

## 建库和气候变化对襄阳站径流的影响评估

杨娜, 赵亦童, 黄伊涵, 韩翠, 劳晓璨 (南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 江苏南京 210044)

**摘要** 根据襄阳站日径流资料(1940—2012年),分别采用 Mann-Kendall 检验方法和 RVA 方法分析该站点的径流变化特征,认为襄阳站的年径流量呈现出一定程度的减少趋势,以夏、秋两季的减少最为明显,通过对月水文情势的变化评估认为径流年内分布的变化主要来自于丹江口水库的调丰补枯作用。进一步根据襄阳站以上流域的气象观测数据定性分析降水和气温的变化趋势,发现建坝后径流的演变与气候变化关系密切。在此基础上建立了径流与降水及气温的线性回归模型,通过对径流的模拟进一步验证了径流演变与当地气候变化密切相关,但由于人类活动影响的加剧,其相关性在 1985 年后有所减弱。

**关键词** 径流;气候变化;建库;影响评估;襄阳站

中图分类号 P 333 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)11-0064-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.11.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Impact Assessment of Reservoir Construction and Climate Change on Runoff in Xiangyang Station

YANG Na, ZHAO Yi-tong, HUANG Yi-han et al (School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

**Abstract** According to the daily runoff data of Xiangyang Station (1940–2012), Mann-Kendall test method and RVA method were used to analyze the runoff variation characteristics of the site. It was believed that the annual runoff of Xiangyang Station showed a certain degree of decreasing trend with the most obvious reduction in summer and autumn. Through the assessment of the change of monthly hydrological situation, it was believed that the variation of runoff distribution during the year mainly came from the adjustment and replenishment effect of Danjiangkou Reservoir. According to the meteorological observation data of the basin above the Xiangyang Station, the trend of rainfall and temperature was qualitatively analyzed. It was found that the evolution of runoff after dam construction was closely related to climate change. Based on this, a linear regression model of runoff, rainfall and temperature was established. It was further verified by the simulation of runoff that runoff evolution is closely related to local climate change, but its correlation had weakened after 1985 due to the intensification of human activities.

**Key words** Runoff; Climate change; Reservoir construction; Impact assessment; Xiangyang Station

河流系统是地球的大动脉,是生物循环的重要通道,具有调节气候、改善生态环境以及维护生物多样性等功能<sup>[1]</sup>。研究表明,天然河道的水文过程与流量过程、水位高低以及年际变化特征等均会对河流生态产生重要影响<sup>[2-3]</sup>。襄阳站地处汉江中下游,是汉江下游的四大产卵场之一,受气候变化和人类活动的加剧影响,汉江襄阳段水环境问题日益突出<sup>[4]</sup>。尤其是丹江口水库的运行调度,在一定程度上改变了襄阳站的水流情势,使该河段常规鱼类的生存环境受到不同程度的破坏:汉江水量减少,水位降低,水资源利用成本增加;环境容量减少,水体稀释自净能力降低,控制污染的难度增加;汉江襄阳段水环境质量大为下降,鱼类的生存环境受到不同程度的破坏,某些江段中的原“四大家鱼”产卵场可能消失,对襄阳市渔业资源造成巨大影响<sup>[5-6]</sup>。研究襄阳站径流演变特征,探讨影响其发生演变的原因,对于汉江下游河流生态环境的保护具有现实意义。

## 1 资料与方法

**1.1 数据选取** 研究采用襄阳站 1940—2012 年的日径流资料,其中 1960—1973 年的径流资料由于上游丹江口水库的修建而缺测。气象数据为襄阳站 1960—2012 年逐日气温、降水资料,气象数据来自于中国气象科学数据共享网。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 RVA 方法。变动范围分析 (range of variation ap-**

proach, RVA) 法是由 Richter 等<sup>[7]</sup>于 1998 年提出,该方法将建坝前的河流视为天然的河流状态,并基于河流建坝前的历史流量资料估算出符合河流生态要求的流量变化范围,在此基础上量化建坝后河流水文情势的变化程度。水文情势的变化程度采用水文改变度指标来进行量化评估,其公式如下:

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

式中,  $D_i$  为第  $i$  个水文指标的水文改变度;  $N_{oi}$  为第  $i$  个水文指标受干扰后的观测年数中落在 RVA 目标内的年数;  $N_e$  为受干扰后水文指标预期落入 RVA 目标内的年数。规定:  $D_i$  值为 0~33%, 属于未改变或者低度改变; >33%~67%, 属于中度改变; >67%~100%, 属于高度改变。

**1.2.2 多元线性回归模型。**为了检验建坝后襄阳站径流变化对气候变化的响应,基于多元回归方法分段建立襄阳站径流对气候变化的响应模型,模型参考傅国斌等<sup>[8]</sup>、刘春蓁等<sup>[9]</sup>的做法,建立径流深对降雨和气温的线性模型:

$$\ln R = m \ln P + nT + c \quad (2)$$

式中,  $R$ 、 $P$ 、 $T$  分别为年平均径流深 (mm)、年平均降水量 (mm) 和年平均气温 (°C);  $m$ 、 $n$ 、 $c$  为回归系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 建坝后襄阳站径流变化特征

**2.1.1 径流变化特征。**基于襄阳站 1940—2012 年的径流资料,对襄阳站多年平均径流量的在建坝前后的变化趋势进行分析,从图 1 可以看出,襄阳站的年平均径流量在丹江口水库修建 (1974 年) 前后呈现一定程度的减少趋势,建坝前后

**基金项目** 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目 (201710300045Z, 201410300105)。

**作者简介** 杨娜 (1983—), 女, 河南驻马店人, 副教授, 博士, 从事水文气象方面研究。

**收稿日期** 2018-10-16

年平均径流量减少了 15%。进一步对其年内变化情况进行分析, 结果发现(表 1), 除冬季外, 各季节的径流量均呈现一定程度的减少, 其中以夏季径流的减少程度最大, 减少率达 34%; 其次为秋季, 减少率为 24%。这与上游丹江口水库运行后调峰补枯的影响密切相关, 夏秋两季为汉江流域的汛期, 在进入汛期后, 上游的丹江口水库根据水库的防洪要求会对大洪水进行拦截, 因此, 夏秋两季的径流量较建坝前发生较大幅度的减少。当进入非汛期时(春冬), 为满足下游的用水需求, 丹江口水库会进行放水。因此, 受枯季径流的补给影响, 襄阳站冬季径流增加了 98%, 几乎为建坝前的 2 倍。

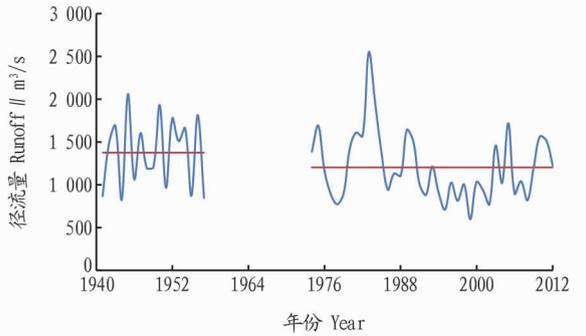


图 1 1940—2012 年襄阳站年平均径流量

Fig. 1 Annual average runoff of Xiangyang Station from 1940 to 2012

表 1 1940—2012 年襄阳站各季建坝前后平均径流量及其变化  
Table 1 Average runoff and its changes before and after dam construction in Xiangyang Station from 1940 to 2012

季节 Season	建坝前 Before dam construction//m <sup>3</sup> /s	建坝后 After dam const- ruction//m <sup>3</sup> /s	变化系数 Coefficient of variation
春季 Spring	926.26	907.80	-0.02
夏季 Summer	2 468.69	1 629.92	-0.34
秋季 Autumn	1 865.37	1 425.85	-0.24
冬季 Winter	415.56	823.53	0.98

2.1.2 水文情势变化特征。通过日尺度水流变化特征的分析, 可以更全面地了解建坝对河流水文情势的影响。分别选用襄阳水文站 1940—1959, 1974—2012 年的日均流量作为丹江口水库建设前后的原始资料, 采用变动范围分析(RVA)法对襄阳站在丹江口水库运行前后的变化情况进行评价和分析, 计算出各指标符合生态要求的 RVA 变化范围。根据表 2 的计算结果, 对各组水文指标进行分析, 发现丹江口水库建库后, 枯季(1、2、3、11、12 月)径流的平均流量高于水库运行前, 而 4—10 月的平均流量低于水库运行前, 其中 1、2 月变化度较大, 分别达 78% 和 69%, 属于高度改变; 6 和 10 月的变化度高于 33%, 属于中度改变; 其余月份均低于 33%, 属于轻度改变。说明丹江口调峰补枯的运行调度对襄阳站径流的年内分配影响较大, 尤其是冬季径流的变化最为明显, 汛期

表 2 襄阳水文站水文变化指标计算结果

Table 2 Calculation results of hydrological change indicators in Xiangyang Hydrological Station

月份 Month	建坝前 Before dam construction(1940—1959 年)				建坝后 After dam construction(1974—2012 年)				RVA 目标 RVA target		变化度 Change degree
	均值 Mean m <sup>3</sup> /s	变异系数 Variable coefficient	最小值 Minimum m <sup>3</sup> /s	最大值 Maximum m <sup>3</sup> /s	均值 Mean m <sup>3</sup> /s	变异系数 Variable coefficient	最小值 Minimum m <sup>3</sup> /s	最大值 Maximum m <sup>3</sup> /s	低值 Low value	高值 High value	
1	338	0.25	192	474	823	0.38	326	1 344	253	424	-0.78
2	339	0.32	156	526	791	0.40	290	1 410	230	448	-0.69
3	524	0.51	175	1 102	802	0.40	278	1 384	257	791	-0.29
4	958	0.39	402	1 758	881	0.34	396	1 575	589	1 327	-0.02
5	1 228	0.50	501	3 051	1 005	0.32	365	1 799	617	1 838	0.10
6	1 395	1.06	261	6 401	1 162	0.36	497	2 461	685	2 869	0.37
7	3 362	0.59	913	8 411	1 844	0.54	647	4 137	1 377	5 347	-0.19
8	2 911	0.62	638	6 190	1 948	0.56	702	5 733	1 102	4 720	0.30
9	2 948	0.81	461	9 555	1 905	0.73	547	6 255	547	5 350	0.21
10	2 078	0.77	281	5 815	1 503	0.99	492	7 541	485	3 672	0.37
11	781	0.45	251	1 443	885	0.43	430	1 961	431	1 130	-0.02
12	491	0.35	216	930	797	0.39	393	1 777	321	661	-0.51

(6—10 月)径流变化其次。通过对水文情势的分析, 进一步说明了建坝对襄阳站径流变化规律的影响。

2.2 气候变化对襄阳站径流的影响 气候变化对汉江现有径流的影响也较为明显<sup>[10]</sup>。采用 M-K(Mann-Kendall)趋势检验方法对襄阳站 1974—2012 年气温、降水和径流系列的年内和年际变化趋势进行检验, 发现其冬季降水呈现显著的增加趋势, 而气温的年际和年内升温趋势均较为显著, 说明襄阳站所在流域的气候发生了一定程度的变化。通过对比分析建坝后(1974—2012 年)的径流变化趋势与降水、气温的年际年内变化趋势(图 2)可以看出, 径流的演变趋势与降

水较为一致, 而与气温相反。其中春季、秋季径流的减少与降水的减少和气温的增加密切相关。夏季径流减少趋势最为显著, 但夏季的降水和气温均呈现不显著的增加趋势, 说明建坝后夏季径流的减少主要受到水库调蓄的影响。冬季径流增加趋势较为显著, 而冬季降水也呈显著的增加趋势, 说明冬季径流的增加与冬季降水的增加有关。可见, 建坝后襄阳站的径流演变与气候变化存在着一定的关系。

2.3 径流对气候变化的响应模型 通过以上分析可知, 径流的变化是受到气候变化和人类活动的共同影响。为了确定径流变化的突变点, 对建坝后年径流进行 M-K 突变检验

(图3),发现UF和UB这两个统计量在1985年附近有一个交叉点,且在1985年之后,UF统计量呈现持续下降趋势,说明建坝后襄阳站的径流发生了由丰转枯的突变。

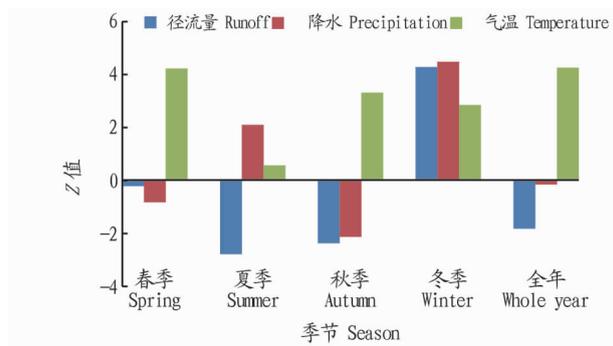


图2 建坝后襄阳站降水、气温及径流量系列Z值比较

Fig. 2 Comparison of Z-values of precipitation, temperature and runoff in Xiangyang Station after dam construction

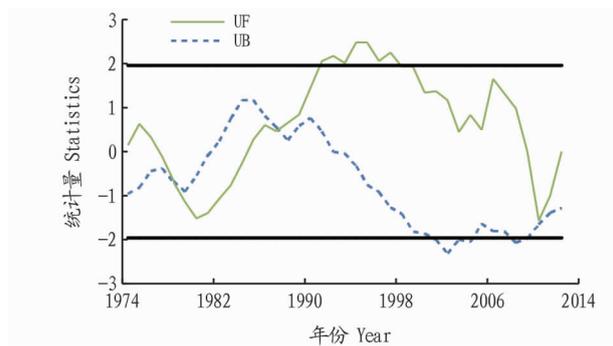


图3 建坝后襄阳站年径流的M-K突变检验

Fig. 3 M-K mutation test of annual runoff at Xiangyang Station after dam construction

为了检验建坝后襄阳站径流变化对气候变化的响应,以径流发生明显减少的1985年为界限,基于多元回归方法分段建立襄阳站径流对气候变化的响应模型。由于率定模型对数据系列的长度有一定的要求,经验证,襄阳站上游的皇家港站与襄阳站的年径流相关性较好,相关系数达0.953,因此,以皇家港站为参证站对襄阳站缺失的1960—1973年的年平均径流进行插补,使襄阳站的径流资料得到延长,并与气象资料同步。通过参数率定,分别得出1960—1985和1986—2012年的线性回归模型:

$$\begin{cases} \ln R = 0.306 \ln P - 0.139T + 3.098 & (1960-1985 \text{年}) \\ \ln R = 0.652 \ln P - 0.174T + 3.527 & (1986-2012 \text{年}) \end{cases} \quad (3)$$

通过模拟可以看出,基于气象因子的模拟径流过程基本能够真实反映径流的演变趋势,说明径流的演变与当地的气候变化有较为密切的关系。而且通过径流的模拟对比发现(图4),在1985年之前,通过降水和气温模拟出的径流过程拟合度高于1985年之后的径流过程,其中建坝前的相关系数(CC)为0.91,建坝后的相关系数只有0.78。这说明在径流发生较为明显的减少之前,径流与降水和气温有较好的相关性;在1985年之后,径流与降水和气温的相关性减弱,表明襄阳站径流受其他因素(人类活动)的影响程度加剧。

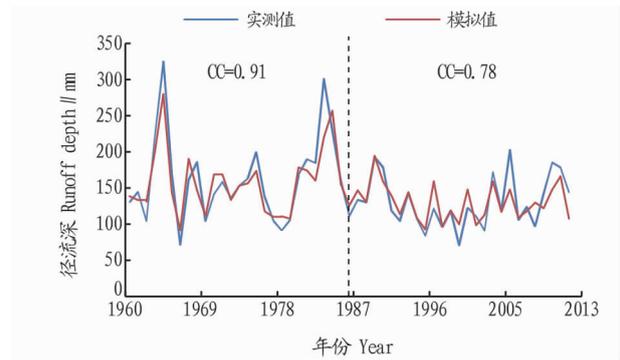


图4 1960—2012年年平均径流深实测序列与模型预估对比

Fig. 4 Comparison of annual mean runoff depth measurement and model prediction from 1960 to 2012

### 3 结论与讨论

通过对襄阳站长系列径流和气象要素的演变趋势分析,以及建立径流、降水、气温的数学模型,发现襄阳站的径流呈现出一定的减少趋势,在夏、秋两季最为明显;襄阳站的水文情势在丹江口水库运行之后发生了明显的变化,主要表现为枯水期径流增加、丰水期径流减少,这是由于水库的调蓄作用造成的;襄阳站所在流域的气象要素发生了一定的变化,其中降水呈现不显著的减少趋势,气温呈现显著的增加趋势,建坝后襄阳站径流的演变与气候变化关系密切;襄阳站的径流与降水和气温的演变有密切关系,但由于人类活动影响的加剧,其相关性在1985年之后有所减弱。

人类活动影响的加剧除了大坝的调蓄之外,还有人口的增加导致的需水量增加,及城镇化和工农业发展所带来的影响。汉江下游位于湖北省,1953年进行全国第一次人口普查时,湖北省全省人口仅为2 778.97万人,截至2010年全国第六次人口普查湖北省人口增至5 723.77万人,增幅为106%。1978年,湖北省人均GDP仅333.02元,城镇化覆盖率仅15.09%,而2014年人均GDP为47 124元,城镇化比例高达55.67%。流域取水的增加及地面硬化导致的径流系数的改变等,都对襄阳站的径流演变规律产生影响。

### 参考文献

- [1] KARR J R, CHU E W. Sustaining living rivers [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 422/423: 1-14.
- [2] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性分析 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 307-314.
- [3] 刘春蓁. 自然气候变异与人为气候变化对径流影响研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(3): 133-139.
- [4] 胡安焱, 张自英, 王菊翠. 水利工程对汉江中下游水文生态的影响 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(2): 5-9.
- [5] 张家玉, 罗莉, 李春生, 等. 南水北调中线工程对汉江中下游生态环境影响研究 [J]. *环境科学与技术*, 2000(S1): 1-32, 89.
- [6] 郭文献, 夏自强, 王乾丹. 丹江口水库对汉江中下游水文情势的影响 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(6): 733-737.
- [7] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *Regulated river research and management*, 1998, 14(4): 329-340.
- [8] 傅国斌, 刘昌明. 全球变暖对区域水资源影响的计算分析: 以海南岛万泉河为例 [J]. *地理学报*, 1991, 46(3): 277-288.
- [9] 刘春蓁, 田玉英. 用改进的非线性水量平衡模型研究气候变化对径流的影响 [J]. *水科学进展*, 1991, 2(2): 120-126.
- [10] 任利刚, 殷淑燕, 靳俊芳. 1960—2011年汉江上游降水量变化特征和区域差异 [J]. *中国农业气象*, 2014, 35(4): 365-372.