

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2019.0036

葛学金, 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[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 75-80. GE J J, PENG W Q, ZHANG W H, et al. Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 75-80. (in Chinese)

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

葛学金¹, 彭文启¹, 张汶海², 渠晓东¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 适宜生态流量是保障河流生态系统健康的重要变量, 合理评估适宜生态流量具有现实意义。以淮河流域典型河流沙颍河为研究对象, 基于沙颍河周口水文站 44 年天然日流量数据, 运用常用的 5 种水文学方法计算沙颍河的适宜生态流量, 通过比较 5 种水文学方法在计算适宜生态流量方面的优劣发现: 在水量需求方面, Q50_Q90 法水量需求最大, Tennant 法水量需求最小, Q50_Q90 法会加重“三生”用水矛盾; 在水文节律模拟方面, Tessman 法、月流量变动法和 Lyon 法较 Q50_Q90 法和 Tennant 法有明显优势; 在月流量满足率方面, Tennant 法和 Lyon 法满足率最高, 其中枯水期 Lyon 法满足率最高。综合考虑水量需求、水文节律和满足率三方面因素, Lyon 法在计算沙颍河这类季节性河流的适宜生态流量结果最为合理。

关键词: 日流量数据; 生态流量; 水文学法; 需水量; 满足率

中图分类号: X143 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparison of several hydrological methods to determine the ecological flow for instream river:

A case study of Zhoukou hydrological station in Shaying River

GE Jinjin¹, PENG Wenqi¹, ZHANG Wenhai², QU Xiaodong¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As the amount of ecological flow is one of the important factors in maintain aquatic ecosystem, the accurate estimation of it has important practical significances. The Shaying River, a typical river in the Huai River basin, was used in this study. In order to explore the advantages and disadvantages of five commonly used hydrological methods, the ecological flow was estimated based on the 44-year natural daily streamflow data at Zhoukou hydrological station. The results showed that the Q50_Q90 method had the largest water demand and the Tennant method had the smallest. Q50_Q90 method would increase water pressure. Meanwhile, the simulation result of natural flow regime with different hydrological methods showed that the Tessman method, the Monthly Flow variation method and the Lyon method all had obvious advantages over the Q50_Q90 method and the Tennant method. It was found that the Tennant method and the Lyon method had the highest satisfaction rates than the other method, and the Lyon method had the highest satisfaction rates in dry hydrological years than other four methods. Therefore, the Lyon method was the most reasonable method to calculate the ecological flow in seasonal river, such as Shaying River.

Key words: daily streamflow; ecological flow; hydrological method; water demand; satisfaction rate

收稿日期: 2018-10-29 修回日期: 2018-12-06 网络出版时间: 2018-12-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181211.2056.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404506); 国家科技重大专项(2017ZX07301003); 国家自然科学基金(51309253)

作者简介: 葛学金(1988—), 女, 安徽合肥人, 在读博士研究生, 主要从事生态流量及水资源研究。E-mail: gejinjin66@163.com

水资源是基础性的自然资源,随着经济社会的高速发展,我国水资源开发利用不断提高,淮河流域甚至达到 53.6%^[1],远远超出了国际水资源开发利用 40% 的警戒线^[2]。直接导致部分河流枯水期干涸断流、湿地萎缩和本地水生物种消失等一系列生态环境问题,严重制约了经济社会的可持续发展^[3]。合理确定生态流量是解决这一问题的关键^[4-5]。自 20 世纪 70 年代,我国开始研究生态流量以来,生态流量研究已经取得了长足的发展^[6]。洪水脉冲、河流连续体等理论的提出,河湖健康指标体系的发展,促进了我国生态流量研究由维持水量到保障过程的转变^[7],为维护我国的河湖生态系统健康发挥了重要作用。但是,纵观我国的生态流量研究,研究方法机理不清,方法滥用的情况仍然存在,而江河湖泊确定的生态流量又多为最小生态流量,无法满足水生态系统健康发展的内在需求。对适宜生态流量研究的忽视,严重阻碍了水生态系统修复的进程^[8]。

在研究水生态系统修复过程中,河流生态学家发现,河流生态系统对水文节律的变化具有明显的响应关系,独特的水文节律特征形成了独特的水生物种群分布^[9],它被称为塑造河流栖息地分布和特征的“主变量”^[10]。因此,水文节律一直是研究人员合理确定生态流量的重要参考^[11]。为确定生态流量,国内外学者提出了近百种计算方法,大体可以分为水文学法、水力学法、栖息地法和整体法四类^[12-13],这四类方法各有优缺点。其中,水文学法是最早研究生态流量的方法,具有操作简便,数据需求量少和成本较低等优点^[14-15]。在大尺度确定生态流量方面,尤其基于全球尺度分析生态流量保障问题中,水文学法更是首选方法。同时,水文学法也是四类方法中唯

一基于天然水文节律确定生态流量的方法,在水文节律模拟方面较其他三类方法有明显优势。

水文学方法是基于天然流量数据计算,默认生物已经适应天然流量节律,即参照天然流量状况界定生物最适宜的流量^[16]。水文学法是目前生态流量计算开发最多的一类方法,也是我国研究人员应用最多的方法,其中 Tennant 法、Q90_Q50 法、Lyon 法、Tessman 法和月流量变动法这 5 种水文学方法应用最多。但是这些方法都引自外文文献,在引用过程中由于机理识别不清、方法适用条件不明等问题,导致由此计算得出的生态流量无法满足水生生物健康发展的内在需求。因此,有必要对目前常用的确定生态流量的水文学方法进行深入研究,明确常用水文学方法的适用性^[17]。

本文以淮河流域沙颍河为研究对象,选取国内外常用的 5 种计算生态流量的水文学方法,评估沙颍河周口段的适宜生态流量。综合考虑三方面因素:年需水量大小;对天然水文节律的模拟效果;适宜生态流量方案的满足率。分析 5 种方法在沙颍河的适应性,最终确定沙颍河的适宜生态流量。

1 研究区域

沙颍河是淮河的最大支流,发源于河南省伏牛山区。流域地跨河南省郑州市、许昌市、平顶山市、南阳市、周口市与安徽省阜阳市等共 32 个县(市)。流域源头在嵩山东麓和伏牛山北麓,全长 561 km,流域面积为 36 651 km² (不含黑茨河)^[18]。沙颍河是淮河流域典型的闸坝河流,生态流量保障问题严峻,周口水文站位于沙河和颍河交汇处(图 1),是沙颍河干流的起始断面,保护周口段的生态流量对维

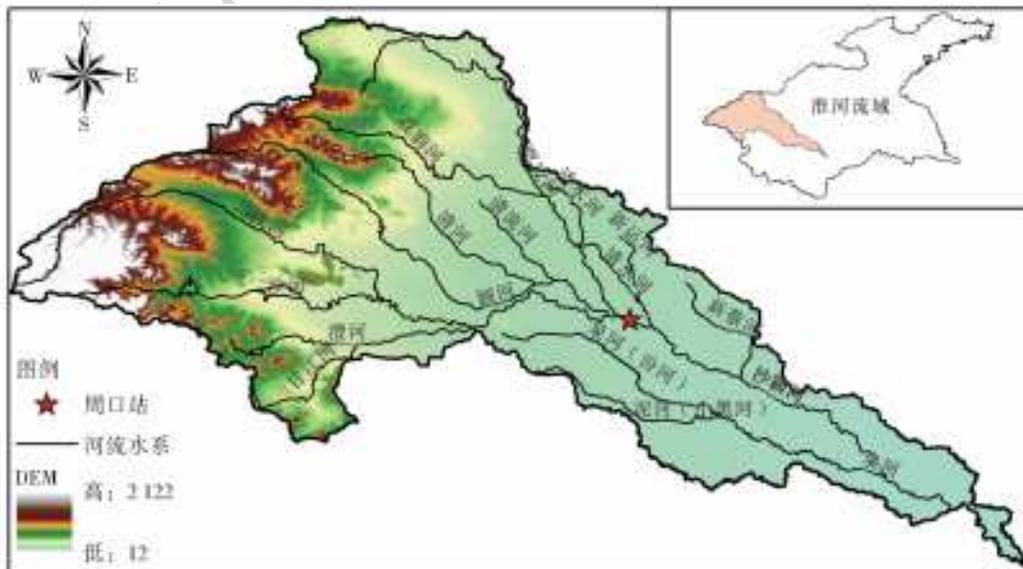


图 1 研究区域概况

Fig. 1 The location of study area

护沙颍河干流的水生态系统尤为重要。因此,选取周口站 1956—2000 年的逐日还原流量作为 5 种水文学方法的计算依据,选取 1956—2015 年的实测日流量作为满足率的评估依据。

2 水文学适宜流量计算方法

由于我国河系众多,水资源禀赋具有空间异质性,运用不同水文学方法计算出来的生态流量结果差异很大。因此,明确水文学方法的适用条件,对我国水生态系统修复至关重要。常用的水文学方法主要有 5 种:Tennant 法^[19]、Q90_Q50 法^[20-21]、Lyon 法^[22]、Tessman 法^[23]和月流量变动法^[24]。5 种方法的开发背景各有不同,Tennant 方法是基于美国蒙大拿州冷水性鲑鱼的天然流量需求提出的方法,是目前我国应用最多的水文学方法,Q90_Q50 是基

于水文自然频率确定的方法,Lyon 法是美国德克萨斯州基于水文频率变动和生态需求开发的方法,Tessman 法、月流量变动法则多用于全球尺度生态流量核定。在数据需求和年内水期变动划分方面,五种方法也各有侧重。在数据需求方面,Tennant 法需要基于多年年均自然流量计算,Q90_Q50 法需要基于多年日均流量,Lyon 法、Tessman 法和月流量变动法的计算尺度则为月尺度。在年内水期考量方面,Tennant 法、Q90_Q50 法和 Lyon 法将年内流量划分成丰水和枯水两个水期,Tessman 法和月流量变动法则将年内水期划分成丰水、平水和枯水 3 个水期。在数据长度需求方面,5 种常用的水文学方法都要求计算基准为 20 年以上,数据类型为天然流量数据。5 种常用水文学方法的适宜生态流量计算原则见表 1。

表 1 常用水文学方法的计算法则

Tab. 1 Five common hydrological methods used in this study

项目	计算方法				
	Tennant 法	Q90_Q50 法	Lyon 法	Tessman 法	月流量变动法
枯水月份	月均流量 \leq 年均流量	月均流量 \leq 年均流量	月均流量 \leq 年均流量	月均流量 $\leq 0.4 \times$ 年均流量	月均流量 $\leq 0.4 \times$ 年均流量
计算法则	$0.2 \times$ 年均流量	Q90	$0.4 \times$ 月中值流量	月均流量	$0.5 \times$ 月均流量
丰水月份	月均流量 $>$ 年均流量	月均流量 $>$ 年均流量	月均流量 $> 0.8 \times$ 年均流量	月均流量 $>$ 年均流量	月均流量 $> 0.8 \times$ 年均流量
计算法则	$0.4 \times$ 年均流量	Q50	$0.5 \times$ 月中值流量	$0.4 \times$ 月均流量	$0.3 \times$ 月均流量
平水月份	—	—	—	$0.4 \times$ 年均流量 $<$ 月均流量 \leq 年均流量	$0.4 \times$ 年均流量 $<$ 月均流量 $\leq 0.8 \times$ 年均流量
计算法则	—	—	—	$0.4 \times$ 年均流量	$0.45 \times$ 月均流量

3 结果分析

3.1 年月需水量分析

5 种水文学方法计算的适宜生态流量结果见图 2。从月尺度来看,沙颍河周口段的枯水月份和丰水月份月均流量数值相差较大,8 月份的月均流量值甚至达到 2 月份的 10 倍。其中,月均流量相对较低的 12 至次年 3 月中,4 个月的总流量值约占年总流量的 15%,月均流量相对较高 7 至次年 8 月,2 个月的总流量值约占全年总流量值的 40%,多年月均流量呈现明显的季节性变化。对比五种水文学法的月流量值发现:水量相对较少的 12 至次年 3 月,Lyon 法、Tennant 法和月流量变动法计算结果类似,低于 Tessman 法和 Q90_Q50 法,而水量充足的 7、8 月,Tessman 法和 Lyon 法相较于其他方法,月流量需求较大。在流量的年内季节变化模拟方面,五种方法的计算结果均能体现水期差异,能在一定程度上反映流量的季节性变化。5 种方法中,Tennant 法在枯水月份和丰水月份的流量需求变化最小,Lyon

法变化最大。与其他 4 种方法比较,Lyon 法更能反映天然流量的月间流量悬殊,即在反映流量的年内季节性变化特征方面具有更高的敏感度。

基于年尺度对比分析 5 种水文学方法的年需水总量发现:Tennant 法的年生态水量需求最少,Q90_Q50 法的年生态水量需求最大。在来水量相对较少的 12 至次年 3 月,Q90_Q50 法计算的适宜生态流量值出现高于天然月均流量的现象,这势必会增加保障适宜生态流量的压力。保障生态流量的本质是在水资源管理过程中协调“三生”用水矛盾,若制定过高的生态流量值,会加深生产用水、生活用水和生态用水的矛盾^[25],而通过跨流域调水或水库调水缓解“三生”用水压力又会引起水资源管理部门运营成本增加。严重的话,可能还会增加物种入侵的风险^[26]。因此,在沙颍河这类季节性流量差别较大的河流,不建议使用 Q90_Q50 法。

3.2 水文节律变化分析

天然流量和适宜生态流量结果的月尺度变动热点分布见图 3,对比分析可以发现,天然月均流量的

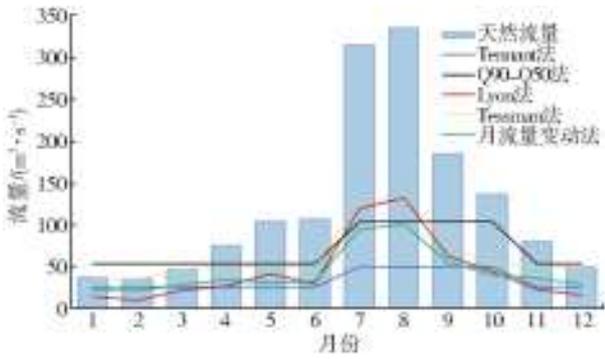


图 2 不同水文学方法计算结果对比

Fig. 2 Comparison of calculation results of different hydrological methods

水文节律变化呈现 3—8 月逐月增加,9—12 月逐月减少的趋势。在模拟天然水文节律变化规律方面, Tennant 法和 Q90_Q50 法的计算结果年内变化不明显,不能反映水文节律的天然变化过程。因此基于这两种方法计算出来的结果,可能会导致一些对水文节律响应依赖度较高的水生生物丰度减少或消

失。Lyon 法、Tessman 法和月流量变动法计算结果仅在个别月份出现与天然水文节律偏差的情况,对天然水文节律的模拟方面效果较好。在 5、6 月与自然流量的水文节律模拟中,3 种方法均有偏差,究其原因,主要是 5、6 月流量相对较高,该时期由于从枯水月份向平水月份的过渡,流量值较为接近。

由于河流的自然流动特征构成了生态系统的完整性,因此,年内适宜生态流量方案应反映水文节律的天然变化。从物种进化的角度分析,河流的水生生物适应了它们在前几代中经历的水文节律^[27]。当水文节律改变,生物生命史过程会遭到破坏,尤其是鱼类这种常年存在于河流中的水生生物,对水文节律变动更加敏感^[28]。因此,人为将月尺度水文节律填平的 Tennant 法,并不适用于沙颍河这类有明显水文节律变化的河段。考虑水文节律因素,建议采用 Tessman 法、月流量变动法和 Lyon 法。

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
天然流量	绿色	蓝色	红色	红色	红色	红色	红色	红色	蓝色	蓝色	蓝色	蓝色
Tennant法	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	蓝色	绿色
Q90_Q50法	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	绿色	红色	绿色	绿色	绿色	蓝色	绿色
Lyon法	绿色	蓝色	红色	红色	红色	蓝色	红色	红色	蓝色	蓝色	蓝色	蓝色
Tessman法	绿色	蓝色	红色	红色	绿色	绿色	红色	红色	蓝色	蓝色	蓝色	蓝色
月流量变动法	绿色	蓝色	红色	红色	蓝色	红色	红色	红色	蓝色	蓝色	蓝色	蓝色

注:绿色表示流量不变,蓝色表示流量下降,红色表示流量增加。

图 3 不同方法的自然水文节律模拟效果对比

Fig. 3 Comparison of simulation results of natural hydrological rhythms with different methods

3.3 满足率分析

将五种水文学方法计算的适宜生态流量结果与人为干扰后的实测流量状况对比,5 种方法的满足率均不能达到 100%。究其原因:一方面,5 种方法的适宜生态流量计算结果为月均值,没有考虑天然流量的实时波动特征;另一方面,由于人类取水,实测流量会出现低于天然流量的状况,而基于天然流量计算的适宜生态流量结果,满足率会降低。5 种水文方法的满足率见表 2,在 5 种方法中, Tennant 法和 Lyon 法的满足率明显高于其他三种方法。在枯水年份,Lyon 法的满足率高于 Tennant 法。虽然枯水年来水量少,但是在枯水年份保障适

宜生态流量却更加重要。因为水生生物在枯水期对流量需求最为敏感,很多水生生物,如藻类、鱼类均在枯水期物种大量减少或死亡。因此有必要适当提高枯水期适宜生态流量的满足率^[29-30]。

表 2 水文学方法满足率评估

Tab. 2 The satisfaction rates of different hydrological methods

方法	枯水年/%	平水年/%	丰水年/%	全年/%
Tennant 法	37.88	75.76	85.00	66.21
Q90_Q50 法	12.88	42.80	62.92	39.53
Tessman 法	17.05	49.24	71.25	45.85
月流量变动法	33.33	68.56	83.33	61.74
Lyon 法	39.39	71.97	83.75	65.04

3.4 水文学方法比选

结合年需水量大小,水文节律模拟效果、满足率高低这三个因素,可以发现 Lyon 法在年需水量、水文节律和满足率方面均有极佳表现。建议在沙颍河段采用 Lyon 法计算适宜生态流量,虽然 Tennant 法的年需水量最小,满足率最高,但是在 5 种方法中 Tennant 法在水文节律模拟方面效果最差。因此不推荐在沙颍河使用 Tennant 法。计算表明,适宜生态流量的满足率易受到水文年的影响,丰水年满足率高,枯水年满足率低。因此,建议水资源管理单位适当放宽适宜生态流量在枯水年的评估要求,建立生态流量的枯水年、平水年和丰水年的分期考评制度。

4 结论

本文基于沙颍河长序列还原流量数据,对比分析了常用的 5 种计算生态流量的水文学方法优劣,得出如下结论。

(1) 5 种方法中, Q_{90} _ Q_{50} 需水量最大,保证率最低,同时 Q_{90} _ Q_{50} 法还会出现生态流量大于个别天然月均流量的状况,加重沙颍河本地“三生”用水矛盾。因此, Q_{90} _ Q_{50} 的计算结果不适用于沙颍河这种季节性河流。

(2) 在水文节律模拟方面, Tessman 法、月流量变动法和 Lyon 法在对天然水文节律效果最好, Tennant 法效果最差,年内季节性变动剧烈的河流不建议使用 Tennant 法。

(3) 综合考虑需水量、水文节律演替、满足率三方面因素,建议在沙颍河这类季节性河流中使用 Lyon 法计算适宜生态流量。

参考文献(References):

- [1] 赵家祥,朱梅,赵博. 淮河中游枯水期水资源利用及缺水态势研究[J]. 治淮, 2016(3): 8-10. (ZHAO J X, ZHU M, ZHAO B. Study on water resources utilization and water shortage situation in the middle of the Huai River in dry season[J]. Control Huai River, 2016(3): 8-10. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9243. 2016. 03. 004.
- [2] World Bank Group. World development indicators 2014 [M]. World Bank Publications, 2014. DOI: 10. 1596/978-1-4648-0163-1.
- [3] 陈毅,郭纯青. 北部湾经济区河流环境流量计算[J]. 中国农村水利水电, 2012(1): 8-12. (CHEN Y, GUO C Q. The calculation of environment flow of the economic region in beibu gulf[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(1): 8-12. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/dy2095590.
- [4] SHENTON W, BOND N R, JIAN D L Y, et al. Putting the “Ecology” into environmental flows: ecological dynamics and demographic modelling[J]. Environmental Management, 2012, 50(1): 1-10. DOI: 10. 1007/s00267-012-9864-z.
- [5] PAHL-WOSTL C, ARTHINTON A, BOGARDI J, et al. Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(3-4): 341-351. DOI: 10. 1016/j. cosust. 2013. 06. 009.
- [6] 董哲仁,张晶,赵进勇. 环境流理论进展述评[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 670-677. (DONG Z R, ZHANG J, ZHAO J Y. Comments upon progress of environmental flows assessments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 670-677. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20161056.
- [7] 陈昂,王鹏远,吴森,等. 国外生态流量政策法规及启示[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 49-53. (CHEN A, WANG P Y, WU M, et al. Ecological flow policies and regulation review and enlightenment [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2017, 38(5): 49-53. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2017. 05. 006.
- [8] 陈昂,隋欣,廖文根,等. 我国河流生态基流理论回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(6): 401-411. (CHEN A, SUI X, LIAO W G, et al. Review study on instream ecological base flow in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(6): 401-411. (in Chinese)) DOI: 10. 13244/j. cnki. jiwahr. 2016. 06. 001.
- [9] SUEN J P. Potential impacts to freshwater ecosystems caused by flow regime alteration under changing climate conditions in Taiwan[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2008, 5(6): 115-128. DOI: 10. 5194/hessd-5-3005-2008.
- [10] POFF L R, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The Natural Flow Regime[J]. Bioscience, 1997, 47(11): 769-784. DOI: 10. 2307/1313099.
- [11] YANG H C, SUEN J P, CHOU S K. Estimating the ungauged natural flow regimes for environmental flow management[J]. Water Resources Management, 2016, 30(13): 1-14. DOI: 10. 1007/s11269-016-1437-0.
- [12] THARME R. E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Applications, 2003, 19(5-6): 397-441. DOI: 10. 1002/rra. 736.
- [13] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等. 基于栖息地指标法的生态流量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1):

- 168-175. (HONG S Y, WANG H R, ZHU Z F, et al. Research of ecologic flow based on habitat index method[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2018, 27(1): 168-175. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201801019.
- [14] KARIMI S S, ESLAMIAN S. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2012, 9(3): 549-558. DOI: 0. 1007/s 13762-012-0062-6.
- [15] ABDI R, YASI M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods in perennial rivers[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2015, 72(3): 354-63. DOI: 10. 2166/wst. 2015. 200.
- [16] CAISSIE J, CAISSIE D, JABI N. Hydrologically based environmental flow methods applied to rivers in the Maritime Provinces (Canada)[J]. River Research & Applications, 2015, 31(6): 651-662. DOI: 10. 1002/rra. 2772.
- [17] 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(z1): 175-179. (YU S Y, XU Z X, WU W. Ecological baseflow in the Guanzhong reach of the Wei River estimated by using different hydrological methods [J]. Journal of Beijing Normal University, 2013, 49(z1): 175-179. (in Chinese)) DOI: 10. 1002/hyp. 7944.
- [18] 左其亭, 罗增良, 石永强, 等. 沙颍河流域主要参数与自然地理特征[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 66-72. (ZUO Q T, LUO Z L, SHI Y Q, et al. Main parameters and physiographic characteristics of Shayinghe River basin[J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2016, 47(12): 66-72. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2016. 12. 015.
- [19] TENNANT D. L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10. DOI: 10. 1577/1548-8446(1976)001<0006:ifrfww>2. 0. co; 2.
- [20] SMAKHTIN V, REVENGA C, DOLL P. A. Pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity[J]. Water International, 2004, 29(3): 307-317. DOI: 10. 1080/02508060408691785.
- [21] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 18, 12(2014-12-11), 2014, 18(12): 14987-15032. DOI: 10. 5194/hess-18-5041-2014.
- [22] OPDYKE D R, OBORNY E L, VAUGH S K, et al. Texas environmental flow standards and the hydrology-based environmental flow regime methodology[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(3-4): 820-830. DOI: 10. 1080/02626667. 2014. 892600.
- [23] GAUPP F, HALL J, DADON S. The role of storage capacity in coping with intra- and inter-annual water variability in large river basins[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(12): 125001-125012. DOI: 10. 1088/1748-9326/10/12/125001.
- [24] SHADKAM S, LUDWIG F, VLIET M T H, et al. Preserving the world second largest hypersaline lake under future irrigation and climate change[J]. Science of the Total Environment, 2016(559): 317-325. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2016. 03. 190.
- [25] 张锦, 徐琳瑜. 基于河道径流可变区间的河流水资源可开发利用率分析[J]. 水资源保护, 2015(4): 37-41. (ZHANG J, XU L Y. Analysis of exploitable rate of river water resource based on variable interval of river runoff[J]. Water Resources Protection, 2015(4): 37-41. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/ j. issn. 1004 6933. 2015. 04. 007.
- [26] GE J, PENG W, HUANG W, et al. Quantitative assessment of flow regime alteration using a revised range of variability methods[J]. Water, 2018, 10(5): 597-608. DOI: 10. 3390/w10050597.
- [27] SNELDER T H, J. BOOKER D. Nature flow regime classification are sensitive to definition procedures [J]. River Research & Applications, 2014, 29(7): 822-838. DOI: 10. 1002/rra. 2581.
- [28] WHEELER K, WENGER S J, FREEMAN M C. States and rates: Complementary approaches to developing flow-ecology relationships[J]. Freshwater Biology, 2017, 8(14): 1-11. DOI: 10. 1111/fwb. 13001.
- [29] JOWETT I G, RICHARDSON J, BONNETT M L. Relationship between flow regime and fish abundances in a Gravel-bed river, New Zealand[J]. Journal of Fish Biology, 2010, 66(5): 1419-1436. DOI: 10. 1111/j. 0022-1112. 2005. 00693. x.
- [30] KLAAR M J, DUNBAR M J, WARREN M, et al. Developing hydroecological models to inform environmental flow standards: A case study from England [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Water, 2014, 1(2): 207-217. DOI: 10. 1002/wat2. 1012.