

基于概率加权 FDC 法的河流生态需水量计算

龙 凡^{1,2}, 梅亚东^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 基于河流流量过程的年内和年际变化特性, 提出了一种计算河道内生态需水量的概率加权 FDC(流量历时曲线)方法。该方法基于年均流量系列和逐月月均流量系列的特定频率, 将年均流量系列和逐月月均流量系列划分为丰、平、枯组, 通过建立年月丰枯遭遇的 Copula 联合分布函数, 求得不同典型年下各月丰平枯的条件概率, 将其作为概率权重, 得到不同典型年生态需水过程的计算公式, 改进了 FDC 法, 计算出了丰、平、枯典型年的年内生态需水过程。以屏山站为例, 将计算结果与 Tennant 法、逐月最小生态径流法、年内展布法和改进 FDC 法进行了对比分析。计算结果表明: 由此方法得到的生态流量在 Tennant 法评价体系中, 能很好的满足河道的生态需水要求, 且较好地体现了河流径流的年内及年际变化过程, 符合实际情况。

关键词: 河道生态需水; 年内年际变化; 流量历时曲线; 概率加权; Copula 函数; 屏山站

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0852(2017)04-0001-05

1 研究背景

随着人类社会的不断发展, 对水资源的需求也日益加剧。大规模的开发利用, 对原始的河流生态系统造成了不小的影响, 如何维持或修复河流生态系统的健康, 是当前的一个重要挑战^[1]。河流水文过程的年内及年际变化, 对于河流生态系统的健康有着决定性的作用^[2], 这是长期的河流演变过程中, 河流中的生物群落所适应的生存环境。因而保护河流生态系统的健康, 就需要维护河流径流过程的变化特性, 确定出有利于河流生态系统保持稳定的生态流量过程。

目前, 针对生态需水的研究, 其方法主要分为 4 大类: 利用历史水文资料的水文学方法(Tennant 法^[3]、逐月最小生态径流法等)、依据河道断面水力性质的水力学方法(湿周法^[4]、R2CROSS 法等)、通过分析生境适宜性的栖息地模拟法(IFIM 法^[5]等)、综合考虑各因素的整体法(BBM 法^[6]等), 据不完全统计, 相关方法总数已超过 200 种。这些方法都具有一定的生态基础, 也各有优缺点, 但由于河流生态需水问题的复杂性, 目前并没

有统一的标准, 生态需水的计算方法仍在不断更新和发展中。

在这 4 类方法中, 水文学方法, 由于易获得水文数据资料, 且具有较强的通用性及不需要进行野外观测等优势, 在全世界范围内都得到了广泛的推广和应用。就目前来看, 常见的水文学方法中, 有很大一部分未体现生态需水量的年内变化, 如最小月平均法; 还有一部分只考虑了年内变化, 未考虑年际变化, 如逐月最小生态径流算法; 仅有极少数的方法考虑了年内和年际间的变化, 如李昌文等提出的改进 FDC 法^[7]。同时, 在这些方法中, 有的并不具有普适性, 如年内展布算法^[8], 此方法不适用于强季节性河流。

鉴于以上因素, 本文针对河流水文过程的年内及年际动态变化规律, 提出了一种能同时考虑河流径流年内年际特征并维持河流健康稳定的生态需水计算方法。

2 研究方法

2.1 方法思路

河流的水文过程是随时间和空间变化的, 就时间

收稿日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51479140); 国家自然科学基金重点项目(51239004)

作者简介: 龙凡(1993-), 男, 湖南衡阳人, 硕士生, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: fanlong@whu.edu.cn

而言,既有年内的时间变化,也有年际的时间变化,而河流的生态需水,是在特定时间和空间下受河流水文过程约束的,为实现河流生态系统诸多功能所需的水量^[8]。因此,河流的生态需水过程也是具有年内和年际变化规律的。

FDC(流量历时曲线)法,是基于各月的日流量历时曲线(将流量由大到小排序),一般选取累积频率为90%或95%所对应的流量 Q_p 作为生态流量^[9]。在文献[7]中,通过将各月划分为不同的来水等级,对各月不同来水等级内的日流量历时曲线,选取90%历时点对应的流量作为生态需水量,此方法相当于年内各月来水频率的重组,得到新的丰平枯典型年,在计算结果上,丰水年各月的生态需水一定是大于平水年和枯水年的。而实际上,年月间的丰枯是存在一定的“交叉”关系的,不同典型年各月流量的丰枯概率是有差异的,因而,不应简单地认为年月径流是同频的。

Copula函数可以构造多变量的联合分布,分析各变量间的相关关系^[10],目前已广泛应用于水文分析计算中。本文利用Copula函数建立年来水概率的联合分布,并求出在丰平枯不同典型年下,各月来水为丰平枯的条件概率。将计算得到的条件概率,作为权重,与FDC法划分的生态流量相结合,得到不同典型年下各月的生态需水过程。

2.2 计算步骤

Copula函数是一种“连接函数”,可以将两个或多个随机变量的边缘分布连接起来,得到联合分布。在水文分析计算中,常用的二维Copula函数有:Clayton、Frank、Gumbel、Gaussian和Student $t^{[11]}$ 。

对于随机变量 $X、Y$,其边缘分布函数分别为 $F_x、F_y$,若 $F_x、F_y$ 连续,则根据Sklar定理:存在唯一的函数 $C_\theta(u,v)$,使:

$$F(x,y)=C_\theta(F_x(x),F_y(y)) \quad (1)$$

式中: $F(x,y)$ 为变量 $X、Y$ 的联合分布; $C_\theta(u,v)$ 为Copula函数; θ 为待定参数。

计算时,首先需要计算变量间的相关系数 τ ,即Kendall秩相关系数:

$$\tau = \frac{2}{n(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}[(x_i-x_j)(y_i-y_j)] \quad (2)$$

式中: (x_i,y_j) 为测点据; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数,当 $(x_i-x_j)(y_i-y_j)>0$ 时, $\text{sign}=1$;当 $(x_i-x_j)(y_i-y_j)<0$ 时, $\text{sign}=-1$;当 $(x_i-x_j)(y_i-y_j)=0$ 时, $\text{sign}=0$; n 为资料系列长度。 θ 则根据 θ 与 τ 之间的关系进行计算,例如,在Clayton中,

$\tau=\theta/(\theta+1)$;其余各Copula函数中 θ 的计算,可参见文献[11]。

在我国,对于水文变量,采用皮尔逊型分布曲线,其概率密度函数为:

$$F(x)=\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(x-a_0)^{\alpha-1}e^{-\beta(x-a_0)} \quad (3)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ 是 α 的伽马函数; $\alpha、\beta、a_0$ 分别为P-型分布曲线的形状、尺度和位置参数。

本文利用五种常用Copula函数建立了年月二维联合分布,通过比较理论与经验概率的接近程度,利用均方根误差(RMSE)最小原则,选择合适的联合分布函数,RMSE的计算公式为:

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (4)$$

式中: d_i 为经验概率与理论概率的差值。

计算了年月丰枯概率的联合分布后,利用条件概率的计算公式,便可计算得到不同典型年下各月丰平枯的条件概率:

$$P(A_{ij}|B_k)=\frac{P(A_{ij}B_k)}{P(B_k)} \quad (5)$$

式中: $i=1,2,\dots,12$,表示12个月份; $k=1,2,3$,表示丰平枯3种年均来水频率; $j=1,2,3$,表示丰平枯3种月均来水频率; $P(B_k)$ 表示第 k 种年型的概率; $P(A_{ij}B_k)$ 为第 i 月第 k 种年型第 j 种月均来水频率的联合分布概率。

通过上述计算,从理论上直观地反映出不同年均来水保证率下,各月不同来水的概率情况,同时也体现了径流过程的年内年际变化。

按照现有的生态需水选取研究成果,结合本文提出的概率加权思想,本文认为,不同年均来水保证率下,各月的生态需水计算公式为:

$$Q_{ik}=P(A_{i1}|B_k)*Q_{i190\%}+P(A_{i2}|B_k)*Q_{i290\%}+P(A_{i3}|B_k)*Q_{i390\%} \quad (6)$$

式中: $Q_{i190\%}$ 为第 i 月来水频率为丰水组的90%日流量历时点流量值; $Q_{i290\%}$ 为第 i 月来水频率为平水组的90%日流量历时点流量值; $Q_{i390\%}$ 为第 i 月来水频率为枯水组的90%日流量历时点流量值。

3 实例研究

本文以金沙江下游河段为研究对象。根据《金沙江干流综合规划报告》,金沙江下游将建成四级电站,包括乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝。其中溪洛渡于2007

年完成截流,向家坝于 2008 年完成截流,其余两个电站目前还处于施工准备阶段。屏山站是金沙江下游的代表性控制断面,因此采用屏山站 1963~2007 年的日均流量系列资料,对河流的生态需水进行实例研究计算。

3.1 计算结果

本次计算时划分的丰平枯组分别按照:丰组:年均

流量的频率 $PN<25\%$, 月均流量的频率 $PY<25\%$;平组: $25\%\leq PN\leq 75\%$, $25\%\leq PY\leq 75\%$;枯组: $PN>75\%$, $PY>75\%$ 。

利用 Copula 函数建立了年来水概率的联合分布后,不同典型年各月的丰平枯概率计算结果分别见表 1~3。

表1 丰水年各月来水概率情况
Table1 The monthly conditional probabilities in the wet year

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
丰	0.3332	0.3964	0.3112	0.3428	0.3068	0.4476	0.4644	0.6768	0.6000	0.4692	0.6116	0.6824
平	0.5284	0.4772	0.5244	0.4908	0.4964	0.4592	0.4972	0.3148	0.3956	0.4948	0.3848	0.3172
枯	0.1384	0.1264	0.1644	0.1664	0.1968	0.0932	0.0384	0.0084	0.0044	0.0360	0.0036	0.0004

表2 平水年各月来水概率情况
Table2 The monthly conditional probabilities in the normal year

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
丰	0.2643	0.2386	0.2622	0.2454	0.2482	0.2296	0.2486	0.1574	0.1978	0.2474	0.1924	0.1586
平	0.5273	0.5228	0.5182	0.5094	0.5036	0.5406	0.6056	0.6854	0.7122	0.6090	0.7218	0.7782
枯	0.4448	0.2386	0.2196	0.2452	0.2482	0.2298	0.1458	0.1572	0.0900	0.1436	0.0858	0.0632

表3 枯水年各月来水概率情况
Table3 The monthly conditional probabilities in the dry year

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
丰	0.1384	0.1264	0.1644	0.1664	0.1968	0.0932	0.0384	0.0084	0.0044	0.0360	0.0036	0.0004
平	0.4168	0.4772	0.4392	0.4904	0.4964	0.4596	0.2916	0.3144	0.1800	0.2872	0.1716	0.1264
枯	0.4448	0.3964	0.3964	0.3432	0.3068	0.4472	0.6700	0.6772	0.8156	0.6768	0.8248	0.8732

从以上 3 个表格可以看出,屏山站在丰水年时,出现各月平水概率占比较大的现象;平水年时,各月为平水的概率占比明显大于其余两种情况;枯水年时,7~12 月出现了较高的年月枯水同步性,而在 1~6 月,则出现了枯水年与丰水、平水月较大概率的“交叉”现象。

利用式(6)计算得到的丰水年、平水年、枯水年的生态需水过程见图 1。

从图 1 可以发现,不同典型年在非汛期阶段,生态需水量较为接近,而在汛期阶段出现较明显的差异。由于研究对象所处河段在汛期的来水占一年总来水的比例远大于非汛期,因而汛期来水在不同典型年间的差异直接影响了生态需水过程的差异。

4 讨论与分析

4.1 与 Tennant 法的比较

Tennant 法是较为传统且经典的水文学方法,此方法提供了径流量和栖息地适宜程度的经验度量准则。按照金沙江主要鱼类的繁衍规律^[12-13],将一年划分为两个阶段,11 月~翌年 4 月(一般用水期)和 5~10 月(鱼类产卵期),不同典型年评价结果见表 4。

由表 4 可以看出,按照 Tennant 法的评价标准^[8],各典型年各月的生态流量占多年同期均值比均在 20%以上,即流量评价等级均处于“好”及以上,因此,本文提出的生态需水量计算方法能够满足河流生态功能的需求。

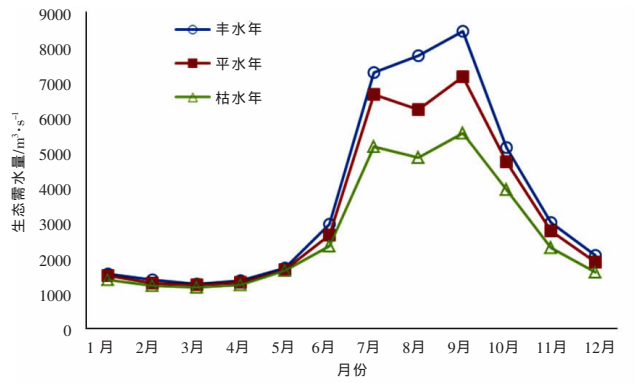


图 1 生态需水过程
Fig.1 The basic ecological flow process

表4 Tennant法评价结果
Table4 The evaluated results usingTennant method

月份	占多年同期均值比/%											
年型	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
丰水年	24.3	41.7	102.6	109.4	119.0	72.4	154.8	106.5	79.3	71.1	65.2	70.4
平水年	23.7	37.3	93.7	87.7	101.0	66.6	142.1	96.7	77.1	66.6	63.6	67.3
枯水年	23.1	33.1	72.9	68.4	78.1	55.6	117.2	82.4	71.3	62.5	59.5	64.2

4.2 与逐月最小生态流量法和年内展布法的比较

首先,选取了两种常用的能体现年内变化的生态需水方法:逐月最小生态流量法和年内展布法,比较结果见图2。

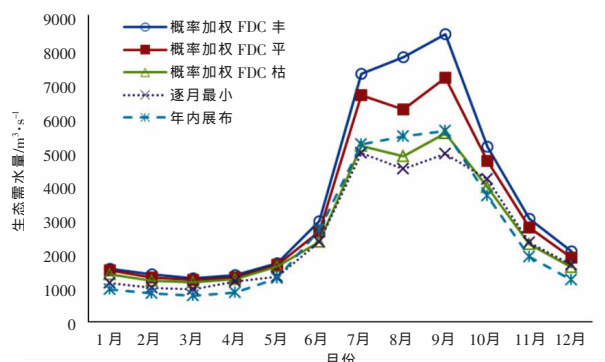


图2 不同方法计算的生态需水过程比较
Fig.2 Comparison of the basic ecological flow processes between the methods

从图2中,可以看出逐月最小和年内展布法计算的结果与概率加权FDC法计算的枯水年结果最为接近,这在一定程度上也说明了概率加权FDC法的正确性,同时也说明,生态流量的计算应该区分不同典型年,从而能够更加符合实际情况。

4.3 与改进FDC法的比较

本文引入概率权重的原因,在于说明河流在长系列观测条件下,所包含的年月丰枯遭遇间存在交叉关系以及发生交叉的可能性概率,这也是河流水文过程自身所包含的特有规律。将概率思想与FDC法结合,可以体现不同典型年生态流量的最常见情况,而最易发生的情况,能更好地反映河流历史径流的总体情况以及河流生态真正的需水情况。本文将文献[7]的方法称为改进FDC法,两种方法的对比情况见图3。

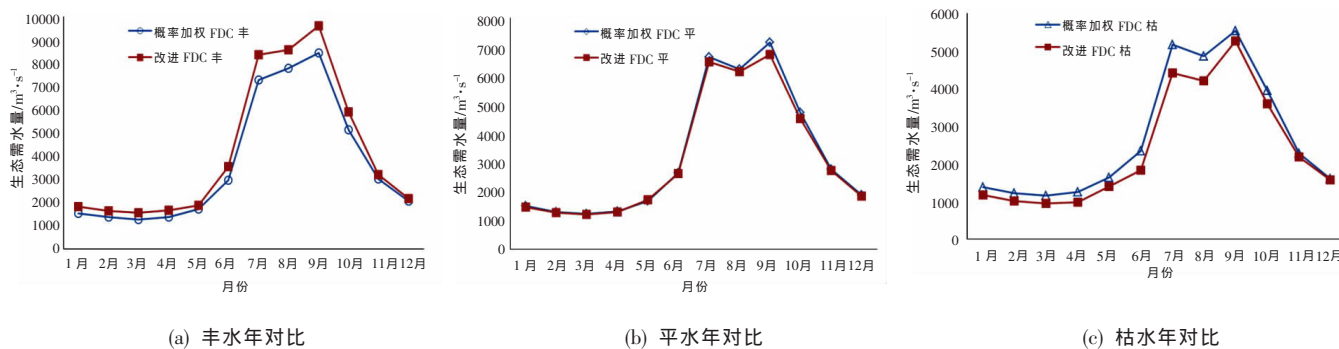


图3 概率加权FDC法与改进FDC法计算生态需水量结果对比

Fig.3 Comparison of the ecological flow demands between the two methods

从图3的3幅图可以看出,概率加权FDC法计算的丰水年各月的生态需水量小于改进FDC法;平水年差别不大,概率加权FDC法在7月、9月和10月三个月份稍大于改进FDC法;枯水年中,概率加权FDC法计算的结果是大于改进FDC法的。

从计算出的条件概率情况来看,丰水年下,各月份

中平水概率占有较大比重,因而使得最终的计算结果小于各月丰水组90%日流量历时点的流量值;平水年下,大多数月份中平水概率占比明显高于丰水和枯水,仅有少数几个月份丰水和枯水占比稍大,因而平水年的计算结果呈现与改进FDC法基本重合的现象;枯水年下,大多数月份出现丰水和平水概率占比之和

大于枯水的情况, 所以导致最终的结果大于枯水组 90%日流量历时点的流量值。

另外, 在文献[13]中提到, 屏山站中华鲟的主要产卵时期为 10 月份, 产卵期的特征流量为 $6\,700\sim 3\,500\text{m}^3/\text{s}$, 基于概率加权 FDC 法计算出的丰平枯典型年在 10 月份的生态流量分别为 $5\,134\,4\,729\,3\,947\text{m}^3/\text{s}$, 这也说明了本文所用方法计算的生态流量是合理的。

5 结论

本文提出的概率加权 FDC 计算方法是一种计算河道生态需水的水文学方法。此方法基于河流水文过程存在年内年际变化规律及年月丰枯遭遇相关性的原理, 利用 Copula 函数建立了年月间丰枯遭遇的联合分布概率函数, 并计算了不同典型年下各月来水为丰平枯的条件概率, 结合 FDC 法对于生态需水比例的选取原则, 计算出了丰、平、枯典型年下的生态需水过程。

概率加权 FDC 法具有简单可靠的计算原理, 计算时充分利用了河流的历史流量资料数据, 生态流量的计算中运用了日流量数据, 减少了月内极端流量值的影响; 利用条件概率作为权重能够较全面合理地反映径流过程的年内年际丰枯变化规律, 因而具有极强的推广适用性。

在金沙江下游屏山站的实例研究中, 与逐月最小生态流量法、年内展布法、改进 FDC 法进行了对比分析, 并利用 Tennant 法的评价标准进行了评价, 评价结果显示计算结果能很好地满足河道的生态需水要求, 同时也符合实际观测情况。因此, 表明本文提出的概率加权 FDC 法是具有合理性的, 符合河流的动态生态需水要求。

参考文献:

- [1] Palmer M A, Bernhardt E S. Hydroecology and river restoration: Ripe for research and synthesis [J]. Water Resources Research, 2006,42.
- [2] Poff N L, Zimmerman J. 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.
- [3] Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976,1(4):6–10.
- [4] Gippel G J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows[J]. Regulated Rivers:Research and Management, 1998,14(1):53–67.
- [5] Bovee K D, Lamb B L, Bartholow J M, et al. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology [R]. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD, 1998.
- [6] King J, Louw D. Instream flow assessments for regulated rivers in South Africa using the building block methodology [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 1998,1(2):109–124.
- [7] 李昌文, 康玲, 张松, 等. 一种计算多属性生态流量的改进 FDC 法[J]. 长江科学院院报, 2015,32 (11):1–6. (LI Changwen, KANG Ling, ZHANG Song, et al. A modified FDC method with multi-level ecological flow criteria[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(11):1–6. (in Chinese))
- [8] 潘扎荣, 阮晓红, 徐静. 河道基本生态需水的年内展布算法[J]. 水利学报, 2013,44 (1):119–126. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(1):119–126. (in Chinese))
- [9] 门宝辉, 林春坤, 李智飞, 等. 永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J]. 南水北调与水利科技, 2012,10(2):52–56. (MEN Baohui, LIN Chunkun, LI Zhifei, et al. Application of flow duration curve method in calculating instream minimum ecological water demand in Guanting gorge of Yongding river[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012,10 (2):52–56. (in Chinese))
- [10] 张忠波, 张双虎, 王浩. 基于 Copula 函数的三峡工程供水期丰枯遭遇分析[J]. 人民长江, 2012,43(3):5–8. (ZHANG Zhongbo, ZHANG Shuanghu, WANG Hao. Analysis of wetness-dryness encounter in TGP water supply period based on Copula function[J]. Yangtze River, 2012,43(3):5–8. (in Chinese))
- [11] 侯芸芸. 基于 Copula 函数的多变量洪水频率计算研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. (HOU Yunyun. Multivariate Flood Frequency Analysis Based on Copula Functions[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010. (in Chinese))
- [12] 段辛斌, 田辉伍, 高天珩, 等. 金沙江一期工程蓄水前长江上游产漂流性卵鱼类产卵场现状 [J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(8): 1359–1365. (DUAN Xinbin, TIAN Huiwu, GAO Tianheng, et al. Resources status of ichthyoplankton in the upper Yangtze river before the storage of Jinsha river first stage project[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(8):1359–1365. (in Chinese))
- [13] 陈永柏. 三峡水库运行影响中华鲟繁殖的生态水文学机制及其保护对策研究 [D]. 武汉: 中科院水生所, 2007. (CHEN Yongbo. Studies on the Influences of the Operation of the Three Gorges Dam on Reproduction of the Chinese Sturgeon, Acipenser Sinensis: the Ecohydrological Mechanism and Conservation Strategy [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))

(下转第 28 页)

不断提升模型模拟精度,充分发挥洪水预报的防洪减灾效益。

参考文献:

- [1] 宋星原,管怀民,苏志诚,等.半湿润地区洪水预报模型研究及应用[J].水文,2005,25(2):24-28.(SONG Xingyuan, GUAN Huaimin, SU Zhicheng, et al. Application and research on the model of flood forecasting for the semi-humid area [J]. Journal of China Hydrology, 2005, 25(2): 24-28. (in Chinese))
- [2] 陈玉林,韩家田.半干旱地区洪水预报的若干问题[J].水科学进展,2003,14(5):612-616.(CHEN Yulin, HAN Jiatian. Problem on flood forecasting in the semi-arid region [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5): 612-616. (in Chinese))
- [3] 刘金涛,宋慧卿,张行南,等.新安江模型理论研究的进展与探讨[J].水文,2014,34(1):1-6.(LIU Jintao, SONG Huiqing, ZHANG Xingnan, et al. A discussion on advances in theories of Xinanjiang model [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(1): 1-6. (in Chinese))
- [4] 包为民.格林-安普特下渗曲线的改进和应用[J].人民黄河,1993,(9):1-4.(BAO Weimin. Improvement and application of the

Green-Ampt infiltration curve [J]. Yellow River, 1999, (9): 1-4. (in Chinese))

- [5] 水利部水文局,长江水利委员会水文局.水文情报预报技术手册[M].北京:中国水利水电出版社,2010:423-428.(Hydrology Bureau of Ministry of Water Resource, Hydrology Bureau of Changjiang Water Resource Commission. Technical Handbook of Hydrological Information and Forecasting [M]. Beijing: China Water-Power Press, 2010: 423-428. (in Chinese))
- [6] 侯翔,汤元斌.基于BP神经网络的洪水预测研究[J].长江大学学报(自然科学版),2013,10(25):88-90.(HOU Xiang, TANG Yuanbin. Research of flood forecasting based on BP neural networks model [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science), 2013, 10(25): 88-90. (in Chinese))
- [7] 胡健伟,周玉良,金菊良.BP神经网络洪水预报模型在洪水预报系统中的应用[J].水文,2015,35(1):20-25.(HU Jianwei, ZHOU Yuliang, JIN Juliang. Flood forecasting model on BP neural networks and its application in flood forecasting systems [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(1): 20-25. (in Chinese))

Comparative Analysis of Different Flood Forecasting Models Used for Jumahe River Basin

ZHAO Lanlan¹, ZHU Bing¹, TANG Junlong²

(1. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The Jumahe River is one of the most important flood control areas in the Haihe River Basin, and it is difficult for flood forecasting. In this paper, the Xinanjiang Model, Modified Xinanjiang Model, rainfall flood model for Hebei Province and BP Neural Network Model were chosen to simulate the different historical floods occurred in the years of 1956, 1963 and 2012. The results show that the four kinds of flood models can be taken into use when the rain intensity is heavy and the rainfall duration is long; the relative errors of the peak flow simulation is less than 20%, and the accuracy of BP Neural Network Model is the best, all the models mentioned in this paper can be applied in arid and semi-arid regions.

Key words: hydrological forecasting; hydrological model; BP neural network model; rainfall flood model for Hebei Province; Jumahe River Basin

(上接第5页)

Using Probability-weighted FDC Method to Calculate Basic River Ecological Flow

LONG Fan^{1,2}, MEI Yadong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the intra-annual and inter-annual change characteristics of the river flow process, this paper put forward a probability-weighted FDC(flow-duration curve) method to calculate the stream basic ecological flow for the typically wet, normal and dry years. The probability is based on the historical data with the Copula function method. The approach was tested in the Jinshajiang River and the results were evaluated by the Tennant standard and compared with month-by-month minimum ecological runoff method, dynamic calculation method and modified FDC method. The results show that the stream ecological demand can be perfectly met. Besides, this approach is reasonable and reliable under the proof of experimental data.

Key words: river ecological flow demand; annual and inter-annual variation; flow-duration curve; probability weight; Copula function; Pingshan Hydrometry Station