

基于变动范围法(RVA)的信江水文改变及生态流量研究

刘贵花^{1,2}, 朱婧瑄², 熊梦雅², 王 点², 齐述华^{1,2}

(1.江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室,江西 南昌 330022;

2.江西师范大学地理与环境学院,江西 南昌 330022)

摘要:选择信江下游梅港站 1950~2010 年日径流量,根据流域大型水库界牌枢纽运行时间将梅港站径流序列分为建库前(1953~2001)和建库后(2002~2010)两个时段。采用变动范围法(Range of Variability Approach,简称:RVA)分析水库运行对下游梅港站流域生态水文指标改变度,并分析了信江下游生态流量。研究表明:33个水文指标有22个发生中高度改变,11个指标发生低度改变,其水文综合改变度为0.51,属于中度改变;梅港站生态流量值均在RVA阈值内,基本能够保持河流稳定流量,但2月、7~9月及12月河道生态流量大于RVA下限。可适量增大水库下泄水量,降低对下游河段生态系统的威胁。

关键词:水文改变指标;变动范围法;水文情势;信江流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)01-0051-07

河流水流的天然变化特征,即河流水文情势,是河流生态学研究的核心,决定并影响河流生态系统的物质循环、能量过程、物理栖息地状况和生物相互作用。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]。随着人类对河流开发利用程度的不断提高,河流的自然水文情势在人类活动干扰下发生不同程度的改变,对河流生态系统造成威胁,产生深远影响。确定流域生态流量,对河流生态的恢复和保护工作日益紧迫和必要^[3-4]。

鄱阳湖是中国最大的淡水湖,是长江水系及其生态系统的重要组成部分^[5-6]。汇入鄱阳湖的河流主要包括赣江、抚河、信江、饶河、修水五大水系,五河入湖水量的变化对鄱阳湖的水文特征影响巨大,径流量的剧烈波动还会引发洪旱灾害。近年来,由于鄱阳湖流域水库群等工程设施的修建及对水资源的开发利用导致水文条件发生变化,并对河流生态系统的健康发展造成一定影响^[7-8]。据统计,流域内大型水库26座,集水面积 $7.95 \times 10^4 \text{ km}^2$,累计总库容量达 $171 \times 10^8 \text{ m}^3$;中型水库

206座,集水面积 $2.545 \times 10^4 \text{ km}^2$,累计总库容量达 $47.036 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水库大坝的运行使流量变化不再取决于季节性降水,天然状态下原有的极值流量、水温和输沙率等改变,造成河流生境发生显著变化。研究表明鄱阳湖近年来出现的极端水文气象事件大量水利工程的修建及运行有一定关系^[9]。信江是鄱阳湖流域五大河流之一,又是一个易发生洪涝灾害的地区^[10]。为在时间上对水量进行再分配,便于工农业生产,同时为了减轻洪涝灾害,流域修建大量水库,其中大型水库3座,中型水库17座,增加了流域水资源的利用效率,但是水库运行也会影响流域生态系统健康^[11]。已有研究多集中在水利工程的调度运行及效益分析的介绍,定性阐述其对流域生态水文的影响,缺乏定量研究^[12]。

正确理解水利工程对河流水文条件和生态系统的影响,是实现流域人水和谐的关键。有关学者尝试运用多种方法评估河流生态水文变化特征,其中Richter等^[13-14]建立的变动范围法(Range of Variability Approach,简称RVA)创立了一种评估河流生态水文变化的指标体系,被广泛用于评价水利工程等人类活动对河流水文情

收稿日期:2015-01-23

基金项目:鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金资助项目(ZK2014003);江西省重大生态安全问题监控协同创新中心资助项目(JXS-EW-00);江西师范大学青年成长基金资助项目(6035)

作者简介:刘贵花(1984-),女,山东菏泽人,博士,从事水文水资源研究。E-mail:yafeng9918@163.com

通讯作者:齐述华(1973-),男,教授,博士,从事遥感技术在生态、水文、资源与环境等方面的应用研究。E-mail:qishuhua11@163.com

势影响程度以及河流生态恢复研究,确定河流管理年度目标^[15-18]。本文拟采用RVA法评估,分析信江上游的界牌水利枢纽运行对信江下游水文条件及生态系统的影响,为分析信江流域乃至鄱阳湖流域水资源管理和生态保护提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

信江是鄱阳湖的主要支流之一,流域面积17 599 km²,地处亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛,多年平均降雨量为1 815mm,上半年雨多易涝,下半年雨少易旱,4~6月降雨量约占全年降雨量的50%,7~9月降雨约占18%,流域多年平均蒸发量为1 161 mm。信江主河道长359 km²,主要支流有丰溪河、铅山河、白塔河等,梅港水文站位于信江下游,控制的集水面积为15 535km²。新中国成立以后,随着经济建设的发展,流域内修建了大量以防洪、治涝、灌溉、供水、发电、航运、水利血防、水土保持等为目的的水利工程设施。目前信江流域有大型水库3座,中型水库17座,小型水库1 200多座。其中界牌枢纽位于江西省鹰潭市以下1 215km处,距离梅港水文站19.8km,控制流域面积为12 277km²,多年平均流量为440m³/s,是信江干流最大的以航运为主、兼有发电、灌溉等综合效益的工程。该工程于1992年底开工,1997年7月主体工程竣工,2002年8月18日正式下闸蓄水。水库的调度运行显著改变了河流径流的时间分配特征。

1.2 研究方法

1.2.1 变动范围法(RVA)

RVA(Range of Variability Approach)法是Richter

等提出的,该方法选取反映天然状况或受人类影响较小的径流资料定义自然流量的变化范围,从流量、时间、频率、延时和变化率等5个方面33个水文指标对河流水文特征进行描述^[19-20](表1)。通常以各指标的平均值、标准差或以频率为75%和25%作为各个指标的上下限,称为RVA目标。Poff研究认为如果数据时间序列大于20年,就能基本消除年际气候变化等因素对水文指标计算结果的影响。通过对比不同时间的河流水文条件,揭示水利工程建设等人类活动对河流流量的影响。其中以频率75%和25%作为各指标的上下限较为常用^[21-22],本文选择该方法计算水文指标的改变度。

RVA法的操作步骤为:(1)首先计算水利工程建设前未受干扰的33个水文指标;(2)根据步骤(1),确定各个水文参数的RVA目标;(3)计算水利工程影响后的日流量数据的33个水文指标;(4)根据步骤(2)(3)的结果,评价2001年前后人类活动对河流水文情势的影响程度。

1.2.2 水文改变度的计算

采用Richter等提出的水文改变度公式:

$$D_i = \frac{N_i - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 为第*i*个水文指标改变度; N_i 为第*i*个水文指标变异后的径流总年数落在目标范围内的年数; N_e 为预期年数,即变异后预期落在目标范围内的年数, $N_e = rN_i$,其中*r*为受干扰前水文指标落入RVA目标内的比例,本文以各水文指标的75%和25%作为RVA目标,则*r*=50%,而 N_i 为受干扰后径流观测年数。

为将评价标准 D_i 量化,Richter等建议 $0\% \leq |D_i| \leq$

表1 IHA指标参数及其生态影响

Table1 The IHA Parameters and their ecosystem influence

IHA 指标	参数(33个)	对生态的影响
月均水量	各月流量均值或中值 (12个参数)	(1)满足水生生物栖息地需水;(2)植被土壤需水;(3)陆生生物需水要求;(4)动物迁徙;(5)对水文光合作用的影响
年均极值	年均1、3、7、30、90d最小流量; 年均1、3、7、30、90d最大流量; 零流量日数;基流指数;7d最小流量/年均流量(12个参数)	(1)满足植被扩张;(2)生物体忍耐性平衡;(3)河渠地形构造;(4)培养自然栖息地物理条件;(5)河流和漫滩之间养份交换;(6)植物群落分布要求
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(2个参数)	(1)生物繁衍;(2)繁衍期栖息地环境;(3)物种进化需要;(4)鱼类洄游产卵
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个参数)	(1)植物所需土壤湿度的频率与尺度;(2)满足洪泛区与河流的泥沙运输、渠道结构、底层扰动等需要;(3)水鸟栖息地
流量变化率与频率	流量平均增加率;流量平均减少率;每年流量逆转次数(3个参数)	(1)植物干旱胁迫;(2)岛上、漫滩有机物沉积;(3)河滩低速生物的干旱胁迫

33%为低度改变, $33\% \leq |D_i| \leq 67\%$ 为中度改变, $67\% \leq |D_i| \leq 100\%$ 为高度改变。

采用整体改变度 D_o 综合评价流域生态水文特征的总体变化^[23], 将 33 个水文指标用一个公式联系起来, 对较大的 D_i 给予较大的权重, 使各个指标的 D_i 不太大, 表达流域水文特征的变化。

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

1.2.3 生态流量估算方法

研究认为正常水文特征值的变动范围不能超过天然可变范围(RVA 变化范围), 才能维持河流健康生态系统。目前计算生态流量的方法有很多^[24-25], 本文采用基于 RVA 法的生态流量估算方法^[15]:

$$S_{eco} = S_{ave} - (S_{上限} - S_{下限}) \quad (3)$$

式中: S_{eco} 为月均生态流量值; S_{ave} 为月均流量均值; $S_{上限}$ 、 $S_{下限}$ 分别为 RVA 上限和下限阈值。生态流量值是为了维护河流生态系统平衡的最小的水流量。

2 结果与分析

2.1 水库建设对河流流量的影响

根据界牌水利枢纽的下闸蓄水时间, 分别分析建库前(1953~2001)和建库后(2002~2010)的日径流变化特征(图 1), 建库前日均径流为 $567.03\text{m}^3/\text{s}$, 建库后为 $540.49\text{m}^3/\text{s}$, 减少 4.68%, 表明界牌水库的运行日径流显著下降; 分析建库前后的降水量变化, 两时段分别为 4.31mm 和 4.13mm, 减少 4.18%。可知径流受降雨等气候因素及人为因素的双重影响, 尤其建库后水库修建等人为因素的影响也不容忽视。

2.2 RVA 水文指标计算结果

根据界牌枢纽运行时间将梅港站径流分为 1953~

2001 和 2002~2010 两个阶段, 即: 自然状态河流和人工干扰状态河流。利用变动范围法(RVA)计算梅港 IHA(Indicators of Hydrologic Alteration), 其水文参数计算结果见表 2、表 3 和表 4, 并由(2)式计算水文指标变化对生态环境的综合影响程度。

2.2.1 月平均流量

由表 2 可以看出, 建库后月均径流变化显著。1~2 月、6~8 月五个月的径流发生中度改变, 其余月份发生低度改变。其中 8 月份径流均值改变度最大($D=-0.62$), 1 月份次之($D=0.54$)。1 月和 5 月的径流最小值有所减少, 其余月份均增加, 表明建库后增加了信江下游河道基流; 1~2 月、8 月、10~12 月的径流最大值有所增加, 其余月份有所减少; 1 月、3~5 月、9~10 月的离差系数减少, 其余月份均有所增加。建库前后, 月最小流量值整体呈上升趋势(1 月、5 月除外), 其中 4 月份流量最小值从 $501.5\text{m}^3/\text{s}$ 增加到 $1785.0\text{m}^3/\text{s}$, 增加 256%, 8 月份次之, 增加率为 161%, 此外 3 月、6 月、9~10 月流量最小值增加幅度均较大; 而月最大流量变化不明显, 3~7 月、9 月流量最大值有所减少, 其余月份有所增加, 且 1 月、2 月径流最大值增幅较大, 分别为 72% 和 74%。表明水库运行削减了洪水期流量, 增加了枯水期径流。

2.2.2 年极端值变化

分析年均最小流量改变度, 年均 1d 和 3d 最小流量水文改变度为中度改变($D=-0.36$), 其余为低度改变。分析年均最大流量改变度, 年均 30d 最大流量水文改变度为低度改变。建库前后, 年均最小流量最小值均呈增加趋势。年均 7d 最大流量的最小值由 $2829\text{m}^3/\text{s}$ 增加到 $5953\text{m}^3/\text{s}$, 增加幅度最大, 为 98%, 其次为年均 1d 最大流量。分析年均极值最大值,

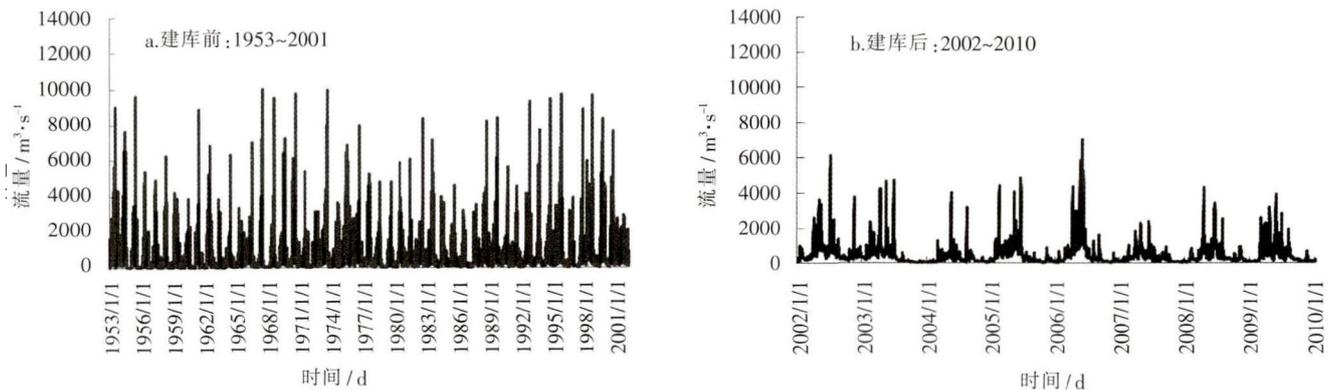


图 1 梅港站建库前后日均径流量变化特征(a: 建库前, b: 建库后)

Fig. 1 The change characteristics of the daily runoff at the Meigang station during 1953-2010

表2 信江梅港站月均流量的RVA分析

Table2 Statistical analysis of the monthly runoff at the Meigang station of the Xinjiang River

非参数 统计 参数	建库前:1953~2001				建库后:2002~2010				RVA 范围		水文 改变度 (D_i)
	均值	离差 系数	范围		均值	离差 系数	范围		低值	高值	
			最小值	最大值			最小值	最大值			
1月流量	528.00	0.95	290.00	2010.00	682.00	0.44	288.00	3460.00	429.90	768.80	0.54
2月流量	934.00	0.54	270.00	2300.00	1140.00	0.89	388.00	4005.00	678.40	1055.00	-0.49
3月流量	1670.00	0.84	433.00	6010.00	1950.00	0.65	753.00	5820.00	1183.00	2221.00	0.15
4月流量	3065.00	0.72	501.50	8555.00	3355.00	0.38	1785.00	6910.00	2377.00	3599.00	0.15
5月流量	3860.00	0.75	1760.00	9540.00	3230.00	0.54	1130.00	7310.00	3332.00	4970.00	0.03
6月流量	3660.00	0.65	907.50	8610.00	3975.00	0.68	1725.00	7060.00	3053.00	4749.00	0.03
7月流量	1520.00	0.78	540.00	5390.00	2380.00	0.83	680.00	4520.00	1164.00	2056.00	-0.49
8月流量	1080.00	0.53	331.00	3220.00	1540.00	0.70	863.00	4680.00	902.00	1222.00	-0.62
9月流量	915.50	0.81	327.00	6790.00	1390.00	0.47	715.50	3640.00	765.90	1164.00	-0.36
10月流量	783.00	0.75	261.00	2330.00	926.00	0.61	513.00	2360.00	610.80	1006.00	0.28
11月流量	616.50	0.84	326.50	1925.00	743.50	0.85	448.00	2770.00	536.70	980.60	0.28
12月流量	508.00	0.70	234.00	1840.00	688.00	0.87	393.00	2380.00	411.20	659.20	0.15

表3 信江梅港站年均流量极值的RVA分析

Table3 Statistical analysis of the annual extreme runoff at the Meigang station of the Xinjiang River

非参数 统计 参数	建库前:1953~2001				建库后:2002~2010				RVA 范围		水文 改变度 (D_i)
	均值	离差 系数	范围		均值	离差 系数	范围		低值	高值	
			最小值	最大值			最小值	最大值			
年均 1d 最小流量	318.00	0.54	179.00	618.00	428.00	0.34	265.00	611.00	285.60	375.00	-0.36
年均 3d 最小流量	325.00	0.53	188.00	627.30	441.70	0.34	267.30	621.30	291.80	380.90	-0.36
年均 7d 最小流量	344.30	0.51	191.90	659.00	457.70	0.36	270.70	645.40	298.90	396.70	-0.10
年均 30d 最小流量	380.20	0.50	237.10	941.60	591.50	0.37	299.20	780.10	339.30	485.90	-0.23
年均 90d 最小流量	647.10	0.82	300.40	2015.00	901.90	0.45	482.30	1341.00	514.70	797.70	0.03
年均 1d 最大流量	11900.0	0.50	3500.0	20100.0	11300.0	0.43	6120.0	21100.0	8669.0	13550.0	0.41
年均 3d 最大流量	10970.0	0.53	3327.0	19370.0	10700.0	0.44	5727.0	19900.0	7999.0	13240.0	0.67
年均 7d 最大流量	9319.00	0.62	2829.00	16930.00	9103.00	0.47	5593.00	18760.00	7241.00	11360.00	0.41
年均 30d 最大流量	6821.00	0.47	2423.00	11810.00	5631.00	0.58	3148.00	9111.00	5135.00	7812.00	-0.10
年均 90d 最大流量	4401.00	0.36	1558.00	8407.00	4751.00	0.40	2659.00	7572.00	3892.00	5046.00	-0.49

表明年均极值最小流量均呈减少趋势; 年均 30d、90d 最大流量呈减少趋势, 其余呈增加趋势, 但变化趋势均不明显, 因此最大值变化不大。

2.2.3 年极值出现时间

建库前, 年最大流量出现的平均时间范围为第 83d 到第 225d, 为中度改变; 建库后, 其出现平均时间范围为第 71d 到第 219d, 表明建库后流域洪水期提前 (表 4)。

2.2.4 高低流量发生频率及延时

由表 4 可见, 低流量发生次数变化不大, 但是平均延时时间缩短, 由建库前 2~126d 变为建库后 2~59d; 高流量发生次数及平均延时变化均不显著, 平均延时

由 3~22d 变为 4~29d, 呈轻微增加趋势。分析水文改变度, 低流量发生次数及高流量平均延时均为高度改变 ($D=0.67$)。

2.2.5 流量的改变率及频率

由表 4 看出, 流量的平均减少率有所增加, 改变度为 -0.58, 属于中度改变; 流量的平均增加率基本不变, 属于低度改变; 流量的逆转次数变化度为 -0.36, 属中度改变。

2.2.6 信江流域水文指标综合改变度

根据式(2)计算表 1 中的各水文指标的改变度, 求得水文综合改变度为 0.51, 为中度改变。表明建库后, 信江下游的生态水文指标发生显著改变。

表4 信江梅港站多年径流量的变化特征统计分析表

Table4 Statistical analysis of the variation features of the annual runoff at on the Meigang station of the Xinjiang River

非参数 统计 参数	建库前:1953~2001				建库后:2002~2010				RVA 范围		水文 改变度 (D_i)
	均值	离差 系数	范围		均值	离差 系数	范围		低值	高值	
			最小值	最大值			最小值	最大值			
零流量次数	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
基流指数	0.18	0.40	0.13	0.32	0.21	0.41	0.13	0.29	0.16	0.20	-0.23
年最小流量出现时间	10.00	0.16	1.00	366.00	5.00	0.11	1.00	366.00	31.40	291.30	-0.36
年最大流量出现时间	154.00	0.12	83.00	225.00	168.00	0.09	71.00	219.00	136.60	172.20	0.28
低流量发生次数	4.00	1.25	0.00	9.00	3.00	0.83	1.00	7.00	2.88	6.00	0.67
低流量平均延时	10.25	1.17	2.00	126.00	8.00	1.41	2.00	59.00	8.28	16.90	-0.17
高流量发生次数	6.00	0.50	3.00	11.00	8.00	0.38	3.00	12.00	5.00	8.00	-0.32
高流量平均延时	6.50	0.85	3.00	22.00	8.00	0.44	4.00	29.00	5.94	9.00	0.67
流量平均增加率	108.00	0.71	40.00	260.00	100.00	0.67	53.00	270.00	77.48	120.40	-0.10
流量平均减少率	-70.00	-0.43	-210.00	-34.00	-100.00	-0.51	-170.00	-40.00	-80.00	-59.76	-0.58
径流逆转次数	78.00	0.17	62.00	91.00	84.00	0.16	63.00	104.00	72.88	80.24	-0.36

2.3 生态流量及可调用水量

根据公式(3)计算信江流域界牌枢纽下游梅港站各月生态流量值(图 2a),可知梅港站年内 12 个月的生态流量值小于实测流量均值,表明梅港站流量变动幅度小于河流流量自然变化;2 月、7~9 月、12 月的生态流量值大于 RVA 下限而小于 RVA 上限,1 月、3~6 月、10~11 月的生态流量值均小于 RVA 下限,表明梅港站冬季和夏季流量在丰水年能保证生态流量需求而枯水年不能满足生态流量需求,春季和夏季生态流量值能够保持河流基本且稳定的流量。

根据前文计算的生态流量计算梅港站月均可调用水量(图 2b),可知梅港站年可调水量为 $23.7 \times 10^9 m^3$,可调用水量主要集中在 3~7 月份。结合前面计算的月均生态流量,建议增大界牌枢纽在夏季和冬季的下泄水量,以便满足梅港站下游流域河流生态蓄水量。

3 结论

本文基于信江流域梅港站 1953~2010 年日径流资料,根据距离梅港站上游 19.8 km 处的界牌枢纽的运行时间将径流分为两个阶段:建库前流量(1953~2001)和建库后流量(2002~2010),分析大型水库的建设对流域生态水文指标的影响。根据变动范围法(RVA)计算 2001 年前的 33 个水文因子的 25%~75% 区间范围作为生态水文目标,进而统计 2001 年后径流序列的各指标值的背离程度,结果表明,33 个水文指标中,22 个属于中度或高度改变,11 个属于低度改变,求得其水文综合改变度为中度改变($D_i=0.51$)。

基于 RVA 法计算梅港站生态流量及可调用水量,表明流域生态流量值均在 RVA 阈值之内,基本能够保持河流基本且稳定的流量,但在 2 月、7~9 月及 12

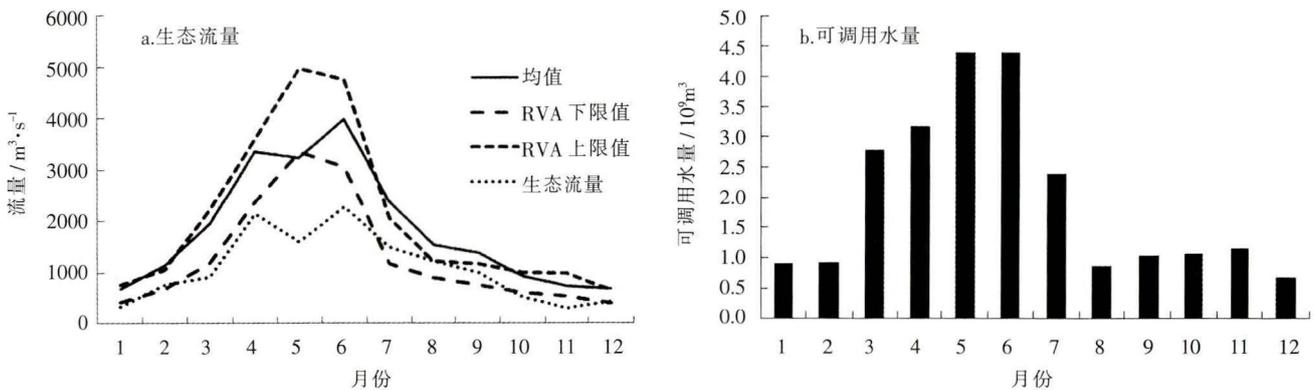


图 2 信江流域梅港站月生态流量及可调用水量(a. 生态流量;b. 可调用水量)

Fig.2 The monthly ecological flow and transferable water quantity at the Meigang station of the Xinjiang River

月河道流量偏小,可以适当增大界牌枢纽下泄水量,增加其生态流量,以免对该水库下游的河段生态系统构成威胁。

参考文献:

- [1] Richter B D, Mathews R, Harrison D L, et al. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity [J]. *Ecological Applications*, 2003,13(1):206–224.
- [2] Nel J L, Turak E, Linke S, et al. Integration of environmental flow assessment and freshwater conservation planning: a new era in catchment management [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2011,62(3):290–299.
- [3] Ruth M, Brain D R. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting [J]. *Journal of American Water Resources Association*, 2007,43(6):1400–1413.
- [4] 宋兰兰,陆桂华,刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. *水利学报*, 2006,37(11):1336–1341. (SONG Lanlan, LU Guihua, LIU Ling. Estimation of instream flow based on hydrological indexes [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006,37(11):1336–1341. (in Chinese))
- [5] 《鄱阳湖研究》编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. (Editorial Committee of Study on Poyang Lake. Study on Poyang Lake [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1988. (in Chinese))
- [6] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究 [J]. *生态学报*, 2004,24(7):1480–1485. (CUI Lijuan, ZHAO Xinsheng. Researches on the emergy analysis of Poyanghu wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004,24(7):1480–1485. (in Chinese))
- [7] Ye X C, Zhang Q, Liu J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang lake catchment, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,494:83–95.
- [8] 徐德龙,熊明,张晶. 鄱阳湖水文特性分析[J]. *人民长江*, 2001,32(2): 21–22. (XU Delong, XIONG Ming, ZHANG Jing. Analysis on hydrologic characteristics of Poyang lake [J]. *Yangtze River*, 2001,32(2):21–22. (in Chinese))
- [9] 郭华,Hu Qi,张奇,等. 鄱阳湖流域水文变化特征成因及旱涝规律[J]. *地理学报*, 2012,67(5):699–709. (GUO Hua, HU Qi, ZHANG Qi, et al. Annual variations in climatic and hydrological processes and related flood and drought occurrences in the Poyang lake basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(5):699–709. (in Chinese))
- [10] 陈廷比, 徐立平. 信江流域洪涝干旱灾害成因分析及防御对策[J]. *江西水利科技*, 2005,31(2):67–70. (CHEN Tingbi, XU Liping. The reason analysis and the control countermeasure of the flood and drought disaster of Xinjiang basin [J]. *Jiangxi Hydraulic Science and Technology*, 2005,31(2):67–70. (in Chinese))
- [11] 刘元波,张奇,刘健,等. 鄱阳湖流域气候水文过程及水环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (LIU Yuanbo, ZHANG Qi, LIU Jian, et al. Climatic, Hydrologic and Environmental Change in Poyang Lake Basin [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [12] 李华勇,祝南. 信江界牌航电枢纽水库调度及其效益分析[J]. *小水电*, 2008,(1):15–17. (LI Huayong, ZHU Nan. Reservoir operation and benefit analyse of Jiepai hydropower junction of Xinjiang river [J]. *Mini and Micro Hydropower*, 2008,(1):15–17. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need [J]. *Freshwater Biology*, 1997,37(1):231–249.
- [15] 苏畅,刘苏峡,莫兴国,等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. *生态环境学报*, 2010,19(5):1151–1155. (SU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010,19(5):1151–1155. (in Chinese))
- [16] 黄速艇,陈森林,艾学山,等. 基于流量分级的生态流量过程线确定方法——以东江水库为例 [J]. *水资源与水工程学报*, 2014,25(5): 22–27. (HUANG Suting, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Deterministic method of ecological flow process line based on flow classification: a case study in Dongjiang reservoir [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014,25(5):22–27. (in Chinese))
- [17] 杜河清, 王月华, 高龙华, 等. 水库对东江若干河段水文情势的影响[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011,44(4):466–470. (DU Heqing, WANG Yuehua, GAO Longhua, et al. Effects of reservoirs on hydrological regimes in several reaches of East river [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011,44(4):466–470. (in Chinese))
- [18] 黎云云,畅建霞,涂欢,等. 黄河干流控制性梯级水库联合运行对下游水文情势的影响[J]. *资源科学*, 2014,36(6):1183–1190. (LI Yunyun, CHANG Jianxia, TU Huan, et al. Impact of controlling cascade reservoir joint operation on hydrologic regimes in the lower Yellow River [J]. *Resources Science*, 2014,36(6):1183–1190. (in Chinese))
- [19] Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 Users Manual [M]. The Nature Conservancy, 2009.
- [20] Richter B D. How much water does a river need [J]. *Freshwater Biology*, 1997,32(2):231–249.
- [21] Francis J M, Keith H N. Changes in hydrologic regime by dams [J]. *Geomorphology*, 2005,71:61–78.
- [22] Yang T, Zhang Q, Chen Y D, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow river, China [J]. *Hydrological Processes*, 2008,22:3829–3843.
- [23] Richter B D, Thomas G A. Restoring environmental flows by modifying dam operations [J]. *Ecology and Society*, 2007,12(1):173–175.
- [24] 刘昌明,门宝辉,宋进喜. 河道内生态需水估算的生态水力半径法[J]. *自然科学进展*, 2007,17(1):42–48. (LIU Changming, MEN Baohui, SONG Jinxi. The ecological hydraulic radius approach for

- evaluating instream ecological flow [J]. *Progress in Natural Science*, 2007,17(1):42–48. (in Chinese))
- [25] 刘苏峡,莫兴国,夏军,等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较[J]. *地理学报*, 2006,61(3):273–281. (LIU Suxia, MO Xingguo, XIA Jun, et al. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: curvature technique or slope technique[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006,61(3):273–281. (in Chinese))

Assessment of Hydrological Regime Alteration and Ecological Flow at Meigang Station of Xinjiang River

LIU Guihua^{1,2}, ZHU Jingxuan², XIONG Mengya², WANG Dian², QI Shuhua^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*; 2. *School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*)

Abstract: The daily discharge at the Meigang Station of the Xinjiang River from 1953 to 2010 was selected and divided into two stages namely the original watershed (1953–2001) and the drainage with human impact (2002–2010), based on the running time of the Jiepai Reservoir. The range of variability approach (RVA) which was proposed by Richer was used to study hydrological situation change. Then, the mean value and the difference values of RVA targets were used for estimating monthly ecological flow and transferable water at the Meigang station of the Xinjiang River. The results of ranked median degrees of 33 hydrologic alteration indicators indicate that about 22 indicators had highest or higher change and 11 indicators changed a little. The impacts of the Jiepai Reservoir on the hydrologic alteration is relatively significant with a mean hydrologic alterations (HA) value of 0.51. The values of ecological flow at the Meigang Station are within the RVA threshold that can basically maintain steady river flow to safeguarding river ecological security. However, the values of ecological flow on five months including Feb., Jul., Aug., Sep. and Dec. exceeded the lower limit of RVA value. Measures should be implemented such as increasing the amount of water discharged from reservoir in order to reduce the threat to downstream river ecosystems.

Key words: indicator of hydrological alteration; range of variability approach; hydrological regime; Xinjiang River Basin

(上接第 14 页)

Probabilistic Ensemble Precipitation Forecasting Based on Bayesian Model Averaging for Daduhe River Basin

ZHONG Yixuan¹, WU Yuzhen^{2,3}, WANG Dagang^{2,3}, KONG Dongdong²

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 2. *Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 501275, China*; 3. *Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Guangzhou 501275, China*)

Abstract: Bayesian Model Averaging (BMA) probability forecast models for the Daduhe River Basin was established by calibrating model parameters with precipitation ensemble forecasts and gauge observations. The ensemble forecasts used in this study consists of five single-center predictions from the following five agencies: the China Meteorological Administration (CMA), the Canadian Meteorological Center (CMC), the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the United States National Center for Environmental Prediction (NCEP) and the United Kingdom Meteorological Office (UKMO) in the THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE). Evaluation based on continuous ranked probability score (CRPS), mean absolute error (MAE) and Brier Score (BS) shows that the BMA models are better than the original probability forecast models. The averages of CRPS and MAE of the BMA models decrease by 31.6% and 23.9%, respectively. By analyzing BMA model weights of each single-center prediction, we find that ECMWF contributes most for the models, which means ECMWF does best in precipitation forecasts in the Daduhe basin. The BMA models for the Daduhe basin does not perform well for the prediction of extreme precipitation and usually underestimate the precipitation amount.

Key words: Daduhe River Basin; precipitation probabilistic forecast; BMA; ensemble forecast