

DOI:10.14188/j.1671-8844.2018-03-001

文章编号:1671-8844(2018)03-0189-09

河流环境流量计算方法及其应用

韩琦¹, 谈广鸣¹, 付湘^{1,2}, 杨会娟¹, 李想¹

(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. 武汉大学水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

摘要:研究了河流环境流量计算的 Desktop Reserve Model 方法与流量历时曲线转换法及其应用. Desktop Reserve Model 方法将环境流量过程分为基流量、高流量两部分, 将它们进行计算值叠加即可得到环境流量. 流量历时曲线转换法考虑不同的河流环境管理等级, 根据河流流量历时曲线, 推求相应的环境流量过程. 以三峡水库下游宜昌站为例, 利用两种方法进行了计算. 计算结果表明: Desktop Reserve Model 方法应用在长江流域具有一定的适用性, 该方法计算得到的环境流量占多年平均径流量的 41.2%; 而流量历时曲线转换法计算的环境流量过程可以较好地保持天然流量的情势, 维持 A~B 等级环境管理目标需要 60%~80% 的年平均径流量, 维持 C~D 等级需要 40%~50% 的年平均径流量, 维持 E~F 等级需要 20%~40% 的年平均径流量. Desktop Reserve Model 方法计算的环境流量与流量历时曲线转换法相比, 相当于维持 C~D 等级以上标准所需的环境流量.

关键词:环境流量; Desktop Reserve Model; 环境管理等级; 流量历时曲线转换

中图分类号:TV 147 **文献标志码:**A

Calculation methods of river environmental flow and their applications

HAN Qi¹, TAN Guangming¹, FU Xiang^{1,2}, YANG Huijuan¹, LI Xiang¹

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

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

Abstract: The desktop reserve model(DRM) method and flow duration curve shifting method for river environmental flow calculation are studied. In the DRM method, the process of environmental flow consists of two parts: base flow and high flow, the sum of which makes up the river environmental flow. While, considering different river environmental management levels, flow duration curve shifting method derives the environmental flow process based on the river flow duration curve. In the case studies, the aforementioned two methods are used to calculate the river environmental flow of Yichang Station, which is downstream of the Three Gorges Reservoir. The results indicate that the DRM method is suitable for the Yangtze River. The environmental flow calculated by DRM method needs 41.2% of the annual average runoff. The environmental flow process calculated by flow duration curve shifting method is relatively closer to the natural flow process. Maintaining A-B environmental management class needs 60% to 80% of the annual average runoff; and C-D class needs 40% to 50%, close to the calculation results of DRM method; and E-F class needs 20% to 40% of the annual average runoff.

Key words: environmental flow; desktop reserve model (DRM); environmental management level; flow duration curve shifting

收稿日期:2017-08-07

作者简介:韩琦(1987-),男,博士研究生,主要从事河流管理研究,E-mail:hqwhu@whu.edu.cn.

通讯作者:付湘(1971-),女,教授,博士生导师,主要从事水文及水资源研究,E-mail:xfu@whu.edu.cn.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:91647204,51339004).

随着河流生态与环境问题的日趋严重,国内外河流生态环境需水问题的研究也逐渐深入。从河流环境流量视角研究解决生态环境功能问题在国外经历了一个从维持河流生态环境最低需求、河流环境修复到恢复河流生态系统健康的过程,依据研究目的、研究对象与研究方法的不同,国内外河流环境流量的研究方法大致可分为 4 类:水文学法、水力学法、栖息地法和整体分析法^[1-3]。水文学方法主要基于某一频率的流量过程来确定生态环境需水,如: Tennant 法^[4]以一定百分比的年平均流量为基础,以满足鱼类和其他水生生物赖以生存的河流水流条件为目的,根据不同季节性需求来确定河流的生态需水量; Boner 等提出的 7Q10 法^[5]采用 90% 保证率下最枯连续 7 d 的平均流量作为河流所需最小环境流量的设计值; Matthews 提出的 Texas 法^[6]选取某一保证率下的月平均流量来表示河流所需的生态流量过程; Dunbar 提出的 NGPRP 法^[7]将不同年份划分为干旱年、湿润年、标准年,并取标准年组 90% 保证率对应的流量作为河流最小流量。李捷等^[8]界定了生态径流、最小生态径流、最大生态径流和适宜生态径流的概念,提出了逐月频率算法; 黄峰等^[9]在最小环境流量和适宜环境流量的基础上,提出了河流生态流量计算的流量区间比例法,分析不同情况下河流生态的保证方案; 朱才荣等^[10]从众多概念中提出了生径比概念,使用 Tennant 法、Texas 法、逐月频率算法、月保证率设定法及其改进法对汉江中下游作了生径比分析; 何俊仕^[11]等用流量历时曲线转移法对辽河干流铁岭站不同环境管理级别下的生态环境需水量进行年内分配计算,并与 Tennant 法进行比较,验证了该方法的适用性。水力学法是指水力学家根据河道断面的参数来确定河流所需生态流量。如以曼宁公式为基础,通过分析一个河流断面的实测地形资料,确定相关参数,并将其代表整条河流所需水量的 R2-Cross 法^[12]; 利用河道湿周作为水生生物栖息地的质量评价指标,来估算河道内所需生态流量值的湿周法^[13]等。最著名的栖息地法是河道内流量增加法(IFIM)^[14],作为世界范围内最常用的流量评价方法,IFIM 建立在解释群落分布的生态小生境概念(水力模型)基础上,同时还结合了大生境和微生境的概念。以澳大利亚的整体研究法^[15]、南非的构造块法(Building Block Methodology)^[16]、DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformation)法^[17]等为代表的整体分析法,旨在还原天然情势下河流的健康状态,并以此为目标制定一系列的方法用于指导和修复河

流生态环境。Smakhtin^[18-19]对整体分析法和水文学法进行改进,进行环境管理流量分级,并建立了基于流量历时曲线的环境流量计算过程,既考虑了环境的整体需求,又方便不同的管理者使用。

围绕河流生态环境需水问题的研究,不同学者从不同角度提出了诸如生态流量、环境流量、生态需水、环境需水、生态环境需水等相近概念。概括地讲,生态需水量应该是特定区域内生态系统需水量的总称,实质上就是维持生态系统生物群落和栖息环境动态稳定所需的用水量。环境需水量实质上是为满足生态系统的各种基本功能健康所需的用水。倪晋仁等^[20]认为大多数研究都不具备将生态需水和环境需水割裂开来讨论的条件,因此将两者结合起来提出生态环境需水量这一概念。需水量与流量是一个相对的概念,河流生态需水量、环境需水量占据河流自然来流量的一部分,这一部分流量分别称为“河流生态流量”、“河流环境流量”^[21]。研究方法中,水文学法和水力学法需要长序列和高精度的水文资料信息; 栖息地法需要大量野外勘测数据,耗时长,难以保证计算数据的精确性; 整体分析法需要多学科的综合资料数据。综上所述,在国内外的研究中,对于河流环境流量的概念并没有统一的定义,尚缺乏较强普适性的河流环境流量估算方法,因此建立一套科学、合理、全面的河流环境流量估算理论和方法将成为未来水资源规划、水生态研究的重点方向。

本文从不同管理层次的生态类别或环境需水要求出发,拟研究三峡水库下游的生态环境需水问题,采用环境流量的概念是可行的。选取宜昌水文站作为三峡水利枢纽出库控制站,研究了两种快速流量计算方法——Desktop Reserve Model 方法和流量历时曲线转换法在长江中下游地区的适用性,建立了可指导三峡电站运行调度的环境流量约束序列。对评估河流环境流量、开展以保护和修复河流环境为目标的水库运行调度具有一定的参考价值。

1 研究方法

1.1 Desktop Reserve Model 方法

为了克服构造块法涉及到一系列专家的判断、对使用者要求过高、计算复杂、不具有很强普适性的问题, Hughes^[22]以此为参考,总结出了一种简单实用的 Desktop Reserve Model 环境流量计算方法,以便快速定量地计算河流环境流量。

Desktop Reserve Model 方法将环境流量分为基流量和高流量两部分,将两部分流量进行叠加即可得到环境流量^[22]。根据平水年与枯水年又可以细

分为平水年基流量 MLIFR (Maintenance Low Instream Flow Requirements)、平水年高流量 MHIFR (Maintenance High Instream Flow Requirements) 以及枯水年基流量 (Drought Low Instream Flow Requirements)、枯水年高流量 (Drought High Instream Flow Requirements)。枯水年高流量相对于其他 3 部分流量来说非常小^[23],暂不考虑。现将计算方法介绍如下。

1.1.1 平水年基流量

平水年基流量用该年的基流量占年均径流量百分数表示,其计算公式如下:

$$MLIFR = LP_4 + (LP_1 \times LP_2) / (CVB^{LP_3})^{1-LP_1} \quad (1)$$

式中:MLIFR 为平水年基流量;LP₁、LP₂、LP₃ 和 LP₄ 为生态类别 I~IV 需要量化的参数,其分类见表 1;CVB 为流量变异指数。CVB 的计算式为

$$CVB = \sum CV / BFI \quad (2)$$

式中:∑CV 为湿季和旱季的 3 个主要月份变异系数的平均值总和;BFI 为基流指数,是基流量与年总径流量的比值,反映河流短期变异的适应能力,高 BFI 值的河流比低 BFI 值的河流具有更强的变异适应性,即稳定性。式(1)仅适用于流量变异指数≥1,式(1)中各参数取值见表 2。基流指数根据数字滤波方法来计算^[24],见下式:

$$\begin{cases} q_m = aq_{m-1} + \beta(1+\alpha)(Q_m - Q_{m-1}) \\ Q_{bm} = Q_m - q_m \\ BFI = Q_{bm} / Q_m \end{cases} \quad (3)$$

式中:Q_m 为第 m 时段的总径流量, m³; q_m 为第 m 时段过滤后的地表径流, m³; Q_{bm} 为基流成分, m³; α、β 是滤波参数,一般取 β=0.5, α 参考相关资料^[25]取 0.95。

表 1 生态类别判定表

Table 1 Classification of ecological categories

类别	整体水文改变度	描述
I	0~10%	接近自然的河流
II	11%~20%	极少人为影响,基本生态系统功能无变化
III	21%~50%	适度的人为影响,基本生态系统功能无变化
IV	51%~70%	人为影响程度高,基本生态系统功能已发生大量变化
V	71%~100%	人为影响程度很高,大范围地丧失了基本生态系统功能

1.1.2 平水年高流量

Desktop Reserve Model 方法假定平水年高流

表 2 平水年基流量计算的参数

Table 2 Parameter values of the equation to estimate MLIFR

生态类别	LP ₁	LP ₂	LP ₃	LP ₄
I	0.900	79	6.00	8
I / II	0.905	61	5.90	6
II	0.910	46	5.80	4
II / III	0.915	37	5.60	2
III	0.920	28	5.40	0
III / IV	0.925	24	5.25	-2
IV	0.930	20	5.10	-4

量随着流量变异指数的增加而增加(与低流量相反),故引入 Box-Cox 变换的正常累积概率密度函数来计算^[22],公式如下:

$$\begin{cases} \gamma = (x^\lambda - 1) / \lambda \\ x = \ln(CVB) / \ln(100) \\ \text{if}(CVB > 15) \\ MHIFR = (\gamma \times HP_2 + HP_3) + (CVB - 15) \times HP_4 \\ \text{else} \\ MHIFR = \gamma \times HP_2 + HP_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中:MHIFR 为平水年高流量(用占年均径流量百分数表示);x 为 0~1 之间的不变量;λ 为估算方程中的一个参数,相当于 HP₁;HP₁、HP₂、HP₃ 和 HP₄ 是生态类别 I~IV 需要量化的参数。公式(4)要求 CVB≥1,若 CVB<1,可取 CVB=1 进行计算;若 CVB>100,则取 100。各参数取值见表 3。

表 3 平水年高流量计算的参数

Table 3 Parameter values of the equation to estimate MHIFR

生态类别	HP ₁	HP ₂	HP ₃	HP ₄
I	0.90	13.00	10.0	0.015
I / II	0.80	11.00	8.5	0.015
II	0.72	9.00	7.2	0.015
II / III	0.66	7.75	6.2	0.015
III	0.61	6.70	5.5	0.015
III / IV	0.58	5.90	4.9	0.015
IV	0.55	5.50	4.5	0.015

1.1.3 枯水年基流量

枯水年基流量可以认为是河流保持最低生态功能的流量,与生态类别 IV 类的平水年基流量相等^[22],见公式(1)及其结合表 1 与表 2 的计算。

1.2 流量历时曲线转换法

Desktop Reserve Model 方法的基本概念在一定程度上具有生态学的意义,Smakhtin^[18]等根据这些原则,应用该方法对其他区域河流的环境流量进行评估,发现地区性的参数并不普遍适用于其他地

区;在考虑资料获取、参数率定、管理者使用的难易程度基础上,将 Desktop Reserve Model 方法进行简化,保留主要原则,建立了环境管理等级并围绕流量历时曲线建立了一套基于月流量过程的河流环境流量计算方法^[19]。

1.2.1 河流环境管理等级

河流环境管理等级(Ecological Management Category, EMC)的环境流量是为了便于人们在不同河流管理质量要求下,计算环境流量以保护河流

生态环境健康^[21-22]。河流管理等级一共分为 A~F 共 6 个等级,见表 4,等级越高,需要分配河流更多的水以维护河流生态系统健康。理论上,河流管理等级的环境流量确定应该基于流量与生态之间的经验关系,确定识别不同环境流量等级的阈值。但是,到目前为止缺乏这些阈值的定量研究,河流管理等级划分通过一定的专家经验,定性描述各个等级河流的状态和要求。

表 4 河流环境流量管理等级

Table 4 River environmental management classes

EMC	最可能的生态条件	管理观点
A	自然河流,河流和沿岸栖息地仅微小的改变	受保护的河流和盆地、水库和国家公园,不允许新建水利设施(水坝建设)
B	轻微改变的河流,有水资源开发和利用,但生物多样性和栖息地完整	可以用于灌溉和供水
C	生物的栖息地和活动受到干扰,但基本的生态系统功能仍然完好,一些敏感物种在一定程度上丧失或减少,有外来物种存在	与社会经济发展存在冲突,例如大坝、分流、栖息地改变和降低水质
D	自然栖息地,生物种群和基本生态系统功能有巨大变化,物种丰富度明显降低,外来物种占优势	与流域和水资源开发存在明显的冲突,包括水坝、分流、栖息地改变和水质退化
E	栖息地的多样性和可用性下降,物种丰富度明显降低,只有耐受的物种才能保留,植被不能繁殖,外来物种入侵生态系统	高人口密度和广泛的水资源开发,一般而言,这种状况不能作为管理目标而被接受,应该将管理干预措施转移到更高的管理类别
F	生态系统已经完全改变,几乎完全丧失了自然栖息地和生物种群,基本的生态系统功能已被破坏,变化是不可逆转的	从管理角度看,这种状况是不能接受的,为恢复流域格局和河流栖息地需要将河流移动到更高的管理类别

1.2.2 河流环境流量的推求

1) 典型流量历时曲线

典型流量历时曲线(Representative Flow Duration Curve)的绘制要求流量资料应该是天然河流情况下不受人类活动影响的月流量资料。典型流量历时曲线是在流量历时曲线上,选取代表性的 17 个频率点及其相应的流量绘制而成。其中,流量历时曲线由长序列月径流资料从大到小的顺序进行排频而成,代表性的频率点为 0.01%、0.1%、1%、5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、95%、99%、99.9% 和 99.99%。使用这 17 个频率点的流量历时曲线即可完全覆盖和刻画各种河流流量。

2) 不同河流管理等级的环境流量历时曲线

Smakhtin 认为各等级的环境流量总是小于一个参考的流量情势^[18],因此,将典型流量历时曲线进行横向平移获得各个等级的环境流量历时曲线(Environmental Flow Duration Curve)。流量历时曲线横向移动一步是指原来超过 99.99% 频率对应的流量现在将超过 99.9% 频率的时间,原来超过

99.9% 频率的流量现在将超过 99% 频率,对于 A 级环境流量的河流,环境流量历时曲线由典型流量历时曲线从原始位置沿概率轴向左平移一步确定,对于 B 级环境流量的河流,环境流量历时曲线由典型流量历时曲线从原始位置沿概率轴向左平移两步确定,其余等级同理,具体见图 1。

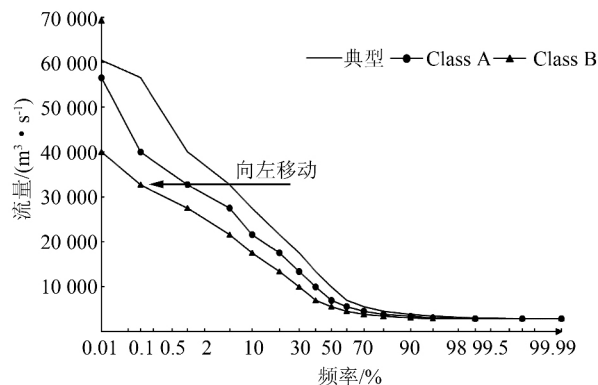


图 1 各等级环境流量历时曲线转化过程
Fig. 1 Estimation of environmental flow duration curves for different environmental management classes by lateral shift

在移动的过程中,由于保证率的减少,总有一部分流量信息损耗,但是流量变化的趋势性得到保留;同时,由于环境流量历时曲线与横坐标包围的面积减少,整个环境流量过程所包含的总环境流量也会随着等级降低而降低。

3) 不同河流环境流量管理等级对应的环境流量

每个环境管理等级对应的环境流量历时曲线仅体现出一条河流所需环境流量的集合,能够反映一条河流的水量及其流量分布特征,但不能反映真实的流量序列。因此,本文运用流量历时曲线的空间插

值方法^[25],将研究站点的天然流量过程转换为环境流量过程。具体步骤为:在天然流量过程线(图2(c))上读取某月的流量值,然后在天然流量历时曲线(图2(d))上读取该流量值对应的频率,继而在某一等级下环境流量历时曲线(图2(b))上读取该频率值对应的流量值,该值即为某月的环境流量值(图2(a))。依次对每月的天然流量过程应用上述步骤进行转换,即可得到某一河流管理等级下的环境流量过程。利用不同河流管理等级的环境流量历时曲线,就可以获得各等级下的环境流量时间序列。

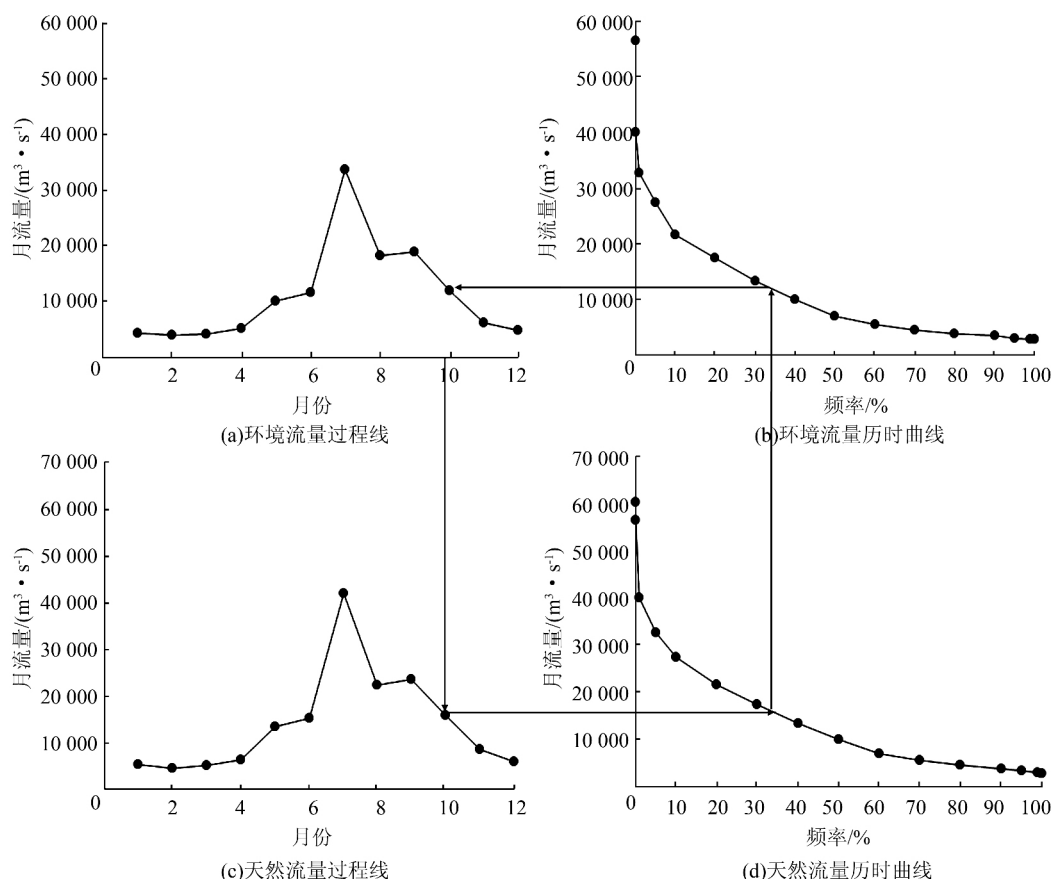


图2 天然流量过程与某一等级的环境流量过程转换示意图

Fig. 2 Illustration of transformation procedure from natural flow time series to environment flow time series

2 实例研究

以三峡水库的出库控制站宜昌站为例,收集到该站1950—2012年的径流资料,采用前述方法进行三峡水库下游河道的环境流量计算。其中1950—2002年为实测天然流量系列,而在2003年以后,三峡水库进入围堰发电期。由于水库建设运行的影响,河流径流资料的一致性常会遭到破坏。为了得到天然状况下的径流系列,需要对2003年以后的资料系列进行径流还原计算。根据水量平衡原理,可用下式还原水库下游控制站的径流量:

$$Q_{Y,t}^{\text{unreg}} = \Delta V / \Delta t + Q_{Y,t}^{\text{reg}} \quad (5)$$

式中: $Q_{Y,t}^{\text{unreg}}$ 为还原后的天然流量, m^3/s ; ΔV 为水库在 Δt 时段内蓄水量的变化量, m^3 ; Δt 为时间间隔, s ; $Q_{Y,t}^{\text{reg}}$ 为实测流量, m^3/s 。

2.1 Desktop Reserve Model 方法环境流量计算

由于长江流域年径流量较大,且枯水年基流量可由相应等级的平水年基流量推求得到。本案例研究只计算平水年基流量和平水年高流量作特定河流的适宜环境流量分析。利用1.1中的方法,根据宜昌站径流资料计算得到, $\sum CV = 0.4347$, $BFI = 0.7268$,故可得 $CVB = 0.5981$ 。按照计算公式要

求,取 CVB=1 计算.

由于长江宜昌站以上水电站相继修建,长江流域的生态环境受到一定的人工影响,根据蔡文君^[26]等人的研究,三峡水库运行对长江中下游的径流影

响属于中度改变,故根据表 1,综合判定其类别为Ⅱ/Ⅲ类.由表 2、表 3 查得对应参数,根据式(3)、(4)计算得平水年月分配的基流量、高流量、环境流量及环境流量占比,如表 5 所示.

表 5 平水年各月份环境流量计算

Table 5 Monthly environmental flow calculation results of maintenance flow

月份	多年月平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	基流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	高流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	环境流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	环境流量占比/%
1	4 300	2 191.57	43.67	2 235.24	52.0
2	3 860	2 078.85	29.65	2 108.50	54.6
3	4 163	2 106.72	65.52	2 172.25	52.2
4	5 982	2 404.15	328.11	2 732.26	45.7
5	10 700	3 379.37	750.07	4 129.44	38.6
6	16 750	4 974.20	1 109.76	6 083.96	36.3
7	27 700	8 104.66	3 209.79	11 314.45	40.8
8	25 800	9 206.04	776.83	9 982.87	38.7
9	24 300	8 955.50	554.88	9 510.38	39.1
10	16 600	6 417.81	953.34	7 371.15	44.4
11	9 325	3 272.23	476.29	3 748.51	40.2
12	5 630	2 492.32	93.31	2 585.63	45.9
合计	155 110	55 583.44	8 391.21	63 974.64	41.2

由表 5 可见,该环境流量占该站多年月平均流量的 41.2%,按照各月分配的环境流量与月平均流量的占比为 35%~55%.图 3 所示为平水年环境流量与Ⅱ/Ⅲ类别天然流量的对照比较图.

2.2 流量历时曲线转换法环境流量计算

根据典型流量历时曲线绘制要求,选取进行过还原的宜昌站 1950—2012 年月流量进行排频计算,得到典型流量历时曲线.将典型流量历时曲线进行平移,计算得到三峡下游河道各等级环境流量历时曲线,分别见表 6、图 4.

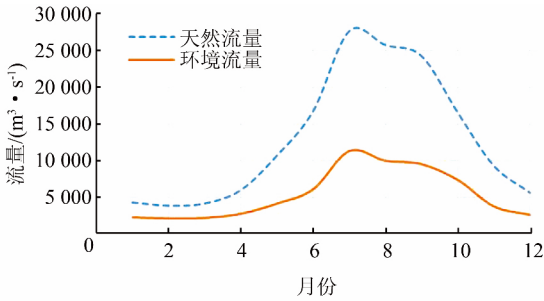


图 3 平水年环境流量与天然流量对比图
Fig. 3 Contrast chart of environmental flow and maintenance natural flow

表 6 环境流量历时曲线计算

Table 6 Calculation of environmental flow duration curve

频率/%	典型流量	不同 EMC 下环境流量						m^3/s
		A	B	C	D	E	F	
0.01	60 444	56 586	40 035	32 693	27 473	21 577	17 507	
0.1	56 586	40 035	32 693	27 473	21 577	17 507	13 372	
1	40 035	32 693	27 473	21 577	17 507	13 372	9 938	
5	32 693	27 473	21 577	17 507	13 372	9 938	6 961	
10	27 473	21 577	17 507	13 372	9 938	6 961	5 536	
20	21 577	17 507	13 372	9 938	6 961	5 536	4 511	
30	17 507	13 372	9 938	6 961	5 536	4 511	3 824	
40	13 372	9 938	6 961	5 536	4 511	3 824	3 447	
50	9 938	6 961	5 536	4 511	3 824	3 447	3 030	
60	6 961	5 536	4 511	3 824	3 447	3 030	2 868	
70	5 536	4 511	3 824	3 447	3 030	2 868	2 865	
80	4 511	3 824	3 447	3 030	2 868	2 865	2 862	
90	3 824	3 447	3 030	2 868	2 865	2 862	2 859	
95	3 447	3 030	2 868	2 865	2 862	2 859	2 856	
99	3 030	2 868	2 865	2 862	2 859	2 856	2 852	
99.9	2 868	2 865	2 862	2 859	2 856	2 852	2 849	
99.99	2 865	2 862	2 859	2 856	2 852	2 849	2 846	

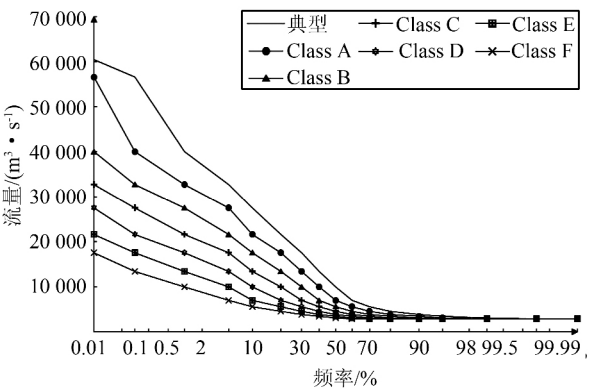


图 4 各环境管理等级对应的环境流量历时曲线
Fig. 4 Environmental flow duration curves for different environmental management classes

根据 1.2 节中目标环境流量的转换方法进行环境流量过程的计算. 由于长系列环境流量过程具有类似性,在此仅取 2004—2007 年(图 5)还原后月平均流量和对应各等级的环境流量进行分析.

从图 5 中可以看出对应每个等级的环境流量过程都保留了原流量的变化特征,都有高、低流量过程;随着 A~F 各个环境管理等级目标的下降,对应的环境流量也逐渐减小,在极端低值时 D、E、F 有重合,这是因为极端低值是线性插值的误差引起的,实际过程中,各等级环境流量过程线互不重合.

3 结果分析

国内外的一些研究发现,一般河道综合环境流量至少为年平均径流量的 10%^[23,28]. Desktop Reserve Model 方法计算得到宜昌站年环境流量占该

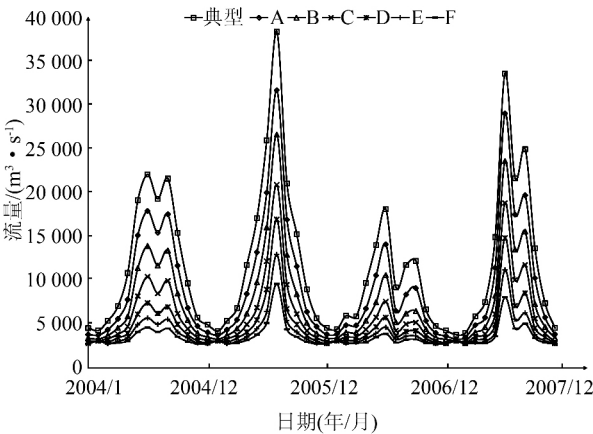


图 5 各环境管理等级对应的月环境流量过程
Fig. 5 Monthly environmental flow series for different environmental management classes

站多年平均流量的 41.2%,符合这一基本条件. 由此可见,Desktop Reserve Model 原始参数虽然是基于南非河流率定,但其对长江流域的环境流量的计算依然具有一定的适用性.

流量历时曲线转换方法计算得到的各等级对应年平均径流量以及各等级所需年平均径流量占总年平均径流量比例见表 7 和表 8. 从表中可以看出,维持 A、B 两个环境管理等级目标需要 60%~80% 的年平均径流量,维持 C~D 需要 40%~50% 的年平均径流量,维持 E~F 需要 20%~40% 的年平均径流量,与 Tennant 法生态需水计算标准相比较^[11],计算结果在合理范围之内.

表 7 各等级环境流量计算
Table 7 Monthly environmental flow calculation results at different classes m³/s

月份	多年月平均流量	不同 EMC 下环境流量					
		A	B	C	D	E	F
1	4 300	3 678	3 270	2 967	2 833	2 809	2 805
2	3 860	3 444	3 215	3 124	3 107	3 104	3 101
3	4 163	3 679	3 268	3 006	2 859	2 812	2 805
4	5 982	5 089	4 231	3 667	3 282	3 034	2 930
5	10 700	8 163	6 130	4 873	4 070	3 532	3 156
6	16 750	12 664	9 365	6 943	5 408	4 450	3 818
7	27 700	23 523	18 801	14 701	11 186	8 386	6 335
8	25 800	21 160	16 834	12 997	9 826	7 419	5 757
9	24 300	19 336	15 165	11 604	8 717	6 599	5 201
10	16 600	13 091	9 764	7 212	5 540	4 501	3 823
11	9 325	6 902	5 418	4 451	3 822	3 392	3 063
12	5 630	4 663	3 924	3 444	3 086	2 868	2 811

表 8 各等级环境流量占比计算

Table 8 Proportion of different classes environmental flow to annual flow

EMC	A	B	C	D	E	F
径流量 /亿 m ³	3 294	2 610	2 075	1 674	1 390	1 198
比例/%	80.85	64.06	50.93	41.09	34.12	29.41

4 结语

本文探讨了 Desktop Reserve Model 方法与流量历时曲线转换法及其在三峡水库下游宜昌站的应用,主要有以下结论:

1) Desktop Reserve Model 方法从概念框架到理论分析较完善,在公式计算中体现出了一定统计学、水文学、生态学的意义,对于河流环境流量计算具有一定的适用性。但涉及的模型参数较多,计算参数所需资料较多且难于获得,研究中使用的参数借鉴南非干旱地区河流率定的参数,致使枯水年基流量、平水年基流量与平水年高流量 3 部分的详细分项计算具有主观性,结果的客观性受到影响。

2) 流量历时曲线转换法确定 A~F 共 6 个河流管理等级的环境流量过程。该方法的原理是在河流天然流量-频率曲线上提取 17 个频率(0.01%、0.1%、1%、5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、95%、99%、99.9%和 99.99%)以及对应的月流量,构成典型流量历时曲线。A 级环境流量历时曲线由典型流量历时曲线沿概率轴向左平移一步确定,B 级环境流量历时曲线由 A 级环境流量历时曲线沿概率轴向左平移一步确定,其余 C~F 级环境流量历时曲线依次类推。然后,利用空间插值的思路,通过天然流量历时曲线与环境流量历时曲线将河流天然流量转换为河流环境流量。

3) 流量历时曲线转换法以流量频率曲线为基础,计算不同河流环境流量管理等级对应的环境流量,该方法所需资料少,且资料较易获取,计算方法既具有河流环境流量一般属性特征又具有当地河流特色,因而方法的普适性强。计算结果表明:维持 A、B 两个等级的环境管理目标需要年平均径流量的 60%以上,维持 C、D 等级需要年平均径流量的 40%以上,维持 E、F 等级需要年平均径流量的 20%以上,结果合理可靠。

4) 使用 Desktop Reserve Model 方法算得环境流量占多年平均流量的 41.2%,与流量历时曲线转换法计算结果相比,相当于维持 C、D 等级以上标准所需要的环境流量。

参考文献:

- [1] Caissie J, Caissie D, El-Jabi N. Hydrologically based environmental flow methods applied to rivers in the Maritime Provinces(Canada)[J]. River Research and Applications, 2015,(31):651-662.
- [2] 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.
- [3] 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]. 水力发电学报, 2013, 32(3):66-70.
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):66-70.
- [4] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [5] Boner M C, Furland L P. Seasonal treatment and variable effluent quality based on assimilative capacity[J]. Journal-Water Pollution Control Federation, 1982, 54 (54): 1408-1416.
- [6] Jr R C M, Bao Y. The Texas method of preliminary instream flow assessment[J]. Rivers, 1991, 2: 295-310.
- [7] Dunbar M, Gustard A, Acreman M, et al. Review of overseas approaches to setting river flow objectives [R]. Agency R&D Tech. Rep. W6B (96) 4. Inst. of Hydrology, Wallingford, UK, 1998.
- [8] 李捷, 夏自强, 马广慧, 等. 河流生态径流计算的逐月频率算法[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2916-2921.
Li Jie, Xia Ziqiang, Ma Guanghui, et al. A new monthly frequency computation method for instream ecological flow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2916-2921.
- [9] 黄峰, 张潇, 夏自强, 等. 河流生态径流计算的流量频率区间比例法[J]. 水电能源科学, 2014, (12): 26-29.
Huang Feng, Zhang Xiao, Xia Ziqiang, et al. Flow frequency interval ratio method for river ecological flow calculation[J]. Water Resources and Power, 2014, (12): 26-29.
- [10] 朱才荣, 张翔, 穆宏强. 汉江中下游河道基本生态需水与生径比分析[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 10-15.

- Zhu Cairong, Zhang Xiang, Mu Hongqiang. Analysis on basic eco-water demands and REF in mid-lower reaches of Hanjiang River[J]. Yangtze River, 2014, 45(12): 10-15.
- [11] 何俊仕, 冯德财. 流量历时曲线转移法在河流生态环境需水量计算中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(3): 341-347.
- He Junshi, Feng Decai. Flow duration curve shifting method and application on the calculation of eco-environmental flow[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(3): 341-347.
- [12] Mosley M P. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a Braided River, Ohau River, New Zealand[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 800-812.
- [13] Lamb B L. Quantifying instream flows: matching policy and technology [C]// Instream Flow Protection in the West. Island Press, Covelo, CA, 1989: 23-29.
- [14] Bovee K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology [Z]. Instream Flow Information Paper 12. USDI Fish and Wildlife Services, Office of Biology Services, Washington D C, 1982.
- [15] King J, Brown C, Sabet H. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers [J]. River Research & Applications, 2003, 19(5-6): 619-639.
- [16] 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.
- [17] Seaman M, Watson M, Avenant M, et al. DRIFT-ARID: A method for assessing environmental water requirements (EWRs) for non-perennial rivers [J]. Water SA, 2016, 42(3): 356-367.
- [18] Smakhtin V, Anputhas M. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins[J]. Iwmi Books Reports, 2006, 28(3): 13-23.
- [19] Smakhtin V U, Eriyagama N. Developing a software package for global desktop assessment of environmental flows[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(12): 1396-1406.
- [20] 倪晋仁, 崔树彬, 李天宏, 等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2012, (9): 14-19.
- Ni Jinren, Cui Shubin, Li Tianhong, et al. On water demand of river ecosystem[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, (9): 14-19.
- [21] 赖昊. 长江中下游环境流量计算方法及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- Lai Hao. Study on the calculation methods and application of environmental flow in the middle and lower reaches of Yangtze River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [22] Hughes D A, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(3-4): 167-181.
- [23] 陈星, 崔广柏, 刘凌, 等. 计算河道内生态需水量的 DESKTOP RESERVE 模型及其应用[J]. 水资源保护, 2007, (1): 39-42.
- Chen Xing, Cui Guangbo, Liu Ling, et al. The calculation of ecological water demand in river channel DESKTOP RESERVE model and its application[J]. Water Resources Protection, 2007, (1): 39-42.
- [24] Nathan R, McMahon T. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [25] 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 等. 数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用[J]. 水文, 2011, 31(6): 18-23.
- Cui Yujie, Liu Defu, Song Linxu, et al. Application of digital filtering theory in base flow separation in Xiangxi River watershed of Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 18-23.
- [26] Hughes D A, Smakhtin V. Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves[J]. Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques, 1996, 41(6): 851-871.
- [27] 蔡文君, 殷峻暹, 王浩. 三峡水库运行对长江中下游水文情势的影响[J]. 人民长江, 2012, 43(5): 22-25.
- Cai Wenjun, Yin Junxian, Wang Hao. Influence of operation of Three Gorges Reservoir on flow regime in mid-lower reaches of Yangtze River [J]. Yangtze River, 2012, 43(5): 22-25.
- [28] 余玲. 基于生态需水量的水资源承载力研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2011.
- Yu Ling. Study and application of water resources carrying capacity based on ecological environmental water requirements[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2011.