

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0112

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)

基于RVA法的沙颍河周口段水文情势评价

武心嘉¹, 葛金金², 戚晓明¹, 杨 兰¹, 汪艳芳¹

(1. 蚌埠学院, 安徽 蚌埠 233000; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:沙颍河周口闸的建成运行,使得下游河流水文情势发生较大改变,对其水生态系统结构功能产生了显著影响。为定量评价周口段的水文情势变化,选取周口水文站1951—2016年的日径流资料,采用RVA法评估水闸建成前后33个水文指标的改变度及其生态影响。结果表明:1975年后,人类活动尤其是周口闸的运行对沙颍河干流水文情势影响加剧,月均流量均呈明显下降趋势,河道内多次出现断流情况;周口站的整体水文改变度为42.23%,属于中度改变,其中11月月均流量、最小1d流量出现时间和流量下降率受到的影响最为强烈,为高度改变;沙颍河流域水资源供需矛盾突出,水闸的运行调度对水生态系统的稳定性产生不利影响,迫切需要对沙颍河进行生态修复,对河流流量适时调整,实现区域经济和生态系统协调发展。

关键词:沙颍河流域;水文情势;RVA法;水文改变度;生态影响

中图分类号:P331 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assessment of flow regime of Zhoukou section based on RVA method

WU Xinjia¹, GE Jinjin², QI Xiaoming¹, YANG Lan¹, WANG Yanfang¹

(1. Bengbu University, Bengbu 233000, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The construction and operation of Zhoukou sluice on Shaying river has caused great changes in the flowing regime of the lower reach, which has a significant impact on the structure and function of the water ecosystem in the basin. In order to evaluate the hydrological changes of Zhoukou reach quantitatively, daily runoff data of Zhoukou gauging station from 1951 to 2016 is selected, and the degree of 33 hydrological alteration indexes and their ecological influences before and after the construction of Zhoukou sluice in the middle reaches of Shaying river were evaluated through Ranges of Variability Approach (RVA) method. The results indicate that: after 1975, the operation of Zhoukou sluice, human activities had an intensified influence on the flow regime of Shaying River, and the median value for each month showed a significant downward trend; the overall degree of hydrologic alteration of Zhoukou gauging station is 41.4%, which is a moderate change, and the most significant changes occurred on the average flow in November, the timing of annual 1-day minimum discharge and the flow fall rates, which were strong changes; The water supply and demand of Shaying River are in serious contradiction, and the operation and dispatching of sluice has adverse effects on the stability of water ecosystem. Therefore, it is urgent to carry out ecological restoration of Shaying River, adjust river flow timely, and realize coordinated development of regional economy and water ecosystem.

收稿日期:2019-02-13 修回日期:2019-05-17 网络出版时间:2019-05-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190523.1605.004.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404506);国家科技重大专项(2017ZX07301003);国家自然科学基金(51309253);蚌埠学院科学研究项目(2018ZR01;2017ZR21)

作者简介:武心嘉(1990—),女,安徽蚌埠人,助教,主要从事生态水利方面研究。E-mail:wuxinjiaflie@163.com

Key words: Shaying River basin; flow regime; RVA method; degree of hydrological alteration; ecological influences

水文情势被许多水生生态学家认为是影响河流和洪泛平原湿地生态系统的关键驱动力^[1]。人类在流域内的各种活动(如兴建闸坝、提水取水等),已经严重改变了世界各地河流的自然水文情势^[2]。人工干扰引起的流量变化会对生态造成许多负面影响,包括生境可利用性的降低、水生物种繁衍生长受困、河流横向纵向连通性下降等,致使河流生态系统退化,河流生态水文系统健康受损^[3]。为减轻水利工程对生态环境造成的破坏,管理者需要了解具体的水文情势变化程度,近几十年国内外学者对此开展了大量的研究^[4]。

1996 年美国学者 Richter 等^[5]提出了水文变异指标(index of hydrologic alteration, IHA)用以评估河流生态水文变化,包括月均流量、年均极值、年极值出现时间、高低流量频率与历时、流量变化率与频率共 5 类与生态相关的水文因子。1997 年 Richter 等^[6-7]在 IHA 基础上,又提出了水文变化幅度法(ranges of variability approach, RVA),用于量化分析水工建筑物修建后对河道水文情势的改变程度。由于很多河流都保存有较长历史的流量资料,且这种评价体系对生物栖息地、地貌、物种信息等难以搜集到的数据要求很低,因此 RVA 法自提出以来就得到各国学者的广泛应用^[8]。Animesh 等^[9]采用 RVA 法对恒河下游流域的流量阈值进行评估,发现旱季月平均值和年最低流量的多个阈值参数发生了重大变化,为孟加拉国和印度之间制定水资源相关政策提供了帮助。Hu 等^[10]选取吴家渡水文站测量的 1930—1990 年日均流量过程资料为研究对象,利用 RVA 法研究了蚌埠闸及其上游各闸坝对淮干流水文情势的影响,论证了闸坝尤其在枯水期对淮河河道流量影响较大。于茜等^[11]将 RVA 法应用于黄河上游兰州站断面,对比分析单库运行和梯级水库联合运行不同阶段中 IHA 指标的变化情况,说明了水库运行对河道生态系统的影响。薛联青等^[12]以塔里木河流域为研究对象,采用 RVA 法定量分析平原水库建库和扩库对下游河流水文情势的影响。郭文献等^[13]应用 RVA 法综合评价了三峡大坝下游宜昌江段生态水文情势变化及其对重要鱼类产卵繁殖的影响。

沙颍河地处豫东平原,是淮河第一大支流,也是淮河众多支流中闸坝分布最为密集的支流,城镇化率较高、污染问题严峻^[14]。整个豫东平原地区的地

势落差较小,大都利用水闸拦蓄地面径流和渗入河道的地下水,以满足当地农业发展和汛期削减洪峰等需求,而大量的闸坝建成后对沙颍河流域的水文情势产生了显著影响,引发了严重的水生态问题^[15]。因此亟需开展沙颍河生态需水研究,推动河流生态系统修复。鉴于沙颍河周口段的水文情势变化的研究较少,本文采用 RVA 法分析周口闸运行对该段河流水文情势的影响,为优化利用河流水资源、开展生态调度提供技术支撑。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

沙颍河流域水系发育,全长约 621.20 km,流域总面积 39 075.30 km²,大部分位于河南省境内^[14]。沙河和颍河为沙颍河的两大主要支流,分别源起河南省的鲁山县伏牛山和登封县嵩山,于周口市汇流后统称沙颍河,流经郑州、平顶山、漯河、周口等多座城市,为河南省中东部地区的农业灌溉用水提供重要保障。沙颍河流域位于北半球西太平洋地区的副热带高压带和我国南北方气候过渡带,年降水量受大陆性季风气候影响,年内年际分布不均。沙颍河中上游修建有大量闸坝,人类活动密集度高,废污水量占淮河水系的 40%以上^[16],水生态健康严峻。

周口闸建成于 1975 年,是位于沙颍河中游的一座以灌溉为主兼顾工业及城市生活供水和航运等功能的大型枢纽工程,投入运行至今,发挥着巨大的工程效益。每年提供城市工业及生活用水 4 000 万 m³,干旱时通过东干渠、南干渠、调水渠向面上引水补源,提供农业用水 2 亿~3 亿 m³。本文以周口水文站 1951—2016 年实测逐日流量为计算依据,分析周口闸修建前后对沙颍河周口段河流水文情势变化的影响。

1.2 研究方法

IHA 共有 33 个水文特征指标(表 1),全方位多角度的覆盖了水生生物栖息地要求、鱼类的洄游产卵、陆地生物的水需求、植物群落分布的要求、河渠地形塑造等多种能对生态系统造成影响的因素^[17-18]。RVA 法的原理是:将河流的多年日流量资料分为人工干扰前(自然状态)和干扰后两段时间序列,并根据干扰前的 IHA 指标,拟定出生态目标区间;统计干扰后的 IHA 指标落入目标区间的概率,以此来判断人工干扰后河流水文情势的变化程度^[19]。

表1 IHA指标及其生态影响

Tab.1 IHA Parameters and their ecosystem influences

IHA组别	水文指标	生态影响
第1组 月均流量	年内月流量中值(12个)	生境可用性或适宜性的量度,包括:植物有效的土壤水分;陆生动物的水需求和食物供给;栖息地掩护;捕食者到筑巢地的通路;水体中的水温、氧含量和光合作用。
第2组 年均极值流量	年均1、3、7、30、90 d最小流量;年均1、3、7、30、90 d最大流量;零流量日数;基流指数(12个)	对河流、河川平原和河口的结构和功能起着重要的调节作用,包括:生物体竞争性和耐受性平衡;建立植物繁殖地;生物和非生物因素的水生生态环境构建;河渠地形和物理生态条件构造;土壤水分、缺氧环境对植物的胁迫;河流和洪泛平原的养分交换;水环境中低氧和高浓度化学物质等压力条件的持续时间;湖泊、池塘、洪泛平原植物群落分布;洪水对净化水体、产卵河床曝气等作用的持续时间。
第3组 年极值流量出现时间	年最大流量出现儒略日;年最小流量出现儒略日(2个)	满足某些生命周期要求,影响与极端水条件(如洪水、干旱)相关的压力或死亡率,包括:生命体的循环繁衍;生物压力的可预测性;生物繁殖期的特殊栖息地条件;鱼类洄游产卵;生命进化的行为机制。
第4组 高低流量频率与历时	每年低流量谷底数;每年低流量平均持续时间;每年高流量洪峰数;每年高流量平均持续时间(4个)	影响各物种的繁殖或死亡,控制种群动态,包括:植物所需土壤湿度和含氧量的频率与大小;洪泛平原水生生物所需栖息地;河流与漫滩之间的养分和有机质交换;土壤矿物质的可用性;泥沙输送、沉积物扰动;供水鸟进食、休息和繁殖的栖息地。
第5组 流量变化率与频率	流量平均增加率;流量平均减小率;每年流量逆转次数(3个)	影响河边或淤积洼地的某些生物,以及植物根系能否接触到地下水,包括:植物和低移动性生物的干旱胁迫;岛屿、洪泛平原上的生物诱捕。

注:基流指数为7 d最小流量与年均流量的比值。

因周口闸建成运行对沙颍河的水文情势影响较大,故将1975年作为突变年对研究时段进行划分,即影响前1951—1974年,共24 a;影响后1975—2016年,共42 a。将33个水文指标发生频率的75%和25%作为RVA目标边界的上下限^[8-12],计算各水文指标的改变程度(Degree of Hydrological Alteration),计算公式^[6]为

$$D_i = \frac{N_{\alpha} - N_f}{N_f} \times 100\% \quad (1)$$

其中 $N_f = r \times N_T$

式中: D_i 为第*i*个水文指标的改变度; N_{α} 为第*i*个指标在受到干扰后落入干扰前于RVA阈值内的实际年数; N_f 为干扰后的水文指标落于RVA阈值范围的预期年数; r 为水文指标在干扰前落在RVA阈值内的比例,本文取50%; N_T 为干扰后时间序列的总年数,本文取42 a。 $0 \leq D_i < 33\%$ 为低度改变(L); $33\% \leq D_i < 67\%$ 为中度改变(M); $67\% \leq D_i \leq 100\%$ 为高度改变(H)。

由于公式(1)只反映了每个指标在影响后落入阈值内的个数比值,没有反映出单个指标整体上升或下降的幅度,故采用公式(2),计算影响前后水文指标中值的变化率,计算为

$$P = \frac{\bar{M}_{\text{post}} - \bar{M}_{\text{pre}}}{\bar{M}_{\text{pre}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: \bar{M}_{post} 为影响后水文指标的中值; \bar{M}_{pre} 为影响前水文指标的中值。

为了从宏观上考虑河流水文情势的综合改变情

况,Shiau等^[20]建议使用式(3)评价河流在人类干扰后的整体水文改变度*D*,计算公式为

$$D = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中: n 取值可以为每组指标个数,也可以为整体指标个数。

2 沙颍河水文情势分析

2.1 月均流量

周口闸建设前后月均流量及改变度见表2。周口闸建设后的月均流量改变度大都为负值,其中11月的月均流量改变度最高(-76.19%),属于高度改变,表明影响后落于RVA阈值范围的年数远达不到预期年数(图1),且大部分都低于RVA下限值。其他有6个月属于中度改变,5个月属于低度改变。其中7月月均流量改变度最低(0.00%),意味着这一指标落在RVA阈值范围的数量刚好达到期望值(图2),这种情况是较理想的。但7月月均流量中值明显比建闸前有所降低,且其他各月都发生了不同程度的减少(图3),尤其7—9月流量下降十分明显,最高由8月份145.5 m³/s降至81.05 m³/s,说明周口闸建成后在汛期的削峰拦洪作用显著。根据历年统计资料分析,周口水文站控制断面年均流量呈下降趋势,这与沙颍河流域内经济社会快速发展,用水总量不断上升密不可分,而周口闸的建成运行加剧了对河流水文节律的人为干扰^[21],对水生生物的生存和繁殖具有不利影响^[17]。

表 2 周口站第 1 组 IHA 水文指标改变度评估

Tab. 2 Evaluation of IHA index change degree in Group 1 Zhoukou hydrological station

月份	影响前月均流量/(m ³ ·s ⁻¹)			影响后月均流量/(m ³ ·s ⁻¹)		改变度/%	中值变化率/%
	中值	下限值	上限值	中值			
1 月	38.80	24.25	54.68	24.50		-28.57 (L)	-36.86
2 月	42.80	21.30	47.59	17.95		-21.43(L)	-58.06
3 月	36.00	27.20	44.33	23.25		-50.00(M)	-35.42
4 月	32.55	25.73	49.25	25.38		-21.43(L)	-22.03
5 月	42.05	28.03	51.58	30.80		-28.57(L)	-26.75
6 月	25.40	11.23	36.81	15.95		-42.86(M)	-37.20
7 月	107.50	64.95	218.00	79.20		0(L)	-26.33
8 月	145.50	89.20	246.00	81.05		-14.29(L)	-44.30
9 月	93.45	66.63	118.00	66.98		-49.21(M)	-28.33
10 月	60.70	51.63	87.18	32.45		-64.29(M)	-46.54
11 月	55.98	47.41	71.25	33.25		-76.19(H)	-40.60
12 月	43.50	30.58	58.08	28.85		-50.00(M)	-33.68

注:改变程度为正,表明影响后各指标落在阈值范围内比期望值高;改变程度为负,表明各指标落在阈值范围内比期望值低,下列表同。

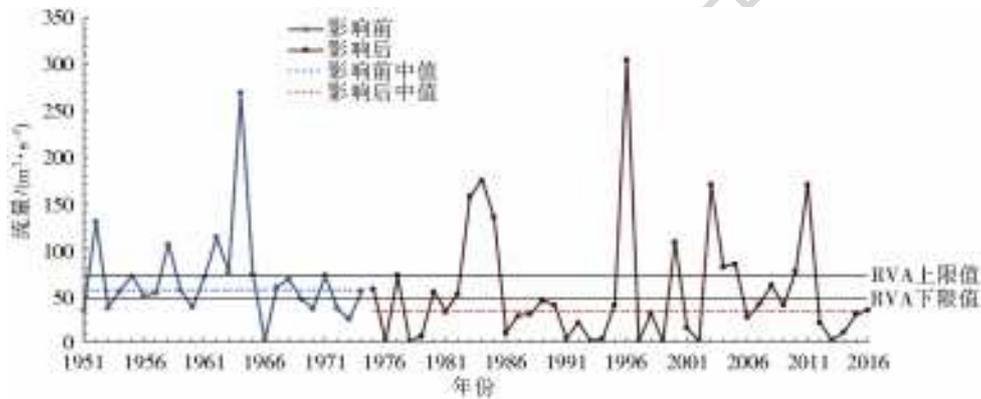


图 1 周口水文站 11 月月均流量在建闸前后的变化

Fig. 1 Change of mean flow in November of Zhoukou Gauging station before and after the sluice construction

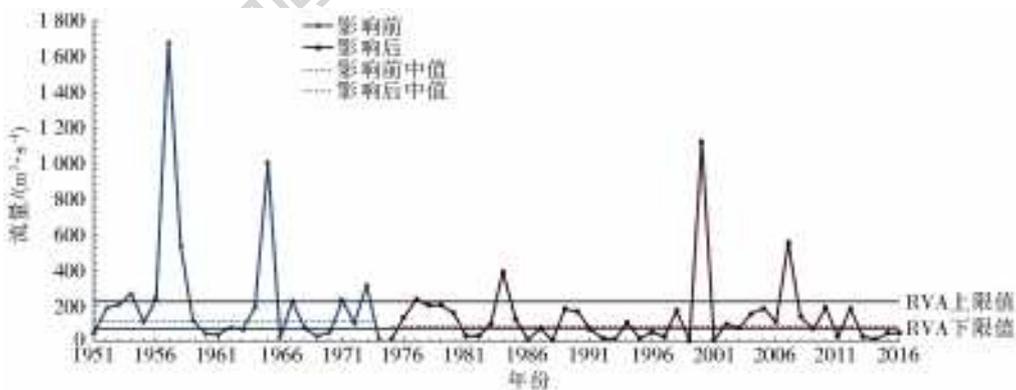


图 2 周口水文站 7 月月均流量在建闸前后的变化

Fig. 2 Change of mean flow in July of Zhoukou Gauging station before and after the sluice construction

2.2 年均极值流量

周口闸建设前后年均极值流量及改变度见表 3。年最小流量相关的 5 个水文指标改变度均为中低度改变且为负值,意味着建闸后这 5 个指标落在阈值区间的数量均没有达到期望值,其中 30 d 最小流量(图 4)接近高度改变(-64.29%),且中值低于

RVA 下限值,与影响前相比大幅降低。年最大流量相关的 5 个指标中,1 d 最大流量(图 5)的改变度最大(-35.71%),中值由建闸前的 1 800 m³/s 减少至 1 002 m³/s,其它 4 个指标都是低度改变,且 7 d、30 d 的改变度为正值。总体来看,低流量相关指标的改变度比高流量的更剧烈,且中值变化率下降更显著。

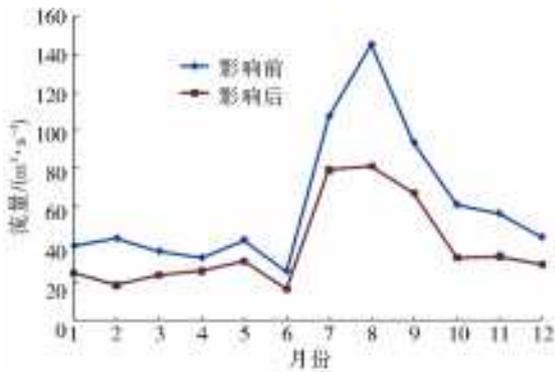


图3 月均流量中值在建闸前后的比较

Fig.3 Comparison of median monthly mean flow before and after the sluice construction

另一极端事件就是建闸后出现了多次断流现象(图6)。建闸前统计的24 a内常年有水,没有出现断流;建闸后统计的42 a内有14 a出现了断流,平均每年断流天数7.78 d,其中1999年断流最严重,达到119 d。2006—2016年,除了2012年未断流以外,其他10 a均出现了不同程度的断流。陈志慧等^[22]研究发现,沙颍河流域枯水期地表水与地下水的补排关系,主要表现为地下水补给地表水,但流域内地下水超采现象严重^[23],使贫乏的水资源供求关系更加不对等,严重威胁到了河流生态系统的稳定性。

表3 周口站第2组 IHA 指标改变度评估

Tab.3 Evaluation of IHA Index Change Degree in Group 2 at Zhoukou hydrological station

年均极值	影响前/(m ³ ·s ⁻¹)			影响后/(m ³ ·s ⁻¹)		改变度/%	中值变化率/%
	中值	下限值	上限值	中值			
1 d 最小流量	4.825	0.910	9.358	0.120 0		-42.86(M)	-97.51
3 d 最小流量	5.263	1.025	10.320	0.208 3		-28.57(L)	-96.04
7 d 最小流量	6.458	1.230	11.870	0.487 9		-28.57(L)	-92.45
30 d 最小流量	13.150	8.219	20.420	3.121 0		-64.29(M)	-76.27
90 d 最小流量	26.950	17.710	33.990	13.630 0		-28.57(L)	-49.42
1 d 最大流量	1 800.000	1 315.000	2 301.000	1 002.000 0		-35.71(M)	-44.33
3 d 最大流量	1 401.000	838.100	1 938.000	798.700 0		-21.43(L)	-42.99
7 d 最大流量	916.300	576.700	1 543.000	561.700 0		21.43(L)	-38.70
30 d 最大流量	439.400	264.400	817.600	284.700 0		21.43(L)	-35.21
90 d 最大流量	243.600	153.500	423.700	156.500 0		0(L)	-35.76
断流天数/d	0	0	0	0		-33.33(M)	-
基流指数	0.058	0.028	0.101	0.007 0		-21.43(L)	-87.18

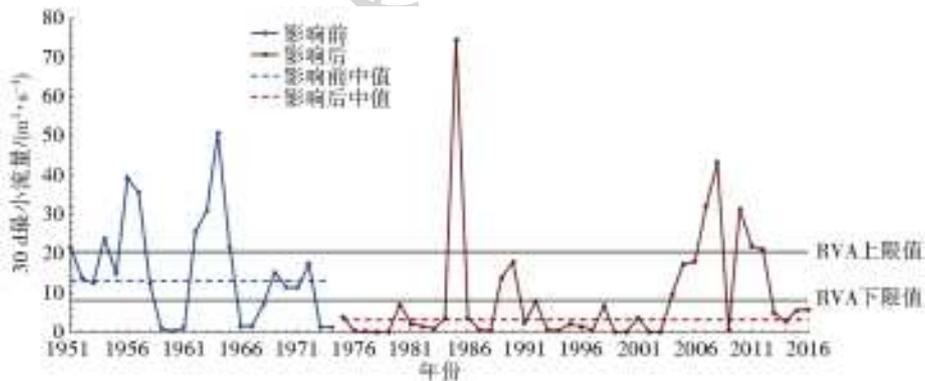


图4 周口水文站30 d最小流量在建闸前后的变化

Fig.4 Change of 30-day minimum discharge of Zhoukou Gauging station before and after the sluice construction

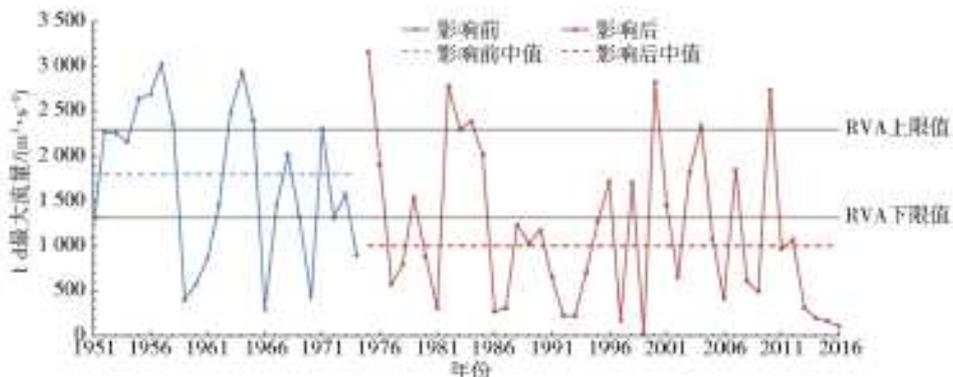


图5 周口水文站1 d最大流量在建闸前后的变化

Fig.5 Change of 1-day maximum discharge of Zhoukou Gauging station before and after the sluice construction

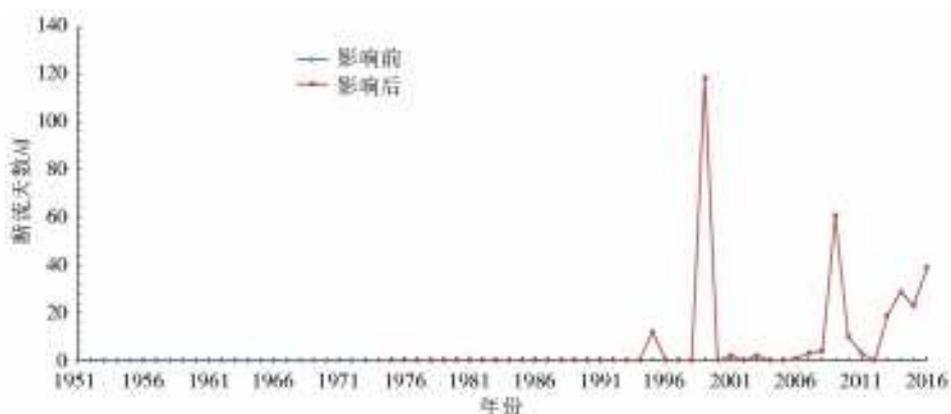


图 6 周口水文站断流天数在建闸前后的变化

Fig. 6 Change of number of zero-flow days of Zhoukou Gauging station before and after the sluice construction

2.3 年极值流量出现时间

周口站建设前后年极值流量出现时间及改变度见表 4。极端水文事件对河流、洪泛区和河口的结构和功能起着重要的调节作用。建闸后,年 1 d 最大流量出现时间(图 7)为低度改变(-7.14%),中值仍然

保持在每年 7 月月初;年 1 d 最小流量出现时间(图 8)中值从每年 6 月下旬提前至 3 月上旬,指标改变度高达 71.43%,且有不少年份的出现时间呈跳跃式波动。年最小流量发生时间的大跨度变化,对生物繁殖期的特殊栖息地条件、鱼类的洄游产卵等产生极大威胁。

表 4 周口站第 3 组 IHA 指标改变度评估

Tab. 4 Evaluation of IHA Index Change Degree in Group 3 at Zhoukou hydrological station

年极值流量	影响前/d			影响后/d		改变度/%	中值变化率/%
	中值	下限值	上限值	中值			
最小 1 d 流量	173	138.8	179	65.5		-71.43(H)	-62.14
最大 1 d 流量	211	195.3	217.8	211		-7.14(L)	0.00

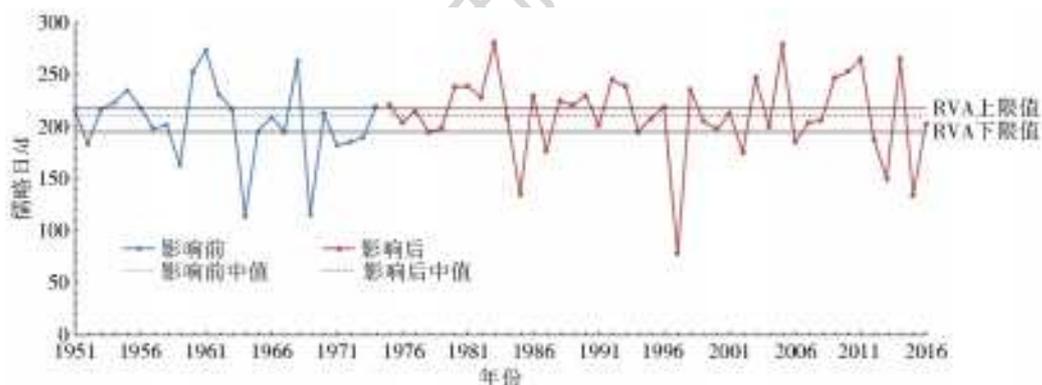


图 7 年均最大 1 d 流量出现时间在建闸前后的变化

Fig. 7 Changes in the timing of annual 1-day maximum discharge before and after the sluice construction

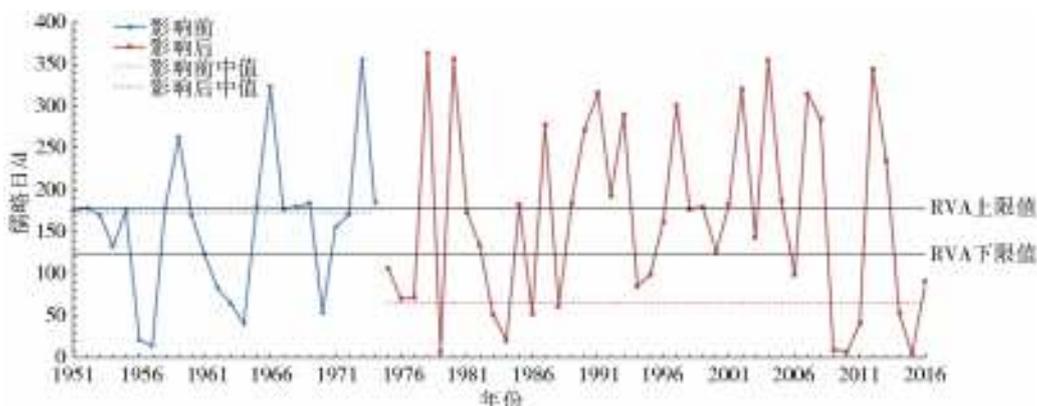


图 8 年均最小 1 d 流量出现时间在建闸前后的变化

Fig. 8 Changes in the timing of annual 1-day minimum discharge before and after the sluice construction

2.4 高、低流量频率与历时

建闸前后高、低流量频率与历时及改变度见表5。其对河流与漫滩、洪泛平原之间的养分和有机质交换有重要作用,直接影响到植物的生长环境和水鸟的栖息地^[18]。1975 年后的水文序列中,高、低流量频率均为中度改变(57.14%),与建闸前的自然水文情势相差较大。其中大部分年份的低流量频率

(图9)都超过了干扰前 RVA 上限,中值较建闸前增加了142%,这会导致部分河床和漫滩反复出现干湿交替的现象,对沙颍河流域的生物多样性和数量产生严重影响。高流量频率增加了33.3%(图10),可为低流量河道提供重要改变,适当缓解由低流量所引起的水温变高、含氧量变低等情况,并为河岸的水生动植物带来一定养分^[25]。

表5 周口站第4组 IHA 指标改变度评估

Tab.5 Evaluation of IHA Index Change Degree in Group 4 at Zhoukou hydrological station

高、低流量频率与历时	影响前			影响后		改变度/%	中值变化率/%
	中值	下限值	上限值	中值			
低流量谷底数/次数	6	3	9	14.5		-57.14(M)	141.67
低流量平均持续时间/d	6	3.92	8	4.5		-2.86(L)	-25.00
高流量洪峰数/次数	7.5	5.25	9	10		-57.14(M)	33.33
高流量平均持续时间/d	5.25	3	6.5	3		-3.30(L)	-42.86

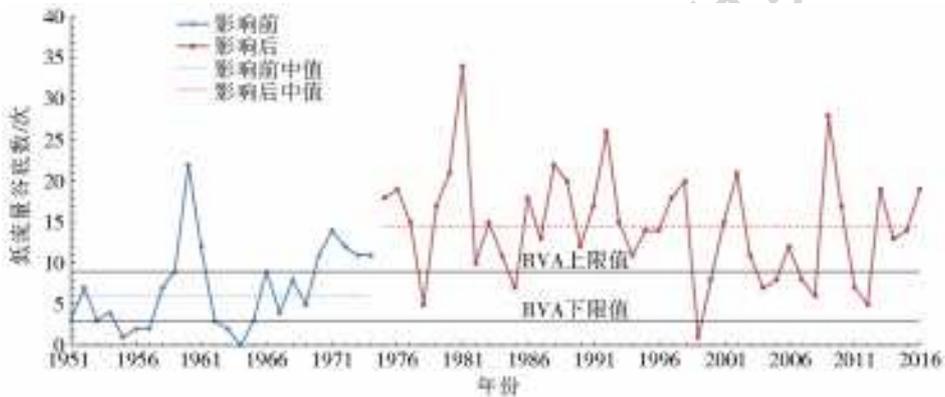


图9 每年低流量谷底数在建闸前后的变化

Fig.9 Changes of number of low pulses within each water year before and after the sluice construction

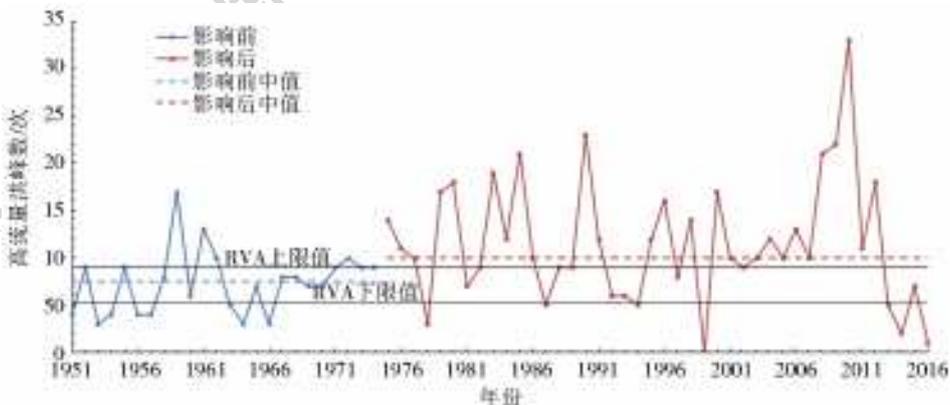


图10 每年高流量洪峰数在建闸前后的变化

Fig.10 Changes of number of high pulses within each water year before and after the sluice construction

建闸后,高、低流量历时的改变度较小,基本达到了预期值。除了1978年(110 d)和1999年(214 d),其他年份的低流量持续时间大都处于阈值范围左右(图11)。不过这种低频率但高强度的干旱,可能对沙颍河生态系统、河口以及豫东平原泛洪区产生长期影响。

2.5 流量变化率与频率

建闸前后河道流量变化率与频率及改变度见表6,河道流量变化率与频率对河道水生植物干旱压力以及低速生物体干燥胁迫具有一定影响,若数值大小不能保持在合理范围,还会促使河岛、漫滩的有机物被诱捕^[18]。影响后周口站流量增加率为中度改

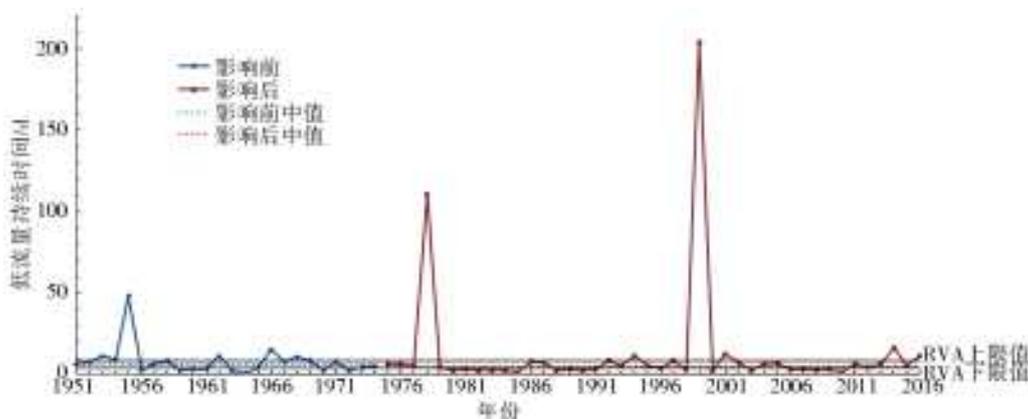


图 11 每年低流量持续时间在建闸前后的变化

Fig. 11 Changes of annual low pulse duration before and after the sluice construction

变(-57.14%),中值上涨了 33.5%;流量减少率为高度改变(-85.71%),中值下降了 56.1%;逆转次数为中度改变(-36.51%),中值由年均 100 次增加到 116.5 次。这 3 个水文指标的改变度均为负值,意味着 1975 年后这些指标落在阈值范围内个数均比期望值低。其中,流量减少率(图 12)在 1975 年

后的变化最为强烈,落入目标区间的数量较少,且多个年份的指标远低于 RVA 下边界,由于旱缺水引发的水分胁迫,会对流域内植物和低移动性生物产生巨大影响^[26]。逆转次数的增加,意味着频繁的流量波动会破坏水生态系统的稳定性,影响河流、湿地、洪泛平原和河口的生态功能和生物多样性^[12]。

表 6 周口站第 5 组 IHA 指标改变度评估

Tab. 6 Evaluation of IHA Index Change Degree in Group 5 at Zhoukou hydrological station

流量变化率与频率	影响前/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)			影响后/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)		改变度/%	中值变化率/%
	中值	下限值	上限值	中值			
流量平均增加率	4.045	3.513	5.250	5.40		-57.14(M)	33.50
流量平均减小率	-3.875	-4.400	-3.525	-6.05		-85.71(H)	-56.13
每年流量逆转次数/次	100.000	90.000	110.500	116.50		-36.51(M)	16.50

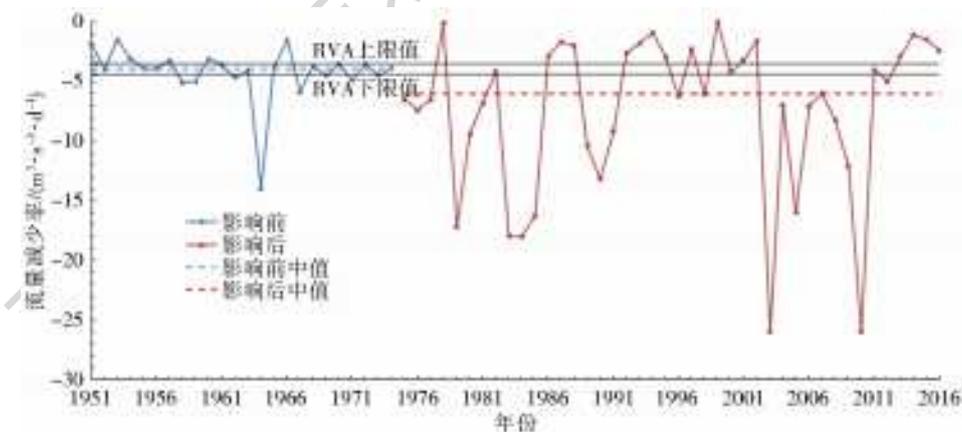


图 12 每年流量减少率在建闸前后的变化

Fig. 12 Changes of flow fall rates before and after the sluice construction

2.6 整体水文改变度

周口水文站 33 个水文指标中,高度改变 3 个,中度改变 14 个,低度改变 16 个,均值变化率反映出影响后河道内流量明显减少的情况。通过式(3)算得 5 组指标的整体改变度,除第 2 组指标整体改变度为低度改变外,其他 4 组均为中度改变,周口站总体水文改变度为 42.63%,属于中度改变程度。

胡惠兰等^[27]根据《淮河片水资源公报》中 2003—2013 年的数据,研究了淮河流域所处的五省(河南、安徽、江苏、山东、湖北)的水资源短缺风险程度,发现河南省风险值最高,且有逐年增长趋势。沙颍河大量的闸坝切断了河流的连通性,且该流域天然补给水能力一直不足^[28],近几十年水资源开发利用的不断增长,更是打破了原本就脆弱的生态系统平衡,

出现了大范围的生态系统退化现象^[29]。综上分析,整体水文改变度计算结果符合客观事实,有助于管理者定量了解周口闸的修建运行对沙颍河周口段水文情势的影响。

3 结 语

基于RVA法评估沙颍河周口闸对水文情势的影响,发现周口闸建成运行后,对沙颍河干流周口段影响较大:年内均月流量中值下降明显,尤其7月、8月、9月份减少显著;年均极值中与低流量相关5个指标的中值均低于RVA下限值,且下降幅度剧烈;建闸后出现断流情况,沙颍河由常年有水型变为间歇性断流型河流;最小1d流量出现时间属于高度改变,中值从每年6月下旬提前至3月上旬;高流量洪峰数和低流量谷底数均较之前增加,属于中度改变;流量平均减小率呈现高度改变,逆转次数增加;整体水文指标改变度为中度改变。随着淮河流域工业化和城镇化进程的加快,闸坝的建设运行对流域生态环境产生了很大的负面影响,生态和环境用水被挤占的情况越发严重,流域内的社会、经济和环境安全都受到了严重威胁。以上研究可为生态用水和生活生产用水之间的平衡管理提供参考,以开展相应生态补偿措施。

参考文献(References):

- [1] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507. DOI: 10.1007/s00267-002-2737-0.
- [2] HORNE A C, WEBB J A, STEWARDSON M J, et al. *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*[M]. London, United Kingdom: Academic Press, 2017.
- [3] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration[J]. *Bioscience*, 1997, 47(11): 769-784. DOI: 10.2307/1313099.
- [4] 张飒,班璇,黄强,刘登峰. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(7): 34-43. (ZHANG S, BAN X, HUANG Q, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(07): 34-43. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdx.20160704.
- [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.
- [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.
- [7] RICHTER B D, JEFFREY V B, DAVID 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)14:4<329:AID-RRR505>3.0.CO;2-E.
- [8] JOWETT I G, BIGGS B J F. Application of the 'Natural Flow Paradigm' in a New Zealand Context[J]. *River Research and Applications*, 2009, 25: 1126-1135. DOI: 10.1002/rra.1208.
- [9] ANIMESH K, GAIN, CARLO GIUPPONI. Impact of the farakka Dam on thresholds of the hydrologic flow regime in the lower Ganges River Basin (Bangladesh)[J]. *Water*, 2014, 6(8). DOI: 10.3390/w6082501.
- [10] HU W, WANG G, DENG W, et al. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River Basin, China[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33(3/4): 233-241. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.04.003.
- [11] 于茜,黄强,张洪波. 不同水库运行模式对黄河兰州站生态水文特征变异的影响[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(5): 747-755. (YU Q, HUANG Q, ZHANG H B. Influence of different reservoir operations on the eco-hydrological characteristics variability of Lanzhou Gauge of the Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5): 747-755. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2010.05.012.
- [12] 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. 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.
- [13] 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. (GUO W X, LI Y, WANG H X, et al. IHA-RVA-based assessment of eco-hydrological regime of Lower Jinshajiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(9): 2014-2021. (in Chinese)) DOI:

10. 13928/j. cnki. wrahe. 2018. 08. 021.
- [14] 左其亭, 罗增良, 石永强, 等. 沙颍河流域主要参数与自然地理特征[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 66-72. (ZUO Q T, LUO Z L, SHI Y Q, et al. Main parameters and physiographic characteristics of Shayinghe River Basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 66-72. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2016. 12. 015.
- [15] ZUO Q T, LIANG S K. Effects of dams on river flow regime based on IHA/RVA [J]. IAHS-AISH Proceedings and Reports, 2015, 368: 275-280. DOI: 10. 5194/piahs-368-275-2015.
- [16] 左其亭, 陈豪, 张永勇. 淮河中上游水生态健康影响因素及其健康评价[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1019-1027. (ZUO Q T, CHEN H, ZHANG Y Y. Impact factors and health assessment of aquafic ecosystem in Upper and Middle Huai River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1019-1027. (in Chinese)) DOI: 10. 132430. cnki. slxb. 20141160.
- [17] The Nature Conservancy. Indicators of hydrologic alteration version 7. 1 user's manual[R]. Arlington: The Nature Conservancy, 2009.
- [18] 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.
- [19] 郭卫, 徐长江, 邵骏, 等. 基于 RVA 法的金沙江下游水文情势研究[J]. 人民长江, 2018, 49(18): 58-63. (GUO W, XU C J, SHAO J, et al. Research on hydrologic regime of lower Jinsha River based on RVA method. Yangtze River, 2018, 49(18): 58-63. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 18. 012.
- [20] SHIAU J T, WU F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime[J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): W06433. DOI: 10. 1029/2006WR005523, 2007.
- [21] 梁士奎. 闸控河流生态需水调控理论方法及应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016. (LIANG S K. Research on the theory and application of regulation on ecological water requirement in river controlled by sluices[D]. Zhengzhou University, 2016. (in Chinese))
- [22] 陈志慧, 阮晓红, 单楠. 基于耦合模型的沙颍河流域地下水与地表水硝酸盐通量过程模拟[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(5): 860-870. (CHEN Z H, RUAN X H, SHAN N. Modeling of nitrate flux between groundwater and surface water based on a coupled model in Shaying River Basin [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2017, 53(5): 860-870. (in Chinese)) DOI: 10. 13232/j. cnki. jnju. 2017. 05. 005.
- [23] 刘明洋. 周口市水资源承载力综合评价分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. (LIU M Y. Comprehensive evaluation and analysis of water resources carrying capacity in Zhoukou [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese))
- [24] 李仲辉, 王才安. 河南鱼类的地理分布[J]. 新乡师范学院学报(自然科学版), 1983(4): 65-75. (LI Z H, WANG C A. the distribution of fishes in Henan [J]. Journal of Xinxiang Normal College, 1983(4): 65-75. (in Chinese)) DOI: 10. 16366/j. cnki. 1000-2367. 1983. 04. 010.
- [25] CHEN H. Assessment of hydrological alterations from 1961 to 2000 in the Yarlung Zangbo River, Tibet [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2012, 12(2): 93-103. DOI: 10. 2478/v10104-012-0009-z.
- [26] POFF N L, ZIMMERMAN J K H. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 194-205. DOI: 10. 1111/j. 1365-2427. 2009. 02272. x.
- [27] 胡惠兰, 周亮广. 淮河流域水资源短缺风险评估与时空分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 59-65. (HU H L, ZHOU L G. The risk assessment and space-time analysis of water resources shortage in Huaihe River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 59-65. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 06. 009.
- [28] 戴韵秋, 石朋, 胡健伟, 等. 气候变化和人类活动对流域径流的影响分析——以沙颍河为例[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 15-19. (DAI Y Q, SHI P, HU J W, et al. Effects of climate change and human activities on runoff: A case of Shaying River [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40(1): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10. 13393/j. cnki. issn. 1672-948X. 2018. 01. 004.
- [29] 徐艳红, 于鲁冀, 吕晓燕, 范鹏宇. 淮河流域河南段退化河流生态系统修复模式[J]. 环境工程学报, 2017, 11(1): 143-150. (XU Y H, YU L J, LV X Y, et al. Ecological restoration modes for Huaihe River basin of Henan, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(1): 143-150. (in Chinese)) DOI: 10. 12030/j. cjee. 201509105.