

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.011.

李正勤, 柯造成, 田晋华, 等. 基于不同水文学方法的河流生态基流研究——以渭河甘肃段为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 177-183.

LI Zhengqin, KE Haocheng, TIAN Jinhua, et al. Study on River Ecological Base Flow Based on Different Hydrology Methods[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 177-183.

基于不同水文学方法的河流生态基流研究

——以渭河甘肃段为例

李正勤¹, 柯造成¹, 田晋华², 田孟涵¹, 梁 靓¹, 李占斌³, 李 鹏³

(1. 兰州理工大学, 兰州 730050; 2. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020;

3. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要: [目的]明确渭河甘肃段生态基流推荐值,揭示不同水文学方法计算渭河甘肃段生态基流的适用性,进而为渭河甘肃段生态基流保障提供参考。[方法]基于北道水文站近65年月径流资料,采用 Tennant法、传统年内展布法、改进年内展布法及基流比例法对渭河干流甘肃段的河流生态基流值进行了计算对比。[结果]Tennant法计算的渭河甘肃段控制站生态基流应控制在 $1.12\sim 12.38\text{ m}^3/\text{s}$;传统年内展布法计算生态基流应控制在 $0.72\sim 4.13\text{ m}^3/\text{s}$;改进年内展布法计算的渭河甘肃段控制站生态基流应控制在 $1.48\sim 8.19\text{ m}^3/\text{s}$;基流比例法计算的渭河甘肃段控制站生态基流应控制在 $1.76\sim 12.37\text{ m}^3/\text{s}$ 。4种方法计算得出的河流平均生态基流分别占多年平均流量的16.89%, 6.59%, 12.69%, 15.83%。[结论]基流比例法与改进年内展布法对于非汛期基流分配效果较为良好,基流比例法计算结果可作为渭河甘肃段生态基流推荐值,未来应加强河道的生态基流保障研究。

关键词: 生态基流; 改进年内展布法; 基流比例法; 水文序列突变; 渭河甘肃段

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0177-07

Study on River Ecological Base Flow Based on Different Hydrology Methods

— A Case Study of Weihe River in Gansu Province

LI Zhengqin¹, KE Haocheng¹, TIAN Jinhua², TIAN Menghan¹, LIANG Liang¹, LI Zhanbin³, LI Peng³

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Institute of

Soil and Water Conservation, Lanzhou 730020, China; 3. State Key Laboratory of

Eco-Hydraulic in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study is to determine the recommended value of ecological base flow and reveal the applicability of different hydrographic methods for calculating the ecological base flow of the Weihe River in Gansu, and then to provide reference for the ecological base flow guarantee in the Weihe River in Gansu section. [Methods] Based on the monthly runoff data of Beidao hydrology station in recent 65 years, the ecological base flow values of the Weihe River in Gansu section were calculated and compared by using Tennant method, traditional annual spreading distribution method, improved annual spreading distribution method and base-flow ratio method. [Results] The ecological base flow of the control station in the Weihe River in Gansu calculated by Tennant method should be controlled between $1.12\sim 12.38\text{ m}^3/\text{s}$. The ecological base flow calculated by traditional annual distribution method should be controlled within $0.72\sim 4.13\text{ m}^3/\text{s}$. The ecological base flow calculated by improved annual distribution method should be controlled in the

收稿日期: 2022-05-26

修回日期: 2022-06-23

资助项目: 陇原青年创新创业人才(团队)项目(甘组通字[2022]77号); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划(甘水建管发〔2022〕59号, [2021]71号, [2020]46号); 省级水资源费项目(甘水资源发[2021]105号); 国家自然科学基金(4210070887)

第一作者: 李正勤(1997—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为旱区水资源高效利用。E-mail: hydrolzq@163.com

通信作者: 柯造成(1986—), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事生态水文与水资源方面的研究工作。E-mail: kehc@lut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

range of 1.48~8.19 m³/s. The ecological base flow calculated by base flow ratio method should be controlled between 1.76~12.37 m³/s. The average ecological base flow calculated by the three methods accounted for 16.89%, 6.59%, 12.69%, and 15.83% of the annual average flow, respectively. [Conclusion] The base flow proportion method and the improved annual distribution method have good effects on the allocation of base flow in non-flood season. The results of the base-flow ratio method can be used as the recommended values of the ecological base flow of the Weihe River in Gansu, and the study of ecological base flow guarantee should be strengthened in the future.

Keywords: ecological base flow; improved annual distribution method; base flow ratio method; sudden change in hydrological sequence; Weihe River in Gansu Province

保证天然河道内具有一定的径流量是维系河流生态健康运行的前提,然而不合理的水资源开发利用使得生产生活用水抢占了生态用水,导致河流生态用水不能满足需要的情況频频发生。为解决这一矛盾,以保证河流生态系统稳定与健康为目的的生态基流理论便应运而生^[1],并且日益成为水利工作者研究的热点问题。

生态基流相关理论最早出现在 20 世纪 40 年代,国内外学者就生态基流的问题做了诸多探索与研究。目前生态基流主流计算方法主要分为 4 大类:水文学方法、水力学方法、生境模拟法与整体分析法等^[2]。由于水文学方法由于所需资料要求较少,因此被广泛应用于国内外的生态基流计算。20 世纪 70 年代, Tennant 等^[3]针对生态基流问题提出了 Tennant 法,为生态基流研究奠定了重要的理论基础。此后, Q95 法、7Q10 法、Texas 法、Hoppe 法、NGPRP 法^[4]等极大地丰富了生态基流理论,并催生了不同角度下的生态基流计算方法。例如, Bernardo 等^[5]基于半干旱地区计算的视角,探讨了葡萄牙南部季节性河流的生态基流,结果表明不同阶段的生态基流值介于多年平均流量的 15.0%~44.7%; Baruah 等^[6]综合水文学和水动力模拟研究,针对印度博格多伊河的生态基流需求进行了计算分析,结果表明博格多伊河的生态基流推荐值介于 13.17~18 m³/s。国内生态基流研究虽然起步较晚,但发展较快,并提出了诸多计算方法,例如陈凯霖等^[7]基于径流还原理论对桑干河生态基流进行了计算分析,结果表明 Tennant 法下控制站册田水库的生态基流最小值为 1.13 m³/s; 吴喜军等^[8]针对中国北方地区河流年内年际变化,提出了基流比例法并应用于渭河干流宝鸡段,结果表明渭河宝鸡段生态基流推荐值为 5.02~36.73 m³/s; 潘扎荣等^[9]基于河流径流量的年际特征变化,提出年内展布法并应用于淮河,结果表明,一般用水期以多年年均径流量的 4.4%~8.7% 作为断面生态基流值推荐; 张爱民等^[10]利用年内展布法分析新疆白杨河流域生态

基流,结果表明白杨河生态基流推荐值为 2.50 m³/s, 占年均径流量的 17%。

国内外学者针对生态流量的研究,研究对象众多,方法丰富,主要围绕干旱区及半干旱区展开。渭河甘肃段地处我国西北半湿润区与半干旱区交界地带,近年来渭河流量呈现明显下降趋势^[11],且经济社会的快速发展加大了河道取水,河流生态系统稳定与健康因此受到威胁,生态基流问题亟需学者解决。现有研究多集中于渭河关中段,对于作为河源区的渭河甘肃段鲜有涉及,因此有必要就渭河甘肃段生态基流问题展开研究,以期为地区生态建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县,其干支流遍及陕甘宁三省,于陕西潼关汇入黄河,是黄河最大支流。渭河干流全长 818 km,流域总面积 13.48 km²,其中甘肃省境内干流长 316 km,北道站以上 254 km,控制面积 2.49×10⁴ km²。渭河甘肃段流域地处黄土丘陵沟壑区,属于温带季风气候区,大陆性气候特征显著,降水年内分布差异大,主要集中在 7—9 月。渭河流域甘肃段年降水量 400~600 mm,年平均气温 4~10℃,受降水季节性特征影响,流域内径流季节特征明显。研究区位置示意图见图 1。

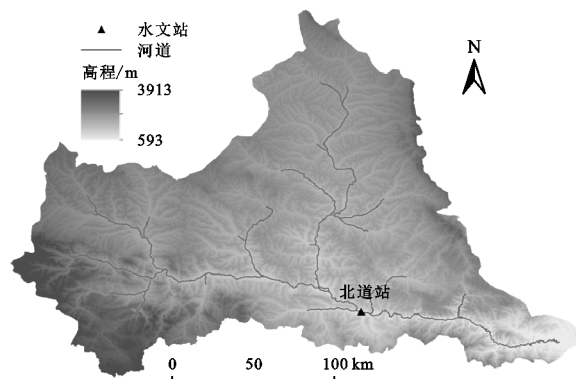


图1 研究区示意图

1.2 数据来源

本文选取渭河流域北道水文站 1953—2018 年的月径流资料数据,资料来自于甘肃省水资源公报。北道站位于渭河干流,是渭河甘肃段的控制站点,为国家基本水文站点二等站,水文资料详细且准确度较高。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 法 Mann-Kendall 法^[12]是一种非参数统计检验方法,其应用不受个别异常值的干扰,计算过程简便,因此适用于水文气象等非正态分布的数据,可用来分析水文气象时间序列趋势性与变异性。

构造时间序列 x 的秩序列 S_k

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k=2,3,\cdots,n \quad (1)$$

式中: S_k 为第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值个数的累计数, $i \geq j$ 。

定义统计量

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, \quad k=1,2,\cdots,n \quad (2)$$

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

其计算步骤为:

(1) 分别构造顺序与逆序时间序列的秩序列 S_k , 计算对应 UF_k 与 UB_k 。

(2) 给定置信度 α , 若 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$, 证明通过置信度为 α 的显著性检验, 时间序列趋势显著。

(3) 绘制 UF_k 与 UB_k 两条曲线, 临界区间内的曲线交点为潜在突变发生时刻。

1.3.2 Tennant 法 Tennant 法其不同季节以平均年流量的不同百分比作为推荐流量, 一般情况下选取多年平均天然径流量的 10%~30% 作为推荐比例, 并根据不同水期适当调整。Tennant 法适用于流量较大, 拥有长序列水文资料的河流^[13]。Tennant 法计算结果具有宏观指导性, 一般作为计算结果的参考。

1.3.3 改进年内展布法 改进年内展布法^[14]是一种考虑了水文序列突变的生态基流计算方法, 避免了传统年内展布法在季节性明显的河道计算结果误差较大的弊端。其计算方法如下:

(1) 剔除长序列径流资料各月中的最大值与最小值, 并计算平均值。

(2) 利用突变检验判断突变年份, 并以突变年份为界限将长序列径流分为 k 个子序列。

(3) 确定汛期与非汛期, 并判断距离现状年子序

列趋势特征。

计算各子序列汛期与非汛期平均流量与 $\overline{Q_1}, \overline{Q_2}$ 和最小平均流量 $\overline{Q_{\min 1}}, \overline{Q_{\min 2}}$, 计算均值比 η 并计算各子序列生态基流。

$$\eta_1 = \overline{Q_{\min 1}} / \overline{Q_1}, \eta_2 = \overline{Q_{\min 2}} / \overline{Q_2} \quad (5)$$

$$Q_{p1} = \eta_1 \overline{q_{i1}}, Q_{p2} = \eta_2 \overline{q_{i2}} \quad (6)$$

式中: $\overline{q_{i1}}$ 与 $\overline{q_{i2}}$ 分别为子序列汛期与非汛期的第 i 月多年平均流量 (m^3/s)。

(4) 计算子序列权重并做归一化处理, 对于增加及减少趋势的水文序列, 其权重计算方法分别如下:

$$\text{增加趋势: } \omega_{pi} = (Q_{pi} / Q_{0i})^2 / [(Q_{pi} / Q_{0i})^2 + 1] \quad (7)$$

$$\text{减小趋势: } \omega_{pi} = (Q_{0i} / Q_{pi})^2 / [(Q_{0i} / Q_{pi})^2 + 1] \quad (8)$$

式中: Q_{0i} 为靠近现状年的子序列第 i 月生态基流 (m^3/s)。

(5) 根据子序列生态基流计算加权生态基流, Q_i 即为加权后生态基流。

$$Q_i = \sum_{j=1}^k Q_{pi} \omega_{pi} \quad (9)$$

1.3.4 基流比例法 基流比例法认为各时段的流量是相互联系的^[15], 基流比例法将水文径流序列资料划分为 m 种不同的丰枯水文年型, 并在划分丰枯年的基础上进一步在年内区分 n 种水期。基于此, 每个断面的生态流量计算便有了 $m \times n$ 种潜在计算场景, 并可以根据需求进行场景划分。

(1) 年型划分。划分年型是基流比例法计算的第一步, 研究采纳距平百分率法进行年型划分, 其公式如下:

$$\omega = (Q_i - Q_a) / Q_a \times 100\% \quad (10)$$

式中: ω 为所求断面流量距平值; Q_i 与 Q_a 分别为第 i 年年平均径流与多年平均径流量 (m^3/s)。根据渭河甘肃段水文资料实际, 划分为 4 个水平年, 划分依据见表 1。

表 1 水文年型划分

年型	枯水年	偏枯年	平水年	丰水年
距平值(ω)	$\omega \leq -60\%$	$-60\% < \omega < -20\%$	$-20\% < \omega < 20\%$	$\omega \geq 20\%$

(2) 汛期划分。分析渭河北道站水文序列资料, 结合地区防汛工作实际, 将每年的 6—10 月定为汛期, 11 月—次年 5 月定为非汛期。

(3) 基流比例与生态基流计算。

$$T_{i+1} = \alpha \times T_i \quad (11)$$

$$\alpha = 1 + (Q_i / Q_{i+1} - 1) \times \mu \quad (12)$$

$$S_i = Q_i \times T_i \quad (13)$$

式中： T_i 为已知的第*i*年型的基流比例(%)； $i=1,2,3,4$ ，依次为丰水年、平水年、枯水年和特枯年； α 为比例倍数，即第($i+1$)年型与第*i*年型基流比例的比值； μ 为衰减系数， $0\leq\mu\leq1$ ； Q_i 为断面第*i*年型的平均径流量； S_i 为*i*时段生态基流量(m^3/s)。

2 结果与分析

2.1 渭河甘肃段生态基流计算

2.1.1 基于 Tennant 法渭河甘肃段生态基流计算
Tennant 法以多年平均流量的 10%~30%为生态基流推荐值，考虑到渭河甘肃段偏干旱，水资源较为有限，因此在计算生态基流量时，非汛期选择多年平均流量的 10%，汛期选择多年平均流量的 20%，最终年内平均生态基流计算结果占多年平均流量的 16.89%，整体情况较为良好。

2.1.2 基于两种年内展布法渭河甘肃段生态基流计算
基于传统年内展布法对生态基流进行计算，其各月生态基流值处于 0.72~4.13 m^3/s ，利用线性回归法对渭河干流北道站进行了趋势分析，并利用 Mann-Kendall 检验对年均径流序列进行了突变检验，其结果见图 2—3。

由图 2—3 可以看出，北道断面径流序列整体呈下降趋势，且于 1986 年发生突变，通过置信水平 $\alpha=0.05$

的检验，因此我们将径流序列分为子序列 A(1953—1986 年)，子序列 B(1987—2018 年)，并通过改进加权年内展布法进行基流计算，其中子序列 A 与子序列 B 基流及权重分配见表 2，子序列与原始序列对比见图 4，两种年内展布法计算结果对比见图 5。

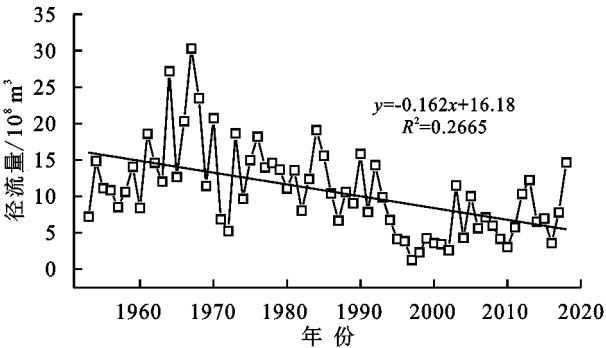


图 2 北道站年径流趋势变化

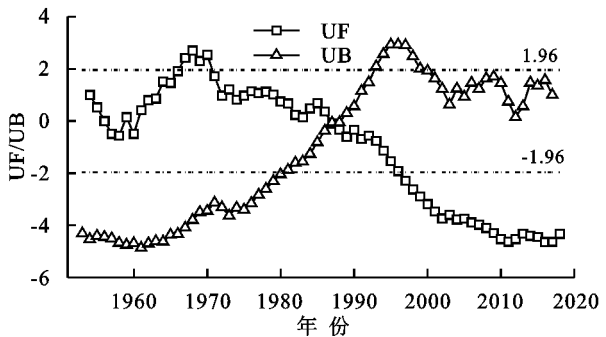


图 3 北道站径流 Mann-Kendall 检验

表 2 改进年内展布法年内基流分配

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
传统年内展布法基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.72	0.85	1.15	1.33	1.95	2.26
基流过程 A/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	3.53	4.63	6.33	7.59	9.67	6.48
权重	0.11	0.07	0.06	0.05	0.09	0.36
基流过程 B/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.23	1.22	1.51	1.64	2.95	4.83
权重	0.89	0.93	0.94	0.95	0.91	0.64
改进年内展布法生态基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.48	1.49	1.8	1.94	3.56	5.42
月平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	11.16	13.23	17.54	20.43	29.07	34.53
占该月多年平均流量比/%	13.26	11.26	10.26	9.50	12.25	15.70

项目	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
传统年内展布法基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	4.05	4.13	3.83	3.31	1.56	0.81
基流过程 A/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	13.26	13.27	13.34	10.00	8.15	4.39
权重	0.20	0.21	0.15	0.29	0.07	0.06
基流过程 B/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	6.63	6.85	5.52	6.41	2.26	1.11
权重	0.8	0.79	0.85	0.71	0.93	0.94
改进年内展布法生态基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	7.96	8.19	6.69	7.45	2.67	1.31
月平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	61.89	61.88	57.49	50.28	23.69	12.39
占该月多年平均流量比/%	12.86	13.24	11.64	14.82	11.27	10.57

相较于传统年内展布法，该方法基流值提升明显，整体提升 92.52%，其中非汛期提升 70.25%，汛期提升

103.13%。经计算，北道断面年平均基流占年平均流量的 12.86%，符合 Tennant 法推荐的基流比值。

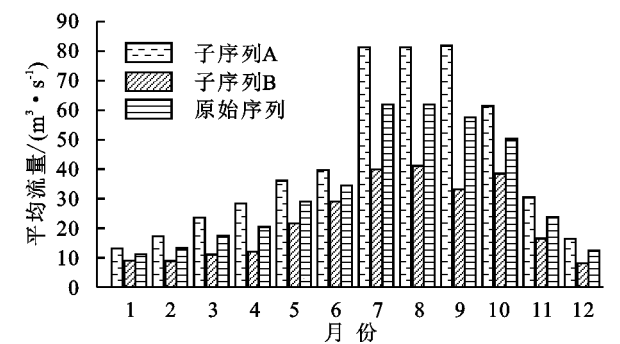


图 4 不同序列月平均流量

2.1.3 基于基流比例法渭河甘肃段生态基流计算与年内展布法不同,基流比例法并非按照年内月份推演基流过程,而是基于不同年型的不同时期进行生态基流的计算,按照年平均径流量划分水文年型。基于径流资料利用公式(11)–(12)计算基流比例,其中衰减系数 $\mu=0.4^{[8,15]}$,计算得丰水年、平水年、枯水年以及特枯年之间的比例倍数依次为 1.247,1.242,1.478,具体基流比例及生态基流分配结果见表 3。

表 3 各年型生态基流

水文年型	丰水年	平水年	枯水年	特枯年
平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	56.10	34.69	21.61	9.84
基流比例/%	20	24.94	30.98	45.80
生态基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	11.22	8.65	6.69	4.51

因为生态基流更多是为了保障枯水期的河道生态^[16],因此推算基流比例时有必要按照枯水期的径流量划分。本文选择采用非汛期的径流量为基准,按照距平百分率法对水文资料进行水文年型划分从而按照进行比例推算,丰水年、平水年、枯水年以及特枯年之间的比例倍数分别为 1.296,1.244,1.670,具体基流比例及生态基流分配见表 4。丰水年生态基流比例按照 Tennant 法推荐定为 20%,各年型依次以丰水年为基准进行比例推荐,其中特枯年非汛期生态基流值为 2.33 m^3/s ,丰水年非汛期生态基流值为 6.47 m^3/s 。为与其他方法形成对比以判断适用效果,且为保障非汛期生态基流,因此选择按照特枯年非汛期基流比例进行月内分配,其结果见表 5。

表 4 非汛期各年型生态基流

水文年型	丰水年	平水年	枯水年	特枯年
平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	32.37	18.60	11.56	4.32
基流比例/%	20	25.92	32.24	53.85
生态基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	6.47	4.82	3.73	2.33

2.2 不同水文学方法计算的生态基流对比分析

不同方法计算生态基流结果对比见图 6。Tennant 法是计算生态基流过程中广泛应用的方法,对

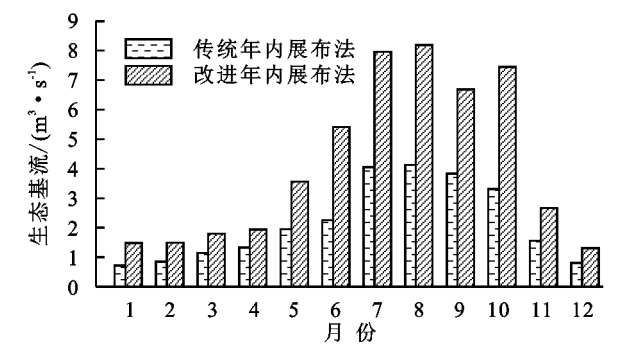


图 5 不同年内展布法生态基流对比

于生态基流的计算具有宏观定性指导意义,其河道流量与河流生态健康关系见表 6,Tennant 法最终年内平均生态基流值占多年平均流量的 16.89%,生态健康状况处于生态健康关系表的差与好两个健康状况之间,认为其生态基流结果较为良好。传统年内展布法整体基流值仅占平均流量的 6.59%,未能满足 Tennant 法下 10%的标准下限。

表 5 特枯年生态基流逐月分配

月份	1	2	3	4	5	6
平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	4.26	4.25	3.47	3.26	7.98	15.94
基流比例	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
生态基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	2.30	2.29	1.87	1.76	4.30	8.58

月份	7	8	9	10	11	12
平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	22.97	18.48	13.72	14.31	5.00	2.03
基流比例	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
生态基流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	12.37	9.95	7.39	7.71	2.69	1.09

基流比例法在保障非汛期生态基流方面效果要明显优于其他各方法,改进年内展布法在非汛期保障方面效果较为良好,且基流年内分配更为均匀平缓。Tennant 法给出生态基流为 1.12~12.38 m^3/s ,基流比例法为 1.76~12.37 m^3/s ,传统年内展布法推荐范围为 0.72~4.13 m^3/s ,改进年内展布法推荐生态基流值为 1.48~8.19 m^3/s ,具体计算结果详见表 7。

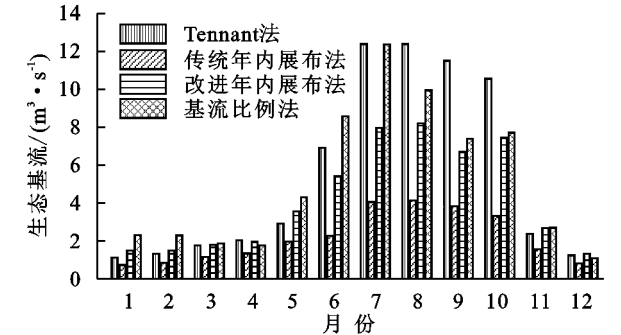


图 6 不同方法下北道逐月生态基流计算结果

2.3 生态基流保障程度分析

确定生态基流能否得到满足是河流健康评价的基

础,因此有必要就生态基流的保障程度进行分析^[17]。前文指出,生态基流更多是为了保障枯水时期的河道生态,因此基于考虑现状年的原则,选择靠近现状年的代表性年份进行径流与基流值对比分析^[18],为此选择2012年(平水年, $p=50.7\%$),2014年(枯水年, $p=74.6\%$),2016年(特枯年, $p=89.6\%$)实测资料进行对比分析见图7。由图7可以看出,除了枯水年7月份 Tennant 法结果不能满足生态基流外,其他时间径流均能满足各方法生态基流需求。同时也可以明显看出,随着不同水平年干旱程度的加剧,其保证程度也逐渐降低,生态基流量甚至逼近实际径流量,河道生态健康面临压力较大。

表6 河道流量与河流生态健康关系 %

生态系统健康状况	非汛期	汛期
最大	200	200
最佳流量	60~100	60~100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
开始退化	10	30
差或最小	10	10
极差	<10	<10

综合计算结果与保证程度来看,基流比例法在保证整体结果较优的基础上,更能保证非汛期的生态基流,给出的推荐范围更为适合渭河甘肃段。

3 讨论

3.1 两种年内展布法

传统年内展布法计算结果偏小,其原因在于渭河甘肃段径流资料年际变化极大,因此最小月平均流量存在偏小的情况而不具有代表性,赵然杭等^[19]研究指出该方法更多适用于径流连续且径流量较大的河

道,渭河甘肃段径流量季节变化大,径流量偏小的同时还呈下降趋势,因而其结果误差较大。传统年内展布法计算生态基流值仅占全年平均流量的6.59%,不能有效保证河流生态需求,因此可以认为其生态基流计算结果不适合渭河甘肃段。

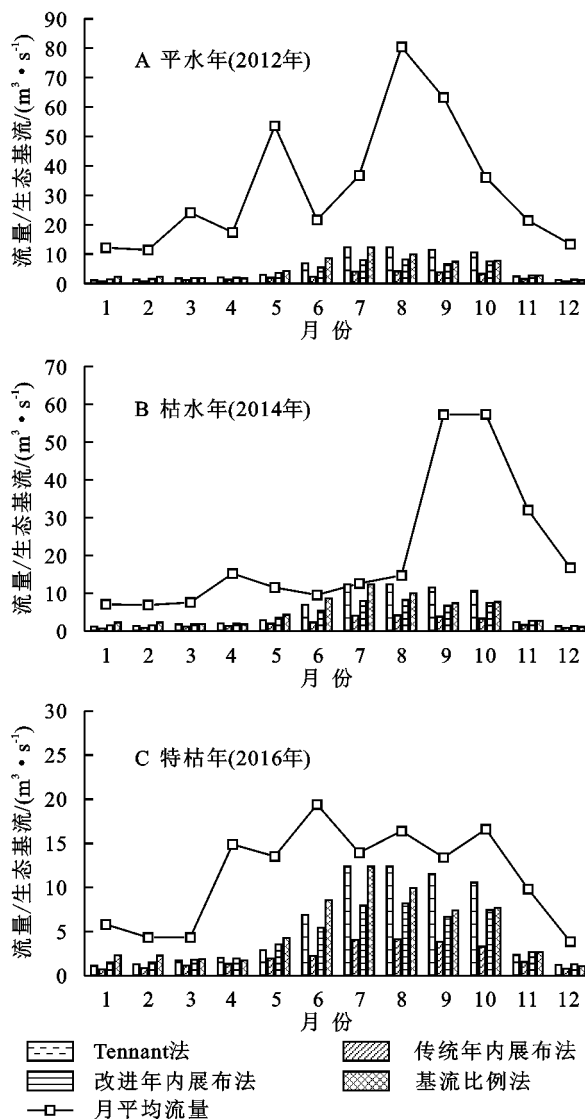


图7 北道站生态基流与不同水平年实际径流对比

表7 不同水文学方法生态基流计算结果

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均流量	11.16	13.23	17.54	20.43	29.07	34.53	61.89	61.88	57.49	50.28	23.69	12.39
Tennant 法	1.12	1.32	1.75	2.04	2.91	6.91	12.38	12.38	11.50	10.56	2.37	1.24
传统年内展布法	0.72	0.85	1.15	1.33	1.95	2.26	4.05	4.13	3.83	3.31	1.56	0.81
改进年内展布法	1.48	1.49	1.8	1.94	3.56	5.42	7.96	8.19	6.69	7.45	2.67	1.31
基流比例法	2.30	2.29	1.87	1.76	4.30	8.58	12.37	9.95	7.39	7.71	2.69	1.09

改进年内展布法去除了传统年内展布法结果受极端值影响的问题,综合考虑了径流序列突变后的变化趋势,在基流分配时,更加注重现状年的影响。在加权过程中,靠近现状年的子序列 B 对基流计算值

的影响权重更为突出,渭河北道断面近年来径流量呈现显著下降趋势,其中汛期径流下降趋势尤其明显,因而在计算的结果方面较基流比例法结果偏小。由于生态基流更多地要以现状年为保护目标,因此考虑

到水文变异后的改进年内展布法更为切合现状年实际。改进年内展布法考虑近现状年的原则,适合于其他方法的改进。

3.2 Tennant 法与基流比例法

Tennant 法计算生态基流占年均流量 16.89%,整体结果最好,其整体结果较好的原因是汛期与非汛期采用了不同比值,汛期较高的基流值拉高了整体水平,因此导致年内基流差异巨大,相比而言在非汛期基流保障方面不如基流比例法。

基流比例法推荐结果较好的原因在于,其原始比例定为 20%是建立河道健康状况为好的基础上,因而其结果更多是以河道健康评价中的好为导向,在保证整体结果较优的基础上,进一步考虑了非汛期的基流保障问题,其结果可以作为生态基流的规划值。

4 结论

(1) 采用 Tennant 法、基流比例法、传统年内展布法以及改进年内展布法等对渭河甘肃段生态基流进行了计算,除传统年内展布法不能满足生态基流最低下限外,其他方法基流计算结果占年均流量比例均处于 10%~20%,生态健康评价均为良好。不同特征年型均能较好保障生态基流,但随着干旱程度加剧,基流保障压力逐渐加大。

(2) 不同方法计算的生态基流结果区别较为明显,其中,基流比例法在保证整体结果较优的基础上,更能保证非汛期的生态基流,因此该方法计算结果更适用于年际年内变化明显的渭河甘肃段,而考虑水文变异的改进年内展布法更多考虑了现状年的径流变化,其思路可应用于其他方法的改进。

参考文献:

- [1] 徐宗学,李鹏,侯昕玥.河道生态基流理论基础与计算方法研究[J].人民黄河,2019,41(10):119-127.
- [2] 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.
- [3] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries,1976,1(4):6-10.
- [4] 姚云泽,姜翠玲,万福涛.基于多种水文学方法的滦河典型断面生态基流研究[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):941-949.
- [5] Bernardo J M, Alves M H. New perspectives for ecological flow determination in semi-arid regions: a preliminary approach[J]. River Research and Applications, 1999,15(1/3):221-229.
- [6] Baruah A, Sarma A K. Ecological flow assessment using hydrological and hydrodynamic routing model in Bhogdoi river, India[J]. Modeling Earth Systems and Environment,2021,7:2453-2462.
- [7] 陈凯霖,冯民权,王丹丹.基于径流还原的桑干河生态基流及其盈缺分析研究[J].水资源与水工程学报,2018,29(2):90-96.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张爱民,郝天鹏,周和平,等.新疆白杨河流域特征及生态植被需水分析[J].生态学报,2021,41(5):1-10.
- [11] 靖娟利,和彩霞,王永锋,等.西南地区 1902—2018 年干旱时空演变特征分析[J].水土保持研究,2022,29(3):220-227.
- [12] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [13] 黄康,李怀恩,成波,等.基于 Tennant 方法的河流生态基流应用现状及改进思路[J].水资源与水工程学报,2019,30(5):103-110.
- [14] 林梦珂,魏娜,卢锟明,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.
- [15] 栾清华,刘存,张俊,等.基于基流比例法的洋河干流生态基流估算[J].水利水电技术,2018,49(6):101-108.
- [16] 李怀恩,岳思羽.河道生态基流的功能及价值研究:以渭河宝鸡段为例[J].水力发电学报,2016,35(11):64-73.
- [17] 田若谷.渭河干流关中段河道生态基流保障研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [18] 于松延,徐宗学,武玮.基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J].北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(2/3):175-179.
- [19] 赵然杭,彭弢,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.