

# 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<sup>\*</sup>

苏 恒 徐宗学<sup>†</sup> 李 鹏 叶陈雷 王京晶

(北京师范大学水科学研究院,城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,100875,北京)

**摘要** 基于西江大湟江口站 1960—2017 年逐日流量数据,运用 Mann-Kendall 等 3 种突变点检验方法将该站流量序列划分为人类活动干扰前(1960—1991 年)和干扰后(1992—2017 年)2 个时段,以干扰前流量序列为基础,采用 Tennant、NGPRP 等 6 种水文学方法对该河段逐月生态基流进行计算,并与相关研究中基于该河段鱼类产卵期生境模拟计算结果进行比较,分析结果表明 NGPRP 法在该河段适用性更强.将 NGPRP 法计算所得各月生态基流值作为基准,分析比较干扰前后河段生态基流保证程度,分析结果表明干扰后 9—11 月生态基流保证程度有所下降,其余月份均有所提高,但由于西江规划水利设施较多,河流生态环境保护工作仍面临一定挑战.本研究为计算该河段生态基流筛选、确定适用程度较高的水文学计算方法,以及为该河段生态基流计算提供一定参考,并据此对该河段干扰前后生态基流保证程度进行分析,其结果可以为该河段生态保护和评估工作提供技术支撑.

**关键词** 生态基流;西江;水文学方法;突变点检测

**中图分类号** TV21

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021229

## 0 引言

水资源在人类生存、社会发展与生态环境保护的平衡关系中具有十分重要的作用<sup>[1]</sup>.然而近年来,随着社会经济发展和人口快速增长,水资源的供需关系变得愈发紧张,人类不合理地开发利用水资源,对河流生态系统结构和功能造成重大破坏,长此以往将导致河流生态系统发生严重退化<sup>[2-4]</sup>.尤其在我国,水资源已经成为经济社会发展和生态系统健康的主要制约因素,因此科学合理地处理水资源开发与保护的关系,对于社会可持续发展具有十分重要的现实意义<sup>[5-6]</sup>.生态基流是生态系统功能得以正常发挥所需维持的水量,是为保持河流健康状态所必须满足的最小水量<sup>[7]</sup>.将生态基流作为必须满足的河流流量下限,能够有效避免河流生态系统遭受到不可恢复的破坏.

据不完全统计,计算生态基流的方法已达 200 多种<sup>[8]</sup>.这些方法大致可以分为 4 类,分别为水文学方法、水力学方法、生境模拟法以及整体分析法<sup>[7]</sup>.然而,水力学方法、生境模拟法以及整体分析法对于河流资料要求较高,其中:水力学方法假设生态基流与河道物理形态特征有关,进行计算需要较为丰富的河道断面形态数据;生境模拟法需要调查研究河段栖息

地目标物种种类及其不同生命阶段对水文条件的需求;整体分析法需要综合考虑河流污染防治、栖息地保护、河道形态稳定等多方面因素,其计算结果的得出需要长期的调查研究和系统分析.我国生态监测资料较缺乏,且在实际研究中人力物力有限,故此 3 种方法的应用均具有一定的局限性.水文学方法基于水文站流量观测数据和数理统计分析计算河流生态基流,无需复杂烦琐的现场资料,且我国多数河流均具有较长序列的水文资料,因此它具有快速高效、易于使用、对资料要求低的优势.国外对于生态基流的研究起步较早.在 1970 年代, Tennant<sup>[9]</sup>通过调查美国中西部多条河流,建立了河道最小流量与栖息地质量之间的量化关系,即 Tennant 法;1991 年 Matthews 等<sup>[10]</sup>通过分析不同区域的水文和生物特征,提出了以某一保证率下的月均流量作为生态基流的方法,即 Texas 法;而后,变化范围法、流量历时曲线法及 7Q10 等方法逐渐发展起来并获得了广泛应用<sup>[11-12]</sup>.国内对于生态基流的研究较为滞后,但发展迅速,相关研究主要集中在对于原方法的改进:吴喜军等<sup>[13]</sup>通过确定不同年型对基流比例法进行了改进,并对渭河干流宝鸡段生态基流进行了计算;王鸿翔等<sup>[14]</sup>对

<sup>\*</sup> 科技基础资源调查专项资助项目(2019FY101900)

<sup>†</sup> 通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士生导师.研究方向:水文与水资源研究. E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-14

逐月最小径流法、逐月频率法等 5 种方法在城市河流生态基流计算中的适用性进行了比较研究;黄强等<sup>[15]</sup>通过引入环境比降和季节系数对 Tennant 法进行了改进,弥补了原方法不能反映河流多沙特性和季节特性的不足;杨裕恒等<sup>[16]</sup>采用流量还原的方法对补水和未补水河流流量进行修正,并考虑鱼类产卵期最低流速改进了 Tennant 法;赵越等<sup>[17]</sup>依据流域季节划分时段,以各月 90% 频率径流量代替各月最小径流量对年内展布法进行改进,并以此计算了梧桐河生态基流。

西江流域拥有丰富的水能和航运价值。西江干流水利设施众多,规划建设了龙滩、乐滩、大化、桥巩等梯级水电站,尚有正在施工建设中的大藤峡水电站。人类活动的加剧会对西江流域水生生物栖息地造成严重破坏。据调查,西江流域鱼类栖息地已由 29 个减少为 17 个,因此进行生态基流研究,为水资源的开发与利用划定“红线”是非常必要的。以往研究多将河流长序列流量数据作为整体来计算生态基流,使用方法单一,未能考虑人类干扰对生态基流计算的影响;且各种水文学方法对南方季节性河流的适用性研究较少;因此本文以西江流域最大的产卵场——东塔产卵场下游大湟江口河段为例,基于大湟江口水文站 1960—2017 年逐日流量数据,通过突变点检验将序列分为人类干扰前后 2 个时段,并将干扰前的时段作为河流天然状态,避免了径流还原计算天然流势,方法更加简便。采用 Tennant、NGPRP 等多种水文学方法计算河段的生态基流,通过结合河流天然水文

特征,并参考该河段生境模拟法计算鱼类产卵期生态基流结果,对各方法计算结果进行对比分析,筛选出该河段适宜的生态基流计算方法并确定各月生态基流值,以分析干扰前后生态基流保证程度。计算结果可为西江流域大湟江口段的生态调度及水资源利用划定红线,避免因河道流量小于生态基流而造成河流生态系统破坏,为该河段生态管理保护提供一定参考。

## 1 研究区概况与数据来源

西江为珠江第一大支流,是南盘江、红水河、黔江、浔江和西江的总称。西江发源于云南省曲靖市马雄山,全长达 2075 km,流经云南、贵州、广西、广东 4 省(区),在广东三水思贤滘流入珠江,流域面积为 35.3 万 km<sup>2</sup>(图 1-a),约占珠江流域面积的 77.8%<sup>[18-19]</sup>。西江流域属亚热带季风气候,多年平均气温为 14~22℃,多年平均降水在 1000~2200 mm,地形复杂且起伏较大,气候南北差异和垂直差异较大<sup>[20]</sup>。

大湟江口水文站位于江口镇上游 1000 m 处,集水面积 289.418 km<sup>2</sup>,历年最高水位达 38.28 m,是黔江和郁江汇入浔江后的第一个水文站,其上游约 20 km 处为西江流域重要的鱼类栖息地——东塔产卵场(图 1-b)。本研究基于大湟江口站 1960—2017 年逐日流量数据进行分析,流量数据来源于珠江水利委员会水文局,数据无缺测,质量可靠。

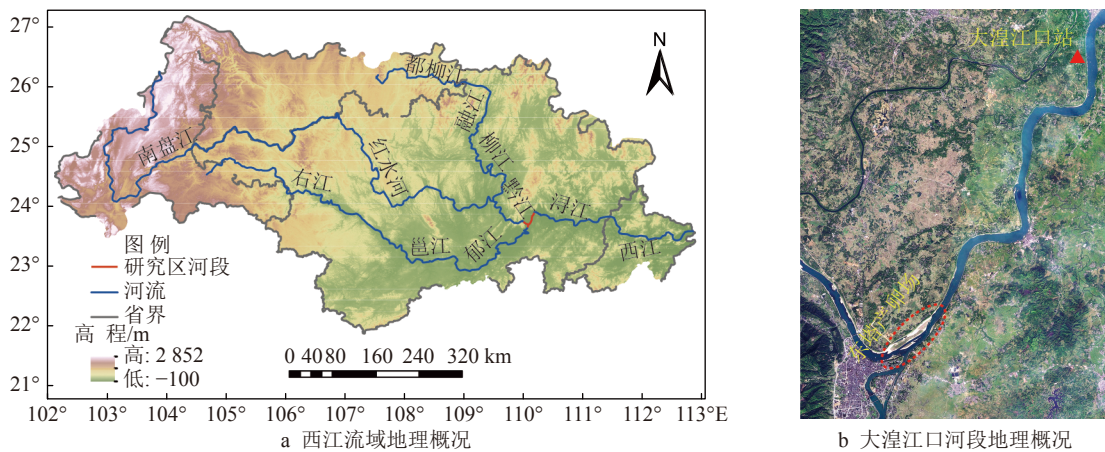


图 1 研究区概况

## 2 研究方法

**2.1 突变点检测** 本研究采用 Mann-Kendall(M-K)突变检验、累计距平和滑动  $T$  检验 3 种方法对年径流序列进行检测。M-K 为一种非参数统计检验方法,其样本无须遵从特定分布,且受异常值干扰小,在趋势分

析中应用较广<sup>[21]</sup>。累计距平法为直观判断方法,通过变量与平均值的偏差累计曲线的升降判断距平的增减,取曲线极值点为突变时间<sup>[22]</sup>。滑动  $T$  检验法是基于  $T$  检验法的原理,对滑动点前后 2 个序列的分布函数相等这一假设进行检验。3 种方法的具体原理详见参考文献 [23-25]。

## 2.2 生态基流计算的水文学方法

1) Tennant 法. Tennant 法由 Tennant<sup>[9]</sup> 于 1976 年提出, 又名蒙大拿法. Tennant 在 1964—1974 年间对美国蒙大拿州、内布拉斯加州以及怀俄明州的 100 多个地区受人类影响较小的河流进行观测研究, 建立了水生生物栖息地适宜性与河流流量之间的关系, 考虑鱼类等水生生物生存以及生态环境健康将河流分为 8 个等级, 如表 1 所示.

表 1 Tennant 法生态基流标准

流量状况	推荐基流(平均流量)占比/%	
	一般用水期(10月—翌年3月)	鱼类产卵育幼期(4—9月)
最好	200	200
最佳范围	60~100	60~100
杰出	40	60
优秀	30	50
好	20	40
一般或退化	10	30
差或最低	10	10
严重退化	0~10	0~10

由表 1 可以看出, Tennant 法将多年平均流量的 10% 作为维持河流生态系统健康的最小流量, 将多年平均流量的 30% 作为能够维持大多数水生生物较好栖息地条件的流量<sup>[9]</sup>. Tennant 法适用于较大且具有长序列水文资料的河流.

2) NGPRP 法. NGPRP 法是将原流量序列分为丰水年、平水年和枯水年 3 组, 取平水年组 90% 设计保证率流量作为生态基流<sup>[26]</sup>. 其优点在于考虑了不同水文年的情况, 将生态基流的计算与径流状况相结合.

本研究采用距平百分率法进行年型划分, 距平百分率计算公式为

$$E = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\bar{Q}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:  $E$  为距平百分率;  $Q_i$  为各年平均流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\bar{Q}$  为多年平均流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . 根据  $E$  值将各个水文年划分为丰水年、平水年和枯水年 3 种, 其分类标准  $E$  分别  $< -20\%$ 、 $[-20\%, 20\%)$ 、 $\geq 20\%$ .

3) Texas 法. Texas 法通过对各月流量频率进行计算, 取设计保证率为 50% 对应的月流量的特定百分比作为生态基流<sup>[10]</sup>. 吴喜军等<sup>[13]</sup> 在对渭河宝鸡段生态流量研究中, 结合考虑典型鱼类及植物水量要求, 提出 Texas 法百分比取 20% 为宜. 故本研究取设计保证率为 50% 对应的月流量的 20% 作为生态基流. Texas 法的优点在于其考虑了季节变化因素.

4) 7Q10 法. 7Q10 法将各月 90% 保证率最枯连续 7 d 的平均流量作为此月的生态基流. 它适用于开发利用程度较高且具有长序列径流资料的河流, 最早是由美国学者考虑水质因素而提出的用来计算生态基流的方法, 其结果有利于防止河流水质恶化<sup>[27]</sup>.

5) 90% 保证率最枯日平均流量法. 90% 保证率最枯日平均流量法(90% 最枯日法)由 90% 保证率最枯月平均流量法(90% 最枯月法)变化而来. 90% 最枯月法是将多年最枯月平均流量进行频率计算, 取其 90% 保证率对应流量作为生态基流<sup>[28]</sup>. 本研究中 90% 最枯日法是将某一月份最枯日流量进行频率计算, 将 90% 保证率对应的流量作为生态基流. 该法适用于开发程度较高且具有较长序列水文资料的河流.

6) RVA 法. RVA 法将给定阈值作为流量过程的可变化范围, 被广泛用于生态基流的计算. 美国相关研究学者于 2002 年提出将 RVA 阈值差值的 25% 作为河流的生态基流, 其公式为

$$Q_e = 0.25 \times (Q_u - Q_d), \quad (2)$$

式中:  $Q_e$  为生态基流,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_u$  和  $Q_d$  分别为 RVA 阈值的上、下限. 但将该式应用于季节流量变化较大的河流结果往往偏小. 舒畅等<sup>[29]</sup> 认为流量均值变化范围应小于 RVA 阈值差值, 故提出下式对生态基流进行计算:

$$Q_e = \bar{Q} - (Q_u - u_d), \quad (3)$$

式中:  $\bar{Q}$  为流量均值. 同样, 该方法对于季节性流量变化较大河流效果较差, 因为枯水期 RVA 流量阈值差值往往较小, 生态流量计算结果偏大; 而对于丰水期, 流量波动较大, 变幅范围广, 因此 RVA 阈值差值往往较大, 故生态流量计算结果偏小, 不能满足生态环境要求. 本研究考虑到西江大湟江口河段天然流量过程特点, 采用张志广等<sup>[30]</sup> 分时期修正 RVA 阈值差值系数计算生态基流的方法, 其公式为

$$\text{汛期: } Q_e = 0.5 \times (Q_u - Q_d), \quad (4)$$

$$\text{非汛期: } Q_e = 0.75 \times (Q_u - Q_d), \quad (5)$$

本研究中, 汛期取 6—8 月, 非汛期取 9 月—翌年 5 月.

## 3 结果与讨论

3.1 年平均径流突变点检测 基于 M-K 法、累计距平法和滑动  $T$  检验法对大湟江口水文站 1960—2017 年年平均流量进行分析, 其结果如图 2 所示. 各种方法所得到的突变点, M-K 突变检验法为 1963、

1986、1992、2002、2015 年, 累计距平法为 1967、1992、2002、2013 年, 滑动  $T$  检验法为 1993、2003 年.

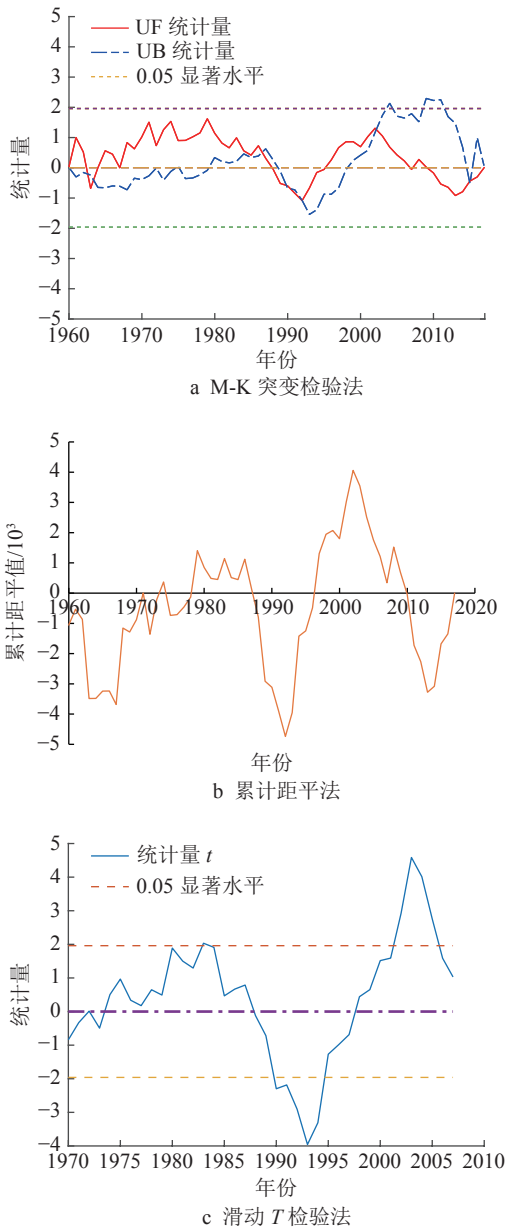


图 2 突变点检验分析曲线

由于在 20 世纪 90 年代前人类活动对于天然河流影响较小, 且距离研究河段上游最近的马骝滩水电站于 1992 年 4 月第 1 台发电机机组发电, 第 2 台和第 3 台机组也分别于 1992 年 12 月和 1993 年 2 月并网发电; 同年, 位于研究河段上游红水河的岩滩水电站首台机组发电, 因此选取 1992 年为河流流势的突变点.

**3.2 不同方法生态基流结果比较** 以 1992 年为突变点, 将原水文序列划分为 1960—1991 和 1992—2017 年 2 个时段, 将 1960—1991 年河流流势作为未受人类干扰的天然状态, 即以 1960—1991 年大湟江口径流资料作为生态基流计算的基础. 6 种水文学方法计

算生态基流结果如表 2 和图 3 所示.

一方面, 生态基流计算的水文学方法以天然径流为基础, 因此对于该河段适用性强的方法, 其计算所得的生态基流过程应符合年内流量变化, 能够较好地体现季节性河流年内丰枯差异. 故以此为标准对各种方法进行初步筛选. 由图 3 可知, 7Q10 法计算得到的生态基流过程线在 7 和 10 月分别出现了 2 次峰值, 而大湟江口水文站多年月均流量过程线为涨落明显的单峰(图 4), 与多年月均流量过程不符. 7Q10 法计算结果表明, 大湟江口水文站给定保证率下最枯 7 d 平均流量过程与整体流量变化过程并不一致, 即最枯 7 d 平均流量大小不能反映月流量大小. 90% 最枯日法计算得到的生态基流过程线在 8 月出现流量极值, 而根据多年月平均流量过程线可知其在 7 月为流量极值, 即由 90% 最枯日法得到的生态基流过程也存在峰现时间滞后的现象, 与实际流量过程不符. 其原因在于各月最枯日流量大小具有一定的不确定性, 其与多年月平均流量并不具有严格的相关性. Texas 法计算得到的生态基流量在 6—8 月基本持平, 无法反映年内流量变化过程, 且生态基流峰值出现在 6 月, 较实际流量过程有所提前.

另一方面, 生态基流需能为河道提供足够的水量以满足生态需求. 对于枯水期, 生态基流既需要为河流水生动植物生命活动提供足够的水量以维持适宜的栖息地环境, 改善河漫滩湿地缺水情况, 维持湿地生物正常生长发育; 又需使河流对污染物具备一定的稀释扩散能力, 维持河流自净功能<sup>[31]</sup>. 由图 3 可知, Tennant、Texas、RVA 法计算得到的生态基流量在枯水期尤其是 12 月—翌年 3 月均偏小, 考虑到确定生态基流的“最不利原则”<sup>[32]</sup>, 这 3 种方法存在无法维持生态系统健康的风险. 另外, 参考 Tennant 法中生态基流计算标准, 在一般用水期(10 月—翌年 3 月), 只有 RVA 法计算所得的 12 月生态基流小于 Tennant 法计算得出的 12 月生态基流量, 即小于多年平均流量的 10%, 低于 Tennant 法中制定的维持河流健康的最低标准; 在鱼类产卵期(4—9 月), Texas、7Q10、90% 最枯日法、RVA 法计算所得各月生态基流值均存在小于 Tennant 法计算所得的生态基流值的情况, 即小于多年平均流量的 30%, 河流生态系统存在退化的风险. 周华彬等<sup>[33]</sup> 基于 River2D 建立了该河段二维水动力学模型, 运用生境模拟法计算不同流量下权重可用面积的变化情况, 确定该区域生态需水量保障值为 5000~6000 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. 由于生境模拟法较为全面地考虑了鱼类产卵期对水文条件的需求, 计算结果比水文学方法普遍偏大, 但与 NGPRP 法计算所得的 6—8 月生

表 2 生态基流计算结果

月份	多年平均 流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Tennant		NGPRP		Texas		7Q10		90%最枯日		RVA	
		生态基 流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	比例/ %	生态基 流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	比例 /%	生态基 流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	比例/%	生态基 流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	比例/%	生态基 流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	比例/%	生态基 流/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	比例/ %
1	1488.2	148.8	10.0	1060	71.2	267.2	18.0	1015.6	68.2	1015.6	68.2	279.0	18.7
2	1453.9	145.4	10.0	945.8	65.1	270.7	18.6	832.1	57.2	832.1	57.2	260.3	17.9
3	1685.6	168.6	10.0	943	55.9	273.5	16.2	918.6	54.5	918.6	54.5	283.5	16.8
4	3145.4	943.6	30.0	1270	40.4	571.5	18.2	1077.1	34.2	1077.1	34.2	666.8	21.2
5	6111.5	1833.5	30.0	2530	41.4	1209.1	19.8	1551.4	25.4	1551.4	25.4	1020.8	16.7
6	10326.4	3097.9	30.0	4294	41.6	2195.5	21.3	2757.1	26.7	2757.1	26.7	1601	15.5
7	11648.8	3494.6	30.0	4827	41.4	2155.2	18.5	3928.6	33.7	3928.6	33.7	2380	20.4
8	10675.2	1067.5	10.0	4521	42.4	2102	19.7	3071.4	28.8	3071.4	28.8	2338	21.9
9	7471.1	747.1	10.0	3501	46.9	1349.6	18.1	2298.6	30.8	2298.6	30.8	1916.3	25.6
10	4186	418.6	10.0	2517	60.1	856.5	20.5	1888.7	45.1	1888.7	45.1	1399.5	33.4
11	3128.9	312.9	10.0	1750	55.9	594.1	19.0	1648.6	52.7	1648.6	52.7	834.8	26.7
12	1885.9	188.6	10.0	1280	67.9	360.7	19.1	1009.3	53.5	1009.3	53.5	166.5	8.8

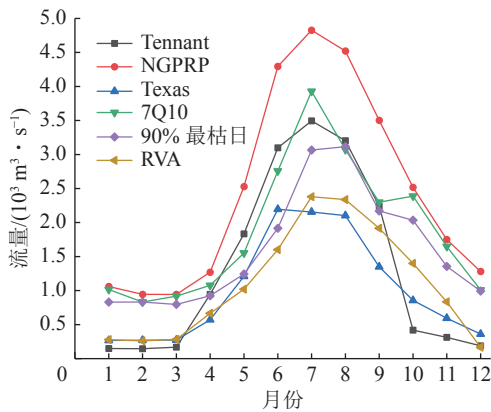


图 3 生态基流计算结果曲线

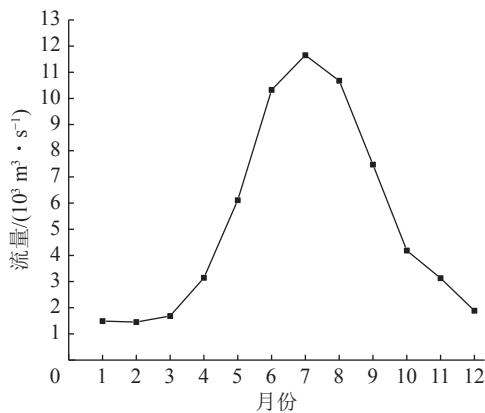


图 4 大湟江口站多年平均流量过程线

态基流最为接近, 说明 NGPRP 法计算结果能基本满足鱼类产卵期流量需求。

因此, NGPRP 法计算得到的生态基流过程线与实际流量过程的符合程度较好, 能够体现流量过程的季节差异, 且生态基流值能符合 Tennant 法提供的生

态基流标准, 满足水量要求, 结果最为理想. 说明在 6 种水文学方法中, NGPRP 法对于我国南方季节性河流的适用性较好. 故本研究取 NGPRP 法对该河段各月生态基流计算的结果作为推荐的生态基流值。

**3.3 干扰前后生态基流保证程度分析** 对比干扰前后各月多年平均流量, 可知干扰后 8—10 月月均流量较干扰前有所减小, 11 月—翌年 7 月月均流量较干扰前有所增加. 总体而言, 干扰后水量较干扰前更为丰富. 河流生态系统的健康程度与河流流量关系密切, 生态基流是维持河流健康的流量下限. 故统计干扰前后日流量不满足生态基流的时间占比如表 3 所示, 用未满足生态基流时间占比表示生态基流满足程度, 未满足生态基流时间占比越大, 则生态基流满足程度越低, 反之则越高. 由表 3 可知: 干扰前未满足生态基流时间占比 12 月最大、2 月最小, 分别为 15.1% 和 9.3%, 全年各月干扰前未满足生态基流时间占比均为 10% 左右; 干扰后未满足生态基流时间占比 10 月最大、6 月最小, 分别为 33.9% 和 1.9%, 干扰后各月未满足生态基流时间占比呈现较大差异, 9—12 月未满足生态基流时间占比明显大于 1—8 月. 对比干扰前后 2 个时段, 干扰后 12 月—翌年 8 月未满足生态基流时间占比均较干扰前有所减小, 其中 4—7 月占比减小明显, 达到 5%~10%; 然而干扰后 9—11 月未满足生态基流时间占比均较干扰前显著增大, 尤其 10 月占比增加约 20%, 干扰后生态基流保证程度在各个月份出现分化现象, 分布更加不均匀。

这可能与大湟江口站上游水库的调度和水资源利用方式有关. 大湟江口站上游邻近东塔产卵场, 近

表 3 干扰前后未达到生态基流时间分布及占比情况

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
干扰前月均流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	1488.2	1453.9	1685.6	3145.4	6111.5	10326.4	11648.8	10675.2	7471.1	4186.0	3128.9	1885.9
干扰前未满足生态基流时间占比/%	12.5	9.3	9.5	9.4	11.7	11.8	13.1	9.8	12.8	13.7	12.8	15.1
干扰后月均流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	2016.2	1799.5	2283.7	3576.9	6367.6	11950.9	13027.1	9887.5	6235.1	4012.0	3168.6	2159.4
干扰后未满足生态基流时间占比/%	7.2	5.7	4.6	4.2	3.0	1.9	5.0	9.6	23.2	33.9	19.9	14.0

年来相关管理部门针对该流域附近生态环境开展了一系列保护工作. 其中: 2005 年广西在东塔产卵场上游红水河来宾段建立珍稀鱼类自治区级自然保护区, 所涉水域面积达 582  $\text{hm}^2$ ; 2010 年在大湟江口下游西江梧州段设立国家级水产种质资源保护区, 总面积 1564  $\text{hm}^2$ . 2013 年国务院在《珠江流域综合规划(2012—2030)》的批复中明确提出“需实施水库生态调度, 提供鱼类产卵期所需要的流速和水环境”. 重点针对满足鱼类生态需求开展的生态调度等工作, 对维持鱼类生态敏感期尤其是繁殖期, 即 4—7 月生态基流具有显著作用和重大意义; 沿江水库蓄丰补枯也在一定程度上提高了该河段枯水期的生态基流保证程度. 然而, 9—11 月即汛后期及枯水前期生态基流保证程度的降低, 反映了流域在水资源管理和利用方面仍然存在一定问题, 且西江流域水利工程的建设仍在进行, 其中研究河段上游大藤峡水电站建成后控制面积达 19.78 万  $\text{km}^2$ , 库容 34.3 亿  $\text{m}^3$ , 年发电量 61.3 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ , 其对河流生态环境的潜在危害仍然不容忽视, 生态基流的保证程度在未来仍会面临一定挑战.

## 4 结论

本文运用 M-K 法等方法对大湟江口水文站 1960—2017 年逐日流量数据进行突变点检验, 基于 Tennant 等 6 种水文学方法对西江流域大湟江口段进行生态基流计算, 并对该河段生态基流保证程度进行分析, 得到如下结论:

1) 通过 M-K 法、累计距平法以及滑动  $T$  检验法对大湟江口站 1960—2017 年流量序列进行突变点检验, 对比 3 种方法突变点计算结果并结合西江大湟江口站上游马骝滩水电站实际建设情况, 确定 1992 年为流量序列突变点, 并将河段 1960—1991 年作为人类活动干扰前的天然状态, 将 1992—2017 年作为受人类活动干扰后的状态.

2) 以河流天然状态流量资料为基础, 即基于 1960—1991 年大湟江口站逐日流量资料, 采用 Tennant、NGPRP、Texas、7Q10、90% 最枯日法以及 RVA 法分别对西江流域大湟江口段逐月生态基流进行计算, 并对其结果进行比较分析. 表明 NGPRP 法计算结果更

加合理, 在本河段适用性更强, 故将 NGPRP 法计算结果作为推荐的生态基流值.

3) 对比干扰前后 2 个时段西江大湟江口生态基流的保证程度, 表明干扰后 9—11 月生态基流保证程度有所下降, 其余月份均有提高, 且干扰后各月未满足生态基流时间所占比例差异较大, 这一方面与该流域实施的一系列生态环境保护措施有关, 另一方面也暴露了水资源管理和利用方面的不足, 且考虑到西江有包括大藤峡水电站在内的水利工程建设仍在进行, 河流健康在未来仍会面临一定挑战.

## 5 参考文献

- [1] KUYLENSTIERNA J L, BJORKLUND G, NAJLIS P. Sustainable water future with global implications: everyone's responsibility[J]. *Natural Resources Forum*, 1997, 21(3): 181
- [2] ARTHINGTON A H, NAIMAN R J, MCCLAIN M E, et al. Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(1): 1
- [3] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 555
- [4] 刘昌明. 华北平原农业水文及水资源[M]. 北京: 科学出版社, 1989
- [5] 李怀恩, 岳思羽, 赵宇. 河道生态基流价值研究进展[J]. *水利经济*, 2015, 33(4): 6
- [6] RODGER A W, MAYES K B, WINEMILLER K O. Preliminary findings for a relationship between instream flow and shoal chub recruitment in the lower Brazos River, texas[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2016, 145(5): 943
- [7] 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
- [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
- [9] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife,

- recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6
- [10] MATTHEWS R C, BAO Y X. The Texas method of preliminary instream flow determination[J]. Rivers, 1991, 2(4): 295
- [11] OLSEN M, TROLDORF L, HENRIKSEN H J, et al. Evaluation of a typical hydrological model in relation to environmental flows[J]. Journal of Hydrology, 2013, 507: 52
- [12] SMAKHTIN V U, ERIYAGAMA N. Developing a software package for global desktop assessment of environmental flows[J]. Environmental Modelling & Software, 2008, 23(12): 1396
- [13] 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
- [14] 王鸿翔, 张爱民, 郭文献, 等. 基于生态水文法的城市河流生态基流综合评估[J]. 中国农村水利水电, 2017(7): 67
- [15] 黄强, 李群, 张泽中, 等. 计算黄河干流生态环境需水 Tennant法的改进及应用[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2007, 22(6): 774
- [16] 杨裕恒, 曹升乐, 刘阳, 等. 基于改进Tennant法的小清河生态基流计算[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 97
- [17] 赵越, 周光涛. 基于改进年内展布计算法的梧桐河流域河流生态基流研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 167
- [18] 张正义. 西江干流下游感潮河段水流传播规律分析研究[J]. 广东水利水电, 2012(8): 17
- [19] 方神光, 张文明, 周若里, 等. 西江中游洪峰演进特性研究[J]. 人民珠江, 2015, 36(6): 30
- [20] 山红翠, 袁飞, 盛东, 等. 利用PRECIS分析AIB情景下西江流域气候变化特征[J]. 中国农村水利水电, 2016(12): 84
- [21] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007
- [23] KAHYA E, KALAYC S. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2004, 289(1/2/3/4): 128
- [24] BURN D H, HAGELNUR M A. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1/2/3/4): 107
- [25] 李景保, 罗中海, 叶亚亚, 等. 三峡水库运行对长江荆南三口水文和生态的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1285
- [26] DUNBAR M, GUSTARD A, ACREMAN M, et al. Overseas approaches to setting river flow objectives[R]. Bristol, UK: Environment Agency, 1998
- [27] 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
- [28] GLEICK P H. Water in crisis: paths to sustainable water use[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 571
- [29] 舒畅, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1151
- [30] 张志广, 金弈, 李克锋, 等. 基于RVA法的河流生态基流过程研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 155
- [31] 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
- [32] 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(增刊1): 175
- [33] 周华彬, 余春雪, 苏芙蓉. 考虑鱼类产卵场健康的生态需水核算: 以西江东塔产卵场为例[J]. 人民珠江, 2020, 41(5): 61

## Estimation of ecological baseflow with several hydrological methods at the Dahuangjiangkou reach of the Xijiang River

SU Heng XU Zongxue LI Peng YE Chenlei WANG Jingjing

(College of Water Sciences, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Daily streamflow data at Dahuangjiangkou Station of Xijiang River 1960-2017 were used to divide the streamflow sequence into two series with three mutation point test methods: Mann-Kendall test for series 1 before the interference of human activities (1960-1991) and series 2 after the interference (1992-2017). In series 1, six hydrological methods including Tennant and NGPRP methods were used to estimate monthly ecological base flow.

Compared with simulation of fish spawning habitat in the river, NGPRP method; was more applicable in the study area. Monthly ecological base flow value was estimated by NGPRP method; the guarantee degree of ecological base flow before and after the interference was analyzed and compared. The guarantee degree of ecological base flow was found to decrease from September to November after interference, but to increase in the remaining months. The large numbers of planned water conservancy facilities on the Xijiang River makes ecological environment protection a great challenge. The highly applicable hydrological calculation method used here provides some reference for the calculation of ecological base flow, to analyze assurance degree of ecological base flow before and after interference.

**Keywords** ecological base flow; Xijiang River; hydrological methods; mutation point test

【责任编辑:武 佳】

## 科技论文中暂许使用的非法定计量单位

2018年修订发布的《中华人民共和国计量法》宣布:“国家实行法定计量单位制度。”因此,我国出版的科技书刊涉及计量单位时,都应使用法定计量单位(以下简称法定单位),即应使用国际单位制(SI)单位和我国选定的16个非SI单位。但在实践中,因特殊需要可能会使用非法定单位,所以在《量和单位》系列国家标准的量和单位表的“换算因数和备注”栏中,列出了各个学科领域暂时允许使用的非法定单位,同时给出了其与法定单位的换算因数。这些非法定单位一般不宜在科技论文中使用(年(符号为a)除外),《北京师范大学学报(自然科学版)》也不推荐使用。

为便于科技论文作者查找或进行换算,特将《量和单位》中列出的暂许使用的非法定单位及其与法定单位的换算因数列于表B1。

表 B1 暂许使用的非法定单位及其与法定单位的换算因数

量名称	非法定单位		法定单位		换算因数
	名称	符号	名称	符号	
[平面]角	冈	gon	弧度	rad	1 gon = $(\pi/200)$ rad = 0.015 707 96 rad
	埃	Å			1 Å = $10^{-10}$ m = 0.1 nm
长度	光年	l.y.	米	m	1 l.y. = $9.460\ 730 \times 10^{15}$ m
	秒差距	pc			1 pc = $30.856\ 78 \times 10^{15}$ m
时间	年	a	天	d	1 a = 365 d
自由落体加速度	伽	Gal	米每二次方秒	m/s <sup>2</sup>	1 Gal = 0.01 m/s <sup>2</sup>
压力,压强	巴	bar	帕[斯卡]	Pa	1 bar = $10^5$ Pa, 1 mbar = 1 hPa
无功功率	乏	var	伏[特]安[培]	V · A	1 var = 1 V · A
[放射性]活度	居[里]	Ci	贝克[勒尔]	Bq	1 Ci = $3.7 \times 10^{10}$ Bq
截面	靶[恩]	b	平方米	m <sup>2</sup>	1 b = $10^{-28}$ m <sup>2</sup>
吸收剂量	拉德	rad	戈[瑞]	Gy	1 rad = $10^{-2}$ Gy
剂量当量	雷姆	rem	希[沃特]	Sv	1 rem = $10^{-2}$ Sv
照射量	伦[琴]	R	库[仑]每千克	C/kg	1 R = $2.58 \times 10^{-4}$ C/kg

(卞 吉)