

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

黄速艇, 陈森林, 艾学山, 董前进

(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)

摘 要: 河流生态流量是生态水文研究的重要部分。鉴于不同等级流量有其特殊生态作用, 本文借鉴水文变化指标体系(IHA)评价参数及环境流量组成(EFC)分类方法, 将河道流量分为特枯流量、低流量、高流量、洪水过程, 并以此为基础绘制生态流量过程线。最后以东江水库为例, 绘制其枯水年、平水年、丰水年的年生态流量过程线。结果来看: ①高流量过程发生于3-10月, 但不同典型年有所差异, 年径流越大, 高流量量级相应变大, 并且首次发生高流量时刻也有所提前。②特枯流量主要发生于11、12、1、2月, 来流越大其持续时间越短, 但其量级基本不变。③在相同典型年内, 高流量有个先增后减的过程, 在5月或6月达到最大值; 特枯流量持续时间则在1月或12月取得最大值。

关键词: 水文改变指标; 生态流量; 环境流量组成; 流量过程线; 东江水库

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0022-06

Deterministic method of ecological flow process line based on flow classification: a case study in Dongjiang reservoir

HUANG Suting, CHEN Senlin, AI Xueshan, DONG Qianjin

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

Abstract: The ecological flow of river channel is an important part of eco-hydrology research. In view of the special ecological function of different grades of flow, the paper divided the river discharge into extreme low flow, low flow, high flow pulse and flood a new method was put forward by means of IHA indicators and EFC method. In this method. Based on which, it draw the ecological flow hydrograph. The method was applied to Dong Jiang reservoir, and gave the e-flow hydrograph of dry year, mean year and wet year. The results indicated that ① the high flow pulses occur from March to September, but there are difference in different typical years, the more the yearly runoff, the larger the high flow magnitude become. The time of the first high flow occurs. ② The extreme low flow mainly occur in January, February, November and December. the larger the discharge, the shorter the time of duration of discharge, but the magnitude of extreme low flow changes little. ③ In the same typical year, the high flow has the process of first increase and then decrease. The maximum is in May or June; the duration time of extreme low flow reaches the maximum in January or February.

Key words: hydrology variation index; ecological flow; environment flow component; discharge hydrograph; dongjiang reservoir

水资源是人类赖以生存和发展的重要资源, 而由于工程、非工程措施对水资源的开发利用已经或多或少影响到河流生态系统健康发展。而河流生态流量作为河流生态系统的一个重要指标, 研究河流

系统的生态需水量有其重要的意义, 并已成为生态水文学以及河流生态学等学科研究的新热点^[1-4]。

目前全球对生态流量的研究方法有超过200种, 它们大致可以分为水文学法、水力学法、栖息地

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-06-06

作者简介: 黄速艇(1990-), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源规划与管理。

通讯作者: 艾学山(1972-), 男, 辽宁开原人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水资源规划与管理。

模拟法以及整体综合评价法^[5]。其中水文学法是最简单,最具代表性的方法,目前常用的水文学方法有 7Q10 法和 Tennant 法等^[6-7]。然而,这些方法大多仅考虑某个水文极值或者某个特定的保证率,没有从整体分析河流水文情势,而众多研究表明不同量级的流量对生态系统都有其特殊的作用^[8-9]。为此,研究不同流量水平下的生态流量过程具有极大的意义。

Richter 等为评价河流健康程度创立的水文改变指标(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA),提供了 32 个水文指标以刻画与河流生态相关流量特征^[10]。不少学者借用 IHA 指标用来评价、计算河道生态流量过程^[11-13],但存在某些不足:①仅考虑整体 32 个指标的变化度,由此来评价河流水文情势变化,并未给出年内生态流量过程;②并未考虑不同月

份的特征流量(如高流量,特枯流量)的不同,仅从整体来研究其特征。故本文尝试借鉴前人已有研究成果,并借鉴环境流量组成(Environment Flow Components, EFC)^[15]对流量的分类方法,将流量分成不同量级,并给出不同特征流量发生月份及其不同月份的特征值,以此为基础给出年内理论生态流量过程线。

1 水文改变指标体系

水文改变指标体系(IHA)是评估河流生态健康的方法,该法主要是以涵盖量(Magnitude)、时间(Timing)、频率(Frequency)、延时(Duration)和变化率(Rate Of Change) 5 个方面的水文特征为基础,根据其统计特征划分为 5 组,32 个指标^[10]。具体见表 1。

表 1 IHA 指标参数^[15]

IHA 指标	参数(32 个)	对生态的影响
月均水量	各月流量的均值或中值(12 个参数)	1. 水生生物栖息地需水;2. 植被土壤需水;3. 陆生生物需水;4. 动物迁徙;5. 对水温光合作用影响
年均极值	年均 1、3、7、30、90 d 最小流量; 年均 1、3、7、30、90 d 日最大流量; 基流指数:7d 最小流量/年均流量(11 个参数)	1. 植被扩张;2. 生物抗极端条件平衡;3. 塑造河道、地形;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. 不同水体植物群落分布
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. 生物的繁衍;2. 繁衍期的栖息地环境;3. 物种进化需要;4. 鱼类的洄游产卵
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. 植物所需土壤水的频率与尺度;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、漫滩的有机物的沉积;3. 河滩低速生物的干旱胁迫;

2 生态流量的确定

为确定生态流量,将天然河道流量等级分为特枯流量、低流量、高流量以及洪水过程。同时,为给出不同来水年份下的建议生态过程,本文将长系列流量序列分成丰、平、枯 3 种水平年份。

本文采用距平百分率 P 作为划分径流丰平枯的标准。具体标准如表 2 所示。

表 2 水平年划分标准表				%
丰平枯级别	丰水年	平水年	枯水年	
划分标准($P\%$)	$P \geq 15$	$-15 < P \leq 15$	$P < -15$	

$$P = (Q - \bar{Q}) / \bar{Q} \times 100\%$$

(1)

式中: P 为距平百分率; Q 为年径流量; $\bar{Q}$ 为多年平均径流量。

2.1 特枯流量

本文将长系列日流量资料中高于 90% 频率的流量值定义为特枯流量。由于特枯流量值较小,且不同值之间差别不大,故本文仅确定其发生时刻(月)和该月流量大小、持续时间。其中,取各月特枯流量值的中值为典型特枯流量值。即:

$$Q_{ELF} = Q_{d,p} > 90\%$$

(2)

式中: Q_{ELF} 为特枯流量集合, $Q_{d,p} > 90\%$ 为高于 90% 频率的所有日流量值集合。

2.2 低流量

低流量,其值一般与河道基流大小相近,可将其作

为河道基流来处理,为确定低流量,将所有日流量资料排频,把日流量频率介于 75% 与 90% 的流量作为低流量,并取该月低流量的中值为该月的低流量值,并将其作为生态流量基流,其流量大小确定公式即:

$$Q_{LF} = Q_{d,75\% < P < 90\%} \quad (3)$$

式中: Q_{LF} 为特枯流量集合, $Q_{d,75\% < P < 90\%}$ 为低流量集合, 为 75% ~ 90% 频率的所有日流量集合。

由于高流量确定并不只一个约束条件,故有部分低流量过程未包括在内,其具体确定方法如 2.3 所述。

2.3 高流量

高流量过程属于脉冲性生态需水量,其统计指标包括峰值、持续时间、发生次数。本文将流量值小于 25% 日流量频率流量过程定义为高流量过程。即:

$$Q_{HFP} = Q_{d,p < 25\%} \quad (4)$$

式中: Q_{HFP} 为高流量集合, $Q_{d,p < 25\%}$ 为小于 25% 频率的所有日流量值集合。

高流量过程是个脉冲过程,高流量过程的界定需确定其起涨与消落时刻,故同时限定:① 起涨时刻:若该日流量值介于 25% 频率与 75% 流量值,且次日流量增加率高于 25% 时,该流量定义为高流量,否则为低流量。② 消落时刻:若该日流量值介于 25% 频率与 75% 流量值,且次日流量值减少率小于 10%,则该流量定义为高流量,否则为低流量。

高流量过程在不同月的分布有所差别,在不同月份其发生的次数亦有所差异。故需确定高流量过程发生的次数及各高流量持续时间,分别取中值;其中,在某些月份,可能来水较充分,按上述方法统计出的高流量过程持续时间较长,且可能包含多个峰值。为此,本文将含有多峰、且不同峰值相差在 25% 以内、相邻峰谷之间流量下降水平超过 50% 的高流量过程拆分为不同高流量过程。

为确定典型高流量过程,以流量为基础,统计各高流量过程峰值、3 d 最大流量、7 d 最大流量、15 d 最大流量。若高流量持续时间不足 7 d 或 15 d,则统计 N 天最大流量,分别取中值。

2.4 洪水

本文以高流量峰值作为量级判断标准,将重现期大于 2 年的高流量过程定义为洪水过程。

为推求生态洪水过程,本文以 1 d 洪峰流量作为评判洪水量级的依据,取其中值作为典型洪水洪峰峰值。同时,统计 3, 7, 15 d 最大洪量,若洪水过程持续时间不足 7 或 15 d,则统计 N 天最大洪量,分别

取中值;取量级、持续时间与设计生态洪水相近的实际洪水过程为典型洪水过程,按同频率放大推求设计洪水的方法推求生态洪水过程,即:

$$R_1 = \frac{w_{1p}}{w_{1D}}, \quad R_{3-1} = \frac{W_{3p} - W_{1p}}{W_{3D} - W_{3P}} \quad (5)$$

其中: R 为放大倍数; W_p 为典型洪量; W_D 为设计生态洪量。

2.5 理论生态过程线绘制

基于上述对河道流量不同量级的划分,以日为单位、以低流量为基准,绘制生态过程线。① 将各月低流量按日绘制于图上。② 根据特枯流量发生时刻、各月持续时间,将该段低流量过程用特枯流量值代替,由于特枯流量发生比较集中且连续,故特枯流量过程线用 1 条或 2 条连续的流量过程线表示。③ 根据高流量分析结果,考虑高流量过程峰值、持续时间,涨落过程。根据计算结果,不考虑其具体发生时刻与发生次数,仅将典型高流量过程绘于线上,其中将其峰值置于月中即每月 15 日上,将原本流量过程用高流量过程线代替,并标记其在该月发生的次数。④ 将洪峰发生时刻置于该月 15 日,以此为基准将各月洪水过程线绘制于图上,并标记其发生频率。

3 实例分析

本文以东江水库为例,分析该水库建坝前的天然流量过程,采用本文上述确定不同流量组成的方法确定生态流量过程线,为水库的调度运行提供一定的科学依据。

3.1 研究区域概况

东江水库位于湘水一级支流耒水上游,资兴市东江镇上游 11 km 的峡谷处。建库后,河流的连续性被破坏,其入库流量过程与出库流量之间有较大的改变,而这些变化直接或间接地影响着河流系统的地貌和河流生态系统的功能。

本研究选用东江水库 1952 - 2010 年共 59 a 的日均入库流量资料和 1993 - 2010 年共计 18 a 日均出库流量资料,分别统计各 IHA 指标参数。绘制丰、平、枯 3 种来水年份下生态流量过程线,为水库运行调度提供依据。

3.2 东江水库入库出库流量水文过程特征分析

应用 IHA 软件统计入库流量(天然流量)过程与水库下泄流量(改变后流量)过程的各水文指标,得到各特征指标在入流和泄流过程中的均值及变化程度,如表 3 所示。

表3 入库流量与出库流量水文情势变化情况

IHA 指标	序号	m ³ /s, %, d				水文特征 变化程度
		入流		出流		
		中值	离散 系数	中值	离散 系数	
第一组指标						
1 月份平均流量	1	42.3	0.66	191.3	0.50	3.52
2 月份平均流量	2	64.2	0.64	191.9	0.79	1.99
3 月份平均流量	3	98.6	0.76	134.7	1.52	0.37
4 月份平均流量	4	157.0	0.54	98.21	0.94	-0.37
5 月份平均流量	5	169.7	0.68	77.28	1.39	-0.54
6 月份平均流量	6	187.0	0.70	74.87	0.52	-0.60
7 月份平均流量	7	98.2	0.77	151.5	0.90	0.54
8 月份平均流量	8	91.8	0.74	164	1.01	0.79
9 月份平均流量	9	84.05	0.63	100.8	0.80	0.20
10 月份平均流量	10	56.5	0.55	99.27	0.41	0.76
11 月份平均流量	11	45.9	0.74	107.8	1.02	1.35
12 月份平均流量	12	39.0	0.68	140.5	0.71	2.60
第二组指标						
年内 1 日最小流量	13	19.4	0.52	22.2	0.67	0.14
年内 3 日最小流量	14	21.73	0.44	31.72	0.72	0.46
年内 7 日最小流量	15	25.07	0.32	39.58	0.49	0.58
年内 30 日最小流量	16	31.95	0.54	54.66	0.26	0.71
年内 90 日最小流量	17	46.65	0.71	75.3	0.41	0.61
年内 1 日最大流量	18	1480	0.57	423.5	0.41	-0.71
年内 3 日最大流量	19	1040	0.61	385.8	0.37	-0.63
年内 7 日最大流量	20	670.7	0.68	356.3	0.38	-0.47
年内 30 日最大流量	21	399.9	0.62	291.6	0.48	-0.27
年内 90 日最大流量	22	283.9	0.45	203.8	0.55	-0.28
基流指数	23	0.2046	0.43	0.2892	0.29	0.41
第三组指标(日)						
年最小流量出现日期	24	8	0.14	178	0.28	21.25
年最大流量出现日期	25	169	0.16	192.5	0.33	0.14
第四组指标						
年低流量谷次数	26	12	1.08	11	1.273	-0.08
年低流量平均持续时间	27	3	1.08	1	1	-0.67
年高流量冲洪峰数	28	15	0.33	18	0.6389	0.20
年高流量平均持续时间	29	3	0.67	2.75	0.8182	-0.08
第五组指标						
年内水流上升幅度	30	14.56	0.78	17.25	0.72	0.18
年内水流下降幅度	31	-12.15	-0.94	-17.12	-0.55	0.41
水文逆转次数	32	144	0.64	204.5	0.06	0.42

从表中可以看出,由于水库的运行,坝前流量与坝后流量的 IHA 参数,除年低脉冲谷次数、年高脉冲平均持续时间等少数指标,其他 IHA 参数改变度大都超过 25%,而其中以枯水月份(1、2、11、12 月)的月均流量改变最大,改变幅度超过 100%。

绘制水库多年月入库流量和出库流量中值箱须图,对比分析其特征:

水库月平均入库流量如图 1 所示,其表现出明显的季节变化,在汛期(3-8 月)流量较大,且有上升的趋势,且流量变幅较大。而在非汛期流量则较小,其变化幅度没有汛期大。

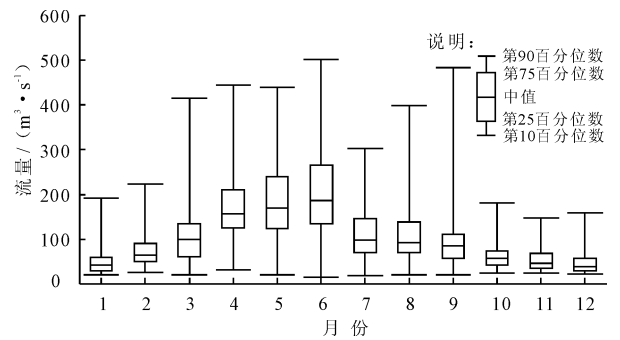


图1 东江水库月入库流量分布图(1952-2010)

水库月出库平均流量的变化特征如图 2 所示。其月平均流量较入库流量改变较大,其汛期流量明显减少而非汛期流量增加,流量值月内变化幅度增大,月内流量分配趋于平均,3-9 月极大值流量明显变小,而 11、12 月和 1、2 月的极大值流量增加显著。

对比入库流量与出库流量可以看出:出库流量年内流量过程枯水期较大,汛期变小。流量季节性变化发生了反转,1、2 月和 7、8 月流量偏大,5、6 月最小,年内没有明显的涨落趋势;就年内流量分配来看,出库流量枯水期(11、12、1、2 月)的流量较丰水期大,其涨落形势与入库流量过程相比,差异巨大。

从上述不同角度分析来看,目前东江水库的调度运行极大的改变了水库下游的天然流量过程,从保护下游生态环境的角度,极有必要深入研究其天然入库过程,并绘制东江水库泄流的生态流量过程线,为保护下游河道生态提供水库调度的依据。

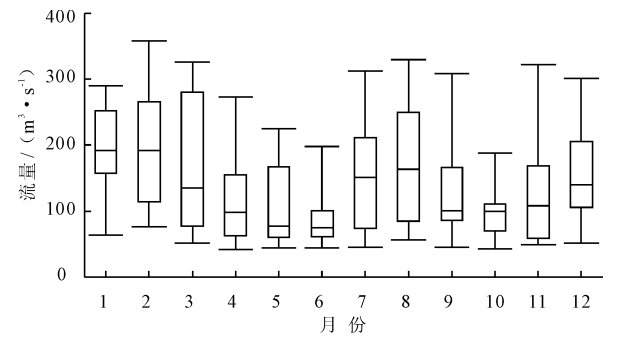


图2 东江水库月出库流量分布图(1993-2010)

3.3 生态流量过程线推求

为更好地反映河流生态流量的天然变化过程,首先将入库流量过程按年度划分为枯水年(19 a)、平水年(22 a)和丰水年(18 a),按上述流量划分方法,将 59 年流量值分为特枯流量、低流量、高流量、洪水过程,其中将不同典型年份的特枯流量、低流量、高流量过程分开分析以探讨不同特征;而洪水过程由于发生次数较少且量级较大,故仅综合讨论其特征。

3.3.1 特枯流量 鉴于特枯流量一般发生在枯水期,且比较连续,故分别按不同典型年统计特枯流量发生时刻(月)、各月低流量持续时间以及流量值大小,其统计值均取中值。具体结果如表 4 所示。鉴于特枯流量发生时间比较集中,根据计算结果,本文将特枯流量置于 1 月底、2 月初及 11 月底、12 月初。

表 4 特枯流量统计表 m³/s, d						
月份	丰		平		枯	
	流量值	持续时间	流量值	持续时间	流量值	持续时间
1	27.0	5	25.8	11	24.9	16
2			27.6	5	26.6	9
11	26.6	4	25.0	8	27.0	11
12	25.9	11	25.0	13	26.0	15

3.3.2 低流量过程 采用前述确定河道低流量水平的方法,将不同年份各月低流量值、月流量值分别排序,取其中值,其结果如表 5 所示。

由表中数据,从横向来看,低流量在年内分配有所差异,其从 1 月到 12 月流量大小先增后减,在 5、6 月份达到最大;从纵向来看,不同典型年份下低流量大小从枯水年、平水年、丰水年逐渐递增,但不同月份有所差异:在来水较少的月份差异较小而在来水多的月份差异较大。

表 5 低流量过程表 m³/s						
典型年	1	2	3	4	5	6
枯水年	41.8	46.5	60.4	76.9	80.8	91.3
平水年	44.9	54.9	61.9	90.3	94.1	106.5
丰水年	49.7	62.2	84.8	110.0	121.4	123.2

典型年	7	8	9	10	11	12
枯水年	58.3	58.4	50.0	41.0	41.6	40.5
平水年	69.9	76.7	69.5	51.2	47.6	43.4
丰水年	86.1	82.1	84.7	70.2	62.3	53.7

3.3.3 高流量 分别统计 1-12 月高流量发生次数、持续时间及其峰值,取中值作为该月高流量特征参数。限于文章篇幅,本文只给出平水年高流量统计表,如表 6 所示。表中仅统计存在高流量过程的月份。

3.3.4 洪水过程 依上文洪水定义,计算可得洪水阈值为 1 480 m³/s,而就发生时刻来看,90%的洪水过程发生于 5-8 月,各月发生洪水频率以及洪水统计特征如表 7 所示。其中,洪水频率用重现期表示,其结果取整。

整合上述各流量组成分析结果及生态过程线绘

制方法,可绘制丰、平、枯来水情况下生态流量过程线,如图 3~图 5 所示。

表 6 平水年高流量统计表 d, m³/s						
月份	次数	持续时间 间 N	峰值 流量	最大 3 日 流量	最大 7 日 流量	最大 N 日 流量
2	1	6	197.0	178.0		142.1
3	2	6	280.0	227.2		194.7
4	2	7	518.8	393.1	289.1	289.1
5	2	7	678.0	495.9	371.2	371.2
6	1	8	615.0	461.3	376.1	349.3
7	2	6	315.0	152.0		122.7
8	2	6	212.6	174.0		141.6
9	2	5	202.4	173.6		148.2
10	1	5	217.0	155.7		131.4

表 7 洪水统计表 d, m³/s						
月份	次数	持续时间 间 N	峰值 流量	最大 3 日 流量	最大 7 日 流量	最大 N 日 流量
5	10	1830	12	1227	737	565
6	3	1806	13	1316	869	693
7	10	2036	10	1416	818	648
8	10	2440	11	1785	1199	997

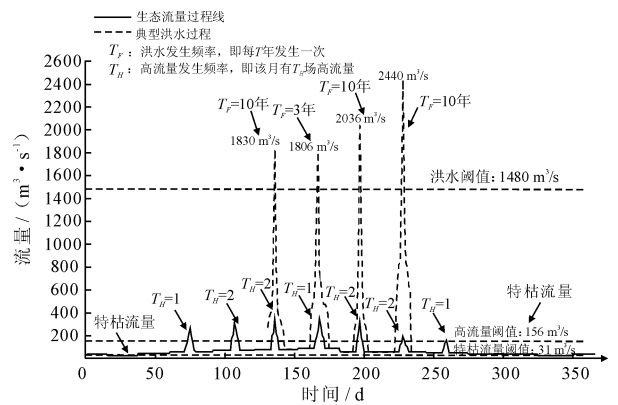


图 3 枯水年生态流量过程线

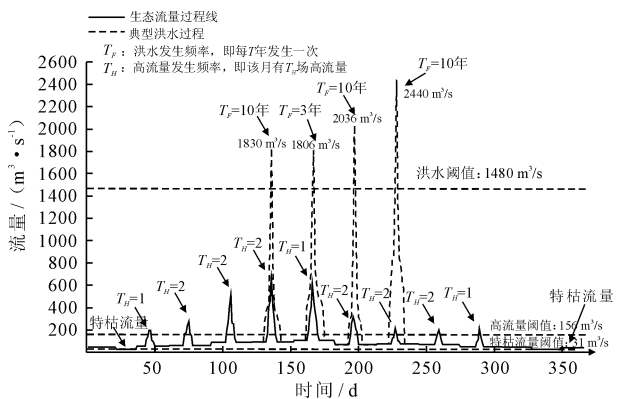


图 4 平水年生态流量过程线

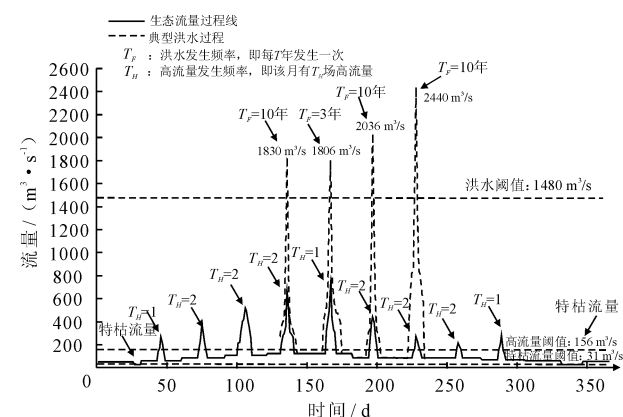


图5 丰水年生态流量过程线

图中 T_F 表示洪水在该月发生的频次,即洪水在该月 T_F 年发生一次,整体来看,每两年发生一场洪水; T_m 为高流量在该月发生的频率,即高流量在该月一年内发生 T_m 次。

3.4 结果分析

根据得到的3条东江水库生态流量过程线,我们可以看出:

(1)在不同来水年份下,不同脉冲流量发生的量级、次数及持续时间不尽相同。其中,高流量过程发生的次数随来水的增多而增多,量级也相应变大,并且一年中首次发生高流量时刻也有所提前,平水年和丰水年在2月份即有高流量发生而枯水年则在3月才开始有高流量过程。特枯流量则主要集中1、2、11、12月份,且该年来水越多,特枯流量总发生时间越短,但其流量大小改变不大。

(2)在同一年内,高流量有个先增后减的过程,在5月或6月达到最大值;特枯流量持续时间则以1月和12月为中心,向两边递减。

(3)得到的生态过程线中包含了4种典型流量过程,考虑到了不同特征流量以及稳定性流量、脉冲流量对河道生态的影响。

4 结语

本文通过对东江水库入库流量与出库流量水文特征分析,发现其水文指标改变较大,而这种改变必将对生态造成不可逆转的损害,因此本文借鉴 IHA 指标中几个参数以及环境流量组成对河道流量的分类方法,将流量分为极低流量、低流量、高流量以及洪水过程,并以各月低流量过程为基础,着重分析了汛期高流量过程以及不同程度的洪水过程,并基于此分别绘制了枯水年、平水年、丰水年的生态流量过程线。得到的生态流量过程线考虑了稳定性生态需水影响

量(低流量)和脉冲性生态需水量(特枯流量、高流量、洪水),符合天然实际的流量过程,能更好的为保护河道生态提供科学依据。

参考文献:

- [1] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater biology, 1997, 37 (1): 231 - 249.
- [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] 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (5): 626 - 633.
- [4] 徐志侠, 等. 河道与湖泊生态需水理论与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [5] Tharme R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River research and applications, 2003, 19 (5 - 6): 397 - 441.
- [6] 门宝辉, 刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40 (3): 479 - 482.
- [7] 董福平, 管庆庆, 周黔生, 等. 河流生态用水流量确定新方法研究 [J]. 水利学报, 2007, 38 (S1): 547 - 551.
- [8] Lytle D A, Poff N L R. Adaptation to natural flow regimes [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2004, 19 (2): 94 - 100.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 冯瑞萍. 筑坝河流水文过程变化及生态流量研究 [D]. 北京: 中国科学院水生生物研究所, 2009.
- [12] 王加全, 马细霞, 李艳. 基于水文指标变化范围法的水库生态调度方案评价 [J]. 水力发电学报, 2013, 32 (1): 107 - 112.
- [13] 马晓超, 栗晓玲, 薄永占. 渭河生态水文特征变化研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22 (1): 16 - 21.
- [14] Richter B D, Thomas G A. Restoring environmental flows by modifying dam operations [J]. Ecology and society, 2007, 12 (1): 12.
- [15] Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual [M]. The Nature Conservancy, 2009.
- [16] 舒畅, 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.