现水库的长期蓄水能力呈现出有偏的随机游走趋势,并提出了采用 R/S 法计算 Hurst 指数来判别时间序列的发展趋势是遵从随机游走还是有偏的随机游走。金保明^[11]等采用 R/S 法对闽江十里庵站洪峰流量序列特性变化趋势进行了分析和预测;谢智博^[12]等运用 R/S 法分析了北洛河上游汛期径流量的变化趋势和持续性。目前的研究多为采用 R/S 法对流量序列进行直接分析,研究指标较为单一,不能全面的反应径流的趋势性变化。

本文采用综合 IHA 指数的 R/S 法,首先通过 IHA/RVA 法计算各 IHA 指标序列,然后采用 R/S 法对各个 IHA 指标序列的趋势性进行分析和预测,更全面的反应寸滩站枯水期水文变异特性和发展趋势。主要计算过程如下:

- (1) 将各个寸滩枯水期 IHA 指标序列 $\{X_t\}$ 分为等长的 n 个子集,对每个子集有:

$$X_i^t = \sum_{u=1}^i (x_u^i - \bar{x}_i), t = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$R_i = \max(X_i^t) - \min(X_i^t) \quad (5)$$

式中: x_{iu} 为第 i 个子集内第 u 个元素值; \bar{x}_i 为第 i 个子集内流量均值; X_i^t 为第 i 个子集第 u 个元素的累积离差; R_i 为第 i 个子集累积离差的极差。

(2) 计算重标极差均值:

$$(R/S)_n = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \left(\frac{R_i}{S_i} \right) \quad (6)$$

式中: S_i 第 i 个子集的样本标准差; A 为总的子集数; $(R/S)_n$ 为重标极差均值。

(3) 绘制 $\log((R/S)_n)$ 和 $\log(n)$ 的散点图, 通过最小二乘法拟合回归得到拟合斜率即为 Hurst 指数。Hurst 指数体现了时间序列的自相关性, 反映了序列中隐藏的长期趋势。Hurst=0.5 表示序列发展呈现随机游走趋势, 越靠近 0.5 则随机性越强; $0 < \text{Hurst} < 0.5$ 表示序列发展为反持续性的均值回复过程, 即序列发展趋势始终围绕着均值上下波动, 越靠近 0 波动性越强; $0.5 < \text{Hurst} < 1.0$ 表示序列具有长期记忆能力, 序列发展趋势可能持续向前, 越靠近 1 则持续发展趋势越强。

3 结果分析

3.1 IHA-RVA 计算

传统的 IHA 计算方法选取全年流量序列为基础数据, 共有 33 个特征指标。本文研究时段为枯水期(11月1日至4月30日), 所以不考虑非枯水期的平均流量指标。由于序列长度缩短了近 50%, 所以不考虑最大和最小 90d 流量, 以提高指标的代表性。最终调整为有代表性的 24 个 IHA 指标, 指标计算结果见表 2, 指标变异程度计算见图 2。结果发现, 24 个 IHA 指标中, 有 11 个发生了高度改变, 4 个为中度改变, 9 个为低度改变。

3.2 平均流量变化

下面结合研究区域确定的 16 座水库累积库容, 分别对发生了高变改度的指标进行分析。如图 3 对比 1998 年前后寸滩站的 1、2、3 和 11~次年 4 月的平均流量变化。结果发现, 1998 年以后月平均流量分别增加了 25.66%、28.93%、39.22%、21.83%。月平均流量在 1998 年以前呈水平波动趋势, 发展比较平稳。1998 年以后, 随着长江上游梯级水库的陆续开发, 流域累积库容的不断增大, 枯水期流量均值开始呈现波动抬升的趋势。且主要分为两个抬升阶段, 第一阶段是 1998~2013 年, 即以二滩为主的长江上游干支流水库修建蓄水后, 使得各月的平均流量增加了, 45、423、520 和 $241\text{m}^3/\text{s}$; 第二阶段是 2013~2021 年, 即溪洛渡、向家坝、乌东德等金沙江梯级水库群的陆续蓄水, 使平均流量在第一阶段基础上又分别增加了 910、793、1082 和 $756\text{m}^3/\text{s}$ 。

3.3 最小流量变化

如图 4 对比 1998 年前后寸滩站的最小 1、3、7 和 30d 流量变化。结果发现，最小流量平均值分别增加了 23.36%、24.05%、25.13%、28.86%。在 1998 年以前，最小流量呈水平波动趋势。1998 年以后，则呈现波动抬升的趋势。第一阶段流量平均分别增加了 266、283、310 和 378m³/s;第二阶段流量平均分别增加了 539、550、558 和 656m³/s。

3.4 极端流量发生时间变化

如图 5 对比 1998 年前后寸滩站极端流量发生时间。结果发现，1998 年以前极小流量发生时间分布主要集中在 1 月 21 日至 4 月 10 日。1998 年后分布随着累积库容的增大，极小流量发生时间呈现提前的趋势，主要集中在 1 月 1 日至 3 月 20 日之间，平均提前 20d 左右。极大流量发生时间分布在顶端和底部，即枯水期初期(11 月 1~22 日)和末期(4 月 10~30 日)，且主要集中在初期。进一步对枯水期初期的极大流量发生时间进行研究如图 6 所示。发现枯水期初期极大流量发生时间外包络线在 1998 年以后呈现大幅度的向下收敛，发生时间分布集中分布在 11 月 1~8 日，提前了近 14d。

表 2 寸滩站 IHA 指标

指标序号	IHA 指标	1954-1998 年			1999-2021 年		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1	12~4 月平均流量(m ³)	5238	3415	4367	6354	3729	5049
2	11 月平均流量 (m ³)	11035	5227	7612	11377	5872	7482
3	12 月平均流量 (m ³)	5795	3519	4612	6092	3843	4878
4	1 月平均流量 (m ³)	4052	2923	3392	6036	3461	4312
5	2 月平均流量 (m ³)	3560	2539	3014	5331	2796	3896
6	3 月平均流量 (m ³)	4220	2420	3143	6737	2863	4409
7	4 月平均流量 (m ³)	7738	2970	4430	7036	3404	5317
8	最大 1d 流量 (m ³)	19100	6430	11242	23200	7940	11445
9	最大 3d 流量 (m ³)	18200	6347	10672	21300	7677	10851
10	最大 7d 流量 (m ³)	15886	6143	9881	18614	7153	10015
11	最大 30d 流量 (m ³)	11069	5242	7868	11381	6008	7876
12	最小 1d 流量 (m ³)	3190	2290	2682	4294	2450	3297
13	最小 3d 流量 (m ³)	3203	2297	2697	4451	2507	3335
14	最小 7d 流量 (m ³)	3241	2309	2721	4559	2543	3392
15	最小 30d 流量 (m ³)	3358	2379	2829	4817	2653	3627
16	极大流量时间 (d)	178	1	27	175	1	18
17	极小流量时间 (d)	157	92	124	143	65	101
18	高脉冲次数	6	1	3	11	2	4
19	低脉冲次数	46	44	45	46	43	45
20	高脉冲延时 (d)	8	1	4	10	2	6
21	低脉冲延时 (d)	45	40	43	45	41	44
22	流量增加率	460	86	218	301	74	189
23	流量减小率	227	78	138	354	95	178
24	流量逆转次数	82	47	66	106	64	84

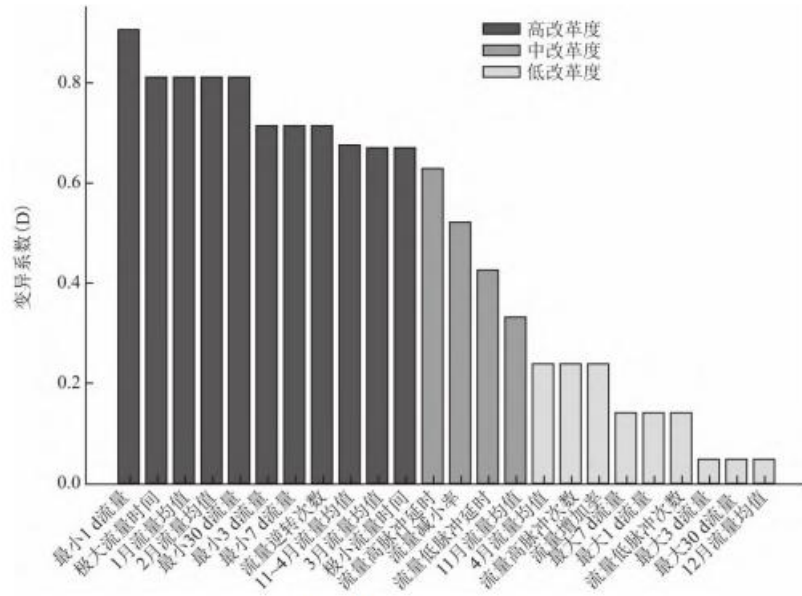


图 2 IHA 指标改变度

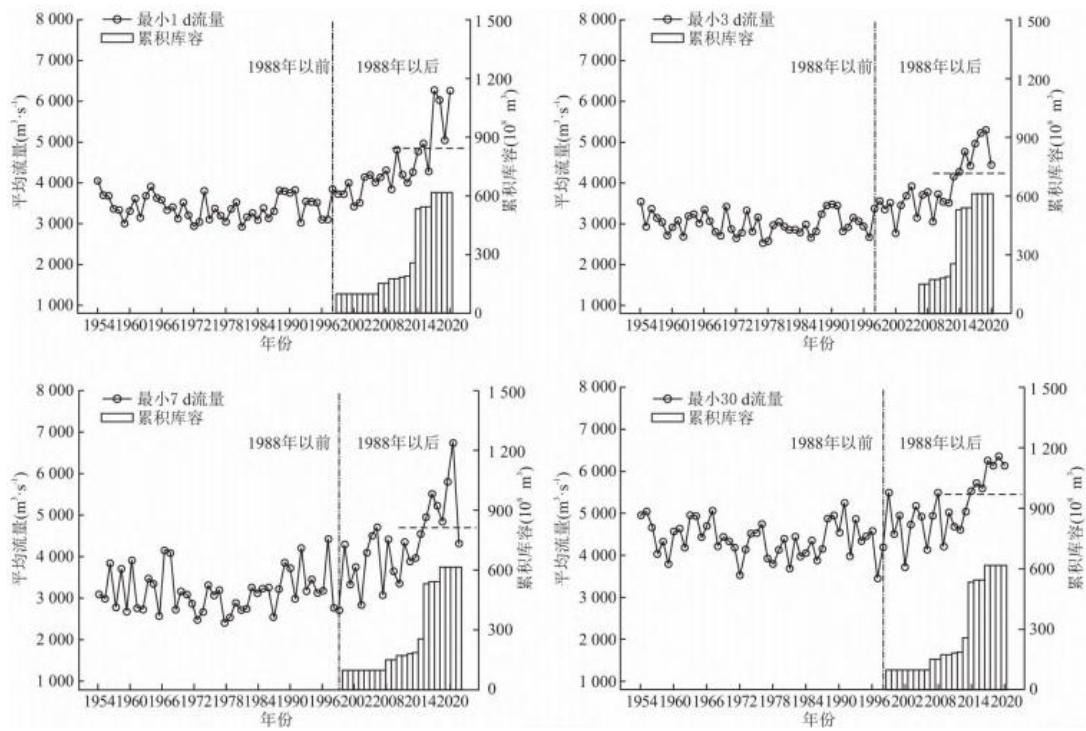


图 3 寸滩站月平均流量变化

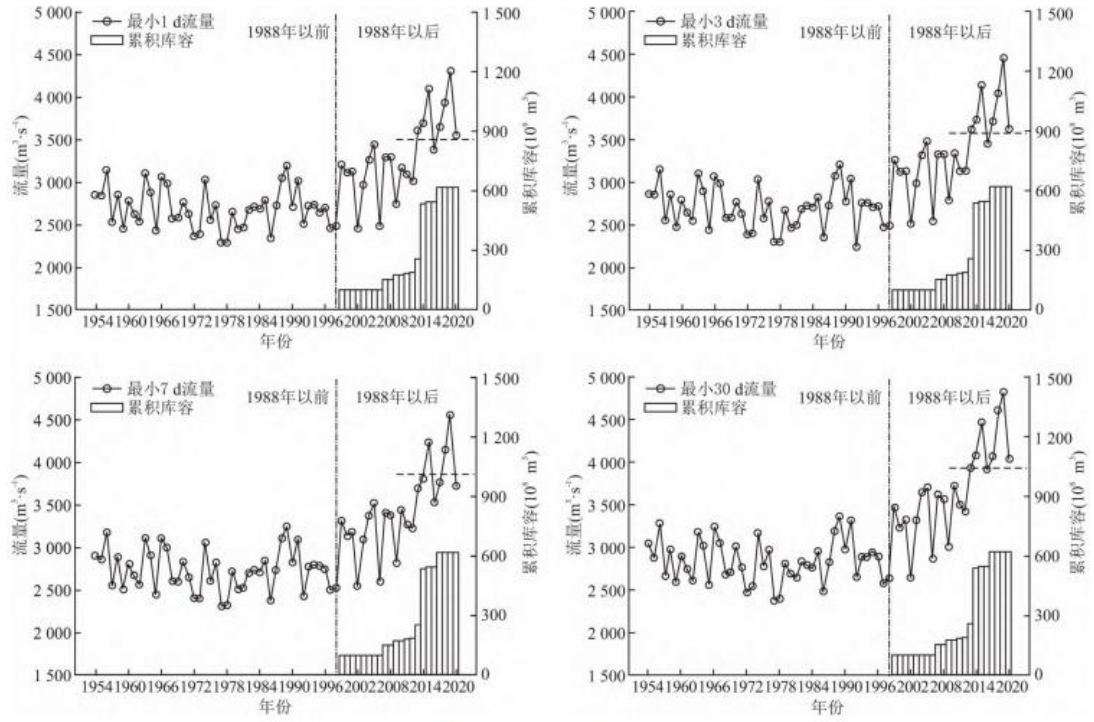


图4 寸滩站最小流量变化

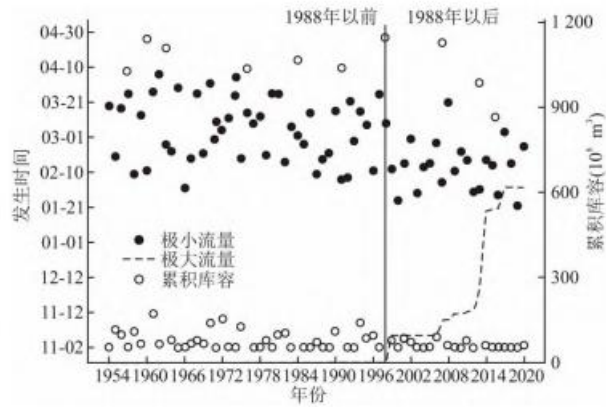


图5 寸滩站流量极值发生时间分布

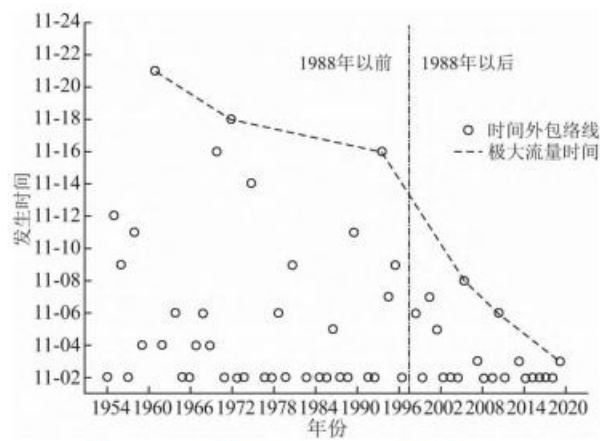


图6 寸滩站初期极大流量发生时间分布

3.5 流量逆转次数变化

流量逆转次数表示在一个统计周期中，流量峰谷的转换次数。如图7对比1998年前后寸滩站的枯期流量逆转次数。结果发现，1998年以前逆转次数呈波动缓慢抬升趋势。1998年以后，逆转次数开始呈现明显上升趋势。特别是在2013~2014年，逆转次数从73次上升到93次，并在随后呈现继续上升发展趋势。

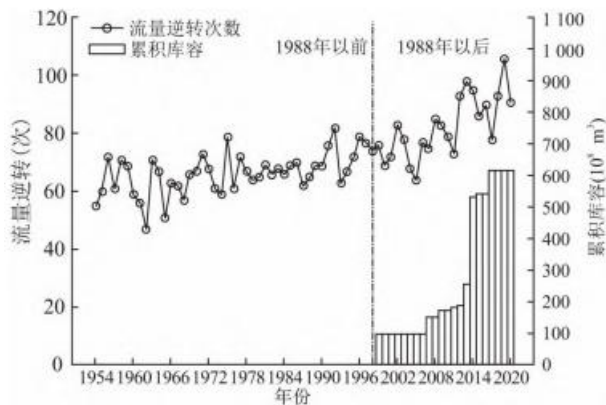


图7 寸滩站流量逆转次数变化趋势

3.6 综合 IHA 指标的 Hurst 指数计算

以1998年为时间节点将流量序列分为2组(1954~1998, 1998~2021年)，通过IHA/RVA法计算2组序列的24个IHA指标，并采用R/S法分别计算每个IHA指标序列的Hurst指数(图8)。

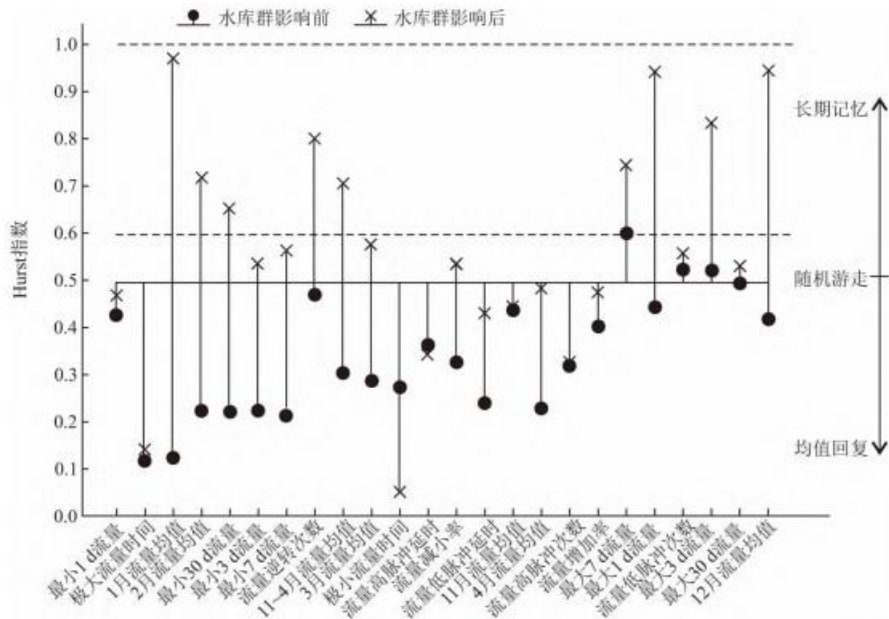


图8 寸滩站不同IHA指标的Hurst指数

结果发现受水库群蓄水影响之前，24个IHA指标的Hurst指数全部小于0.6，表现为无规律的随机游走或者呈现波动的均值回复的发展趋势。1998年后随着水库群的修建有9个指标的Hurst指数大于0.6，表现为长期记忆的有偏游走发展趋势。通过图3、图4和图7可以看出，平均流量、最小流量和流量逆转次数在1998年后均为有偏游走的增加趋势，与Hurst指数计算结果表现一致。预测未来寸滩站枯水期1月流量均值、2月流量均值、最小30d流量、流量逆转次数、最大1d流量、最大3d流量、最大7d流量和最大30d流量变化等9个IHA指标将会继续上升。极大流量时间和极小流量时间的Hurst指数小于0.15，预测在未来将表现为围绕平均值上下波动的均值回复过程。

4 讨论

4.1 寸滩枯水流量增加

水库群通过蓄丰补枯的作用，能有效增大枯水期下游的径流流量。向家坝、紫坪铺、瀑布沟、草街等梯级末控制性水库限制了枯水期最小下泄流量分别为：1200、129、327和327m³/s。寸滩站枯水流量增加的主要原因为上游控制性水库的蓄丰补枯作用，上游梯级水库群总库容越大蓄丰能力和补枯能力就越强。故寸滩站枯水期平均流量和最小30d流量在第一阶段(1998~2013年)分别增加了450和378m³/s，而在2013年以后由于向家坝、溪洛渡、锦屏一级、亭子口等巨型水库群的蓄水，上游梯级水库群总库容急剧增加，蓄丰和补枯能力大大加强，使得第二阶段(2013~2021年)的寸滩站枯水期平均流量和最小30d流量又分别增加了910和656m³/s。段唯鑫等^[6]同样采用了IHA/RVA法对宜昌站的水文情势进行了分析，发现在上游水库群的影响下，发生中度以上改变的因子一般是与最小流量相关的因子。这和本文的研究发现相似，即上游水库群对下游有明显的补枯作用。但不同的是宜昌站的水文变异主要是由于三峡水库的调节作用，上游梯级水库群的作用为次要影响。

枯水期流量的增加势必会对下游的人类活动和水生环境产生一定的影响。李家世等^[13]认为梯级水库在枯水期的运用增大了下游流量，提高了下游航道尺度。许栋等^[14]和黄月群等^[15]认为，枯水期流量的增加促进了水生生物沿程分布的均匀化，扩大了水生生物的栖息面积。未来寸滩站枯水流量将呈稳定增加的发展趋势，将在一定程度上提高重庆河段的枯水期航道尺度，并对改善下游水生态环境有一定积极作用。

4.2 寸滩枯水流量极值发生时间提前

水库群枯水期控制下泄运行在增加下游径流流量的同时,还将改变天然径流流量极值的发生时间的分布规律。寸滩站天然河流枯水期极小流量发生时间集中在1月21日至4月10日,极大流量的发生时间主要集中在11月1~20日。上游梯级水库的控制下泄使得寸滩站枯水期出现极端流量的情况大大减小,极小流量发生时间提前了近20d,极大流量发生时间提前了近14d。

寸滩站枯水流量极值发生时间的变化和上游梯级水库群的汛末蓄水紧密相关。夏少霞等^[16]认为长江上游水库群的汛末蓄水导致了鄱阳湖水位提前消落,使洲滩湿地提前出露。向家坝汛末蓄水时间一般为9月上旬,紫坪铺和瀑布沟为10月1日,草街为9月1日。一方面梯级末控制性水库的汛末蓄水使下游水位提前消落进入枯水期;另一方面由于水库的补枯调节作用,使得下游径流枯水期日均流量过程趋于平稳,出现极端小流量的情况大大减小,从而导致寸滩站流量极值发生时间提前。

段唯鑫等^[4]的研究认为,宜昌站极小流量的发生时间提前是由于三峡水库1~4月的下泄流量控制,而实际上宜昌站极小流量发生时间的提前可能还和三峡水库汛末蓄水有关。此外,本文的研究还表明了上游梯级水库的流量控制将可能导致下游极大流量发生时间的提前。

4.3 寸滩枯水流量逆转次数增加

梯级水库的运行需要考虑不同调度需求,如航运、灌溉、发电、工业用水和生活用水需求等。特别是枯水期,水库运行需要权衡不同的调度需求来改变下泄流量大小。如向家坝水库,在冬季枯水期时作为电网的峰荷部分主要承担调峰任务,出力和下泄流量变幅较大,将在下游产生非恒定流^[17]。寸滩站受上游梯级水库枯水期的日调节非恒定流的影响,流量逆转次数呈增大的趋势。尤其是2013年后,由于向家坝、溪洛渡等梯级水库的建成蓄水,流量逆转次数明显增加。水库下游流量非恒定性的加强将对航运产生一定影响。陈绪坚等^[18]分析了向家坝水文站水文序列的变异系数的变化过程,认为向家坝水电站

的蓄水运用,使得下游河道水位和流量的变异系数增大,水位和流量变化的非恒定性明显加强,对坝下河道的通航条件有一定不利影响的。未来寸滩站枯水期流量逆转次数可能持续增加,下游流量的非恒定性继续加强。虽然枯水流量的增加将提高重庆河段航道通航尺度,但与此同时非恒定流的加强将可能对通航条件产生不利影响。

4.4 IHA 指标的趋势性分析

Hurst 指数的计算结果表明了所有 IHA 指标在梯级水库开发前具有相同的趋势性(Hurst 指数均小于0.6),即表现为无规律的随机游走或是围绕着均值上下波动。这说明天然情况下的气候变化并没有引起寸滩站流量发生显著的趋势性变化。刘波等^[19]分析了长江上游重庆段1961~1990年历史径流变化,发现气候变化对径流量的影响有限;秦年秀等^[20]的研究发现20世纪90年代长江流域径流变化趋势不显著。上述的研究成果验证了采用Hurst指数表征径流发展趋势的有效性。Hurst指数的计算结果还显示了未来寸滩站枯水期平均流量、最小流量和最大流量将持续稳定的增加。结合上游梯级水库的累计库容增长过程可以发现,累计库容的增加是下游流量增加的重要原因。累计库容越大,枯水期梯级水库群对下游补偿和调节能力就越强,枯水流量就越大。未来随着长江上游双江口和两河口两座巨型水库的建成蓄水,上游梯级库容将进一步扩大,预测枯水流量将进一步增加。通过Hurst指数还预测了极小和极大流量发生时间将呈稳定的均值回复趋势,发生时间持续性提前或者推迟的可能性较小,这可以归因于上游梯级水库群汛末蓄水时间的稳定。

5 结论

本文采用 IHA-RVA 法和 R/S 法分析了长江上游梯级水库群建成蓄水前后,寸滩站枯水期的径流指标的变异特性,并预测了指标的未来发展趋势。主要结论如下。

(1) 1998 年后,寸滩站枯水期 IHA 指标有 11 个发生了高度改变,4 个为中度改变,9 个为低度改;受梯级水库的蓄丰补枯和调蓄影响,枯水流量不断增加、极端流量发生时间提前、流量逆转次数不断上升。

(2) 未来随着上游梯级水库的继续修建蓄水,寸滩站枯水流量和流量逆转次数将持续增加,流量的非恒定性可能加强。一方面枯水流量的持续增加将提升下游航道的通航尺度,改善下游的水生态条件;另一方面流量非恒定性的增强可能对下游河道的通航条件产生不利的影响。

参考文献:

[1] DUAN W, GUO S, WANG J, et al. Impact of cascaded reservoirs group on flow regime in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Water*, 2016, 8(6) : 218.

[2] 金勇,周建军,黄国鲜.长江上游大型水库运行对长江上游水文过程的影响[J].*水力发电学报*, 2010, 29(2):94-101.

[3] 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.

[4] RICHTER B Det al. How much water does a river need [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1) : 231-249.

[5] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUND P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration with in a river network [J]. *River Research & Applications*, 1998, 14(4) : 329-340.

[6] 段唯鑫,郭生练,王俊.长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J].*长江流域资源与环境*, 2016, 25(1):120-130.

[7] 郭文献,李越,王鸿翔,等.基于 IHA-RVA 法三峡水库下游河流生态水文情势评价[J].*长江流域资源与环境*, 2018, 27(9):2014-2021.

[8] 陈昌春,王腊春,张余庆,等.基于 IHA_RVA 法的修水流域上游大型水库影响下的枯水变异研究[J].*水利水电技术*, 2014, 45(8):18-22, 26.

[9] 曹艳敏,毛德华,邓美容,等.日调节电站库区生态水文情势评价——以湘江干流衡阳站为例[J].*长江流域资源与环境*, 2019, 28(7):1602-1611.

[10] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版,2002.

[11] 金保明, 高兰兰, 颜望栋. 基于 Kendall 与 R/S 法的年最大洪峰流量变化特性分析 [J]. 水力发电, 2016, 42(11):20—23.

[12] 谢智博, 穆兴民, 高鹏, 等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征研究 [J]. 水土保持研究, 2020, 29(27):1—6.

[13] 李家世, 刘晓帆. 梯级水库建设对岷江下游航道通航流量的影响 [J]. 水运工程, 2021, (6):164—170, 193.

[14] 许栋, 张博曦, 及春宁, 等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响 [J]. 水资源保护, 2019, 35(2):60—66, 84.

[15] 黄月群, 蔡德所, 杨培思, 等. 漓江枯水期流量变化对鱼类栖息地的影响模拟 [J]. 生态科学, 2018, 37(2):147—152.

[16] 夏少霞, 于秀波, 刘宇, 等. 鄱阳湖湿地现状问题与未来趋势 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7):1103—1111.

[17] 王永强, 母德伟, 李学明, 等. 兼顾下游航运要求的向家坝水电站枯水期日发电优化运行方式 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(2):170—175, 183.

[18] 陈绪坚. 金沙江梯级水库下游水沙过程非恒定变化及其对通航条件的影响 [J]. 水利学报, 2019, 50(2):218—224.

[19] 刘波, 陈刘强, 周森, 等. 长江上游重庆段径流变化归因分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6):1333—1341.

[20] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2005(5):589—594