

径流序列突变检验与环境流量组成

——以淮河干流王家坝为例

管新建¹, 张一鸣¹, 孟钰¹, 刘欣²

(郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 中科华水工程管理有限公司, 郑州 450000)

摘要:环境流量作为维持河流生态系统健康运行的一种重要因素,在水资源管理与优化配置中起到越来越重要的作用。为分析淮河干流王家坝径流序列变异情况,并进行环境流量组分分析,进而为水资源优化配置提供参考,采用 Mann-Kendall 法与 Pettitt 法对流量序列进行了突变检验;并应用水文分析技术(IHA)与变化范围法(RVA)进行了环境流量成分与水文生态特征分析;以淮河流域干流王家坝站为实例进行了应用研究。结果表明:径流序列在 1984 年发生突变,突变后流量年平均值有所增加,低流量和高脉冲环境流量成分占比较大,各水文指标均表现为低或中度改变。综上,突变后王家坝生态特征在向好的方向发展,但仍然需要结合生态调度与合理水资源优化配置,进一步改善与维护河流生态系统健康。

关键词:环境流量;突变检验;IHA;RVA;王家坝

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0353-07

Runoff Series Mutation Test and Environmental

Flow Composition Analysis

—A Case Study of the Wangjiaba of Main Stream of the Huai River

GUAN Xinjian¹, ZHANG Yiming¹, MENG Yu¹, LIU Xin²

(1.School of Water Conservancy Science & Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Zhongke Huashui Construction Management Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China)

Abstract:As an important factor in maintaining the healthy operation of river ecosystems, environmental flow plays an increasingly important role in water management and optimal allocation. In order to analyze the variation of the runoff series of the Wangjiaba in the Huaihe River, and analyze the composition of the environmental flow, and provide reference for the optimal allocation of water resources, Wangjiaba station of the Huai River Basin main stream was taken as an example, the Mann-Kendall method and the Pettitt method were used to detect the mutation of the flow sequence. The hydrological analysis technique (IHA) and range of variability approach (RVA) were used to analyze the environmental flow composition and hydrological ecological characteristics. The results showed that the runoff sequence of Wangjiaba station was mutated in 1984; the annual average of the flow rate after the mutation had increased, and the low flow rate and high pulse environment flow components accounted for a large proportion. The hydrological indicators were all low or moderate changes. In summary, the ecological characteristics of Wangjiaba after the mutation are developing towards a good direction, but it is still necessary to combine ecological scheduling and rational water resources optimization in order to further improve and maintain the health of the river ecosystem.

Keywords:environmental flow; mutation test; IHA; RVA; Wangjiaba

自 20 世纪 50 年代以来,淮河流域内就兴建了大量的水利工程,水资源供给体系不断完善,但对水资源进行分配时,却往往忽视生态用水,致使河流生态环境不断恶化,生活用水和生态用水之间的矛盾日益尖锐。因此,科学计算分析维持河流生态系统正常运转所需的河道流量,对水资源进行合理配置,实现人水和谐的可持续发展,具有现实的意义和紧迫感。各国学者对环境流量进行了大量的研究,提出了一些相对成熟的方法^[1]。Tennant 给出了水生生物的生态流量区间^[2],首次将水文学方法应用于生态流量问题。Richter 首先提出了反映流域径流量与生态环境的联系^[3],即水文变化指标法(IHA)。随后 Richter 对 IHA 进行改进,提出了变化范围法(RVA)^[4]。此外,模糊评价法^[5]、生态栖息地矩阵法^[6]的提出对河流量管理具有一定的促进作用。

本文将 IHA 法应用于淮河干流王家坝断面突变前后两个水文序列^[7],对比分析突变前后环境流量成分及其生态影响,充分考虑环境流量所呈现出的年内不同尺度的变化特征以及不同水文年的年际变化特征,并结合 RVA 法进行河流水文改变度以及水文生态特征分析,充分发挥河流环境流量在生态文明建设的重要作用,为淮河干流水资源配置及河流健康提供参考。

1 研究方法

人类活动会在一定程度上改变径流原始状态,在对长序列流量资料进行研究时,首先要找出显著性变化点。文中选择 Mann-Kendall 法进行突变检验^[8],指出突变发生时间^[9];并以 Pettitt 法进行验证,明确突变点,将径流序列划分为突变前和突变后两个序列。在此基础上,利用 IHA 水文分析技术对突变前后典型年过程进行环境流量组分分析,对比突变前后环境流量指标计算结果;基于 IHA 指标,利用 RVA 法确定各个指标的水文改变度,评价河流水文变化情况。

1.1 突变检验方法

1.1.1 Mann-Kendall 法 Mann-Kendall 法(以下简称 M-K 法)是一种非参数检验方法,可以描述序列的变化趋势、明确突变时间,首先以对时间 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 构造序列:

$$U_k = \sum_{i=1}^n S_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \tag{1}$$

若 $X_i > X_j$, 则 S_i 取 1;反之, S_i 值取 0 ($j = 1, 2, \dots, i$)

定义统计量:

$$UF_i = \frac{U_k - E(U_k)}{\sqrt{\text{var}(U_k)}} \tag{2}$$

式中: $E(U_k) = \frac{k(k-1)}{4}$, $\text{var}(U_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$

按时间序列 X 顺序计算统计量序列,得 UF_k ;按时间序列 X 逆序重复上述过程,得统计序列 UB_k 。如果 UF 和 UB 两条曲线出现交点^[10],交点对应时刻便是突变开始的时间。

1.1.2 Pettitt 法 Pettitt 方法与 M-K 法类似,同为非参数检验方法。Pettitt 法是直接利用秩序列来检测突变点的,若 t 时刻满足式 3 条件,则 t 点处为突变点。

$$K_i = \max |C_k| \quad (k = 2, 3, \dots, n) \tag{3}$$

式中: C_k 是第 i 时刻数值大于或小于 j 时刻数值个数的累计数, ($j = 1, 2 \dots, i$)。

1.2 水文变化指标法

1.2.1 IHA 指标参数 环境流量组成(Environment Flow Components, EFC)是一套水文学流量参数,代表流量状况的全系列,以维持河流生态完整的可持续性。发生频率、发生时间、持续时间等对环境流量结果仍有参考价值,具体指标见表 1。

表 1 IHA 指标参数

IHA 指标	参数
月均水量	各月流量的均值或中值
年均极值	年均 1,3,7,30,90 d 最小流量 年均 1,3,7,30,90 d 最大流量 基流, 0 流量天数
年极值出现时间	年最大流量出现时间 年最小流量出现时间 年低流量谷底数
高低流量频率与历时	年低流量平均持续时间 年高流量洪峰数 年高流量平均持续时间
流量变化率与频率	流量变化率 流量平均减少率 每年流量频率逆转次数

1.2.2 环境流量组成的界定 EFC 根据不同的目标阈值可以分为低流量、极端低流、高脉冲流量、小洪水和大洪水 5 种流量形式,对于河流生态具有重要意义,环境流量组成的运算流程见图 1。

1.3 水文变化范围法

RVA 法是在 IHA 方法的基础上对河流变化情况进行评估的方法,它基于为每个 IHA 参数确定自然流

量四分位数范围的目标,水文改变度的定义如下:

$$D_m = \frac{N_{o,j} - N_e}{N_e} \times 100\%$$

(4)

式中: D_m 是第 m 个指标的改变度; $N_{o,j}$ 为 IHA 值落在目标内的年数; $N_e = pN_T$ 是 IHA 落入目标的预期年数; N_T 是观察年数的总数,在目标范围内, p 取 50%。

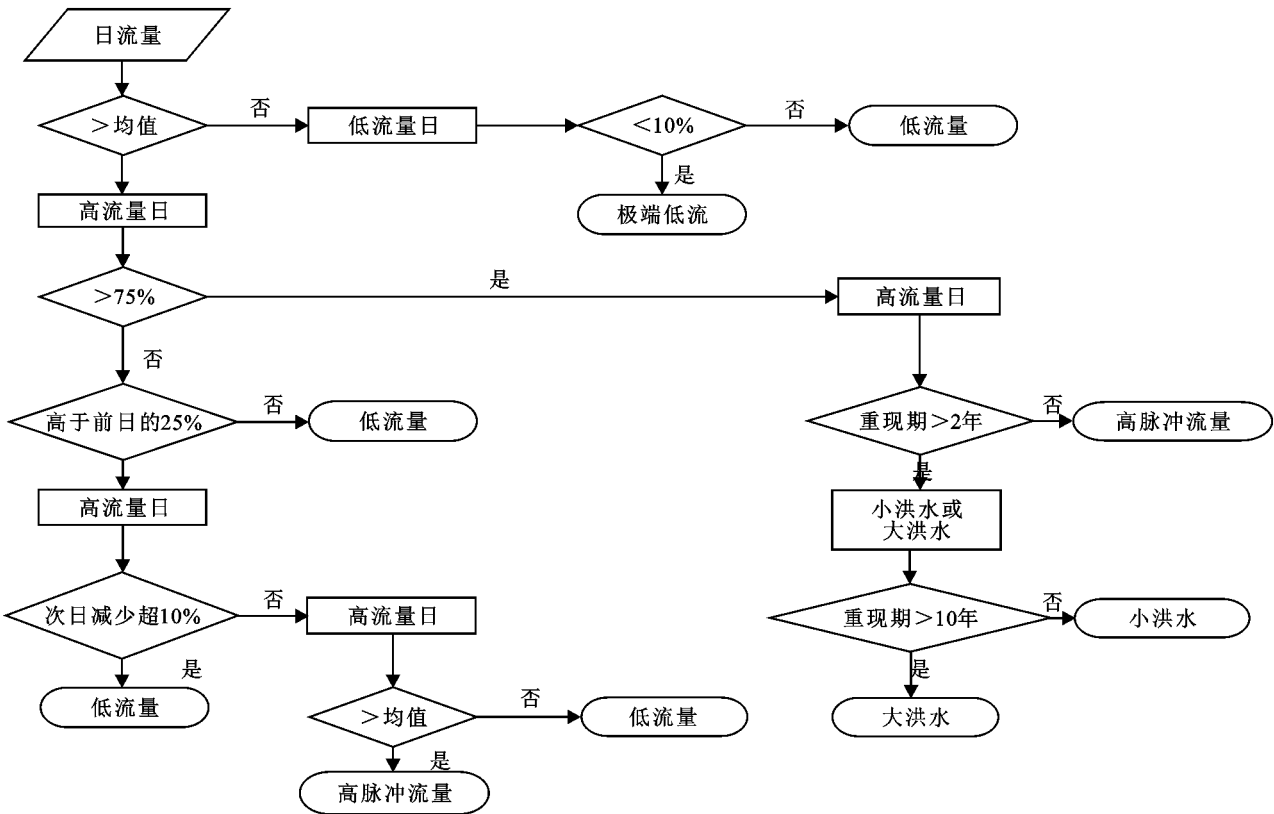


图 1 环境流量组成的运算流程

2 实例分析

2.1 研究区概况

淮河流域地处中国东部,多年平均径流量为 621 亿 m^3 。王家坝站控制流域面积 3.06 万 km^2 ,河段上起洪河口,下至南照集,长 68 km,断面多年平均流量 2 482 m^3/s ,径流年内年际分布不均匀,汛期集中在 6—9 月。王家坝控制断面位于淮河干流上中游分界点,降雨充沛,径流量高于淮河干流平均水平,生物多样性较为丰富,但随着气候变化和人类活动的影响,王家坝河段径流状态在一定程度上发生了改变,生态系统的稳定性也面临着各种各样的挑战。文中选择淮河干流王家坝断面 1956—2010 年的实测径流系列作为研究基础,包括足够的丰、平、枯流量资料,具有较好的可靠性、一致性和代表性(图 2)。

2.2 突变检验

王家坝站 1956—2010 年尺度径流变化情况见图 2,王家坝断面径流年际变化不均匀,丰枯年份差异明显,其中 1956 年径流最大,为 7 093 m^3/s ,1966 年径流最小,为 634 m^3/s 。

利用 M-K 法对王家坝站 1956—2010 年的日流

量序列进行检验,结果见图 4。王家坝站长系列流量资料未出现明显变化趋势,且 UF 与 UB 线在多处相交。因此采用 Pettitt 法进一步确定径流序列的突变点^[11],在 M-K 法计算出 U_k 的基础上,找出序列 C_k 的最值,其对应年份即为突变年份。结果表明:王家坝断面年径流量在 1984 年前后出现明显差异,与 M-K 法的计算结果一致。因此,最终确定王家坝站径流系列突变点为 1984 年。

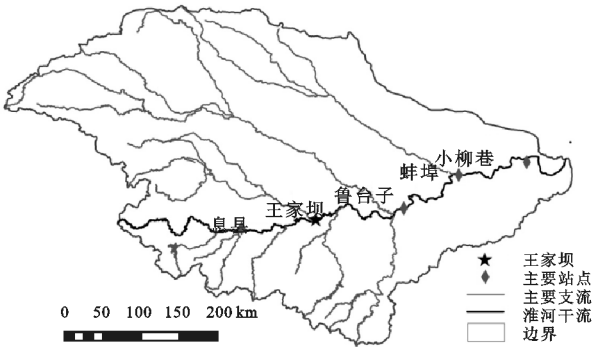


图 2 研究区简图

气候变化和人类活动是改变径流状态的两个主要因素,淮河干流王家坝站径流序列在 1984 年发生突变。根据调查,20 世纪 80 年代正值改革开放初期,淮河流域

内工农业得到空前发展,基础设施也不断完善,淮河流域也加大了水土保持工作力度,使得研究区内的下垫面情况发生变化,在一定程度上改变了径流状态。

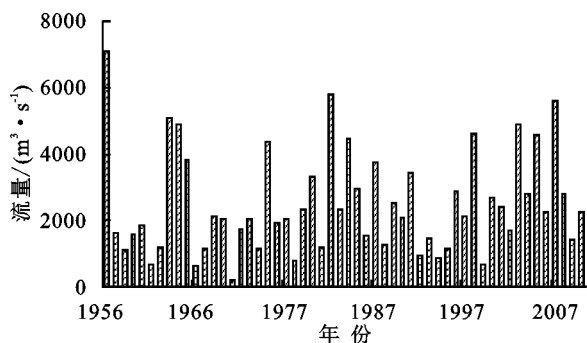


图3 王家坝站年径流量分布

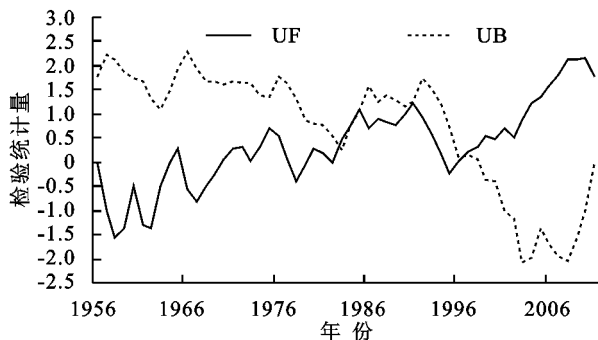


图4 王家坝站 M-K 检验

2.3 环境流量计算与分析

2.3.1 环境流量指标 根据2.2计算结果将王家坝时间序列划分为两个子序列。通过频率曲线筛选出两个阶段的典型年,即丰水年($p=25\%$)、平水年($p=50\%$)、枯水年($p=75\%$),突变前典型年分别为1968年、1976年、1958年,突变后典型年为1991年、1997年、1992年,典型年环境流量划分情况如图5所示。通过IHA水文分析技术对突变前后环境流量指标进行分析,结果见表2。

由表2和图5可知:整体来看突变后流量值更大,其中6月流量值涨幅最为显著,达到106.7%;大、小洪水的平均历时均有增加^[12],且突变后各流量事件量值较为集中。突变后流量事件以高脉冲流量、低流量为主,丰水年(1991年)的低流量和高脉冲流量事件集中在1—5月和9—12月,占据全年流量过程的75%;平水年(1997年)的流量过程均为低流量和高脉冲流量事件,其中高脉冲流量集中在6—7月,流量过程峰高量大,远远高于相邻时期的低流量事件量值,且持续时间较长;枯水年(1992年)除1月出现极端流量事件外,其余均为低流量和高脉冲流量事件。

径流状态的改变势必会引起环境流量组分及水

文指标的改变,包括鱼类在内的水生生物对流量的改变表现得极为敏感,特别是处于繁殖期的水生生物。在径流突变较大的河段,生态系统功能越健全,生物的适应性也越强,当某一水文指标改变时,河流生态系统的正常运行和生物的生存与发展将受到影响。通过对水资源的合理分配,保证正常的河道外“三生”用水需求的同时,尽可能协调河道内生态需水和人类用水之间的矛盾,才能维持流域生态系统健康运转。

对比突变前后各环境流量组分^[13],突变后流量有增加的趋势,尤其是在汛期,年内分布相对均匀,维持生态系统正常运行就有更充足的水量,但通过生态调度平衡汛期与非汛期的流量差异,合理分配有限的水资源仍然重要。其中各环境流量指标中值反映河道流量的一般状态,离散系数反映与均值的偏离程度,突变前后34个指标离散系数较突变前显著下降,各流量事件中值与均值偏离程度较小。这种流量事件集中化的趋势在径流年内年际变化上,则表现为年内年际分配相对均匀,将在一定程度上减少水文灾害的产生,从而有利于水生生物的健康发展。

极端低流事件是对生态系统造成破坏的主要原因,虽然突变后王家坝站流量模式以低流量和高脉冲流量为主,但极端流量事件仍占有一定比重。采用汛期水库蓄水、加大流域内植被保护力度、减少地下水开采量等措施能在一定程度上增加枯水季节流量值,避免极端流量事件的发生,从而减少对生态系统的破坏。高流量事件是生态系统正常运行及生物繁殖的主要信号和媒介,突变后高脉冲流量和大、小洪水的出现时间更早,其中高脉冲流量出现时间提前到4月,更适合鱼类的产卵繁殖;且高流量事件持续时间更长,能在一定程度上改变鱼类在内的多种水生生物的栖息地环境,促进鱼类产卵,为鱼类和其他生物的生存和健康发展提供有利条件。

2.3.2 水文生态特征分析 根据王家坝站水文变化情况计算结果,33个水文变化指标均未有高度改变;发生中度改变的有2月、3月、6月、7月、10月平均流量、最大7日流量、最小流量出现时间、高流量洪峰、等8个指标,其余25个指标均为低度改变。

对于月均水量,除4月、7月、10月月均水量外,其余各月流量均有不同程度增加,其中,3月流量增加幅度最大,表明各月流量呈现增加趋势;各月水文改变度均为低或中度改变,6月水文改变度最大。对于年均极值,最大7日流量为中度改变,其余指标均为低度改变(图6)。

年极值出现时间稍有推迟,但仍在 RVA 阈值范围内,对于生物生存及生态系统正常运行的影响可以忽略不计。对于频率与历时,高流量平均持续时间为中度改变,突变后该指标大多落入 RVA 阈值范围

内。变化率这组参数总体上变化不太明显,流量平均增加率为中度改变,与流量平均减少率一样,突变前后均减少 35%;自 1990 年之后,该指标就很少落入 RVA 阈值范围内^[14](图 7)。

表 2 王家坝站环境流量指标

流量事件	环境流量 指标	中值		离散系数		偏差系数	
		突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后
各月低流量	1 月	49.4	68.4	0.57	0.72	0.38	0.25
	2 月	52.7	61	0.92	0.96	0.16	0.05
	3 月	56.6	84.5	1.04	0.92	0.49	0.11
	4 月	78.9	64.15	0.86	1.1	0.19	0.27
	5 月	73	95.3	1.2	0.71	0.31	0.4
	6 月	46.35	95.83	1.56	0.74	1.07	0.53
	7 月	98.9	129.5	0.72	0.61	0.31	0.15
	8 月	112.3	134	0.57	0.88	0.19	0.55
	9 月	105	137	0.62	0.72	0.3	0.18
	10 月	86	85.3	0.73	0.73	0.01	0
	11 月	78.15	75.15	0.61	0.9	0.04	0.47
	12 月	63.3	73	0.39	0.94	0.15	1.42
极端低流	极小值/(m ³ ·s ⁻¹)	4.75	3.45	1.88	2.13	0.27	0.13
	平均历时/d	11.25	10.5	9.18	1.02	0.07	0.89
	极小值出现时间/d	277.5	183.5	0.42	0.23	0.51	0.47
	极小值出现次数/次	0.5	0	4	0	1	1
	极大值/(m ³ ·s ⁻¹)	529.3	417	0.79	0.5	0.21	0.37
高脉冲流量	平均历时/d	7	6.25	0.89	0.4	0.11	0.55
	极大值出现时间/d	188	136.3	0.36	0.17	0.28	0.52
	极大值出现次数/次	5.5	6	0.55	1	0.09	0.83
	上升率/%	113.4	108.4	0.59	0.76	0.04	0.28
	下降率/%	−58.08	−51.3	−0.61	−0.55	0.12	0.1
小洪水	极大值/(m ³ ·s ⁻¹)	4360	4345	0.48	0.39	0	0.18
	平均历时/d	49.75	61.5	1.07	0.76	0.24	0.28
	极大值出现时间/d	200.5	198	0.13	0.04	0.01	0.72
	极大值出现次数/次	0	0	0	0	—	—
	上升率/%	470	511.5	0.62	1.1	0.09	0.77
	下降率/%	−152	−114.2	−0.99	−1.09	0.25	0.1
	极大值/(m ³ ·s ⁻¹)	11840	7700	0.7	—	0.35	—
大洪水	平均历时/d	21	89	0.38	—	3.24	—
	极大值出现时间/d	202.5	193	0.02	—	0.05	—
	极大值出现次数/次	0	0	0	0	—	—
	上升率/%	2516	418	0.51	—	0.83	—
	下降率/%	−643	−104.2	−0.34	—	0.84	—

王家坝站位于淮河干流中上游,上游大型水利工程少,更接近于未开发利用时的生境系统,更有利于

于生态系统的良性循环。而且王家坝以上干支流经过的地方大多为山区,经济发展水平不高,人类活

动对王家坝以上河流影响较小,河流水文情势变化不明显。

20 世纪八十年代,人们一味重视社会经济的发展,而不注重河流管理与保护,忽视了对生态系统的保护,使得部分水文变化指标在径流序列在突变后未落入 RVA 阈值范围内,这将在一定程度上影响水生物种对于水水分的获取,进而影响其生长。但是从水

文变化指标整体改变情况来看,各指标基本落入 RVA 阈值范围内,这也就意味着其水文生态特征整体未发生明显变化,这与人们对于生态系统的保护是密不可分的。随着经济结构的不断完善,生态系统破坏对经济发展以及人类生存环境的影响日益显著,人们越来越意识到河流保护的重要性,生态流量和生态调度也受到了重视。

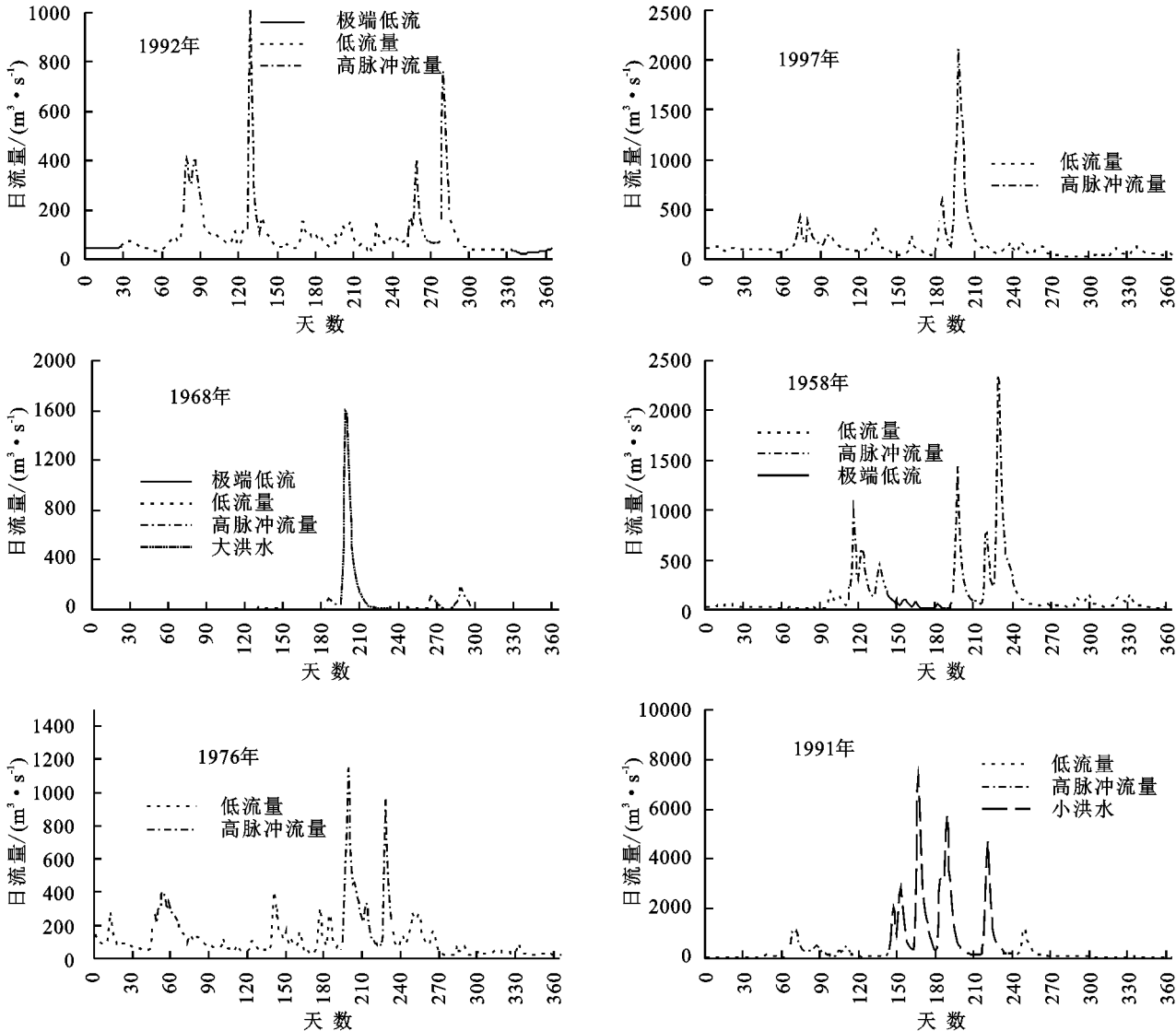


图 5 突变前后典型年环境流量成分

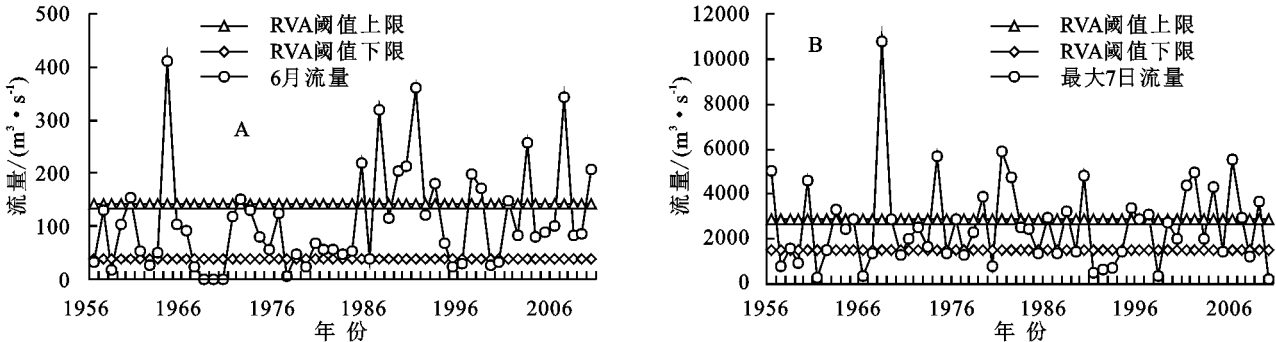


图 6 6 月平均流量(A)及最大 7 日流量(B)过程线

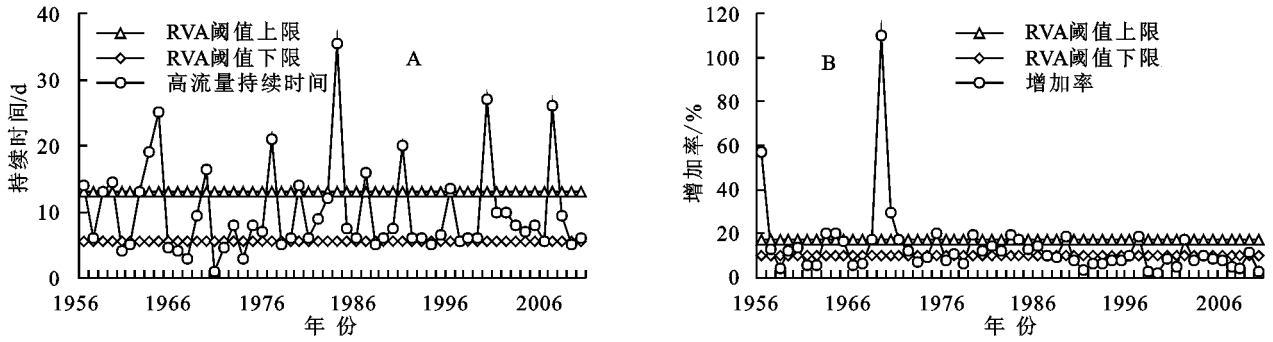


图 7 高流量持续时间 (A) 及流量平均增加率 (B) 变化

3 结论

(1) 通过对王家坝站径流资料分析表明,径流的年际分布不均匀,丰枯年份差异显著;采用 M-K 法和 Pettitt 法进行突变检验,结果表明王家坝站径流序列在 1984 年发生突变。

(2) 突变后流量有增加趋势,高流量平均历时和持续时间有所增加,且流量模式趋于单一化,以高脉冲流量和低流量为主,流量模式更为集中。33 个水文变化指标均未出现高度改变,各月流量呈现增加的趋势,以 3 月流量表现最为显著。

(3) 突变后王家坝环境流量组分发生了不同程度的变化,总体来看,这些水文现象的变化有利于水生生物的生存,但是通过生态调度调节汛期和非汛期之间的流量差异,减少极端事件的发生显得尤为重要。就水文生态特征而言,王家坝水文情势更接近于未开发时的状态,但随着社会经济发展,突变后水文生态特征经历了从生态破坏到逐渐恢复的转变。

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] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976,1(4):6-10.

[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 D, Baumgartner J V, Wigington R, et al.

How much water does a river need[J]. Freshwater Biology, 1997,37(1):231-249.

[5] 李文君,邱林,陈晓楠,等.基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J].水利学报,2011,42(7):775-782.

[6] Suen J P, Herricks E E. Developing fish community based ecohydrological indicators for water resources management in Taiwan[J]. Hydrobiologia, 2009,625(1):223-234.

[7] 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.

[8] 潘彬,韩美,倪娟.黄河下游近 50 年径流量变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2017,24(1):122-127.

[9] 潘扎荣,阮晓红,朱愿福,等.近 50 年来淮河干流径流演变规律分析[J].水土保持学报,2013,27(1):51-59.

[10] 张敬平,黄强,赵雪花.漳泽水库径流时间序列变化特征与突变分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(1):131-135.

[11] 唐为安,田红,卢燕宇,等.1961—2010 降水和土地利用变化对淮河干流上中游径流的影响[J].生态环境学报,2015,24(10):1647-1653.

[12] 王学雷,姜刘志.三峡工程蓄水前后长江中下游环境流特征变化研究[J].华中师范大学学报:自然科学版,2015,49(5):797-804.

[13] 孟钰,张翔,夏军,等.水文变异下淮河长吻鮠生境变化与适宜流量组合推荐[J].水利学报,2016,47(5):626-634.

[14] 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.