

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.015

# 南方季节性缺水河流逐月保证率设定法的改进

高玉琴,刘 钺,赵晨程,吴 迪

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**改进计算生态基流的逐月保证率设定法以适用于南方季节性缺水河流。构建逐月保证率设定模型,综合分析各类影响设定保证率因素,构建模型评价指标体系及评价标准,耦合 AHP 与熵值法求解指标组合权重,运用模糊综合评价法求评价值,并通过对比 Tennant 法、年内展布法等耦合最终适宜生态基流过程。以秦淮河流域为例,将计算结果与传统逐月保证率设定法计算结果对比,验证了改进方法的可靠性与优越性。

**关键词:**季节性缺水河流;生态基流;逐月保证率设定模型;模糊综合评价;秦淮河流域

**中图分类号:**TV211.1<sup>+</sup>1;P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0095-07

**Improvement on monthly guarantee rate setting method for seasonal water shortage rivers in South China**//GAO Yuqin, LIU Yue, ZHAO Chencheng, WU Di (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The monthly guarantee rate setting method for the calculation of ecological baseflow was improved to apply to the seasonal water shortage rivers in South China. The monthly guarantee rate setting model was constructed and various factors affecting the setting guarantee rate were comprehensively analyzed. The model evaluation index system and evaluation standards were constructed coupling with AHP and entropy method to solve the combination weight of the indexes. Fuzzy comprehensive evaluation method was employed to solve the evaluation value and final suitable ecological baseflow process was obtained by comparing the couple of Tennant method and annual distribution method. In the case of Qinhuai River Basin, the calculated results were compared with the traditional monthly guarantee rate setting method which verified the reliability and superiority of the improved method.

**Key words:** seasonal water shortage river; ecological baseflow; monthly guarantee rate setting model; fuzzy comprehensive evaluation; Qinhuai River Basin

生态基流<sup>[1]</sup>作为河流必须保证的最小流量阈值,在水资源配置过程中扮演重要角色,其内涵是为维持河流生态健康,河道内需保证一定数量和质量的流量。具体研究中,由于要协调河流生态系统平衡和人类经济生产活动,常拟定某一最低生态目标,称能满足这一目标的河道内流量为生态基流。视研究尺度不同,生态基流的尺度也不同。也有的学者计算中会额外加上蒸发量、渗漏水量、河道沿岸植被需水量、水土保持需水量等<sup>[2]</sup>,则又称生态流量,区别于生态基流。

南方河流总体水量丰富,但年内分配不均,近年来在人类生产活动干扰和气候变化等多重因素作用下,部分河流出现季节性缺水问题<sup>[3-4]</sup>。近年来人们

逐渐认识到季节性缺水带来的大量生态问题可以通过配置生态基流解决,然而目前适用于南方季节性缺水河流的生态基流计算方法还很缺乏。实际上,现有生态基流的计算方法很多,据不完全统计,有记载的已超过 200 种<sup>[1]</sup>,目前国内外学者仍不断改进和创新生态基流计算方法。生态基流的计算方法总体分为两大类:第一类主要通过建立生态基流与水文学、水力学参数间的关系来确定生态基流,视实际需求而侧重某一角度,分为水文学法和水力学法。如王西琴等<sup>[5]</sup>在 Tennant 法基础上提出月保证率设定法,并应用于黄淮海平原河道;马乐军等<sup>[6]</sup>引入空间插值法使得缺乏资料的断面能够估算生态基流;尚松浩<sup>[7]</sup>较为完备地研究了湿周法,最终确定

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20181310);中央高校基本科研业务费专项(2019B45314)

作者简介:高玉琴(1977—),女,副教授,博士,主要从事防洪与洪涝灾害、风险控制和水利规划等研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

幂函数描述无量纲化的湿周流量关系是适宜的;王庆国等<sup>[8]</sup>把多年平均流量与相应湿周长比值的平方根作为判定拐点的斜率值,使计算中河流特征的差异性表现出来。第二类深入研究生态-水文响应机理,建立生态保护目标与生态基流关系,关注栖息地水文、地理、水生动植物、人口、土地利用、水资源利用、保护物种等,反应信息广度大,计算复杂,包括栖息地法和整体分析法。如 Bovee<sup>[9]</sup>提出 IFIM (instream flow incremental methodology) 法,可对水生生物栖息地生境适宜性进行评价和模拟;郝增超等<sup>[10]</sup>提出一种基于栖息地模拟法的多目标评价法,能协调生态用水和经济用水;王俊娜等<sup>[11]</sup>以三峡水库及其坝下河段为研究对象,提出水文-生态响应法,计算结果为有生态保护目标、时间节点,包含多种水文要素特征的水文过程线。

对于南方季节性缺水河流,基于天然径流过程的水文学法能直观反映其河流季节性特点,并且在我国南方地区的生态基流应用实践起步阶段中,此类方法也是最易于操作的。基于此,本文对水文学法的逐月保证率设定法进行改进,旨在针对南方季节性缺水河流,提出一种结果更为可靠且计算相对简便的生态基流计算方法。

## 1 逐月保证率设定法的改进

### 1.1 传统逐月保证率设定法的局限

依据分析历史(长系列)流量资料统计方法的不同,水文学法又细分为多种不同的方法,如, Tennat 法<sup>[12]</sup>中生态基流等于河道多年平均流量乘以一定百分比;流量历时曲线法<sup>[13]</sup>中生态基流等于流量历时曲线上以某一保证率下求得的流量;Texas 法<sup>[14]</sup>中生态基流等于某一保证率下的月平均流量;NGPRP 法中生态基流过程等于标准年组(不同年份划为干旱年、湿润年、标准年)90% 保证率下对应的流量;年内展布算法<sup>[15]</sup>中多年最小年均流量与多年平均流量的比值等于各月生态基流与各月多年平均流量的比值,从而可求生态基流过程。

逐月保证率设定法是在流量历时曲线法基础上发展而来的,具体步骤为

**步骤 1:** 收集长系列日流量资料(至少 20 年),审查资料可靠性。

**步骤 2:** 推求月流量资料,对各月的流量资料多年系列值从小到大排序,按式(1)求其频率,利用皮尔逊Ⅲ型曲线<sup>[16]</sup>拟合,绘制各月流量历时曲线。

$$p = \frac{n - m + 1}{n + 1} \quad (1)$$

式中: $p$  为所求系列值的频率; $n$  为系列值总数; $m$  为

所求系列值的排位数。

**步骤 3:** 设定保证率,在流量历时曲线上求得对应流量,即为月尺度的设计年生态基流过程。一般通过简单定性分析设定保证率,直接区分四季,或者区分汛期与非汛期,取不同保证率即可。往往非汛期设定保证率 80% ~ 90%,汛期设定保证率 50% ~ 80%。

由此可以看出逐月保证率设定法较流量历时曲线法笼统地全年选取一个保证率来计算生态基流,更能体现河流季节性,适用于南方季节性缺水河流,并且计算十分快捷简便,但有两点局限:①此法的计算关键是保证率的设定,保证率设定值直接影响最终结果,然而其设定十分粗糙,且仅从水文学角度出发,缺乏全面、定量、有针对性地对各类影响保证率设定因素的考量。若能改进保证率的设定,此法的计算可靠度和精度都能得到极大提升。②得到的结果缺乏参照,其客观性和可靠性难以得到直观说明,对季节性河流来说尤其容易出现局部偏差。若能改善这一点,此法的可靠度和精度还能进一步提升。

### 1.2 改进思路

针对传统逐月保证率设定法的两点局限,从以下两方面进行改进:①构建逐月保证率设定模型,通过综合分析确定 4 类影响保证率设定的主要因素建立评价指标体系,结合目前保证率设定现状建立评价标准,进而确定权重,最终求解模型,力求得到更为科学客观的保证率设定结果,以适应南方季节性缺水河流生态基流的计算。②通过与 Tennant 法、年内展布法对比等方式,取包络线优化并确定最终生态基流过程,尽量避免局部偏差。

对于大型河流,不能简单取某一代表断面计算,应考量河段概况的一致性,划分为多个计算河段计算,在处理水文资料时还要注意避免极端情况。具体计算流程见图 1。

### 1.3 构建逐月保证率设定模型

针对保证率设定粗糙的局限,考虑影响保证率设定的主要因素,如不同河段、不同月份水质不同,生境条件不同,需要达到的生态目标也不同。从反应此类差异的角度出发,构建逐月保证率设定模型。

**a. 建立评价指标体系。**通过综合分析,为确保指标体系全面、客观、清晰,力求计算简便、数据易获取,分多层次确立逐月保证率设定模型的评价准则与指标:①水功能区划可反应河流水质需求,其中Ⅴ类以及劣Ⅴ类水质已不能维持河流生态系统健康,故不予考虑;②水生态保护目标可拟定为某种河流中可能存在的珍稀保护动物,本文以国家保护动物为例阐述;③生境条件分析,为保障河流生态系统不

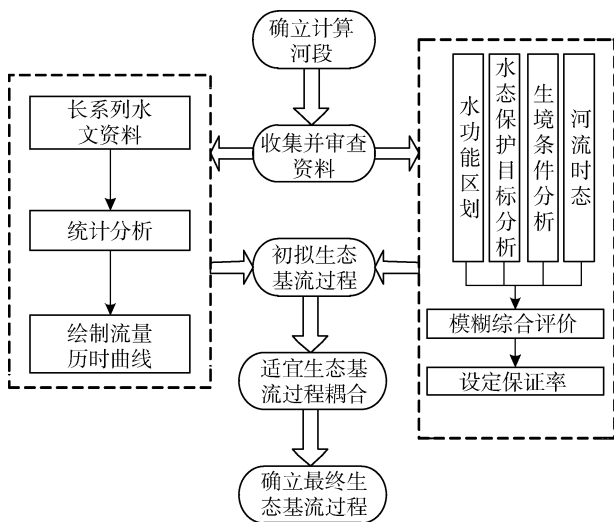


图1 改进的逐月保证率设定法计算流程

Fig.1 Calculation process of improved monthly guarantee rate setting method

再恶化,还需着眼于其中普通的水生生物,对南方季节性缺水河流,则可概化为普通鱼类的一般需求,包括产卵、育幼、成长<sup>[17-18]</sup>3个阶段,同时认定产卵期为4—6月,育幼期为7—10月,成长期为1—3月和11—12月;④体现河流季节性的河流时态,一般认为汛期水量多,可使河流生态系统健康达到较好的水平。为求层次清晰,便于阐述,具体建立评价指标体系见图2。需要注意的是,此处同一准则层下的“指标”并不是一般意义上的指标,其实际内涵是同一个指标对应的不同要求,但为对一个月份进行评价并设定保证率时能容易清晰地识别并赋值,故在本文中均按“指标”叙述。

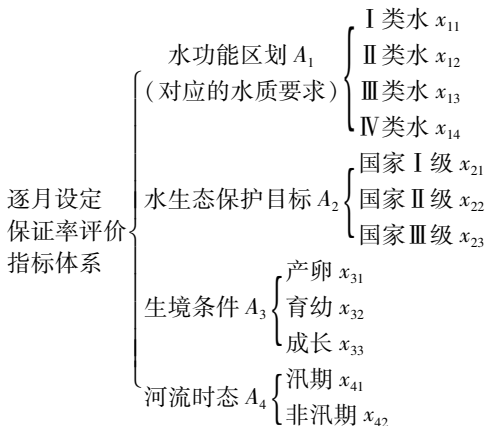


图2 逐月设定保证率的评价指标体系

Fig.2 Evaluation index of monthly setting guarantee rate

b. 逐月保证率设定模型构建。图2所示的评价指标体系实际上反映季节性河流各月对其自身生态系统所要维持的状态是有差异的,由此,构建逐月保证率设定模型:

$$E = \sum_{i=1}^m w_i r_i \quad (2)$$

式中: $E$ 为评价对象(某一个月份)的综合评价价值; $w_i$ 为第 $i$ 个评价指标的权重; $r_i$ 为第 $i$ 个评价指标的评价价值; $m$ 为评价指标个数。

c. 逐月设定保证率模型评价标准。综合考虑南方季节性缺水河流的生态现状和目前传统逐月保证率设定法中的保证率设定情况,为体现河流季节性特点,按对河流生态功能保证程度细化保证率为5个等级:90%、80%、70%、60%、50%。分析评价价值数学内涵、评价价值与评价等级间数学关系,拟定以上5个等级对应的评价标准分别为:最小评价价值占该评价价值的90%及以上、[80%, 90%)、[70%, 80%)、[60%, 70%)、60%以下。其中,最小评价价值即为12个月份评价价值中的最小值。

d. 指标权重求解。无论仅从客观角度还是仅从主观角度确定权重都有缺陷,故在确定逐月设定保证率指标权重时,主客观结合是很有必要。故耦合层次分析法(AHP)<sup>[19-20]</sup>与熵值法<sup>[21]</sup>求解指标主客观权重。①AHP计算流程:先构造判断矩阵,再进行层次单排序、层次总排序,最后进行一致性检验,检验未通过,则重新构造判断矩阵,再做一遍;检验通过,则得到主观权重。②熵值法计算流程:先对成本型、效益型指标进行原始数据标准化,再计算熵并修正,最后计算熵权得到客观权重。进而计算组合权重 $w$ :

$$w = \frac{w_{i1} w_{i2}}{\sum_{i=1}^{12} w_{i1} w_{i2}} \quad (3)$$

式中: $w_{i1}$ 为评价指标的主观权重; $w_{i2}$ 为评价指标的客观权重; $i$ 为指标序号。

e. 评价值求解。由于在生态基流计算中保证率设定所涉及的影响因素众多,具有不确定性、模糊性,而模糊综合评价法是一种以模糊推理为主,定量和定性相结合,精确和非精确相统一的评判方法,对于主、客观指标权重的评判都适用,同时计算简便,易于操作。故在本模型中基于模糊综合评价法的思想求解评价价值。

步骤1:确定因素集和评语集。本模型中,因素集为各层评价指标,评语集为按对河流生态功能保证程度可划分保证率的5个等级阈值:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{90\%, 80\%, 70\%, 60\%, 50\%\} \quad (4)$$

步骤2:计算单因素评价隶属度向量,形成隶属度矩阵。隶属度 $r_{pq}$ 是指多个评价主体对某个评价对象在各层评价指标方面做出某一评定的可能性程度,本模型按图2指标体系,可知其隶属关系明确,如需达到的水质要求为Ⅲ类水,则不必达到Ⅱ、Ⅰ类

水,也不能达到Ⅳ类水;若某一月份属于汛期,则不属于非汛期,属于水生生物成长期,则不属于育幼期、产卵期;对于生态保护目标,则按计算河道拥有所有的最高级别设定。故由此可得隶属度矩阵  $R = (r_{pq})$ , 并且对具体月份进行评价时,若该月属于该项,则  $r_{pq} = 1$ ;反之,则  $r_{pq} = 0$ 。其中  $p$  为指标个数,  $p = 12$ ,  $q$  为待评价项数,本模型逐次评价 12 个月,故  $q = 12$ 。

**步骤 3:**综合评判。按前述主客观组合赋权,可确定权重向量  $U$ 。考虑尽量保留单因素评判的全部信息,故选择加权平均算子,即按普通矩阵乘法的符号来计算:

$$E = UR \tag{5}$$

矩阵  $E$  包含各月的评价值,得此评价值后,再按前述评价标准即可得计算河段各月需设定的保证率。

### 1.4 适宜生态基流过程耦合

针对缺乏参照的局限,通过对比分析多种方法,耦合确立最终适宜生态基流过程。

实际上对于南方季节性缺水河流,大量研究<sup>[22-23]</sup>表明,单一方法计算结果较保守,应运用尽可能多的方法计算其生态基流,取最终包线结果更为准确。

Tennant 法<sup>[12]</sup>由于计算简便,常用作对其他方法的检验,其计算关键是百分比的确定,目前公认准则由 Orth 等<sup>[24]</sup>提出:①10%,表明栖息地差(退化或贫瘠),仅能维持大多数水生生物短时间生存,即只能满足生态系统的短时间需水;②20%,表明栖息地一般,能满足生态系统的一般需水,满足水生生物较长时间的生存;③30%,表明栖息地较好,能满足生态系统的普遍需求,此时河流的水深、流速、河面宽等都是适合生物生存的。年内展布算法<sup>[15]</sup>运用广泛,且采用同期均值比(即多年最小年均流量与多年平均流量之比),较直接设定百分比或保证率的方法更能体现河流的年内季节客观变化。故本文改进方法在得到初拟生态基流过程后,进一步利用 Tennant 法和年内展布算法分别求得计算河段的生态基流,与初拟结果进行比较取舍,并取适宜包络线作为最终结果。如可计算年生态径流(生态基流对应的径流量)占年径流总量的比例,分析河流季节性的体现,作为比较各类方法的依据。

## 2 实例验证

### 2.1 研究区域概况

秦淮河是长江下游南岸支流,处于江苏省境内,介于东经  $118^{\circ}39' \sim 119^{\circ}10'$ 、北纬  $31^{\circ}34' \sim 32^{\circ}10'$  之间,流域总面积约  $2631 \text{ km}^2$ ,位于湿润、半湿润区,亚

热带季风气候,四季变化明显,降水丰沛但年内降水分布不均,不同年份之间降水量差距大,是典型的南方季节性缺水河流。

近年来,高速城镇化给秦淮河带来大量生态问题,一方面人口暴增带来的生活污水、生产污水使水质持续恶化,尤其枯水期河流生态系统严重失衡;另一方面,城市建设使得河道变窄、变浅、硬化,渐渐无法水体自净,排涝困难。2005 年 7 月实施“引江换水”工程,但至今改善效果依旧有限。通过计算秦淮河的生态基流过程,便能以保证生态基流为目标对秦淮河进行生态调控,达到更有的放矢地增加秦淮河人工引水,改善其生态现状的目的。

### 2.2 基础数据处理

#### 2.2.1 确定计算河段,审查流量资料

根据图 3 秦淮河主要水系地理位置及水文测站分布,可将秦淮河划分为以下几个河段:句容河(北源—秦淮河前捍村站)、溧水河(南源—秦淮河前捍村站)、秦淮河干流(秦淮河前捍村站—东山站)、内秦淮河(东山站—三汊河口闸)、秦淮新河(东山站—秦淮新河闸站)。本文以内秦淮河段为例,选其中下游数据完备的武定门闸测站进行计算。

分析武定门闸已有 1984—2016 年共 33 年水文资料,剔除资料中年平均流量在 5% 保证率以下和 95% 以上年份的流量资料,可得内秦淮河多年平均流量为  $24.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均年径流量为  $7.79 \text{ 亿 m}^3$ ,1—12 月的多年月均流量分别为  $10.87 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $14.63 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $21.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $17.74 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $15.92 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $60.45 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $35.50 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $28.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $19.41 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $17.32 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $15.87 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

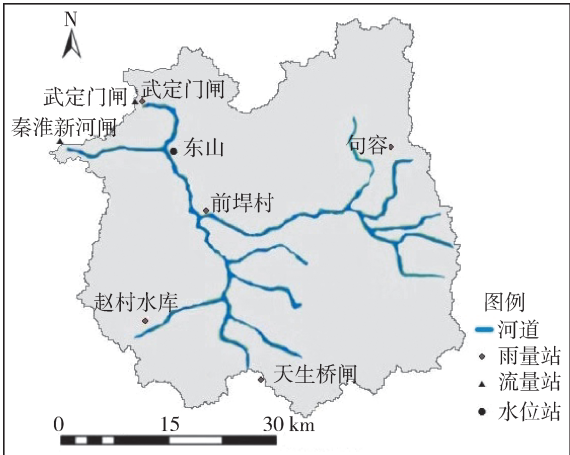


图 3 秦淮河水文测站分布

Fig.3 Distribution of Qinhuai River hydrological stations

#### 2.2.2 计算指标值

由内秦淮河段实际概况,分析并计算认定指标

值:①确定水质要求,根据秦淮河水功能区划分情况(表1),可知内秦淮河为景观娱乐用水区,水质要求为Ⅳ类水;②确定水生态保护目标,内秦淮河无国家重点珍惜保护生物或其他知名保护动物,故不考虑此项;③认定各月生境条件:4—6月为产卵期,7—10月为育幼期,11—12月和来年1—3月为成长期;④认定各月河流时态:3月、6—10月为汛期,其余为非汛期。

表 1 秦淮河水功能区划分  
Table 1 Water function area division of Qinhuai River

| 秦淮河分段 | 位置      | 水功能区    | 水质要求 | 监测点              |
|-------|---------|---------|------|------------------|
| 秦淮河上游 | 天生桥—七瓮桥 | 农业用水区   | Ⅳ    | 天生桥、沙河桥、乌刹桥、洋桥   |
| 秦淮新河  | 河定桥—双闸桥 | 工业用水区   | Ⅳ    | 曹村桥、西善桥、秦淮新河闸    |
| 外秦淮河  | 七桥瓮—三汊河 | 景观娱乐用水区 | Ⅳ    | 上坊门桥、七瓮桥、凤台桥、三汊河 |
| 内秦淮河  | 南京市区    | 景观娱乐用水区 | Ⅳ    | 文德桥、西水关闸         |

2.3 计算生态基流过程

2.3.1 设定保证率并初拟生态基流过程

由指标值计算,分别按 AHP、熵值法可求解各指标主、客观权重,最后由式(3)求组合权重,结果见表2。

表 2 组合权重值  
Table 2 Calculation results of combination weight

| 指标       | 主观权重  | 客观权重  | 组合权重  |
|----------|-------|-------|-------|
| $x_{14}$ | 0.500 | 0.179 | 0.521 |
| $x_{31}$ | 0.143 | 0.165 | 0.137 |
| $x_{32}$ | 0.071 | 0.164 | 0.068 |
| $x_{33}$ | 0.036 | 0.164 | 0.034 |
| $x_{41}$ | 0.167 | 0.164 | 0.160 |
| $x_{42}$ | 0.083 | 0.164 | 0.079 |

由模糊综合评价法求解评价值,再由评价标准确定各月保证率。对前述流量数据预处理后的结果进行统计分析,剔除保证率在5%以下和95%以上的极端月流量,拟合各月流量历时曲线,求所设保证率对应流量,初步得到月尺度的设计年生态基流过程。结果见表3。

2.3.2 综合分析并耦合最终适宜生态基流过程

利用 Tennant 法和年内展布计算法分别求计算河段的生态基流,并与逐月保证率设定法得到的初步结果进行比较(图4)。可知,逐月保证率设定法和年内展布法计算所得生态基流过程均具丰枯变化,与多年月均流量的走向基本一致,能体现河流季节性,其中又以前者的计算结果表现得更为明显。再与 Tennant 法比较,可以看出,逐月保证率设定法的计算结果除在1月、2月和11月、12月未能达到

表 3 各月保证率设定值及初拟生态基流过程

Table 3 The setting monthly guarantee rate and preliminary process of ecological base flow

| 月份 | 评价值   | 设定保证率/% | 生态基流/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----|-------|---------|-------------------------------------------|
| 1  | 0.635 | 90      | 2.21                                      |
| 2  | 0.635 | 90      | 1.71                                      |
| 3  | 0.715 | 80      | 7.58                                      |
| 4  | 0.738 | 80      | 4.46                                      |
| 5  | 0.738 | 80      | 5.06                                      |
| 6  | 0.819 | 70      | 12.25                                     |
| 7  | 0.749 | 80      | 20.66                                     |
| 8  | 0.749 | 80      | 11.02                                     |
| 9  | 0.749 | 80      | 10.49                                     |
| 10 | 0.749 | 80      | 8.37                                      |
| 11 | 0.635 | 90      | 1.02                                      |
| 12 | 0.635 | 90      | 0.89                                      |

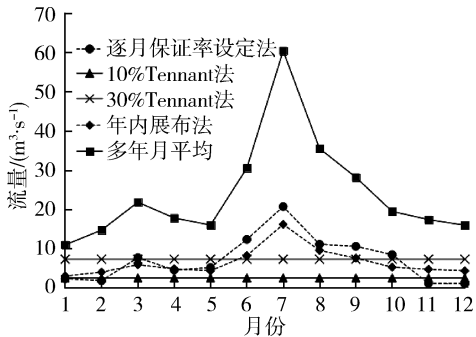


图 4 不同计算方法结果比较

Fig.4 Comparison of results of different calculation methods

栖息地开始退化的 10% Tennant 限值,其余结果均在此限值之上,并在汛期可超过使栖息地较好的 30% Tennant 标准。

综上分析,取逐月保证率设定法和年内展布法结果的外包线为最终的生态基流过程,如图5,使最终各月结果不低于 10% Tennant 限值,并保留生态基流过程明显的丰枯特征,更好地适应河流季节性。同时计算得全年生态径流为 2.52 亿  $\text{m}^3$ ,占多年平均年径流量(7.57 亿  $\text{m}^3$ )的 33.24%,稍高于平均年径流的 30%,弥补了单一方法计算结果较保守的特点,尤其是在汛期,利用南方河流水量丰沛,更大限

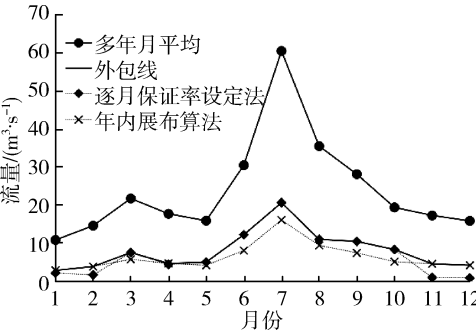


图 5 最终生态基流耦合过程

Fig.5 Coupling of final ecological base flow process

度维持河流生态系统正常功能,利于生态环境的可持续发展。

由此,确定最终生态基流过程,1—12月生态基流分别为 $2.89\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.90\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $7.58\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.72\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.06\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $12.25\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20.66\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $11.02\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10.49\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.37\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $4.61\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $4.23\text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 2.4 成果分析

将传统逐月保证率设定法(设定保证率为汛期80%,非汛期90%)与改进方法进行对比(图6),可见传统逐月保证率设定法计算结果整体偏小。对比4—6月,分析结果偏小,原因为保证率设定值不同,4—6月为水生生物的产卵期,传统方法设定保证率时未能考虑此因素,故而保证率设定值偏小。当然传统方法也可将汛期保证率设定较高,如70%、60%甚至50%,但此时由于没有细化评估汛期各月实际情况,又会使结果计算偏高,造成可供经济生产用水不足。由此便可体现逐月保证率设定模型的优越性。对比1、2月与11、12月,两种方法保证率设定值一样,而单独运用传统方法计算值不仅偏小,且小于10% Tennant法限值,说明进行多种方法综合对比分析,耦合适宜生态基流结果是有必要的。

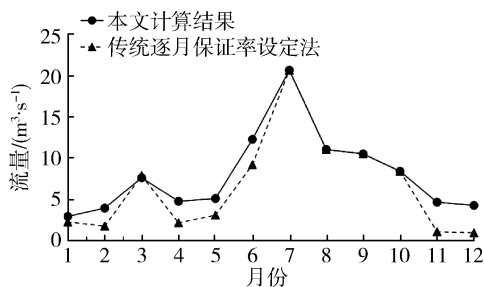


图6 成果对比

Fig.6 Result comparison

## 3 结 语

改进逐月保证率设定法以适用于南方季节性缺水河流生态基流的计算,并应用于秦淮河,以内秦淮河河段为例计算生态基流过程,与多年月均流量走向一致,能较好地适应河流季节性,同时与传统方法计算结果对比表明此法可靠且具有优势。改进方法主要提出逐月保证率设定模型,具体为通过分析水质要求、生境条件等各类影响保证率设定的因素,建立评价指标体系,结合目前保证率设定现状建立评价标准,耦合层次分析法与熵值法求解指标组合权重,最后运用模糊综合评价求解模型评价价值,得到更为客观合理、反映生物需求的各月保证率设定结果。另外还将初拟生态基流结果与Tennant法、年内展布法等的结果对比分析,耦合适宜生态基流过程,使结果更加准确,能够为南方季节性缺水河流的生态

调控提供参考,改善其生态现状。

## 参考文献:

- [1] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 1-11. (XU Zongxue, WU Wei, YU Songyan. ecological baseflow: progress and challenge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 1-11. (in Chinese))
- [2] 褚俊英, 严登华, 周祖昊, 等. 基于综合功能辨识的城市河湖生态流量计算模型及应用[J]. 水利学报, 2018, 49(11): 50-61. (CHU Junying, YAN Denghua, ZHOU Zuhao, et al. Ecological flow calculation in urban rivers and lakes base on synthesized ecosystem service function identification: model and application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 50-61. (in Chinese))
- [3] 王东升, 袁树堂, 杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 35-41. (in Chinese))
- [4] 阳书敏, 邵东国, 沈新平. 南方季节性缺水河流生态环境需水量计算方法[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 72-77. (YANG Shumin, SHAO Dongguo, SHEN Xinping. Quantitative approach for calculating ecological water requirement of seasonal water-deficient rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11): 72-77. (in Chinese))
- [5] 王西琴, 刘昌明, 张远. 黄淮海平原河道基本环境需水研究[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 169-176. (WANG Xiqin, LIU Changming, ZHANG Yuan. Study of the basic environmental water requirement of the rivers in Huang-Huai-Hai plain[J]. Geographical Research, 2003, 22(2): 169-176. (in Chinese))
- [6] 马乐军, 张行南, 陈凯麒, 等. 水利水电工程最小下泄生态基流量计算方法研析[J]. 环境影响评价, 2017(6): 21-25. (MA Lejun, ZHANG Xingnan, CHEN Kaiqi, et al. Study on the calculation method of ecological base flow for minimum discharge in water resource projects [J]. Environmental Impact Assessment, 2017(6): 21-25. (in Chinese))
- [7] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 41-44. (SHANG Songhao, Comparison among several wetted perimeter methods to determine the minimum environmental flows of rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 41-44. (in Chinese))
- [8] 王庆国, 李嘉, 李克锋, 等. 河流生态需水量计算的湿周



- 法拐点斜率取值的改进[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 550-555. (WANG Qingguo, LI Jia, LI Kefeng, et al. Modification of wetted perimeter methods for determining the ecological flow requirement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(5): 550-555. (in Chinese))
- [9] BOVEE K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology, instream flow information paper No. 12 [J]. Scientific Research & Essays, 1982, 6(30): 6270-6284.
- [10] 郝增超, 尚松浩. 基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 557-561. (HAO Zengchao, SHANG Songhao. Multi-objective assessment method based on physical habitat simulation for calculating ecological river flow demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 557-561. (in Chinese))
- [11] 王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文-生态响应关系的环境水流评估方法: 以三峡水库及其坝下河段为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2013(6): 715-726. (WANG Junna, DONG Zheren, LIAO Wengen, et al. An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: a case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach[J]. Science China: Technology Science, 2013(6): 715-726. (in Chinese))
- [12] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [13] LOAR J M, MICHAEL J S. Analysis of environmental issues related to small-scale hydroelectric development [M]. Oak Ridge: Oak Ridge National Press, 1981: 123-128.
- [14] MATTHEWS R C, BAO Y. The Texas method of preliminary instream flow determination[J]. Rivers, 1991, 2(4): 295-310.
- [15] 潘扎荣, 阮晓红, 徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 119-126. (PAN Zharong, RUAN Xiaohong, XU Jing. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese))
- [16] 詹道江, 徐向阳, 陈元芳, 等. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [17] 李梅, 黄强, 张洪波, 等. 基于生态水深-流速法的河段生态需水量计算方法[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 738-742. (LI Mei, HUANG Qiang, ZHANG Hongbo, et al. Determination of ecological water demand based on necessary flow depth and velocity for specific ecological function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 738-742. (in Chinese))
- [18] 魏卿, 薛联青, 张敏, 等. 淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 89-94. (WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 89-94. (in Chinese))
- [19] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [20] 陈建明, 程细英, 李美枫. 基于层次-熵权法的江苏省沿海垦区水生态效应评价[J]. 水利经济, 2020, 38(2): 43-48. (CHEN Jianming, CHENGXiying, LI Meifeng. Evaluation and analysis of water ecological effect in coastal reclamation area in Jiangsu Province based on AHP-entropy weight method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(2): 43-48. (in Chinese))
- [21] 崔晨韵, 朱永华, 吕海深, 等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 406-412. (in Chinese))
- [22] 郝光玲, 王烜, 罗阳, 等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 27-31. (in Chinese))
- [23] 黄显峰, 钟婧玮, 方国华, 等. 基于 ME-Tennant 法的河道生态流量过程评价模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 20-26. (HUANG Xianfeng, ZHONG Jingwei, FANG Guohua. Evaluation of ecological flow process of river by coupling matter element analysis and tennant method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 20-26. (in Chinese))
- [24] ORTH D J, LEONARD P M. Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat [J]. Regulated Rivers Research & Management, 1998(5): 129-138.

(收稿日期: 2020-01-15 编辑: 彭桃英)