

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.016

河流生态流量特征图及生态流量评价方法

涂晶晶, 陈森林, 艾学山, 毕玉晓

(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:以水电站大坝下游河道为研究对象,从分析天然日流量特征出发,基于月中值流量和月内典型特征流量绘制了河流生态流量特征图,作为水库下泄生态流量的确定依据。基于此河流生态流量特征图,建立了判断生态流量满足程度的7d流量偏差率、7d生态需水保证率、月均生态需水适宜度及基于此3个指标的生态需水综合指标,并给出了各指标的评价依据和评价方法。结果表明,河流生态流量特征图符合各时段河流天然流量的基本特征,可作为指导水库生态泄流的依据;所建立的生态流量评价方法能够反映实际下泄流量与天然流量的变化程度,可用于评价河流的生态流量满足程度。

关键词:河流生态流量;生态流量特征图;生态流量评价;水库调度

中图分类号:TV213 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)01-0099-07

Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow

TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, BI Yuxiao

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

Abstract: Taking the downstream of the dam of hydropower station as the research object, by analyzing the natural day-flow characteristics, a diagram of river ecological flow characteristics was drawn based on the monthly mean flow and flow of typical characteristics, being the standard of ecological flow of reservoir water release. Based on the diagram of river ecological flow characteristics, the deviation rate of 7-day flow, the guarantee rate of 7-day ecological water demand, the monthly average suitability degree of ecological water, and the comprehensive index of ecological water demand based on these three indexes were set up to judge the satisfaction level of ecological flows; and the evaluation basis and evaluation method of each index were given. The results show that the diagram of river ecological flow characteristics conforms to the basic characteristics of river natural flow of each period, and it can be used as a basis for guiding the reservoir ecological discharge; and the evaluation method of ecological flows set up can reflect the changes of discharge flow and natural flow, and it can evaluate the satisfaction degree of river ecological flow.

Key words: river ecological flow; characteristics diagram; evaluation of ecological flow; reservoir operation

河流生态流量是指为保护河道内生态环境,需要保留在河流、湖泊、沼泽内的水量及过程,即维持河道内水生生物生存和生物多样性,以及防止河道泥沙淤积、水质污染、海水入侵、河道断流、湖泊萎缩所需要的河道流量^[1]。然而,成千上万座大坝和分水渠的建设和运行改变了全球的水文循环,导致世

界范围内河流生态系统的功能退化和生物多样性的消失^[2]。大型水库可直接控制其下游的泄流过程,但目前大多水库运行调度中没有充分考虑河道生态流量需水,致使水库的泄流量过程与河流原有的天然流量过程有较大的差异,给下游的生态环境系统带来不利影响^[2-3]。20世纪40年代 Tennant 提出了

作者简介:涂晶晶(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。E-mail:tujingjing80@163.com

通信作者:艾学山,副教授。E-mail:ssai@whu.edu.cn

表1 各等级流量生态作用

流量等级	生态作用
枯流量	保证水生生物的基本生存环境,保证河床受到充分的日照,促进或抑制某种生物的生长,同时驱逐入侵的外来物种
基流量	为水生生物提供适当的生存空间;维持合适的水文条件;为陆生动物提供饮用水,使鱼类能够移动到捕食和产卵的区域
中高流量	塑造河道的自然形态;防止河滨植被侵占河道;在持续的小流量之后,冲走废弃物及污染物,恢复正常的水质状况,使河流波动防止发生“水华”现象
小洪水	为鱼类提供迁徙和产卵信号;触发新的生命周期,使鱼类能够到达洪泛区产卵;为幼体提供生存条件;控制洪泛区植物的分布和种类;沉积新的营养物质
大洪水	促使鱼类洄游及产卵;促使生命循环进入新阶段;使鱼类能够在滩区上产卵,为鱼苗提供成长的区域;通过延长淹没时间维持滩区植物类型的多样性;拓宽河道,形成新的栖息地;维持水生群落和河岸群落物种的平衡;塑造滩区的自然生境

d. 流量变化率。流量的变化率是指水流从一个流量变化到另外一个流量的速率,包含上涨率和下降率,变化率的大小可以较为直观地反映出河流的水文情势变化。

生态流量的确定不仅仅是确保河道内应该留有多少水,而是需要在一定程度上重塑河流的天然流态^[1,6-7]。根据河流历史天然流量信息,提取能够反映该河流天然水流情势的流量特征值,通过水库调度重现该过程,可以很大程度上维持河流的生态流量。

2 生态特征流量图

2.1 生态特征流量的选取

通过分析天然条件下长序列日流量数据,依据河流的天然流态特征及 Richter1996 年提出的 IHA 指标体系^[10-11],选取各月枯流量、基流量、中高流、小洪水、大洪水等 5 种特征流量对应的流量大小、发生时间、历时以及发生频率等,作为生态特征流量的要素。

2.2 各生态特征流量值的确定

a. 枯流量的确定。枯流量为河流流量较小时期的流量,往往制约着城市的发展规模、灌溉面积、通航的容量和时间,同时,也是决定水电站保证出力的重要因素。选择月中值流量较小的月份作为枯流量发生的月份,统计历年该月低于中值流量的各流量中值,并选取多年该流量的中值作为枯流量,同样,枯流量发生的历时选取历年相应流量发生历时的中值。

b. 基流量的确定。基流量即基本生态流量,是维系及保护河流生态功能所需、在河道内保留的基本流量,统计天然流量过程中各月的历年中值流量,并取其中值作为该月的基本生态流量。

c. 中高流量的确定。中高流量几乎在每个月

生态流量的概念,首次提出河流最小流量并给出了确定方法^[4-5];随后关于河流生态流量的定量研究不断被发展、完善,人们逐步认识到河流的健康与流量、流速等天然流量特征参数及生物的生活习性有密切联系,最小流量并不能完全满足生态流量需求,到 21 世纪初,提出的生态流量计算方法已超过 200 种^[5-6]。随着研究的不断深入,越来越多的科学家和河流管理者意识到,天然流量过程才是对河流生态系统最好的流量过程^[1,7-9]。

完全回归天然流量过程对生态系统健康有明显的积极作用,但同时将削弱修建水库的经济作用及社会作用。对于调节性能好、以发电为主要任务的水库,如果能够给定该河流下游的生态流量过程,可以通过水库调度来近似实现天然径流。因此,如何给定水库下游河段所需的生态流量过程,确定的流量过程是否合理成为此问题的核心。本文围绕这些问题,基于天然水流情势建立了生态流量特征图,用以模拟河流的生态流量过程,并建立由流量的连续性、可靠性和用水总量等 3 个方面及其综合指标组成的生态流量评价方法,分别对所模拟的流量过程和水库实际下泄流量过程逐月进行生态流量评价;最后,以实例说明所建生态流量特征图和生态流量评价方法的可行性和实用性。

1 河流天然流量的生态意义

河流生态系统的完整性很大程度上依赖于河流水流的天然动态变化的连续性特征,即河流水文情势^[2]。河流水文情势是河流生态系统的驱动力,对河流的健康具有重要的影响,因此,可通过研究河流水文情势来确定河流生态流量过程。对于一条河流,水文情势虽然具有随机性,但是也存在一定的规律性,可通过分析其多年的日流量过程分析其河流生态流量过程^[3]。河流水文情势可以从河流流量量级、流量历时、发生时间和变化率等几个方面分析^[1]。

a. 流量的等级和频率。依据流量量级将流量分为 5 个等级:枯流量、基流量、中高流量、小洪水和洪水。不同等级的流量营造不同的生境,均对河流生态系统起着不可替代的作用,各等级流量的生态作用如表 1 所示。

b. 流量历时。由于不同的物种对不同流量的承受能力不同,因此某一具体的流量历时经常对物种的生存产生重大的影响。

c. 流量发生时间分布。流量发生的时间对生态环境的影响极为关键,这是由于许多物种的生命周期与流量变化发生的时间是密切相关的。

都有发生,但各月发生的频率和历时不同,分析统计健康河流过程历年各月中高流量的流量中值,并统计其发生频率和历时,将中高流过程发生流量及历时简化为中高流脉冲。

d. 小洪水的确定。设定历史日流量资料系列中两年一遇的洪水为小洪水,统计各月历年发生的小洪水情况,将该月高于小洪水流量阈值的流量中值作为小洪水的洪峰值,各小洪水发生的时间长度的中值作为该月的小洪水历时。取其典型流量过程线特征作为代表性的小洪水过程,由于小洪水发生频率为两年一遇,因此在实际应用中该月的小洪水根据出现频率情况确定。

e. 大洪水的确定。大洪水通常可能给沿岸人们的财产带来灾害,但同时河流生态系统具有一定的积极作用^[12]。设定重现期为20年的洪水为大洪水,与小洪水确定方法类似,统计历年发生大洪水的月份及其历时,并确定代表性大洪水过程。由于大洪水发生频率较低,一般年份在生态特征流量里可不予考虑,只有当来水大于20年一遇时,可适当按照来水泄放大洪水过程。

2.3 生态特征流量图绘制

综合各生态特征流量的确定方法,可以得出各月的生态特征流量,将这些特征流量绘制在横坐标为时间、纵坐标为各月生态特征流量值的图中,即可得到生态特征流量图。在生态特征流量图中,各月的基流量以及其他特征流(枯流、中高流、小洪水、大洪水)流量的大小、历时及发生频率均以图形的形式直观表现。特征流量线与时间所包围的面积即为年生态需水总量。该生态特征流量图直观地反映了河流的天然流量变化过程的主要特征,可作为发电水库下泄生态流量过程的重要依据。

3 河流生态流量评价指标确定

在以天然流量为标准下基本满足生活发电需求,因此生态流量特征图可以作为水库生态泄流的基本依据,但它是否符合生态流量要求,需要一定的评价指标来确定^[13]。本文以历年河流天然流量特征作为其生态流量的确定依据,从流量变化、持续时间和发生时间等3个方面建立了7d流量偏差率、7d生态需水保证率、月均生态需水适宜度3个主要评价指标,并将此3个指标转换为一个综合指标评定河流健康状态。

3.1 7d流量偏差率

将多年逐月连续7d天然日流量(不足天数用下个月的天数补)的平均值中值作为标准值,以实际生态用水过程中连续7d的平均流量与该标准值

的偏离程度为指标,称为7d流量偏差率。该指标反映生态用水流量与历史同期天然流量的偏差程度,可为

$$C_i = \frac{Q_{ei}}{Q_{7i}} \quad (1)$$

式中: C_i 为7d流量偏差率; Q_{ei} 为第*i*月连续7d生态用水流量的平均流量; Q_{7i} 为历年第*i*月与 Q_{ei} 时间相应的连续7d天然日流量的平均值的中值。

因为生态流量与天然流量越接近越好,因此, C_i 值越接近1,说明计算流量越接近天然流量。

3.2 7d生态需水保证率

采用历年逐月连续7d(不足天数用下个月的天数补)的天然来水流量的平均值的中值作为指标值,以实际生态用水过程中连续7d的平均流量大于该标准值的保证率作为评价指标,反映生态流量的满足程度,则*i*月的7d生态需水保证率 P_i 为

$$P_i = \frac{N'_i}{N_i} \quad (2)$$

式中: N'_i 为第*i*月连续7d生态用水流量满足天然生态流量的天数; N_i 为第*i*月的总天数。

$P_i \in [0, 1]$,且该值越大说明满足天数越多,即连续生态需水保证率越高。

3.3 月均生态需水适宜度

将该月实际生态用水流量中值和特征极值与天然来水流量中值和特征极值的离散程度之和定义为月均生态需水离散系数,反映各月生态用水量与天然流量的离散程度。

$$F'_i = \left(\frac{Q_{mi} - Q'_{mi}}{Q'_{mi}} \right)^2 + \left(\frac{Q_{\text{极}i} - Q'_{\text{极}i}}{Q'_{\text{极}i}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: F'_i 为*i*月均生态需水离散系数; Q_{mi} 为第*i*月的生态用水量; Q'_{mi} 为第*i*月的计算天然流量; $Q_{\text{极}i}$ 为第*i*月极值特征流量; $Q'_{\text{极}i}$ 为第*i*月天然流量的特征极值。

月均生态需水适宜度指标为

$$F_i = 1 - F'_i/10 \quad (4)$$

该指标反映该月生态需水总量与天然来水总量的适宜程度,当 F_i 为1时,表示完全适宜;当 F_i 为0时,表示完全不适宜。当该月生态用水量与天然流量的离散程度 F'_i 值大于10时可视为完全离散,并取 F'_i 值为10。

3.4 生态流量综合指标

以上指标分别从不同角度对比生态流量特征图与天然流量过程,从连续流量过程及特征流量全面整体分析生态用水量与天然流量差异,生态用水量指数反映总水量情况,7d流量偏差率从连续7d流量值上评价生态流量的偏差,7d生态需水保

证率从满足生态流量的时间上评价生态流量的保证程度,而月生态需水满足度从水量角度分析生态流量与天然流量的满足程度,用几何平均值将3种指标综合为一个生态流量综合指标,用 W_i 表示。其计算公式为

$$W_i = \sqrt[3]{C_i P_i F_i} \quad (5)$$

其中, $W_i \in [0, 1]$ 。 W_i 越接近1,说明3个指标都越符合河流的天然来流,即视为河流越健康。因此根据 W_i 值可将河流健康状态分为5个等级: $0.8 < W_i \leq 1.0$ 为极佳, $0.6 < W_i \leq 0.8$ 为佳, $0.4 < W_i \leq 0.6$ 为中等, $0.2 < W_i \leq 0.4$ 为差, $0 \leq W_i \leq 0.2$ 为极差。

综上所述,生态需水量设定的合理与否可以根据生态需水量对天然流量的满足程度由综合系数指标反映与检测。

4 实例应用

4.1 东江水库概况

东江水库位于长江流域湘江水系耒水上游(图1),控制流域面积4719 km²。流域多年平均降雨量1645 mm,坝址多年平均流量144 m³/s,于1992年枢纽工程全面竣工,在其下游9 km处修建有具日调节能力的小东江水电站。东江水库是一个以发电为主,兼有防洪、航运、城镇工业及生活用水等综合利用的大型水电工程,其库容系数高达1.16,为多年调节水库,系目前国内已建和拟建水电工程中调节性能最好的水库之一,主要供华中地区电力需求,在电网中主要起补偿和调峰、调频等作用^[14]。

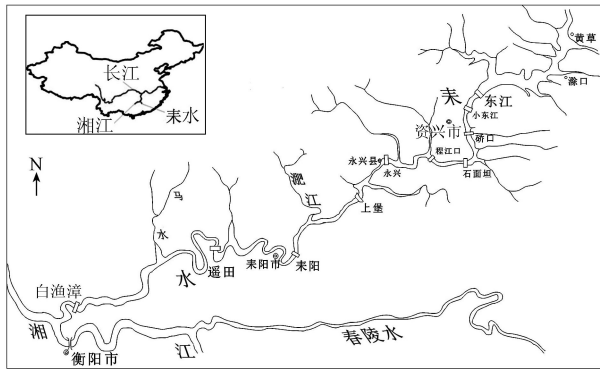


图1 耒水流域水系

4.2 东江水库的天然来水及出库流量特征分析

采用东江水库1952—2010年天然来水及1993—2010年水库泄流日流量数据资料,利用IHA软件,设定流量出现经验频率在10%以下的为枯流量,75%以上作为中高流量,2年、20年一遇洪峰流量分别为小洪水、大洪水流量阈值,统计出历年流量极小值,极大值,以及经验频率分别为25%、50%、75%的流量,结果见表2。中高流量、小洪水、大洪

水流量阈值分别为133 m³/s、1020 m³/s、2192 m³/s。分析水库的天然来水特征,绘制东江水库生态流量特征图,并分别对应用该特征图泄流和实际泄流过程进行了生态流量评价计算。

表2 东江水库特征流量

月份	特征流量/(m ³ ·s ⁻¹)				
	极小	P=25%	P=50%	P=75%	极大
1	21.5	30.6	47.4	72.5	118.3
2	25.6	41.7	66.0	111.4	223.0
3	20.1	77.2	105.0	143.8	415.0
4	31.2	129.0	153.7	218.7	445.0
5	19.6	123.3	222.0	258.0	440.0
6	13.6	116.0	155.3	203.5	292.0
7	18.0	65.1	75.6	119.8	216.0
8	20.2	60.5	85.8	104.3	174.0
9	20.7	54.8	73.1	98.2	140.0
10	23.6	46.0	57.6	69.4	181.0
11	24.8	34.7	42.2	66.5	122.5
12	21.2	30.1	37.8	50.8	104.0

根据以上统计结果可绘制东江水库月流量来水箱须图(图2)。箱须图是利用统计数据中5个统计量描述数据的一种统计方法,它可以辅助分析数据的对称性、数据分布的分散程度等^[15],方盒和线段的长短表明数据的四分位距大小,中间值为中值。由图2可以看出东江水库每月天然来水流量的分散程度。同理绘制水库运行(1993—2010年)后实际泄流量特征箱须图(图3)。

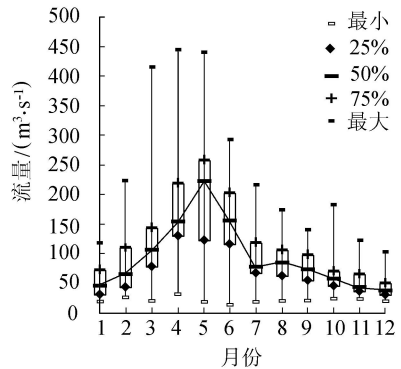


图2 天然来水量特征箱须图

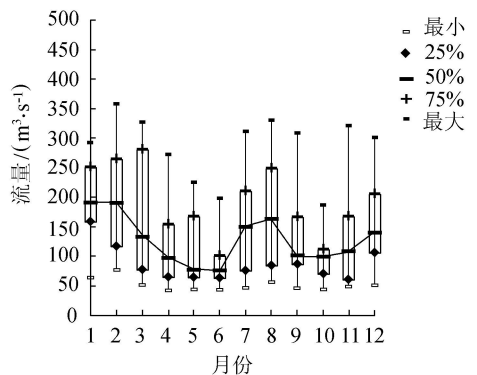


图3 水库实际泄流量特征箱须图

为分析出库流量与天然来水流量的差异,图3中增加了天然来水过程的中值(黑粗线所示),由图2和图3对比分析可得:①水库坝址断面的流量最低值和最高值均出现在天然来水情况下,且最低值在 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 以下,最高值在3—5月都超过 $400\text{ m}^3/\text{s}$ 。②建库后各月极低流量整体提高,而极高流量则出现原来很高的变小而原来较低的增大的现象,且各月的极高值均没有超过 $400\text{ m}^3/\text{s}$,即3—5月的极高值都明显降低,而在枯季的11月、12月和1月,极高值均超过建库前相应值的1倍多;③建库后的出流量在25%~75%区间内明显增多,极低流量与极高流量的距离也有缩短,即流量分布的分散程度降低,流量呈平缓状态;④将本来泄流中值流量较小的11月、12月、1月和3月转变为中值流量较大的时期,而丰水期的4—6月中值流量反而变成下泄流量最小的时期。由此可见,水库修建后,大坝下游的流量过程比入库流量过程有很大的改变。

4.3 东江水库生态流量特征图绘制

根据前述各特征流量的选取方法,分别确定东江水库各月的基流量、枯流量、中高流量、小洪水和在大洪水的特征值。特征流量图绘制具体分为3个步骤:

- a. 统计历年各月中值流量的中值流量,作为各月基本生态特征流量;
- b. 统计历年各月其他特征流量,并明确各月出现该特征流量的量级、时间、历时和重现期等信息;
- c. 综合以上两个步骤,以月份为横坐标,流量为纵坐标,首先绘制各月中值流量,而后加入各月枯流量、中高流量、小洪水和在大洪水信息,同时标注各流量的重现期,即可得到东江水库生态特征流量图(图4)。

4.4 东江水库泄流的生态流量评价

4.4.1 建库后水库实际泄流及按生态特征流量图泄流的评价结果

以坝址多年天然流量过程的统计特征作为评价

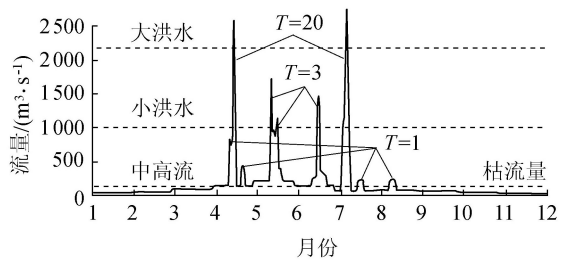


图4 东江水库生态特征流量

标准,以本文给出的生态流量评价指标计算方法进行各指标计算,分别对水库建成后实际运行的1993—2010年间的18年出库流量数据的统计值和本文所得到的东江水库下游河流生态流量特征图作为水库的泄流过程线进行了评价,得到这两种泄流情况下各月的生态流量指标值及评价等级(表3)。

表3计算结果显示,建坝后水库的实际运行中,由于对发电效益、电网稳定运行等经济和社会指标考虑较多,没有充分考虑生态用水的过程,使得实际泄流在很大程度上改变了河流原有的天然流量状态。如偏差率 C_i 在11和12月数值为0,仅在4—6月对天然流量改变稍小一些,在枯水期的1—2月又过大,最高可达3.30,很大幅度高于天然流量;保证率在4—6月为完全满足,而在10—12月与1月和2月时则完全不能满足;离散度 F_i 结果在7—8月时较差;综合评价结果显示,1年内河流健康等级无“极佳”和“佳”等级出现,等级为“中”的有3个月,为“差”的有4个月,为“极差”的有5个月。而按照生态特征流量图计算的生态流量评价指标结果,偏差率 C_i 均在0.5以上,最高能达到0.94(5月),保证率 P 全年各月均达到100%,离散度 F_i 也较小,综合指标 W_i 最小为0.77,最大达到0.93,河流健康等级为“极佳”的有10个月,为“佳”的有两个月,都能很好地符合天然来水状态,河流为完全健康状态。

为进一步验证所建方法的适用性,选取2010年

表3 两种泄流情况下的生态流量指标值及评价等级

月份	水库实际出流					生态特征流量				
	C_i	P_i	F_i	W_i	等级	C_i	P_i	F_i	W_i	等级
1	3.30	0.00	0.44	0.00	极差	0.82	1.00	1.00	0.93	极佳
2	1.94	0.00	0.92	0.00	极差	0.66	1.00	0.97	0.86	极佳
3	0.73	0.48	0.99	0.28	差	0.77	1.00	0.99	0.92	极佳
4	0.57	1.00	0.98	0.47	中	0.72	1.00	0.98	0.89	极佳
5	0.48	1.00	0.97	0.51	中	0.94	1.00	0.99	0.97	佳极
6	0.36	1.00	0.96	0.52	中	0.58	1.00	0.95	0.82	极佳
7	0.91	0.61	1.00	0.21	差	0.50	1.00	0.90	0.77	佳
8	0.87	0.97	1.00	0.24	差	0.51	1.00	0.91	0.77	佳
9	0.77	0.53	0.99	0.35	差	0.70	1.00	0.98	0.88	极佳
10	0.58	0.00	0.98	0.00	极差	0.73	1.00	0.99	0.90	极佳
11	0.00	0.00	0.87	0.00	极差	0.67	1.00	0.98	0.87	极佳
12	0.00	0.00	0.66	0.00	极差	0.68	1.00	0.97	0.87	极佳

表4 典型年(2010年)天然流量标准下不同泄流情况评价指标计算结果

月份	实际泄流					生态特征流量				
	C_i	P_i	F_i^-	W_i	等级	C_i	P_i	F_i^-	W_i	等级
1	1.13	0.52	1.00	0.77	佳	0.65	0.87	0.98	0.82	极佳
2	1.71	0.29	0.96	0.43	中	1.05	1.00	0.97	0.91	极佳
3	1.54	0.23	0.97	0.47	中	1.81	0.03	1.00	0.18	极差
4	0.31	0.63	0.95	0.57	中	0.64	0.93	0.97	0.83	极佳
5	0.27	0.58	0.95	0.53	中	1.19	0.71	0.94	0.81	极佳
6	0.27	0.5	0.95	0.50	中	0.49	0.77	0.98	0.72	极佳
7	1.47	0.42	0.99	0.60	佳	0.64	1.00	0.90	0.83	极佳
8	1.30	0.55	0.98	0.72	佳	1.06	0.68	0.99	0.86	极佳
9	0.67	0.93	0.99	0.85	极佳	0.55	1.00	1.00	0.82	极佳
10	2.59	0.00	0.77	0.00	极差	1.35	0.45	0.92	0.65	佳
11	3.64	0.00	0.04	0.00	极差	1.05	0.93	0.15	0.51	中
12	1.86	0.19	0.93	0.29	差	0.79	0.81	0.83	0.81	极佳

作为典型年,以该年的天然来水流量过程作为标准,分别以生态流量特征图和实际水库下泄过程为评价对象,进行两种泄流情况下的生态流量评价指标计算,计算结果如表4所示。

由表4可知,2010年,水库实际泄流计算偏差率最小值为0.27(5月和6月),最大值3.64(11月),除4—6月、9月外,其他月份偏差率均大于1,说明下泄流量过程在12个月中的8个月比天然来水流量增加了,而在来水流量较大的月份下泄流量减小幅度非常大,相当于对流量过程进行了重塑;从保证率来看,在10月和11月为0,其他月份也较低,说明生态需水没有得到保证;适宜度普遍较高,在1月高达1.0,说明各月下泄水量对天然来水的改变不大;综合指标最高为0.85,最低为0,年内河流健康等级分别有“极佳”1个月,“佳”3个月,“中”5个月,“差”1个月,“极差”2个月,从评价等级结果知,河流的健康受到一定影响。按生态特征流量图计算的结果,各月的偏差率除3月为1.81外,其他月份均在0.55~1.35之间;保证率也是3月小;适宜度多数在0.9以上,说明各月下泄的水量差异不大;综合指标最高为2月的0.91,最小为3月的0.18;年内河流健康等级分别有“极佳”9个月,“佳”1个月,“中”1个月,“极差”1个月,可见,按照生态流量特征图泄流可以使河流健康保持较好状态。

4.4.2 评价结果分析

根据上述结果可知,东江水库实际运行时下泄流量与天然来水过程相差巨大,势必对河流天然生态系统带来较大影响。而按照生态流量特征图法进行的水库调度,所得到的结果更符合河流天然流量状况,可在一定程度上弥补水库泄流对河流生态带来较大负面影响的不足。用生态调度图指导某一年的水库调度也能够得到令人满意的结果,该特征图可以用来指导水库的生态调度。可见,按本文所建

生态特征流量图法进行泄流将有助于河流的生态系统健康。笔者所建立的评价方法能够用来评价河流的生态流量满足程度,而且简单直观,易于发现生态流量没有满足的原因。

5 结语

笔者在以下几个方面对生态流量进行了研究:①通过建立含各种天然流态特征的生态流量特征图描述流域的生态需水过程,更好地符合河流天然状态;②将7d连续流量作为评价指标,体现了流量的连续性;以7d生态需水保证率为评价指标,体现了生态需水的可靠性;以月均生态需水适宜度为指标,体现了生态需水对水量的要求;③用3个指标的综合指标评价生态需水状况,从定量和定性两个方面综合评价生态流量;④在天然流量标准下,分别用实际泄流和按生态流量特征图泄流的流量结果进行评价,并选取了多年及典型年两个系列的泄流资料对河流健康状态进行评定,同时定性分析水库下泄与蓄水过程水量平衡,既证明方法的适用性及可行性,又得到了各种情况下水库下游的生态流量满足程度;⑤通过健康等级划分分析东江水库运行对河流健康的影响,并对比说明生态特征流量图法在指导水库的生态泄流中具有较强的可行性和实用性。

因为东江水库的巨大调蓄能力,水库下泄流量过程可很大程度上受管理者的控制,本文针对生态流量的确定,提出采用生态特征流量图方法确定生态需水过程,并给出生态流量评价指标:7d流量偏差率、7d生态需水保证率、月均生态需水适宜度及综合指标,从流量和时间两个方面综合评定生态流量对天然流量的满足度。将这些评价指标应用于东江水库,以天然流量为标准分别计算了长系列和典型年两种情况下按生态特征流量图泄流及实际泄流情况下各月的各评价指标值,并定性给出各种泄流

情况下的河流生态健康状态。结果表明,按照生态流量特征图的泄流方式较为符合天然流量过程,可以作为水库生态调度时的重要参考依据。

参考文献:

[1] POFF N L, MATTHEWS J H. Environmental flows in the anthropocene: past progress and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5: 667-675.

[2] POSTEL S, RICHTER B. Rivers for life: managing water for people and nature [M]. Washington D. C. : Island Press, 2005: 35-100.

[3] 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: 769-784.

[4] 崔琰, 张强, 陈晓宏, 等. 生态需水理论与方法研究进展 [J]. 湖泊科学, 2010, 22 (4): 465-480. (CUI Ying, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement [J]. J Lake Sci, 2010, 22 (4): 465-480. (in Chinese))

[5] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 变异条件下的黄河流域生态流量研究 [J]. 生态学报, 2011, 31 (17): 4826-4834. (ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River Basin with hydrological alterations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (17): 4826-4834. (in Chinese))

[6] ARTHINGTON A H, BUNN S E, POFF N L, et al. The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems [J]. Ecol Appl, 2006, 16: 1311-1318.

[7] 蔡其华. 充分考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式 [J]. 中国水利, 2006 (2): 14-18. (CAI Qihua. Taking eco-system protection into fully consideration and improving reservoir regulation process [J]. China Water Resource, 2006 (2): 14-18. (in Chinese))

[8] 程绪水, 万一. 构建生态用水调度体系推进淮河流域水

生态文明建设 [J]. 中国水利, 2013 (13): 42-46. (CHEN Xushui, WAN Yi. Regulation of ecological water use for water civilization construction of Huaihe River Basin [J]. China Water Resource, 2013 (13): 42-46. (in Chinese))

[9] 尹正杰, 杨春花, 许继军. 考虑不同生态流量约束的梯级水库生态调度初步研究 [J]. 水利发电学报, 2013, 32 (3): 66-72. (YIN Zhengjie, YANG Chunhua, XU Jijun. Ecological regulation of cascade dams in the lower Jinsha River under different ecological flow constraints [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (3): 66-72. (in Chinese))

[10] 杨娜, 梅亚东, 许银山, 等. 基于下游河道水流情势天然性要求的水库优化调度 [J]. 水力发电学报, 2012, 31 (5): 84-90. (YANG Na, MEI Yadong, XU Yinshan, et al. Downstream natural flow regime-based optimal operation of reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (5): 84-90. (in Chinese))

[11] 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: 397-441.

[12] 常福宣, 张洲英, 陈进, 等. 长江流域河道生态环境需水满足程度研究 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26 (9): 1-5. (CHANG Fuxuan, ZHANG Zhouying, CHEN Jin, et al. Study on satisfactory ratio of environmental water demand of river channels in Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26 (9): 1-5. (in Chinese))

[13] 万俊, 张勤, 刘胡, 等. 东江水库分期控制运用 [M]. 北京: 中国科学出版社, 2009: 1-8.

[14] HELSEL D R, HIRSCH R M. Techniques of water resources investigations of the United States Geological Survey [M]. Washton D. C. : U S Government Printing Office, USGU Publications, 2002: 171-194.

(收稿日期: 2014-04-11 编辑: 徐 娟)

(上接第 90 页)

[16] SL395—2007 地表水资源质量评价技术规程 [S].

[17] 高永胜, 王浩, 王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建 [J]. 水科学进展, 2007, 18 (2): 252-257. (GAO Yongsheng, WANG Hao, WANG Fang. Construction of evaluation index system for river's healthy life [J]. Advances in Water Science, 2007, 18 (2): 252-257. (in Chinese))

[18] 王淑英, 王浩, 高永胜, 等. 河流健康状况诊断指标和标准 [J]. 自然资源学报, 2011, 26 (4): 591-598. (WANG Shuying, WANG Hao, GAO Yongsheng, et al.

Index system and criteria for diagnosing the status of river health [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (4): 591-598. (in Chinese))

[19] BOULTON A J. An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis [J]. Freshwater Biology, 1999, 41: 469-479.

[20] HUGHES R M, PAULSEN S G, STODDARD J L. EMAP-surface water: a multi-assemblage probability survey of ecological integrity in the USA [J]. Hydrobiologia, 2000, 422/423: 429-443.

(收稿日期: 2014-10-03 编辑: 徐 娟)