

## 生物对河流流量的适宜性

张楠<sup>1,2,\*</sup>, 夏自强<sup>1,2</sup>, 江红<sup>3</sup>, 陆志华<sup>1,2</sup>, 黄峰<sup>1,2</sup>

(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. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

**摘要:**从流量、频率、历时、发生时间、变化率 5 个方面选取水文指标, 将描述生态流量的多个特征量转化成单一的综合指标, 利用综合指标值描述生物对河流流量适宜性程度, 并对长江中下游宜昌、汉口、大通水文控制站近 50a 来中华鲟、四大家鱼对河流流量适宜性程度进行了验证分析。结果表明, 以综合指标的方法反映了生物对河流流量适宜性程度是可行的, 体现了河流流量偏离河流适宜生态流量过程的程度, 这对于保证满足水生生物正常生活规律所需要的河道内流量过程具有重要的参考意义。

**关键词:**水文指标; 综合指标; 适宜性程度; 权重; 模型

### The suitability degree of the aquatic organisms to river flow

ZHANG Nan<sup>1,2,\*</sup>, XIA Ziqiang<sup>1,2</sup>, JIANG Hong<sup>3</sup>, HUANG Feng<sup>1,2</sup>, LU Zhihua<sup>1,2</sup>

1 State key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2 College of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

3 North-China University of Water conservancy And Electric Power, Zhengzhou 450011, China

**Abstract:** Hydrological indicators with ecological meaning including flow, frequency, timing, duration, rate of change are selected to do the analysis. The approach is that, simplifying multi-characteristic values into a single integrated indicator, which describing the suitability degree of the aquatic organisms to the river flow. As a case study, flow data in the recent 50 years at Yichang, Hankou and Datong hydrological stations in the middle and lower reach of Yangtze River are selected to analyze the suitability degree of Chinese Sturgeon and Four Major Chinese Carps to the flow of Yangtze River. The results show that, it's feasible to choose the integrated indicator to reflect the suitability degree of the aquatic organisms to river flow, which indicates the deviation degree of the river flow from the suitable ecological flow. It is significantly important to guarantee the suitable river flow process for the normal life of organisms in the river.

**Key Words:** hydrological indicators; integrated indicator; suitability degree; weight; model

随着社会经济的发展以及人类对水资源开发利用的日益加剧, 河流生态流量研究的快速发展<sup>[1]</sup>, 河道内生态流量是目前研究的热点, 同样是河流的生态流量问题, 发展中国家与发达国家的侧重点则是完全不同。发展中国家考虑的是如何建立更多、更大的龙头水库, 增加水资源的调控能力, 满足社会生态流量问题, 发达国家在完全解决了水资源的后顾之忧以后, 主要关注的是如何满足某种鱼类生存习惯的生态流量问题。因此不同国家针对不同河流的自然地理、社会经济状况先后建立起一系列的生态流量计算方法<sup>[2-6]</sup>: 水文指标法, 水力定额法, 栖息地法, 整体分析法。近些年来, 一些学者<sup>[7-11]</sup>从统计学方法对研究河流不同水文特征值进行主成分提取, 认为居于前列的特征流量即为该河道影响生物的主要流量, 依此来反映河流水文情势的变化规律, 利用河流流量频率服从对数正态分布的规律来确定生态适宜流量。以上方法中以水文指标法比较简

**基金项目:**国家自然科学基金重大资助项目(30490235)

**收稿日期:**2009-09-17; **修订日期:**2009-12-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangnan19810202@126.com

单,容易操作,认为低于或高于天然流量将会不利于河流生态系统,但这些天然流量的阈值,即生物适宜性流量的范围没有明确的量化,具有一定的局限性,每条河流的自然状况以及流域的社会经济状况千差万别,生物在产卵、繁殖、生长期间对流量变化的敏感性很强,在发生小概率破坏性极大的洪、枯水灾害时,河流生态系统的空间结构亦会发生重大变化。径流破坏期内保持河道一定范围的流量是维持生物生存的必要条件,究竟这个范围的程度有多大,如何体现河流流量偏离适宜生态径流过程的程度,是反映水与自然生态平衡问题的体现,也是求解适宜生态流量、最小生态流量的关键。

长江是亚洲最大的河流,长江的鱼类资源无论种类和数量都在世界上具有重要地位。我国长江流域的水问题状况日趋严重,特别是在非理性的社会经济活动中,人类过多地开发利用水资源,河流健康状况遭受到各种各样的损害。三峡建成后,长江中下游水沙关系、江湖关系与河势河床稳定将出现新的变化,这些变化将会对长江河流生态系统带来新的影响。对长江中下游河道重要生物对流量适宜性程度问题进行研究,对于保证长江中下游河流生态系统的稳定,湖泊和湿地生态环境的健康具有重要意义。

本文从水文指标的角度,构建权重-综合指标模型,通过一个综合指标反映长江干流中下游四大家鱼、中华鲟繁殖期间(5—6、10—11月份<sup>[12-13]</sup>)对流量的偏好性、适宜性程度,资料采用宜昌、汉口、大通3个主要控制站近50a来丰、平、枯3个水平年。

## 1 研究的方法

### 1.1 水文指标的选取

水文情势变化可以从流量、频率、历时、发生时间、变化率5个方面进行考虑,通过Richter<sup>[14]</sup>和Grows<sup>[15]</sup>指标系列以及分析径流情势提取与5个关键因素相应的水文指标反映水文情势,表1列出了与河流生态关系密切的水文指标,以体现水文过程的变化特征和生物的需求。

表1 水文指标  
Table 1 Hydrology indicators

序号 Number	水文指标 Hydrological indicators	水文参数 Hydrological parameters	指标描述(以下均为月内) Indicators description	对生态系统的影响 The Influence on ecological system
1	月平均变化指标	$Q_{p,n,i}$	月均流量	1. 水生生物栖息可能性;2. 水资源的可获得性
2	月水文极值大小	$Q_{\max,n,i}$	1日最大流量	1. 生物体竞争忍耐的平衡;2. 创造植物散布条件;3. 水紧张持续期;
3		$Q_{\min,n,i}$	1日最小流量	
4	月水文极值发生的时间	$T_{\max,n,i}$	1日最大流量发生的时间	1. 对生物体压力的预测与规避;2. 迁徙鱼产卵信号
5		$T_{\min,n}$	1日最小流量发生的时间	
6	高、低流量发生的频率及历时	$Q_{10,n,i}$	大于10%平均流量	1. 植物土壤含水紧张的频率与尺度;2. 洪泛区水生生物栖息可能性;3. 影响床沙分布
7		$Q_{90,n,i}$	小于90%平均流量	
8		$N_{10,n,i}$	大于10%平均流量发生次数	
9		$N_{90,n,i}$	小于90%平均流量发生次数	
10	水流条件 变化率及频率	$Q_{sz,n,i}$	上涨率	1. 植物干旱压力;2. 非有动性河滨生物体干燥压力
11		$Q_{ls,n,i}$	落水率	
12		$N_{sz,n,i}$	水流上涨次数	
13		$N_{ls,n,i}$	水流落水次数	

### 1.2 水文指标综合指标的建立

以上述各水文指标作为流量系列的特征量,描述流量 $j$ 的 $m$ 个特征量组成指标集 $P_j$ :

$$P_j = (p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{mj})^T, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, $p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{mj}$ 分别为流量的各特征值,如1d最大流量,高脉冲平均流量等。

由于各特征量的量纲不同,为了反映各特征量对流量影响的相对程度,采用下式消除量纲<sup>[16]</sup>:

$$r_{ij} = |(p_{ij} - \bar{p})| / (p_{\max_i} - p_{\min_i}) \quad (i = 1, 2, \dots, m), (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $r_{ij}$ 为流量消除量纲后的指标值, $p_{\max_i}, p_{\min_i}$ 分别表示特征量 $i$ 在实测年中的最大值和最小值。各指

标对应的权重向量为:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (3)$$

流量  $j$  的综合指标:

$$D_j = \omega \times r_{ij}^T \quad (4)$$

式中,  $D_j$  为无量纲流量特征值  $r_{ij}$  的函数, 权重  $\omega$  是函数系数。

### 1.3 综合指标权重的确定

构造综合指标反映生物对该流量的适应程度, 综合指标值应越大, 生物对该流量的适宜度越大, 当流量和综合指标值之间的正相关程度越高, 构造的综合指标越合理, 权重也越优<sup>[17]</sup>。

本文利用 Kendall 相关系数<sup>[18]</sup>构造描述流量与其综合指标相关程度的相关性指标  $\lambda$ , 当  $\lambda$  值越大, 两者之间的相关程度越高, 权重越优。本文将相关性指标  $\lambda$  作为目标函数, 当该目标函数取得最大时对应的权重为最优权重, 从而建立了一个权重决策的优化模型。

假定  $x, y$  分别表示综合指标和流量系列,  $x, y$  的观测值为  $(x_j, y_j)$ , 流量  $j$  的综合指标序位  $x_j$  为  $k_j$ , 流量  $y_j$  的序位为  $l_j$ , 在流量范围内选一  $y_j$ , 此时当  $(l_i - l_j)/(k_i - k_j)$  是正数时, 则称  $(x_j, y_j)$  和  $(x_i, y_i)$  是协调的; 若为负, 则为不协调; 若  $l_i = l_j$  或  $k_i = k_j$ , 则为平衡点。相关性指标采用如下:

$$\lambda = \frac{2 \times (n_c - n_d)}{n(n-1)} \quad (5)$$

$$n(n-1) - 2 \times n_c + n_d + n_i \quad (6)$$

式中,  $n$  为总样本数;  $n_c$  为协调样本数;  $n_d$  为不协调样本数;  $n_i$  为平衡点的样本数。当所选择的综合指标能够完全反映流量时, 两者的序位应该是一致的, 此时取最大值 1。

根据序位值  $(k_j, l_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , 对  $n_c, n_d, n_i$  进行统计, 计算  $x, y$  间的相关系数  $\lambda$ 。  $n_c, n_d, n_i, \lambda$  视为  $\omega$  的函数, 式(5)表示为  $\lambda(\omega)$ 。建立的权重决策模型如下:

目标函数

$$\text{Max} \lambda(\omega) = 2 \times (n_c(\omega) - n_d(\omega)) / (n(n-1)) \quad (7)$$

权重约束

$$0 \leq \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m \leq 1 \quad (8)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m = 1 \quad (9)$$

当目标函数取最大值时,  $\omega_{\text{option}} = (\omega_{\text{option},1}, \omega_{\text{option},2}, \dots, \omega_{\text{option},m})$  即为最后的指标权重, 此时求得的  $\text{Max} \lambda(\omega)$  即可表明综合指标对选取该流量的适宜性程度, 当  $\lambda(\omega) = 1$  时, 说明生物在其他非生物因素一定时, 对该流量的偏好性最大, 当  $\lambda(\omega) = 0$  时, 说明该流量是危害流量, 不适合生物的栖息,  $\lambda(\omega)$  越大, 对应的流量越偏向于生物的偏好。

## 2 实例研究

### 2.1 研究水文站的概况

宜昌水文站位于长江上游与中游的交界处, 它完整地控制了长江上游 100.6 万  $\text{km}^2$  的地区, 约一半的河流量来源于该站以上区域, 宜昌上游约 44km 处修建了全世界最大的水电站——三峡水电站, 上游 6km 处修建了葛洲坝水电站, 这两个重要的水工程都建成于 20 世纪 80 年代后; 汉口站位于长江中游, 控制流域面积 148.8 万  $\text{km}^2$ , 其上游有长江最大的支流——汉江汇入, 汉江中游建有库容仅次于三峡的丹江口水电站, 丹江口水库也是南水北调中线工程的取水源; 大通站位于长江河口湖区附近, 该站控制流域面积 170.548 万  $\text{km}^2$ , 该流域面积占长江流域面积的 94.7%, 大通站距长江入海口约 620km, 是长江入海流量的参考站, 其流量特性的变化对长江河口的演变有着重要的影响作用。研究区流域图见图 1。

### 2.2 资料的选用及研究时段

河道内生态流量适宜性程度的研究通常选择天然情况下的水文序列作为基本计算流量序列, 根据相关研

究分析<sup>[13]</sup>,长江干支流中小型水库已修建几十年,大坝下游生态系统已经逐渐适应了当前的水流情势,主要的大型水库如葛洲坝、丹江口水库已经修建 20 多年,水库对长江中下游河流水文情势影响较小,同时所分析的适宜流量适宜性程度是为三峡水库修建后长江中下游水库开展水库生态调度提供参考依据。因此,本文选取三峡大坝以下研究站——宜昌站、汉口站、大通站,分别采用 1950—2002、1954—2002、1950—2002 年的逐日实测径流资料。河流生态系统的稳定和物种的生存条件繁衍规律在年际间和年内不同时期对河流流量的需求是不一样的,因此将流量系列划分为不同的水平年即枯水年、平水年和丰水年,更能体现水文过程的丰平枯变化特征和生物的需求,同时也便于开展水库调度操作。本文首先将多年平均流量过程划分为枯水年、平水年和丰水年,水平年的划分以多年平均流量系列为基础,对应频率 75% 以上的年份定义为枯水年,频率 75%—25% 之间的年份定义为平水年,频率 25% 以下的年份定义为丰水年,以 5—6,10—11 月份作为年内研究时间段。

2.3 模型计算结果与分析

依据上述研究方法,对长江干流 3 站进行了适宜流量综合指标的计算。本文在选取初始权重时,为了避免主观性,将 13 项水文指标初始特征量设为均等,为 0.077。选取宜昌站平水年 10 月份流量,按大小排序,获得其序位,初次选取  $y_j = 19000\text{m}^3/\text{s}$ ,以  $\omega^* = 0.077$  作为权重优化模型的初始值,遵循目标函数、约束条件,采用遗传算法求解建立的权重优化模型,得到的满足目标函数最大权向量。

此时求得的综合指标  $\text{Max}\lambda(\omega) = 0.93$ ,表明在宜昌站平水年生物对  $\lambda(\omega) = 19000\text{m}^3/\text{s}$  流量具有较大的偏好性,从表 2 中可以看出,上涨率对该月生物适宜流量的影响程度相对最大,其次为月均流量、上涨次数、落水次数。依次采取不同的  $y_j$ ,分别对 3 站 5—6,10—11 月份,不同水平年进行计算,结果如图 2。

表 2 目标函数最大权向量(宜昌站平水年 10 月份)

Table 2 Maximum weight vector of objective function

最大权向量 Maximum weight vector	$Q_{p,n,i}$	$Q_{\max,n,i}$	$Q_{\min,n,i}$	$T_{\max,n,i}$	$T_{\text{in},n}$	$Q_{25,n,i}$
$\omega_{\text{option}}$	0.107	0.033	0.031	0.045	0.056	0.075
$Q_{75,n,i}$	$N_{25,n,i}$	$N_{75,n,i}$	$Q_{sz,n,i}$	$Q_{ls,n,i}$	$N_{sz,n,i}$	$N_{ls,n,i}$
0.069	0.091	0.086	0.120	0.087	0.101	0.099

由图 2 可以看出,不同水平年不同月份对应的综合指标值都有着变化范围,6、10 月份综合指标的最大值对应流量最大,对应流量的跨度最大,反映出年内丰枯流量变化的特征,综合指标最大值对应的流量以宜昌、汉口、大通依次增加,反映出河道上游到下游流量变化的特点;河流的水文过程具有周期性变化的规律,其量的大小在一定范围内随机变化,某一综合指标(最大值除外)分别对应着 2 个流量,当达到该适宜性程度时生物生存流量的上下限,下限高于该流量值,适宜性程度增加,上限低于该流量值,适宜性程度减少,随着综合指标的增大,生态流量的上限减少,下限增加,即对应该时间段流量的保证率在增大,满足生物适宜生存的概率增大,这对于生态稳定和物种生存繁衍来说是与流量状态及其丰枯变化特征吻合的指标变化过程,当综合指标数值选取的越大,越能保证河流的生态健康状况。流量、频率、历时、发生时间、变化率是该时间段内水文过

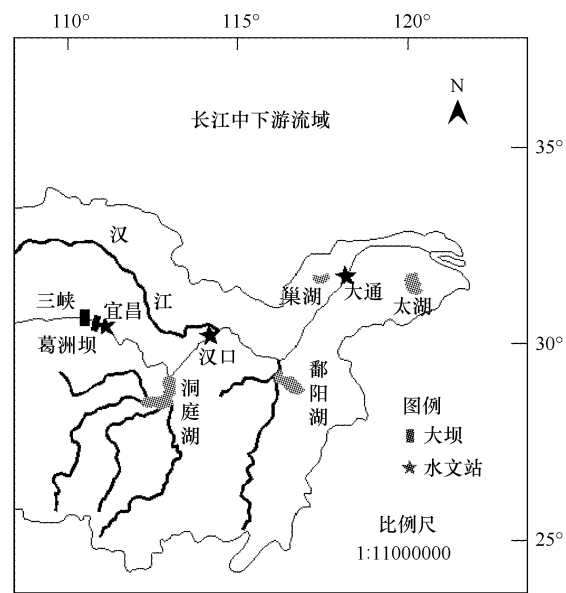


图 1 研究区图

Fig. 1 Graph of study area

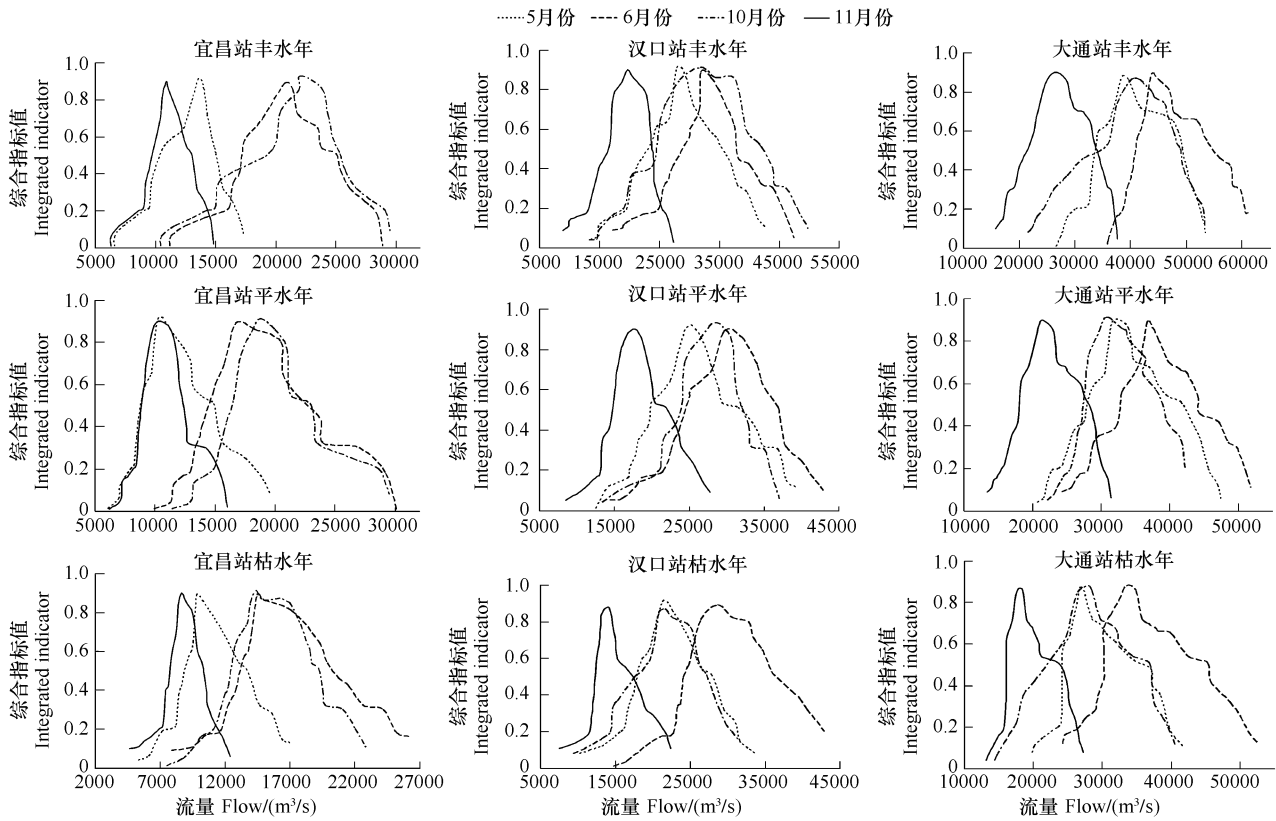


图2 宜昌、汉口、大通水文各站丰、平、枯水年流量-综合指标  
 Fig.2 Flow-integrated indicators of three gauge station

程的综合特征,基于此计算的综合指标值反映生物对近似天然状态下的该流量综合适宜性程度,河流流量偏离适宜生态径流过程的程度,由于人类活动取用水等影响,河流的流量状态形成变动起伏的现象,带来河流生物物种对径流状态的响应,当指标减小时,对应的流量趋于破坏性流量,会逐步导致生物繁衍条件的破坏,生物量的减少,进而生物完整性整体降低。综合指标值最大时,对应的是该时段最为合理的生态流量,是生物最为偏好的生存流量,这对于保证取水断面以下水生态系统的稳定性,保持河道、湖泊、湿地生态环境的健康尤为重要。如果人为给定综合指标的上下限,可以根据图形查找出对应的流量值作为生物适宜流量的范围,为了论证得出结果的合理性和科学性,本文经过计算结果给定不同综合指标范围反向求得的流量值,并与 Tennant 逐月频率法进行了比较,发现当综合指标上限取 0.65,下限取 0.6 时,得到的适宜流量和 Tennant 逐月频率法计算的数值较为接近,比较结果如表 3。

由表 3 可知,宜昌站枯水年 10 月份适宜流量下限减小变化率最大,达到 9.31%,大通站平水年 10 月份适宜流量增加率最大,达到 7.37%,总体来看,变化率均在 10% 以内,与 Tennant 逐月频率法计算结果比较接近,利用综合指标法反向计算河道适宜流量是可行的,同时,也反映出以综合指标的方式反映河道生物对流量偏好性、适宜性程度是可行的。

### 3 结论

本文从流量、频率、历时、发生时间、变化率 5 个方面选取水文指标,将描述生态流量的多个特征量转化成单一的综合指标,利用综合指标值描述生物对流量适宜性程度,通过长江中下游宜昌、汉口、大通重要水文控制站的实例验证,认为综合指标法来反映生物对河道流量适宜性程度是可行性。就不同河流、生物多样性而言,生物对河道流量的适应性程度受到河流环境,人类活动等多方面因素的影响,综合指标上下限的选取会有所不同,本文只根据宜昌、汉口、大通三站四大家鱼、中华鲟对河道流量适宜性程度指标进行研究,该研究站综合指标上下限是否适用于其他流域河流还有待于深入研究。总体而言,利用综合指标的方法不局限于计

算出河流适宜生态径流,也反映出生物在不同时段内对河道流量的适应性程度,进而体现河流流量偏离河流适宜生态流量过程的程度,这对于保证满足水生生物的正常生活规律所需要的河道内流量过程具有重要的参考意义。

表3 各站5—6、10—11月份变化率

Table 3 Change ratio of May—June\October—November of three gauge station

站点时间段 Time quantum	丰水年适宜流量变化率/% Change rate of suitability flow high flow year		平水年适宜流量变化率/% Change rate of suitability flow in normal flow year		枯水年适宜流量变化率/% Change rate of suitability flow in low flow year	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
	宜昌 5 月份	0.14	-1.06	0.41	-0.78	0.77
宜昌 6 月份	1.43	-2.38	-5.18	5.29	1.22	7.15
宜昌 10 月份	-2.21	-0.69	-2.42	-0.13	-9.31	-1.67
宜昌 11 月份	-3.53	-1.38	-1.98	-0.40	-3.46	-1.00
汉口 5 月份	-0.44	-3.19	5.27	-1.52	5.23	-1.84
汉口 6 月份	4.84	3.35	-2.46	-5.86	-0.55	1.46
汉口 10 月份	-5.70	-0.85	-1.14	-0.29	-1.95	-1.13
汉口 11 月份	-2.71	1.49	-2.34	-0.53	-2.73	-0.88
大通 5 月份	-1.79	-1.66	2.05	-1.60	2.46	-5.30
大通 6 月份	-2.37	-2.86	2.81	-1.94	-7.84	-3.12
大通 10 月份	-3.01	-1.36	-2.25	7.37	-4.02	-0.67
大通 11 月份	-2.64	-1.44	-7.01	-6.47	-6.12	-3.33

致谢:感谢长江水利委员会水文局提供水文数据。

#### References:

- [ 1 ] Xun X J, Zhang Z ZH, Huan S X, Hui Y H. Discussion on total ecological mark of river basic ecological flow. Journal of northwest A & F University (Nat. sci. ED.), 2009, 37(2):221-225.
- [ 2 ] Guo L D, Xia Z Q, Lin H, Wang Y. Researches on application of the tennant method in ecological flow evaluation. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4):1788-1790.
- [ 3 ] Xia Z Q, Li Q F. Theory and computation method of ecological flow. Methodology in Hydrology, 2007:331-336.
- [ 4 ] Sang L H, Chen G Q, Huang W. Evolution of environmental flow methodologies for rivers. Advances in Water Science, 2006, 17(5):754-760.
- [ 5 ] Xia Z, Li Q, Guo L, Zhang W, Wang H. Computation of minimum and optimal instream ecological flow for the yiluohe river. IAHS-AISH Publication, 2007:142-148.
- [ 6 ] Xu Z X, Dong Z C, Zhou J K. Montanamethod and its application in calculation of ecological water requirement, Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(11): 15-17.
- [ 7 ] Monk W A, Wood P J, Hannah D M, Wilson D A. Selection of river flow indices for the assessment of hydroecological change. River Research and Applications, 2007, 23 (1): 113-122.
- [ 8 ] Chang F J, Tsai M J, Tsai W P, Herricks E E. Assessing the ecological hydrology of natural flow conditions in Taiwan. Journal of Hydrology, 2008, 354 (4): 75-89.
- [ 9 ] Orndorff R L, Whiting P J. Computing effective discharge with S<sub>+</sub>plus. Computers Geosciences, 1999, 25:559-565.
- [ 10 ] Chang F J, Wu T C, Tsai W P, Herricks E E. Defining the ecological hydrology of Taiwan Rivers using multivariate statistical methods. Journal of Hydrology, 2009:235-242.
- [ 11 ] Song L L, Lu G H, Liu L. Estimation of instream flow based on hydrological indexes. Shui Li Xuebao, 2006:1131-1135.
- [ 12 ] Li Z, Peng J, Liao W G. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(3):171.
- [ 13 ] Guo W X. Research on Reservoir Ecological Operation Model for River Health. Nan Jing, Hohao University, 2008, (12):118-130.
- [ 14 ] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, David P Braun. A method for assess-ing hydrologic alteration within ecosystems. Conservation Biology,

1996;10(4):1163-1174.

- [15] Jane C, Nick M. Characterization of flow in regulated and unregulated streams in Eastern Australia. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology Technical Report, 2000: 1-66.
- [16] Shiau J. T. Return period of bivariate distributed extreme hydrological events. *Stochastic Environment and Risk Assessment*, 2003, (7): 42-57.
- [17] Xiao Y, Guo S L, Liu P. Study on the Multiple Features vectors of the flood flow frequency events. *Yangtze River*, 2007, 38(4): 128.
- [18] Sprent P. *Applied nonparametric statistical methods*. Chapman & Hall, London, 1989: 54-87.

#### 参考文献:

- [1] 薛小杰, 张泽中, 黄四霞. 河流生态流量的生态积分探讨. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(2): 221-225.
- [2] 郭利丹, 夏自强, 林虹. 生态径流评价中的 Tennant 法应用. *生态学报*, 2009, 29(4): 1788-1790.
- [4] 桑连海, 陈西庆, 黄薇. 河流环境流量法研究进展. *水科学进展*, 2006, 17(5): 754-760.
- [6] 徐志侠, 董增川, 周健康. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用. *水利水电技术*, 2003, 34(11): 15-17.
- [12] 李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子及其生态水文目标确定. *中国水利水电科学研究院学报*, 2006, 4(3): 171.
- [13] 郭文献. 基于河流健康水库生态调度模式研究. 南京: 河海大学, 2008, 12: 118-130.
- [17] 肖义, 郭生练, 刘攀. 综合多特征量洪水事件频率问题研究. *人民长江*, 2007, 38(4): 128.