

杜娟,郝泽阳,陆建宇,等.基于改进年内展布计算法的季节性小流域最小生态流量研究[J].人民珠江,2026,47(3):98-106.

基于改进年内展布计算法的季节性小流域最小生态流量研究

杜娟¹,郝泽阳¹,陆建宇¹,陆宝宏²

(1.中水北方勘测设计研究有限责任公司,天津 300222;2.河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:为提升年内展布计算法在季节性变化明显的小流域适用性,以宝鸡市汤峪河为研究对象,将年内时段划分为4段:12月至次年2月、3月和11月、4—6月、7—10月,以95%频率月平均流量替代最小月平均流量、以5%~95%频率之间的多年平均月流量替代各月多年平均流量,改进了年内展布计算法,并分析了其适用性。结果表明,改进年内展布计算法计算的最小生态流量较年内展布计算法在年内各月均有一定提升,其计算值也均大于最小月平均流量法;Tennant法评价结果显示,与年内展布计算法、最小月平均流量法、次最小值法、逐月频率计算法(95%频率)相比,改进年内展布计算法计算值对汤峪河河流生态有利程度是相对更优的;汤峪河最小生态流量保障情况较好,与河流健康评价公示结果是相符的,本次改进的年内展布计算法适用于确定汤峪河最小生态流量。研究结果可为合理确定中国西北地区季节性变化明显的小流域最小生态流量提供一定的参考。

关键词:改进年内展布计算法;季节性;小流域;最小生态流量;汤峪河;漫湾村水文站

中图分类号:TV121;X143 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0098-09

2024年12月,水利部等6部门联合印发的《关于全面推进幸福河湖建设的意见》中提出,加快河湖和已建水利水电工程生态流量目标确定与保障,加强生态流量调度和监管,因地制宜推进生态补水,保障河湖基本生态用水。因此,科学确定河湖最小生态流量是当前和今后持续研究的热点之一。

最小生态流量是维持河流中物种生存的最低流量条件,是确保河流维持生态系统结构不崩溃的最小流量,如果河流长期处于该流量状态,河流生态系统将无法长期保持健康与稳定^[1-2]。目前,河流最小生态流量计算方法总体可分为水力学法、栖息地法、整体法和水文学法^[3-4];其中水文学基于历史流量资料分析生态流量,操作快速便捷,而被广泛用于计算最小生态流量^[4-5];年内展布计算法便是其中一种代表性方法,该方法能够考虑河流生态水文

过程及其对年内径流丰枯变化的需求差异^[6],但全年采用同一均值比,使得该方法计算的最小生态流量在季节性变化明显的河流存在较大偏差。

为提升年内展布计算法的适用性,赵然杭等^[7]以90%频率年径流量替代最小月平均流量的年均值,但全年仍采用同一均值比;田肖冉等^[5]以90%保证率下各月径流量代替各月最小径流量,结合季节、丰枯月份、径流量等3种标准计算同期均值比,但无法避免极端月份径流量的影响;陈小强^[8]以90%保证率逐月径流量代替各月最小径流量,按照流域丰枯月份、季节、径流量将年内各月划分为不同时段并计算同期均值比,但其仍沿用多年月平均径流量,忽略了极端月份径流量对其多年平均月均径流量的影响;林梦珂等^[9]在剔除渭河干流主要控制断面各月径流量极值基础上,基于变异前径流数

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U2240218);中国华能集团科技项目(HNKJ22-H87TB);金沙江旭龙水电站建设期影响区域环境水体监测及评估项目(XL-FW-2023-012)

收稿日期:2025-08-09 **修回日期:**2025-09-10 **网络首发日期:**2025-10-13

作者简介:杜娟(1991—),女,主要从事自然地理及水利工程方面的工作。

联系作者:致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

据,将年内划分为汛期、非汛期,分别计算同期均值比,仍难以有效适应径流季节性显著的小流域。为进一步提升该方法在季节性变化明显的小流域的适用性,本文将年内时段划分为4段,以95%频率月平均流量替代最小月平均流量、以5%~95%频率之的多年平均月流量替代各月多年平均流量,在提高径流年内季节性丰枯变化适应性的同时,进一步降低极端月份径流量对最小月平均流量、多年平均月流量的影响,并以宝鸡市汤峪河为研究对象,探讨了本次改进的年内展布计算法适用性,以期合理确定季节性变化明显小流域的最小生态流量和指导区域河流生态流量核定和科学开展区域生态环境保护工作提供一定的参考。

1 改进年内展布计算法

1.1 年内展布计算法原理、优势与不足

1.1.1 方法基本原理

年内展布计算法通过建立最小年均径流量、多年年均径流量之间的同期均值比,结合多年月平均径流量,计算得到最小生态流量^[6]。该方法计算原理和过程如下。

a)计算最小年均流量、多年年均径流量:

$$\bar{Q} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{q}_i \quad (1)$$

$$\bar{q}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{Q}_{\min} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} q_{\min(i)} \quad (3)$$

式中: \bar{Q} 为年内各月多年平均月平均流量的均值, m^3/s ; \bar{q}_i 为第*i*月多年平均流量, m^3/s ; q_{ij} 为第*j*年第*i*月平均流量, m^3/s ; \bar{Q}_{\min} 为年内各月最小月平均流量的均值, m^3/s ; $q_{\min(i)}$ 为第*i*月最小月平均流量, m^3/s 。

b)计算同期均值比、最小生态流量:

$$\eta = \bar{Q}_{\min} / \bar{Q} \quad (4)$$

$$Q_i = \bar{q}_i \times \eta \quad (5)$$

式中: η 为同期均值比; Q_i 为第*i*月最小生态流量, m^3/s 。

1.1.2 方法优势与不足

年内展布计算法关键指标是基于最小年均径流量、多年年均径流量建立的同期均值比,该方法主要优势及不足概述如下。

a)主要优势。该方法不但在一定程度上弥补了以多年平均径流量的特定比例或径流频率曲线上的特定频率作为生态流量的经验性、主观性^[6],其提出的同期均值比具有明显区域代表性和普适性,以多年月平均径流量为基准,能考虑河流生态水文过程及其对年内径流丰枯变化的需求差异,其得出的最小生态流量可体现河流径流年内丰枯变化特征。

b)主要不足。该方法在实际计算最小生态流量时,年内各月采用同一均值比,使得该方法不能适应季节性变化明显河流的计算需要^[10]。此外,该方法的2个典型指标——各月最小径流量、多年月平均径流量均易受到极端月份径流量的影响,这也会使得计算的最小生态流量存在偏差。

1.2 改进的年内展布计算法模型

基于年内展布计算法原理^[6],将年内时段划分为4段,以95%频率月平均流量、5%~95%频率的多年平均月流量为输入,改进了年内展布计算法。主要计算步骤如下。

a)划分年内时段。结合汤峪河漫湾村水文站5%~95%频率之间的多年平均月流量过程,为充分考虑河流生态水文过程及其对年内径流丰枯变化的需求差异,本次将其年内时段划分为4段(12月至次年2月、3月和11月、4—6月、7—10月)。

b)计算特征流量。绘制漫湾村水文站逐月平均流量P-III频率曲线,获取年内各月5%频率月平均流量 $q_{5\%}$ 、95%频率月平均流量 $q_{95\%}$,为避免极端月份径流量的影响,筛选1—12月处于5%、95%频率($5\% \leq P \leq 95\%$)之间的月平均流量 $q_{5\%-95\%}$,计算其各月多年平均值。

$$\bar{Q}_{95\%,i} = \frac{1}{t_i} \sum_{j=1}^{t_i} q_{95\%,j} \quad (6)$$

$$\bar{Q}_{5\%-95\%,i} = \frac{1}{t_i} \sum_{j=1}^{t_i} q_{5\%-95\%,j} \quad (7)$$

式中： $\bar{Q}_{95\%,i}$ 为 95% 频率下第 i 个时段平均流量， m^3/s ； $q_{95\%,j}$ 为 95% 频率下第 j 月平均流量， m^3/s ； $\bar{Q}_{5\%-95\%,i}$ 为流量介于 5%、95% 频率 ($5\% \leq P \leq 95\%$) 之间的第 i 个时段平均流量， m^3/s ； $\bar{q}_{5\%-95\%,j}$ 为流量介于 5%、95% 频率 ($5\% \leq P \leq 95\%$) 之间的第 j 月多年平均流量， m^3/s 。

c) 计算时段均值比。按照汤峪河漫湾村水文站 12 月至次年 2 月、3 月和 11 月、4—6 月、7—10 月等 4 个时段，为避免极端月份径流量的影响，分别统计 95% 频率月平均流量的时段均值 $\bar{Q}_{95\%}$ ，以及处于 5%、95% 频率 ($5\% \leq P \leq 95\%$) 之间的月平均流量的时段均值 $\bar{Q}_{5\%-95\%}$ ；以 $\bar{Q}_{95\%}$ 、 $\bar{Q}_{5\%-95\%}$ 之间的比值，作为上述 4 个时段的时段均值比。

$$\eta_i = \bar{Q}_{95\%,i} / \bar{Q}_{5\%-95\%,i} \quad (8)$$

式中： η_i 为第 i 个时段的同期均值比， $i=4$ 。

d) 计算最小生态流量。根据汤峪河漫湾村水文站 12 月至次年 2 月、3 月和 11 月、4—6 月、7—10 月等 4 个时段的时段均值比，为避免极端月份径流量的影响，结合 1—12 月处于 5%、95% 频率 ($5\% \leq P \leq 95\%$) 之间的各月月平均流量的各月多年平均值 $\bar{q}_{5\%-95\%,j}$ ，获得汤峪河漫湾村水文站最小生态流量。

$$Q_j = \bar{q}_{5\%-95\%,j} \times \eta_i \quad (9)$$

式中： Q_j 为第 j 月最小生态流量， m^3/s 。

2 研究区概况及资料

2.1 区域概况

汤峪河为渭河一级支流 (图 1)，位于陕西省宝鸡市眉县境内，发源地为秦岭北麓太白主峰小岭梁，在汤峪镇漫湾村出峪口，于横渠镇李家庄入渭河。汤峪河流域面积 358.5 km^2 ，干流全长 43.9 km ，河道平均坡降为 $24.2\% \text{ [11]}$ ；流域多年平均降水量 731 mm ，主要集中在夏秋季节，尤其是 7—9 月，可占全年降水量的 70% 以上；汤峪河流域林木比较茂盛，流域上游为太白山国家旅游森林公园，森林覆盖率可达 94.3%，植被状况较好。

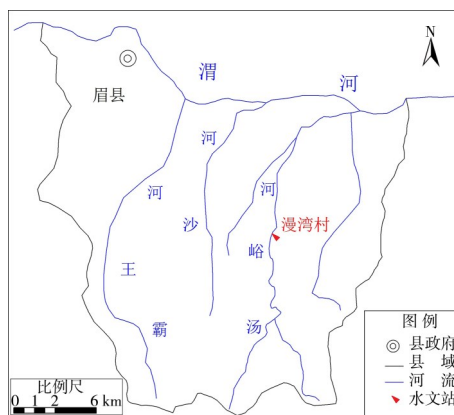


图 1 汤峪河流域水系分布情况示意

Fig. 1 Water system distribution in the Tangyu River Basin

2.2 资料及来源

汤峪河上游于 1953 年 7 月设立漫湾村水文站，该站为渭河水系汤峪河干流控制站、省级一般站，控制流域面积 $122 \text{ km}^2 \text{ [11]}$ 。本次收集到漫湾村水文站 1966—2022 年逐月平均流量资料，该站点水文资料已通过各级水文部门的整编、审查、复审和汇编，并正式对外刊印，资料可靠度高，可直接用于后续分析计算。

3 实例分析

3.1 最小生态流量计算

3.1.1 统计特征流量

根据漫湾村水文站 1966—2022 年实测流量资料，首先统计 1—12 月各月最小月平均流量、次最小月平均流量，然后借助 P-III 频率曲线、矩阵法估计参数，计算 1—12 月各月 5% 频率、95% 频率月平均流量，最后统计 1—12 月各月多年月平均流量。漫湾村站特征流量分析结果见表 1。

3.1.2 计算生态流量

a) 基于年内展布计算法计算生态流量。以漫湾村水文站 1966—2022 年实测流量为输入，结合最小月平均流量、多年月平均流量，计算同期均值比，采用年内展布计算法，得到漫湾村站最小生态流量，见表 2。

表 1 漫湾村站特征流量分析结果(1966—2022年)

Tab. 1 Analysis results of characteristic flow at Manwancun Hydrological Station (1966—2022)

单位: m³/s

特征值	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
最小月平均流量	0.130	0.120	0.180	0.350	0.410	0.360	0.440	0.290	0.410	0.330	0.280	0.170	0.290
5% 频率月平均流量	0.563	0.584	1.360	5.020	5.780	4.630	7.420	7.400	11.300	6.870	1.780	0.875	4.480
95% 频率月平均流量	0.152	0.123	0.182	0.728	0.805	0.464	0.744	0.456	0.607	0.423	0.326	0.186	0.434
多年月平均流量	0.312	0.290	0.653	2.460	2.800	2.070	3.330	3.010	4.480	2.790	0.928	0.477	1.970

表 2 漫湾村站最小生态流量中间变量及成果(年内展布计算法)

Tab. 2 Intermediate variables and results of minimum ecological flow at Manwancun Hydrological Station (intra-annual distribution calculation method)

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
同期均值比	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147
最小生态流量(m ³ ·s ⁻¹)	0.046	0.043	0.096	0.362	0.412	0.305	0.490	0.442	0.659	0.410	0.136	0.070	0.290

b) 基于改进年内展布计算法计算生态流量。以漫湾村水文站 1966—2022 年实测流量为输入,为降低极端月份流量对最小月平均流量、多年平均流量的影响,筛选 1—12 月处于 5%、95% 频率(5%≤P≤95%)之间的月平均流量,计算其各月多年平均值

$\bar{q}_{5\%-95\%}$; 结合 95% 频率月平均流量 $q_{5\%-95\%}$ 、5%≤P≤95% 多年平均月流量 $\bar{q}_{5\%-95\%}$, 分别计算 12 月至次年 2 月、3 月和 11 月、4—6 月、7—10 月流量的同期均值比,采用改进年内展布计算法,得到漫湾村站最小生态流量,见表 3。

表 3 漫湾村站最小生态流量中间变量及成果(改进年内展布计算法)

Tab. 3 Intermediate variables and results of minimum ecological flow at Manwancun Hydrological Station (improved intra-annual distribution calculation method)

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
5%≤P≤95% 多年平均月流量(m ³ ·s ⁻¹)	0.306	0.292	0.626	2.450	2.800	1.960	3.120	2.590	3.910	2.290	0.846	0.455	1.810
同期均值比	0.438	0.438	0.345	0.277	0.277	0.277	0.187	0.187	0.187	0.187	0.345	0.438	0.240
最小生态流量(m ³ ·s ⁻¹)	0.134	0.128	0.216	0.678	0.776	0.542	0.584	0.485	0.733	0.429	0.292	0.199	0.434

c) 不同方法计算的生态流量汇总。基于漫湾村水文站 1966—2022 年实测流量,将改进年内展布计算法、年内展布计算法^[2,5-10]、最小月平均流量法^[5-6,12]、次最小值法^[2]、逐月频率计算法^[12](95% 频率)计算的最小生态流量汇总比较,见表 4 和图 2、3。最小生态流量法、次最小值法计算值是河流年内各月平均流量的最小值和次最小值,是河流生境和水生生物遭受的最恶劣、最危险的历史流量条件。由表 4 和图 2、3 可知:①本次改进的年内展布计算法、

年内展布计算法计算的最小生态流量在年内有一定的相似性,且改进年内展布计算法计算值均略大;②改进年内展布计算法计算的各月最小生态流量均大于最小月平均流量法的,在一般用水期的个别月份甚至还要略大于次最小值法计算值,改进法计算值可使得在后续水资源开发利用活动中,在枯水月份尽量多地在河中预留水量,进而最大限度保障水生生物安全度过最危险的枯水生境条件,同时丰水月份河流中预留水量也相对多一些,在来水高

峰期又可促进流域上游的营养物质随稍好的水流条件输送到流域下游,这有利于维持流域下游河流生态系统健康和稳定。初步看来,本次改进的年内

展布计算法计算的汤峪河最小生态流量是相对更优的。

表4 漫湾村站最小生态流量汇总比较

Tab. 4 Summary and comparison of minimum ecological flow at Manwancun Hydrological Station

单位: m^3/s

方法	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
改进年内展布计算法	0.134	0.128	0.216	0.678	0.776	0.542	0.584	0.485	0.733	0.429	0.292	0.199	0.434
年内展布计算法	0.046	0.043	0.096	0.362	0.412	0.305	0.490	0.442	0.659	0.410	0.136	0.070	0.290
最小月平均流量法	0.130	0.120	0.180	0.350	0.410	0.360	0.440	0.290	0.410	0.330	0.280	0.170	0.290
次最小值法	0.130	0.130	0.190	0.644	0.700	0.410	0.630	0.570	0.780	0.430	0.300	0.180	0.426
逐月频率计算法(95%频率)	0.152	0.123	0.182	0.728	0.805	0.464	0.744	0.456	0.607	0.423	0.326	0.186	0.434

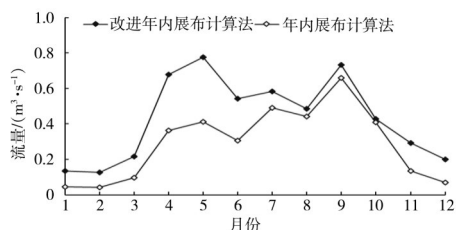


图2 改进年内展布计算法、年内展布计算法计算的最小生态流量比较

Fig. 2 Comparison of minimum ecological flow calculated by improved intra-annual distribution calculation method and intra-annual distribution calculation method

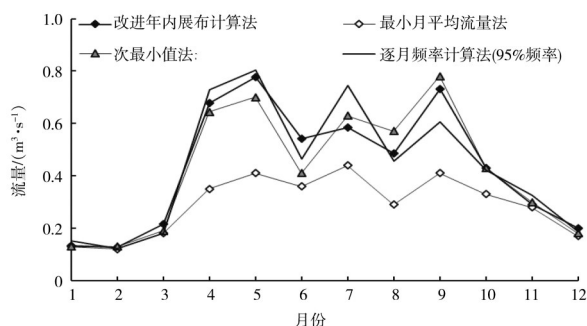


图3 改进年内展布计算法及几种水文学法计算的最小生态流量比较

Fig. 3 Comparison of minimum ecological flow calculated by improved intra-annual distribution calculation method and several hydrological methods

3.2 最小生态流量分析

3.2.1 与Tennant法标准比较

a)Tennant法基本原理。Tennant法常作为生态流量计算结果的评价方法和标准^[13-15],岳自慧等^[15]已将其成功用于分析秦岭北麓西安段生态基流计算的适用性与可靠性。该方法以多年平均流量为基础,将流量对生态有利程度划分为8个等级,并按一般用水期(10月至次年3月)、用水高峰期(4—9月)2个时段^[14-16],分别设定流量过程对河流生态有利程度,见表5。一般地,当来水占其多年平均流量10%时,认为该流量是维持河流生境健康和稳定的最小流量^[16]。

b)Tennant法评价结果。基于Tennant法,评价年内展布计算法、本次改进的年内展布计算法、最小月平均流量法、次最小值法、逐月频率计算法(95%频率)计算的漫湾村站最小生态流量对河流生态有利程度,以进一步分析本次提出的改进年内展布计算法的适用性,见表6。①在一般用水期,年内展布计算法计算值对河流生态有利程度均为“中—好”,是5种方法中评价结果表现最差的;改进年内展布计算法、最小月平均流量法、次最小值法、逐月频率计算法(95%频率)在1—2月计算值对河流生态有利程度均为“极好—最佳”,在10月均表现为“中—好”,在1月均表现为“非常好—极好”;在12

月,改进年内展布计算法计算值表现为“极好—最佳”,是5种方法中评价结果最优的。②在用水高峰期,仅最小月平均流量法计算值在8—9月对河流生态有利程度为“极差—差”,其余方法和时段计算值均表现为“差—中”;同时,在评价结果均为“差—中”情况下,改进年内展布计算法计算值对应的河流流量要大于年内展布计算法的,这对河流生境维持、水生生物繁衍生长是相对更加有利的。总体看来,无论是在一般用水期,还是在用水高峰期,改进年内展布计算法计算的最小生态流量过程对汤峪河河流生态有利程度是相对更优的,本次推荐改进年内展布计算法计算值作为汤峪河最小生态流量。

表5 Tennant法分析评价标准及生态流量比例状况

Tab. 5 Evaluation criteria and proportion of ecological flow for Tennant method %

生态有利程度	推荐标准(多年平均径流量比例)	
	一般用水期(10月至次年3月)	用水高峰期(4—9月)
最大	200	200
最佳范围	60~100	60~100
极好	60	40
非常好	50	30
好	40	20
中	30	10
差	10	10
极差	0~10	0~10

表6 漫湾村站最小生态流量的Tennant法评价结果

Tab. 6 Evaluation results of minimum ecological flow at Manwancun Hydrological Station by Tennant method

时间	改进年内展布计算法		年内展布计算法		最小月平均流量法		次最小值法		逐月频率计算法(95%频率)	
	比例/%	评价	比例/%	评价	比例/%	评价	比例/%	评价	比例/%	评价
1月	43.0	极好—最佳	14.7	中—好	41.7	极好—最佳	41.7	极好—最佳	48.7	极好—最佳
2月	44.1	极好—最佳	14.7	中—好	41.4	极好—最佳	44.9	极好—最佳	42.4	极好—最佳
3月	33.1	非常好—极好	14.7	中—好	27.6	好—非常好	29.1	好—非常好	27.9	好—非常好
4月	27.6	差—中	14.7	差—中	14.2	差—中	26.2	差—中	29.6	差—中
5月	27.7	差—中	14.7	差—中	14.6	差—中	25.0	差—中	28.7	差—中
6月	26.1	差—中	14.7	差—中	17.4	差—中	19.8	差—中	22.4	差—中
7月	17.6	差—中	14.7	差—中	13.2	差—中	18.9	差—中	22.4	差—中
8月	16.1	差—中	14.7	差—中	9.6	极差—差	19.0	差—中	15.2	差—中
9月	16.4	差—中	14.7	差—中	9.2	极差—差	17.4	差—中	13.6	差—中
10月	15.4	中—好	14.7	中—好	11.8	中—好	15.4	中—好	15.2	中—好
11月	31.5	非常好—极好	14.7	中—好	30.2	非常好—极好	32.3	非常好—极好	35.1	非常好—极好
12月	41.8	极好—最佳	14.7	中—好	35.7	非常好—极好	37.8	非常好—极好	39.1	非常好—极好

3.2.2 生态流量保障程度分析

结合《河湖健康评价指南(试行)》(2020年),眉县水利局已委托第三方单位对汤峪河开展了健康评价建档工作,根据眉县水利局2024年12月23日公示的河流健康评价结果,汤峪河河道评分为80.70分,河流健康评价分类属二类河湖,河流处于健康状态。

根据SL/T 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》^[17],生态基流设计保证率应不小于90%。基于漫湾村站1966—2022年实测流量,结合本次推荐的漫湾村站最小生态流量(改进年内展布计算法计算成果),分析最小生态流量保障程度,见图4。当月实测流量大于其最小生态流量时,则认为当月最小生态流量是可以保障的;由图可见,漫湾村站年

内各月最小生态流量保障程度较高,为91.2%~98.2%,其中7—9、11月保障程度最高(均为98.2%),3月保障程度最低(91.2%)。总体来看,汤峪河最小生态流量保障情况较好,相应河流生态系统状态相对较优,与河流健康评价公示结果是相符的,这也进一步印证了采用本次改进的年内展布计算法确定的中国西北地区季节性变化明显的小流域——宝鸡市汤峪河最小生态流量是合适的。

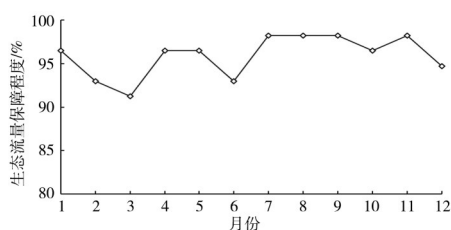


图4 漫湾村站年内各月最小生态流量保障程度分析结果

Fig. 4 Analysis results of minimum ecological flow guarantee degree at Manwancun Hydrological Station

4 小结

a)以季节性变化明显的小流域——宝鸡市汤峪河为研究对象,在将年内时段划分为4个时段基础上,以95%频率月平均流量替代最小月平均流量、以5%~95%频率的多年平均月流量替代各月多年平均流量,改进了年内展布计算法;本次改进的年内展布计算法不仅可提升径流年内季节性丰枯变化适应性,还可降低极端径流量对最小月平均流量、多年平均月流量的影响;经与年内展布计算法、最小月平均流量法、次最小值法、逐月频率计算法(95%频率)比较,以及Tennant法评价,本次改进的年内展布计算法计算的汤峪河最小生态流量是相对更优的。

b)结合本次推荐的最小生态流量、漫湾村站1966—2022年实测流量进行分析,汤峪河最小生态流量保障情况较好,河流生态系统状态相对较优,与河流健康评价公示结果是相符的,这也进一步印证了采用本次改进的年内展布计算法确定宝鸡市汤峪河小流域最小生态流量是合适的。研究成果可提升年内展布计算法在季节性变化明显的小流

域的适用性,同时对于合理确定季节性变化明显的其他小流域的最小生态流量也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 黄宇云,杨卓媛,余飞,等. 三峡工程运行后荆江河段适宜生态流量研究[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1900-1910.
HUANG Y Y, YANG Z Y, YU F, et al. The suitable ecological discharge of the Jingjiang Reach after the operation of Three Gorges Project [J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(6): 1900-1910. (in Chinese)
- [2] 陆建宇,杜娟. 邕江河流域河流最小生态流量研究[J]. 水利水电工程设计, 2021, 40(4): 37-39, 56.
LU J Y, DU J. Study on minimum ecological flow of Chujiang River Basin [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2021, 40(4): 37-39, 56. (in Chinese)
- [3] THARME R E. A global perspective on environment flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for river [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5/6): 397-441.
- [4] 陈宗怡,黄国新,吴倩. 水利工程生态流量的水文学方法分析与确定:以章水油罗口水库为例[J]. 人民珠江, 2025, 46(4): 47-54.
CHEN Z Y, HUANG G X, WU Q. Hydrological method analysis and determination of ecological flow of water conservancy projects: an example of Zhangshui Youluokou Reservoir [J]. Pearl River, 2025, 46(4): 47-54. (in Chinese)
- [5] 田肖冉,姜宁,施巧,等. 基于改进年内展布法的河流生态流量研究[J]. 节水灌溉, 2022(10): 31-36.
TIAN X R, JIANG N, SHI Q, et al. Study on river ecological flow based on improved annual distribution method [J]. Water Saving Irrigation, 2022(10): 31-36. (in Chinese)
- [6] 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 Z R, RUAN X H, XU J. A new calculation method of instream basic ecological water demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 119-126. (in Chinese)
- [7] 赵然杭,彭戮,王好芳,等. 基于改进年内展布计算法的河道内基本生态需水量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 114-119.
ZHAO R H, PENG T, WANG H F, et al. Study on instream basic ecological water demand based on the improved dynamic calculation method [J]. South-to-North Water Transfers and

- Water Science & Technology, 2018, 16 (4) : 114–119. (in Chinese)
- [8] 陈小强. 基于改进年内展布法的减水河段生态流量分析[J]. 水利技术监督, 2023(8):108–110.
CHEN X Q. Analysis of ecological flow of water-reducing reach based on improved intra-year distribution method [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023 (8) : 108–110. (in Chinese)
- [9] 林梦珂,魏娜,卢锺明,等. 基于改进年内展布法的生态基流计算方法[J]. 水电能源科学, 2021,39(5):66–70.
LIN M K, WEI N, LU K M, et al. Calculation of ecological base flow based on improved annual distribution method [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5) : 66–70. (in Chinese)
- [10] 范博伟,张泽中,齐青青. 针对河流生态需水的年内展布法改进及其应用[J]. 水利科技与经济,2018,24(11):1–6.
FAN B W, ZHANG Z Z, QI Q Q. The improvement and application of the dynamic calculation method for river ecological water demand [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(11) : 1–6. (in Chinese)
- [11] 任家伟. 漫湾村水文站超声波水位计比测分析[J]. 水能经济, 2020(8):283–284.
REN J W. Comparison and analysis of ultrasonic water level gauge at manwancun hydrological station [J]. Hydropower Economics, 2020(8) : 283–284. (in Chinese)
- [12] 陈晓璐,林建海,梁华玲. 基于水文学法的海南省三大江生态需水量研究[J]. 人民珠江,2020,41(2):28–35.
CHEN X L, LIN J H, LIANG H L. Research on ecological water requirement of three largest rivers in Hainan Province based on hydrologic method [J]. Pearl River, 2020, 41 (2) : 28–35. (in Chinese)
- [13] HU S Y, FENG M L, XU S Y, et al. Environmental flow assessment for benthic macroinvertebrate communities using pseudo-2D hydraulic habitat modelling at a green small hydropower plant [J]. Ecohydrology, 2024, 17 (4). DOI: 10.1002/eco.2574.
- [14] 李姣,李学辉. 基于Tennant改进法的云南高开发利用河流生态流量研究[J]. 人民珠江,2023,44(2):70–75.
LI J, LI X H. Ecological flow of intensively developed and utilized rivers in Yunnan Province based on improved Tennant method [J]. Pearl River, 2023, 44(2) : 70–75. (in Chinese)
- [15] 岳自慧,杨志,于坤霞,等. 秦岭北麓西安段生态基流保障率及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电, 2026(1):67–72.
YUE Z H, YANG Z, YU K X, et al. Analysis of ecological base flow guarantee rate and influencing factors in Xi'an section of the northern foot of Qinling Mountains [J]. China Rural Water and Hydropower, 2026(1):67–72. (in Chinese)
- [16] 张盼,孔兰,张防修,等. 贺江河道生态流量研究[J]. 人民珠江, 2023, 44(11) : 70–77.
ZHANG P, KONG L, ZHANG F X, et al. Study on ecological flow in Hejiang River [J]. Pearl River, 2023, 44(11) : 70–77. (in Chinese)
- [17] 河湖生态环境需水计算规范: SL/T 712—2021[S].
Specification for calculation of ecological flow for rivers and lakes: SL/T 712—2021 [S]. (in Chinese)

Research on Minimum Ecological Flow in Small Seasonal Watersheds Based on Improved Intra-Annual Distribution Calculation Method

DU Juan¹, HAO Zeyang¹, LU Jianyu¹, LU Baohong²

(1. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to improve the applicability of the traditional intra-annual distribution calculation method in small watersheds with significant seasonal variations, this study took the Tangyu River in Baoji City as an example to conduct methodological improvements and validation. The Tangyu River Basin exhibits considerable seasonal differences in runoff, making it difficult for the traditional intra-annual distribution calculation method to effectively adapt to small watersheds with pronounced seasonal runoff patterns. Therefore, improvements to the intra-annual distribution calculation method are necessary to ensure that the calculated minimum ecological flow process better aligns with the actual hydrological processes of the river. Based on the monthly flow data from 1966 to 2022 at the Manwancun Hydrological Station on the Tangyu River, the study fully accounted for the river's eco-hydrological processes and the varying demands of intra-annual wet and dry runoff changes and first refined the intra-annual periods by dividing the entire year into

four representative periods: December to February, March and November, April to June, and July to October. On this basis, two key improvements were made to the traditional intra-annual distribution calculation method: First, the minimum monthly average flow was replaced with the monthly average flow at a 95% frequency to reduce the impact of extreme low-flow values on the overall calculation; second, the annual average monthly flow was replaced with the annual average monthly flow within the 5%-95% frequency range to eliminate the interference of extreme hydrological events on the average value calculation. Additionally, the results of the improved calculation method were compared with those of the minimum monthly average flow method, the second-minimum value method, the monthly frequency calculation method (at 95% frequency), and the Tennant method to comprehensively evaluate its rationality and applicability. The results show that whether during general water use periods or peak water use periods, the minimum ecological flow process calculated by the improved intra-annual distribution calculation method is relatively more favorable for the ecology of the Tangyu River. The minimum ecological flow values obtained by the improved method are higher than those of the original method in every month and are generally greater than the results of the minimum monthly average flow method. Based on ecological suitability evaluation using the Tennant method, the minimum ecological flow process calculated by the improved intra-annual distribution calculation method is more beneficial to the river's aquatic ecosystem than other comparative methods. Furthermore, the guarantee degree of the minimum ecological flow at the Manwancun Station is relatively high across all months, ranging between 91.2% and 98.2%. The actual ecological flow assurance status of the Tangyu River is good, consistent with the local river health assessment results, further validating the applicability of the improved annual distribution calculation method in this region. By introducing frequency-constrained monthly average flow and segmentally characterizing the intra-annual process, the improved intra-annual distribution calculation method effectively enhances the scientific rigor and adaptability of minimum ecological flow calculations in small watersheds with significant seasonal variations. This study can provide a technical reference for determining the minimum ecological flow in small watersheds with similar hydrological characteristics in northwestern China and has practical significance for balancing water resource development and utilization with ecological protection.

Keywords: improved intra-annual distribution calculation method; seasonal; small watershed; minimum ecological flow; Tangyu River; Manwancun Hydrological Station

(责任编辑:李泽华)