

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221983

# 基于水文学法的小流域生态流量研究

李 阳<sup>1</sup>, 邹 进<sup>1</sup>, 张 雷<sup>2</sup>, 刘 磊<sup>3</sup>, 周齐彬<sup>1</sup>, 何 潇<sup>1</sup>, 刘安友<sup>1</sup>, 容 祎<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院水电系, 云南 昆明 650500;

2. 云南省水利水电科学研究院, 云南 昆明 650228; 3. 云南省水文水资源局曲靖分局, 云南 曲靖 655000)

**摘要:** 为评估确定小流域适宜的生态流量,以珠江流域清水河为例,通过 Tennant 法、Texas 法、频率曲线法等 6 种水文学方法计算逐月生态流量,并进一步结合水文节律及生态流量保障率,对比枯、汛两个时期 6 种方法的优劣程度,获得最适宜小流域的生态流量计算方法来确定生态流量。结果表明,红旗水库断面生态流量在 0.12~1.52 m<sup>3</sup>/s 之间,普者黑断面生态流量在 0.30~4.95 m<sup>3</sup>/s 之间;水文节律拟合系数分别为 0.993、0.998,生态流量保障率均处于良好水平,生态流量选取结果合理。研究结果可为类似全国小流域选取适宜计算方法确定生态流量提供参考。

**关键词:** 清水河;生态流量;水文学法;水文节律;保障率

**中图分类号:** TV21

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0052-04

## 1 概况

清水河为珠江流域南盘江右岸二级支流、清水江左岸一级支流。清水河流域面积 1 533.5 km<sup>2</sup>,干流全长 78 km。多年平均降水量为 1 178.2 mm,5~10 月为雨季,降水占年降水量的 84%,11 月~次年 4 月降水占年降水的 16%,降水悬殊较大。流域上游红旗水库坝址至普者黑湖段,河道从红旗水库坝址起,自西向东汇入普者黑湖,河道长 10.1 km,河宽 6~15 m,河道较平缓,河道比降 2.0%,流速不大,多年径流平稳。下游普者黑湖出口至清水江汇口段,河道流向总体由西北向东南汇入清水江,全长 46.7 km,平均河宽 10~30 m,河道比降 6.3%,流速较大,从平面形态上看,为典型的弯曲山区河道,汛、枯季节水位变幅大。随着我国水资源的开发利用程度逐渐升高,河流生态用水被严重挤占,河道径流量满足不了水生生物群落基本生存发展,进而生物多样性锐减,水体自净能力减弱。对于小型流域,早期的生态监测资料较少,包括河道断面、水生物种及水文生态数据等,导致水力学法、生境模拟法和整体分析法的应用具有一定困难。而水文学法应用广泛、成熟,对资料要求低,计算方便、高效<sup>[1]</sup>,

但单一考虑水文学法计算生态流量具有局限性,为合理确定年内不同时间段的生态流量,加入水文节律及生态流量保障率两项指标作为确定标准。河流的水文节律形成了特有的水生生物群落分布特征,是生态流量确定的一个重要参考<sup>[2]</sup>。生态流量保障率则是在一定时间序列内,河流径流量大于生态流量时期所占比值,能直接反映河流生态系统盈亏水情况。鉴此,本文以清水河流域上下游典型断面为例,基于上游红旗水库与下游普者黑两个水文站 1981~2018 年逐月实测月平均径流量资料,采用 6 种水文学法,并结合水文节律和生态流量保障程度综合确定生态流量,可为清水河流域水生态保护红线划定提供依据。

## 2 研究方法

### 2.1 水文学法

(1)Tennant<sup>[3]</sup>法。参考伍立群等<sup>[4]</sup>提出的适合云南省河流枯期生态流量确定办法,应取枯期多年月平均流量的 20%。汛期生态流量则参考 Tennant 法取值,应取汛期多年月平均流量的 30%。

(2)Texas 法。是以特定保证率的月平均流量的某一百分比来确定生态流量,选取 50%保证率下月平均流量值的 20%作为生态流量<sup>[5,6]</sup>。

**收稿日期:** 2022-09-22, **修回日期:** 2022-11-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(41061053)

**作者简介:** 李阳(1996-),男,硕士研究生,研究方向为水资源与水生态,E-mail:599387838@qq.com

**通讯作者:** 张雷(1986-),男,高级工程师、硕导,研究方向为高原特色农作物节水灌溉,E-mail:554117864@qq.com

(3)频率曲线法。通常需 30 年以上长序列水文资料的月平均流量构建月水文频率曲线,选用一定频率的月平均流量作为河流的生态流量。根据相关规范<sup>[7]</sup>,选取 95% 保证率下对应的月平均流量值作为生态流量。

(4)VMF 法<sup>[8]</sup>。以月为尺度,按一定算法则将月平均流量划分为丰、平、枯三个水期,并通过分配不同水期月平均流量的百分比来确定生态流量,其计算原理见文献[2]。

(5)Tessman 法。计算原理见文献[2]。

(6)NGPRP 法。将月平均流量划分为丰、平、枯水年,参考文献[9]取平水年 90% 设计保障率流量作为生态流量。

### 2.2 水文节律评判方法

选用 SPSS26 软件将计算的生态流量逐月序列与实测径流序列进行相关性分析,以此探究水文节律变化。得到的 Pearson 相关系数  $R$  可定量分析两者相关关系, $R$  越趋于 1,表明相关程度越高。

### 2.3 生态流量保障程度分析方法

生态流量保障程度指的是在一定时间序列内,河道内径流量大于生态流量的时期占总时间序列的比值,从年内逐月变化分析生态流量满足程度,计算 38 年间红旗水库断面和普者黑断面逐月生态流量保障率为:

$$T_i = (P_{ib}/P_i) \times 100\% \quad 1 \leq i \leq 12 \quad (1)$$

式中,  $T_i$  为第  $i$  个月份生态流量保证率;  $P_{ib}$  为 38 年间第  $i$  个月份满足生态流量的月份数;  $P_i$  为 38 年间第  $i$  个月份的总数。

## 3 结果与分析

### 3.1 计算结果

(1)生态流量计算结果。各种水文学法计算的两断面生态流量见图 1。由图 1 可看出,红旗

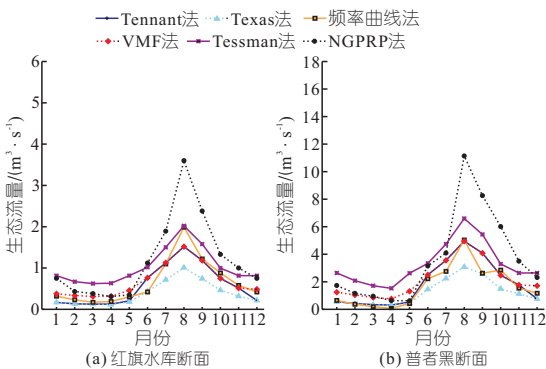


图 1 上下游断面 6 种水文学法逐月生态流量计算结果  
Fig. 1 Monthly ecological flow calculation results of 6 hydrological methods in upstream and downstream sections

水库断面的所有方法中 NGPRP 法计算的生态流量值最高,为 8 月  $3.60 \text{ m}^3/\text{s}$ ,Tennant 法、Texas 法年内计算最低,3 月仅有  $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ ;普者黑断面与红旗水库断面计算结果相似,但普者黑断面整体生态流量值高于红旗水库断面,其中 NGPRP 法年内计算最高值为 8 月达  $11.14 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而最低只有 5 月  $0.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,年内变化差异大。两断面枯水期 Tennant 法、Texas 法、频率曲线法等计算方法结果较低,是由于这三种方法采用多年月平均流量的一定百分比或某一保证率下的月平均流量作为生态流量,而清水河流域枯水期流量较小,导致计算结果偏小。汛期 NGPRP 法计算结果较高,原因是该方法更侧重汛期时段的生态流量研究,导致计算结果偏大。而 VMF 法和 Tessman 法是以月为计算尺度,多用于全球尺度的生态流量计算,计算结果更均衡。

(2)水文节律拟合度结果。生态流量的取值结果应符合河流周期性、季节性变化,维持河流自然栖息地的天然水文状态。因此,本文通过将生态流量与天然径流进行相关性分析,从年内逐月平均流量、汛期和枯水期角度定量分析两者关联程度。计算结果采用相关系数  $R$  来描述各方法生态流量与天然径流拟合程度,越接近 1 说明两者拟合程度越高。结果见表 1。由表 1 可知,两断面 6 种方法全年内生态流量与天然径流水文节律均具有较强的相关性。汛期频率曲线法和 NGPRP 法计算的生态流量在两断面的水文拟合效果较差。由图 1 可知,两种方法计算的生态流量在汛期波动大,导致不能很好地反映径流水文节律。枯水期 Tessman 和 NGPRP 法计算的生态流量在两断面的水文拟合效果较差。枯水期 Tessman 法对于部分特枯月份会将月平均径流全部分配给生态流量,同时由于 NGPRP 法注重汛期时段的生态流量计算,会导致枯水期计算的生态流量接近天然径流值。从而使计算的生态流量值无法符合径流的水文节律变化。

表 1 不同时段相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients of different periods

方法	红旗水库断面			普者黑断面		
	全年内	汛期	枯水期	全年内	汛期	枯水期
Tennant 法	0.998	1.000	1.000	0.998	1.000	1.000
Texas 法	0.997	0.997	0.965	0.999	0.998	0.981
频率曲线法	0.953	0.921	0.919	0.954	0.845	0.981
VMF 法	0.994	1.000	0.995	0.994	1.000	0.992
Tessman 法	0.974	0.996	0.916	0.973	0.998	0.871
NGPRP 法	0.964	0.959	0.542	0.935	0.849	0.825

(3)生态流量保障度结果。生态流量保障程度是河道内水生生物群落健康生存的基础,河流流量长期低于生态流量会对水生生物健康产生影

响。生态流量的取值应考虑河流流量的满足程度,取值过高会导致河流流量满足度低,造成生态用水压力过大,取值过低则会导致河流流量满足度处于高水平,但无法保障水生生物群落生存。本文分别从全年内、汛期和枯水期逐月时期三个方面来计算清水河红旗水库和普者黑断面生态流量满足程度,结果见图 2。由图 2 可知:①红旗水库断面。全年内 Tennant 法、Texas 法、VMF 法和频率曲线法计算的生态流保障率趋势变化大致相同,保障率均在 90%左右,处于较好水平。汛期 NGPRP 法计算的生态流量保障率在 8、9、11 月均低于 80%,其余月份均高于 80%,保障率基本满足。其余各方法计算的生态流量保障率在汛期均维持在高水平。原因在于清水河流域在汛期时段降雨量急剧增加,降雨达全年 84%,导致径流量增加,对于各方法计算的生态流量均能基本满足;枯水期各方法计算的生态流量保障率相比于汛期呈整体下降趋势,其中 1~5 月 Tessman 法计算的生态流量保障率均低于 60%,最低 4 月的保障率为 39.47%。1 月 NGPRP 法计算的生态流量保障率为 68.42%。枯水期降雨少,径流量低,难以满足各方法计算的生态流量,因此整体保障率偏低。②普者黑断面。全年内 Tennant 法、Texas 法和频率曲线法计算的生态流量保障率均在 90%左右,且变化趋势基本相同。汛期 NGPRP 法计算的生态流量保障率在 8、9、10、11 月均处于 70%左右,此时段可能难以保障河流的

生态流量;枯水期各方法计算的生态流量保障率相比于汛期呈整体下降趋势,特别是 Tessman 法 3、4 月生态流量保障率仅有 31.58%。一方面由于枯水期降雨减少,河流量降低,另一方面为了保证上游普者黑湖景区的景观用水,会对河流进行拦蓄,导致下泄生态流量减少。

### 3.2 小流域生态流量计算方法优劣分析

通过 6 种水文学法计算出的生态流量,并结合水文节律与生态流量保障率两项结果指标,可判断各方法在小流域的适用性。NGPRP 法计算的生态流量更多考虑到汛期需求值,汛期的生态流量值往往过高,枯水期的值则相对过低,从而导致年内波动大,特别是在普者黑断面生态流量 0.62~11.14 m<sup>3</sup>/s 之间。且水文节律拟合效果较差,会对于依赖水文节律变化发展的水生物群落造成影响。生态流量保障率处于 70%~80%左右,对于清水河这类水资源短缺的小流域来说,保障生态流量具有一定压力。综合来说,NGPRP 法并不适用于小流域生态流量计算;频率曲线法在枯水期的水文节律拟合效果及保障率均处于良好水平,能很好满足此时段生物生存发展的最低流量要求,但在汛期时段的水文节律拟合效果较差,因此在小流域枯水期生态流量计算中有较好的适用性,但汛期不适用此方法;Tessman 法的计算则太注重枯水期的生态流量保护,导致枯水期将大部分径流分配给生态流量,而优势在于其旨在为河流的生态流量实现一种“公平性”,与其他方法相比汛期生态流量更均衡,水文节律拟合效果与保障率也较好;Tessman 法更适用于汛期小流域生态流量计算,枯水期则不适用;Tennant 法、Texas 法和 VMF 均是以多年月平均流量或 50%保证率下的月平均流量的一定百分比作为生态流量,优势在于计算出防止河流生态系统退化所需的最低流量,对于避免小流域不同程度的断流有较好保障,这三种方法水文节律拟合效果较好,保障率均在 90%左右,适用于小流域生态流量计算。

### 3.3 各月生态流量确定分析

为了更合理地确定生态流量,将年内划分为枯水期和汛期两个时段,通过两个时段计算的生态流量、水文节律和生态流量保障率结果,综合确定清水河流域两断面逐月生态流量。

(1)枯水时期(12 月~次年 5 月)。河道内径流量达最低,根据《水资源保护规划编制规程》<sup>[10]</sup>,南方河流生态流量不得低于多年月平均流量的 10%,同时考虑河道水生生物发展所需良

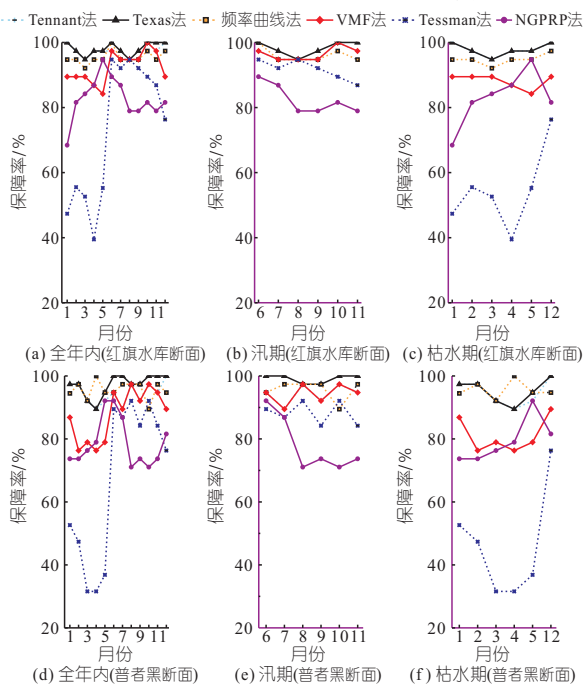


图 2 6 种水文学法不同时期生态流量保障率曲线

Fig. 2 Ecological flow guarantee rate curves of 6 hydrological methods in different periods

好环境,将此期间河流多年月平均流量的 20% 作为下限,即 Tennant 法计算结果。由于枯水期河道径流量较低,取频率曲线法、Texas 法和 VMF 法计算的最小值作为该时段生态流量。

(2) 汛期(6~11 月)。由于清水河雨季来临,径流量达到年内最高值,根据《河湖生态环境需水计算规范》<sup>[7]</sup> 计算导则,对于清水河流域这类用水紧张、水资源稀缺地区,取多年月平均流量的 30% 较好。因此,以多年月平均流量的 30% 为上限,取 Tennant 法、Texas 法、Tessman 法和 VMF 法计算的平均值作为此时段的生态流量。

最后综合分析得到清水河流域上游与下游断面逐月生态流量及保障率,结果见表 2、图 3。由表 2、图 3 可知,获得的生态流量水文节律拟合程度较好,生态流量保障率处于良好水平。计算结果可作为清水河流域生态流量值。

表 2 典型断面逐月生态流量

Tab. 2 Monthly ecological flow of typical sections

月 份	生态流量值		月 份	生态流量值	
	红旗水库断面	普者黑断面		红旗水库断面	普者黑断面
1	0.32	0.65	8	1.52	4.95
2	0.13	0.42	9	1.18	4.08
3	0.12	0.34	10	0.75	2.47
4	0.13	0.30	11	0.58	1.54
5	0.30	0.52	12	0.42	1.17
6	0.75	2.50	水文节律	0.993	0.998
7	1.13	3.49	相关系数		

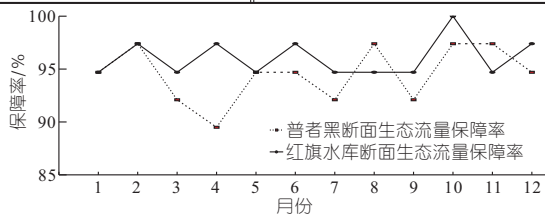


图 3 典型断面生态流量保障率

Fig. 3 Ecological flow guarantee rate of typical section

## 4 结论

a. 对于小流域的生态流量计算,Tennant 法、Texas 法和 VMF 法适用,NGPRP 法不适用。频

率曲线法汛期水文节律拟合程度差,Tessman 法枯水期保障率过低,两种方法不宜在其各时段计算生态流量。

b. 对清水河流域而言,在设置合理的生态流量上下限的情况下,汛期取适用方法的平均值、枯水期取适用方法的最小值作为生态流量,得到红旗水库断面和普者黑断面适宜生态流量值分别在 0.12~1.52、0.30~4.95 m<sup>3</sup>/s 之间。

## 参考文献:

- [1] 苏恒,徐宗学,李鹏,等. 基于多种水文学法的生态基流计算——以西江大湟江口河段为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(2):269-276.
- [2] 葛金山,彭文启,张汶海,等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法——以沙颍河周口段为例[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(2):75-80.
- [3] 徐志侠,董增川,周健康,等. 生态需水计算的蒙大拿法及其应用[J]. 水利水电技术,2003,34(11):15-17.
- [4] 伍立群,王超. 云南省河流生态需水量的片区特点[J]. 水文,2009,29(增刊1):116-119.
- [5] 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 基于基流比例法的渭河生态基流计算[J]. 农业工程学报,2011,27(10):154-159.
- [6] 钟华平,刘恒,耿雷华,等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展,2006(3):430-434.
- [7] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范:SL/Z 712-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [8] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. Hydrology and earth system sciences,2014,18(12):5041-5059.
- [9] 侯昕玥,徐宗学,殷旭旺,等. 小清河济南段生态基流估算研究[J]. 中国农村水利水电,2018(8):127-131,135.
- [10] 中华人民共和国水利部. 水资源保护规划编制规程:SL 613-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

## Study on Ecological Flow of Small Watershed Based on Hydrological Method

LI Yang<sup>1</sup>, ZOU Jin<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, LIU Lei<sup>3</sup>, ZHOU Qi-bin<sup>1</sup>, HE Xiao<sup>1</sup>, LIU An-you<sup>1</sup>, RONG Yi<sup>1</sup>

(1. Department of Hydropower Engineering, Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Institute of Water Resource and Hydropower Research, Kunming 650228, China; 3. Yunnan Provincial Hydrological and Water Resources Bureau Qujing Substation, Qujing 655000, China)

**Abstract:** To determine the appropriate ecological flow for small watershed assessment, taking Qingshui River in Pearl River Basin as an example, the monthly ecological flow was calculated by using six hydrological methods such as Tennant method, Texas method and frequency curve method. Furthermore, combined with hydrological rhythm and ecological flow guarantee rate, the advantages and disadvantages of the six methods were compared and analyzed in the dry and flood periods, and the most suitable ecological flow calculation method for small watershed was obtained to determine the ecological flow. The results show that the ecological flow of Hongqi Reservoir section is between 0.12-1.52 m<sup>3</sup>/s, and the ecological flow of Puzhehei section is between 0.30-4.95 m<sup>3</sup>/s. The fitting coefficients of hydrological rhythm are 0.993 and 0.998, respectively. The ecological flow guarantee rate is at a good level, and the ecological flow selection result is reasonable. The results can provide a reference for similar national small watersheds to select appropriate calculation method to determine the ecological flow.

**Key words:** Qingshui River; ecological base flow; hydrological method; water regime; guarantee rate