

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.002

丹江口水库对汉江中下游水文情势的影响

郭文献¹ 夏自强¹ 王 乾²

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;

2.黄河河口管理局,山东 东营 257091)

摘要:以汉江中游的襄阳水文站 1946~1995 年日均流量资料为研究对象,采用变动范围分析(RVA)法分析了丹江口水库建库前后汉江中下游水文情势特征变化,定量评价了水文情势改变程度。结果表明,丹江口水库对汉江中下游河流水文改变程度为 39%,属于中度改变。水文情势的改变,影响了水库下游重要生物资源的生态环境条件,破坏了河流生态系统完整性以及生物多样性,建议尽快改变现有水库调度模式,开展丹江口水库生态调度研究。

关键词:变动范围法;水文情势;生态调度;丹江口水库

中图分类号: P333.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2008)06-0733-05

近几十年来,随着社会经济的发展,汉江流域水资源开发利用程度逐步加大,在河流上筑坝拦截水量用于防洪、发电、灌溉等使河流的生态环境受到人为影响,尤其是汉江中游丹江口水库的建设,在促进社会经济发展的同时,水库的调节作用改变了河流原有的水文情势,对径流产生显著的径流调节作用。水文情势决定并影响着河流生态系统的主要方面,包括河流的物质循环、能量过程、物理栖息地状况和生物相互作用等,水文情势的改变在不同时空尺度上改变栖息地条件,从而影响物种的分布和丰度,进而影响生物群落的组成和多样性^[1-2]。因此,研究丹江口水库建设对河流水文情势的影响,对于维持汉江河流生态系统健康和可持续发展具有重要意义。

关于水库拦蓄对河流水文情势的影响,国内外学者进行了大量研究,其中,变动范围分析(range of variability approach, RVA)法通过建立指标体系来研究复杂的生态水文过程,是评价人类活动对河流径流过程影响的一种有效分析手段,该方法还可根据分析结果建立河流的生态流量管理模式,可满足河流管理部门的需要^[3-6],已广泛应用于水利工程对河流水文情势影响程度以及河流生态恢复研究^[7-9]。

本文以汉江中游的襄阳水文站 1946~1995 年日均流量资料为研究对象,运用 RVA 法分析丹江口水库建库前后汉江中下游水文情势特征变化,定量评价水文情势改变程度,同时也为丹江口水库生态调度研究提供参考依据。

1 研究区概况

汉江发源于秦岭南麓,是长江最大的支流之一,干流流经陕西、湖北两省,在武汉汇入长江,全长 1570 km,流域面积 15.9 万 km²。汉江干流丹江口以上为上游,丹江口至武汉汉江河口为中下游,其中丹江口水库是一个峡谷盆地交替型的水库,控制流域面积 9.52 万 km²,坝高 162 m,正常蓄水位 157 m,相应库容 174.5 亿 m³。该水库于 1958 年开工建设,1967 年 11 月开始蓄水运用,形成初期规模。2006 年 9 月,丹江口水库大坝加高工程开始实施,从高程 162.0 m 加高到 176.6 m,加高 14.6 m,加高后正常蓄水位为 170 m,相应库容 290.5 亿 m³,属不完全多年调节水库,担负着防洪、发电、灌溉、航运和水产养殖以及南水北调供水等任务。

汉江是我国著名的四大家鱼天然产卵场的分布区之一^[10-11]。丹江口水库修建后,对汉江鱼类的影响主要包括:阻隔影响,汉江的鱼类被分割在大坝上下 2 个不同的生态环境中生活;繁殖影响,改变了产卵场水流条件,使得部分产卵场消失或者移动。此外,南水北调中线工程的兴建和汉江中下游的梯级开发,将再次改变

收稿日期:2007-11-20

基金项目:国家自然科学基金(30490235)

作者简介:郭文献(1979—),男,河南安阳人,博士研究生,主要从事水文水资源及生态水文研究。

汉江现有的生态环境,对鱼类的生活产生复杂的影响,特别是对四大家鱼的影响更大.总之,随着汉江流域水资源开发利用程度的提高,流域内的生态系统受到严重影响,生物多样性下降,生态系统服务功能减弱.

2 研究方法

为了定量分析水利工程影响下河流水文情势的变化程度,Richter等^[2-5]提出了RVA法.该法建立在水文变化指标(indictors of hydrologic alteration,IHA)法的基础上,利用建立的生态水文指标来评价受水利工程影响的河流水文情势.

2.1 IHA法

IHA法以水文情势的5种基本特征为基础,将33个水文指标分为5组,具体水文参数见表1.IHA法根据河流的日水文资料,计算具有生态意义的关键水文特征值,并计算它们年际的集中量数(如中值或平均值)以及离散系数(如范围、标准偏差、变异系数),以对人类活动干扰前和干扰后的河流水流状况进行描述.

表1 IHA法的生态水文参数^[6]

Table 1 Eco-hydrological parameters of the indictors of hydrologic alteration

水文指标参数组	水文参数
月流量值	每月流量的平均值或中值(12个指标)
年极值水文状况大小及历时	年均1d,3d,7d,30d,90d最小流量以及最大流量、断流天数、基流指数 ^① (12个指标)
年极值水文状况发生时间	年最大、最小1天发生的日期(罗马日) ^② (2个指标)
高、低流量脉冲的频率及历时	每年高、低流量脉冲次数 ^③ 以及脉冲持续时间的平均值或中值(4个指标)
水流条件变化率及频率	涨幅、降幅的年均值或中值以及流量变化次数 ^④ (3个指标)

注:①基流指数为年最小连续7d流量与年均值流量的比值;②罗马日表示公历一年中第几天;③低脉冲定义为低于干扰前流量25%频率的日均流量,高脉冲定义为高于干扰前流量75%频率的日均流量;④流量变化次数指日流量由增加变为减少或由减少变为增加的次数.

2.2 RVA法

RVA法建立在分析水文指标的基础上,通过分析水利工程建设前后河道的日流量数据来评估水文指标变化的程度.而认定水文指标受影响的标准需要以生态方面受影响的资料为依据,但若缺乏此方面的资料,通常以各指标的平均值 $\pm\delta$ (标准差)或者以频率为75%和25%作为各个指标的上下限,称为RVA目标.RVA法应用可概括为以下4个步骤:(a)首先计算水利工程建设前未受干扰的33个水文指标;(b)根据步骤(a)所得未受干扰前的结果拟定各个水文参数的RVA目标,本文以各指标的平均值 $\pm\delta$ (标准差)作为评估目标;(c)计算水利工程影响后的日流量数据的33个水文指标;(d)根据步骤(b)(c)的结果,可知水利工程建设前后的情况及水利工程建设对河流水文情势的影响程度.

2.3 水文变化程度分析

为了量化水文指标受干扰后的变化程度,Richter等^[5]建议以水文改变度(degree of hydrological alteration)来评估,其定义如下:

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

式中: D_i ——第*i*个水文指标的水文改变度; N_{oi} ——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 ——受干扰后水文指标预期落入RVA目标内的年数,可以用 rN_T 来评估,其中, r 为受干扰前水文指标落入RVA目标内的比例,若以各个水文指标的75%及25%作为RVA目标,则 $r=50\%$,而 N_T 为受干扰后流量时间序列记录的总年数.

为对水文指标的水文改变程度设定一个客观的判断标准,规定若式(1) D_i 值介于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.

上述33个水文指标可能会有不同的水文改变度,即有不同个数的水文指标分别属于高度、中度或低度改变,不同的水文指标对水利工程影响的反应并不一致,因此综合33个水文指标的水文变化情形为一个整体水文改变状况来代表是一种简化且容易理解的方法.

整体水文变化程度 D_o 可以用以下方法计算:取33个水文指标的水文改变度的平均值来评估河流生态环境的整体变化情形,然而这样将体现不出各指标权重大小.为了体现各指标的权重大小,本文采用对较大的 D_i 值赋予较大的权重,用式(2)计算 D_o :

$$D_o = \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i^2}$$

(2)

其中 D_o 值介于 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。

3 成果分析

3.1 水文指标分析

根据 RVA 计算,分别选用襄阳水文站 1946 ~ 1967 年(缺 1949 年)、1968 ~ 1995 年(缺 1969 和 1983 年)的日均流量作为丹江口水库建设前后的原始资料进行水文指标计算。本研究取各个指标的平均值 ± δ(标准差)作为 RVA 目标的下限和上限,具体水文指标计算结果见表 2。

表 2 襄阳水文站水文变化指标计算结果

Table 2 Results of the indictors of hydrologic alteration analysis at Xiangyang Station												
参 数		建坝前(1946 ~ 1967 年)				建坝后(1968 ~ 1990 年)				RVA 目标		背离率
		均值	变异系数	最小	最大	均值	变异系数	最小	最大	低	高	
第 1 组 (月平均流量)	1 月	463	0.48	199	1 002	854	0.36	363	1 344	242	683	- 0.50
	2 月	433	0.38	156	774	816	0.38	290	1 410	270	597	- 0.60
	3 月	674	0.42	175	1 158	842	0.37	278	1 384	394	955	- 0.19
	4 月	1 151	0.46	474	2 466	984	0.31	433	1 575	622	1 679	0.38
	5 月	1 577	0.57	504	4 331	1 186	0.35	567	2 450	673	2 481	0.33
	6 月	1 205	0.62	271	3 890	1 337	0.33	596	2 461	453	1 958	0.03
	7 月	2 882	0.51	913	7 494	1 920	0.5	647	4 137	1 411	4 353	- 0.19
	8 月	2 548	0.62	638	6 190	1 764	0.38	702	3 750	962	4 135	0.35
	9 月	2 533	0.73	464	7 803	1 979	0.61	677	6 121	692	4 374	0.21
	10 月	1 988	0.68	281	5 362	1 478	0.66	554	4 701	627	3 348	0.18
	11 月	997	0.39	400	1 881	938	0.33	430	1 655	604	1 390	0.08
	12 月	687	0.44	333	1 230	864	0.37	393	1 777	381	992	0.10
第 2 组 (年极值水文 状况大小及历时)	最小 1 d 流量	338	0.43	145	691	448	0.35	142	805	193	482	- 0.14
	最小 3 d 流量	342	0.42	145	695	494	0.33	245	826	197	488	- 0.30
	最小 7 d 流量	352	0.41	146	700	536	0.35	258	922	208	496	- 0.50
	最小 30 d 流量	381	0.39	149	712	616	0.37	273	1 045	232	531	- 0.55
	最小 90 d 流量	511	0.37	177	960	711	0.33	295	1 117	322	701	- 0.43
	最大 1 d 流量	12 870	0.5	2 354	24 600	6 996	0.69	1 270	19 500	6 422	19 320	- 0.06
	最大 3 d 流量	10 510	0.51	2 122	20 900	6 221	0.73	1 103	17 970	5 098	15 920	- 0.31
	最大 7 d 流量	8 262	0.47	1 830	15 660	5 017	0.68	1 087	12 800	4 349	12 180	- 0.25
	最大 30 d 流量	4 567	0.43	1 331	8 975	2 958	0.52	976	7 250	2 606	6 528	- 0.25
	最大 90 d 流量	2 993	0.39	1 190	5 327	2 085	0.38	851	4 381	1 820	4 166	- 0.25
	断流天数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
	基流指数	0.26	0.44	0.08	0.56	0.44	0.33	0.24	0.79	0.15	0.38	- 0.32
第 3 组 (年极值水文 状况发生时间)	最小流量日	60.8	0.19	10	366	51.8	0.17	2	364	43	131.9	0.11
	最大流量日	226.9	0.14	91	296	214.8	0.18	23	295	177.3	276.4	- 0.14
第 4 组 (高、低流量脉冲 的频率及历时)	低脉冲次数	4.7	0.9	0	15	2.4	1.13	0	8	0.5	9	0.06
	低脉冲历时	18.6	0.82	3.0	67.7	14	1.47	1	72	3.4	33.8	- 0.62
	高脉冲次数	6.8	0.49	0	15	2.7	1	0	9	3.5	10.2	- 0.60
	高脉冲历时	4.6	0.47	1.6	9.3	4.1	0.73	1	11	2.5	6.8	- 0.42
第 5 组 (水流条件 变化率及频率)	涨幅率	506.6	0.5225	116.6	1 017.0	148.9	0.5639	45.1	308.9	241.9	771.3	- 0.73
	降幅率	- 243.6	- 0.4640	- 442.2	- 64.8	- 131.0	- 0.5594	- 262.1	- 39.6	- 356.7	- 130.6	- 0.42
	变换次数	78.3	0.0893	68	93	151.9	0.1706	81	190	71.34	85.33	- 0.95

注:表中流量单位为 m^3/s ,时间单位为 d,频率单位为次,变化率单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/\text{d}$,其他为无因次量。

3.2 水文情势变化程度分析

根据表 2 的计算结果,从每组水文指标分析丹江口水库建库后,汉江襄阳水文站水文情势变化及其影响程度。

a. 丹江口水库建库后,4 月、5 月、7 月、8 月、9 月、10 月、11 月的平均流量比建库前小,而 1 月、2 月、3 月、6 月、12 月的平均流量则比建库前大,丹江口水库削减了丰水期流量,而增加了枯水期流量。同时,可以看

出,1月、2月、3月和7月平均流量比期望的低,其余各月平均流量的变化落入RVA目标区内,其中1月、2月偏离程度较大,分别达到50%和60%。4月、5月、8月的偏离程度超过33%,属于中度改变;其余月份均低于33%,属于轻度改变。

b. 从第2组数据结果可知,年最大、最小1d、3d、7d、30d、90d流量以及基流指数均比期望低,没有出现断流流量。其中,年最小7d、30d、90d流量偏离程度较大,分别达到50%、55%和43%,属于中度改变;其余指数均低于33%,属于轻度改变。

c. 年最小流量日落入RVA目标区内,年最大流量日比期望低,偏离程度均小于33%,属于轻度改变;建库后,年最小流量日以及最大流量日出现日期比建库前平均提前10d左右。

d. 建库后高、低流量脉冲的次数以及持续时间都比建库前明显减少,其中低脉冲数量落入RVA目标区内,其余都比期望低,高脉冲次数、历时以及低脉冲历时偏离程度较大,分别达到60%、42%和62%,属于中度改变;低脉冲次数偏离程度小,属于轻度改变。

e. 涨幅率、降幅率、上涨下降变换次数指标均比期望低,偏离程度很大,其中涨幅率、上涨下降变换次数偏离程度分别达到73%、95%,属于高度改变;降幅率为42%,属于中度改变。

f. 根据表2中计算结果,19项指标属于轻度改变,12项指标属于中度改变,2项指标属于高度改变,为了从整体上评价水库建设对水文情势的影响程度,采用式(2)计算的整体水文改变度 $D_o = 39\%$,汉江水文情势变化程度达到中等。

4 结 语

根据以上研究,可知丹江口水库建库后,汉江中下游水文情势发生了较为严重的变化,水文情势的变化,在较大程度上影响到了汉江中下游的河流生态系统的完整性以及生物多样性。就重要生物资源四大家鱼来说,相关研究表明,汉江中游四大家鱼产卵量急剧减少,四大家鱼资源已严重衰退。因此,必须采取强有力的水利工程措施以及水管理措施,其中对丹江口水库进行生态调度,改变现有的水库调度方式,在充分发挥水库防洪、发电、灌溉、航运等功能的同时,尽量减少水库调节对汉江中下游水文情势的影响,以维持汉江中下游河流生态系统健康可持续发展。

参考文献:

- [1] 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): 22-29.
- [2] RICHTER B D, MATHEWS R, HARRISON D L, et al. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity[J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(1): 206-224.
- [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. How much water does a river need?[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 231-249.
- [5] 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.
- [6] The Nature Conservancy. Indicators of hydrologic alteration, user's manual (version 7) [EB/OL]. [2007-10-20] <http://www.blm.gov/nstc/resourcenotes/respdf/RN58.pdf>.
- [7] KOEL T M, SPARKS R E. Historical patterns of river stage and fish communities as criteria for operations of dams on the Illinois River[J]. *River Research and Applications*, 2002, 18(1): 3-19.
- [8] TAYLOR V, SCHULZE R, JEWITT G. Application of the indicators of hydrological alteration method to the Mkomazi River, KwaZulu-Natal, South Africa[J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2003, 28(1): 1-11.
- [9] SHIAU J T, WU F C. Feasible diversion and instream flow release using range of variability approach[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(5): 395-404.
- [10] 余志堂, 邓中旻, 许蕴珏, 等. 丹江口水利枢纽建后的汉江鱼类资源[C]//中国鱼类学会. 鱼类学论文集. 第一辑. 北京: 科学出版社, 1981: 77-96.
- [11] 李修峰, 黄道明, 谢文星, 等. 汉江中游江段四大家鱼产卵场现状的初步研究[J]. *动物学杂志*, 2006, 41(2): 76-80.

Effects of Danjiangkou Reservoir on hydrological regimes in the middle and lower reaches of Hanjiang River

GUO Wen-xian¹, XIA Zi-qiang¹, WANG Qian²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Yellow River Estuary Management Bureau , Dongying 257091 , China)

Abstract : Based on the mean daily flows at Xiangyang hydrologic station in the middle reaches of Hanjiang River from 1946 to 1995 , the range of variability approach was employed to analyze the hydrological regimes in the middle and lower reaches of Hanjiang River before and after the construction of Danjiangkou Reservoir , and the overall degree of hydrological alteration was quantitatively evaluated . The results show that the overall degree of hydrological alteration is 39% and it belongs to the moderate alternation . The alteration of hydrological regimes influences the ecological environment conditions of the important biotic resources in the lower reaches , and the integrality and biodiversity of the river ecosystem are damaged . Therefore , the existing modes of reservoir operation should be improved and the researches on ecological operation of Danjiangkou Reservoir should be implemented as soon as possible .

Key words : range of variability approach ; hydrological regime ; ecological operation ; Danjiangkou Reservoir

· 简讯 ·

第 3 届全国岩土与工程学术大会将在成都召开

为了充分交流我国岩土与工程领域所取得的成就 ,共同面对西部的机遇与挑战 ,全面推动岩土与工程领域的科技进步 ,中国地质学会工程地质专业委员会、中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会商定 ,拟在 2009 年 6 月 11 ~ 18 日联合组织召开第 3 届全国岩土与工程学术大会 .

会议主题 联合应对——西部的机遇与挑战 .具体议题包括 :

- a. 西部大型工程建设的岩土与工程问题 :岩石高边坡工程 ;深埋长隧道工程 ;高坝与大水库 ;复杂介质的交通干线建设 ;复杂场地的大型民用机场 .
- b. 西部特殊岩土环境问题 :人类工程活动与环境问题 ;气候变化与环境灾害 ;环境岩土工程与资源可循环利用 ;西部特殊地区环境条件与工程建设 .
- c. 理论探索与新技术 :岩石与土力学理论 ;岩土工程风险评价与管理 ;西部地区重大地质灾害形成机理与治理技术 ;岩土勘探、测试、监测与施工新技术 ;岩土工程信息技术 ;岩土工程机械与仪器设备 .
- d. 其他 :大型岩土工程实录 ;发展战略与联合应对挑战 ;岩土工程与可持续发展 ;境外岩土工程 .

会议主办单位为中国地质学会工程地质专业委员会 ,协办单位为四川省国土资源厅 ,承办单位为成都理工大学 .

会务组联系 E-mail :tangminggao07@cdut.cn

网址 :http://www.gec2009.com

(本刊编辑部供稿)