

谢培,方源,张雷,等.基于SWAT模型的灤渡河生态流量计算方法[J].环境工程技术学报,2022,12(2):443-448.

XIE P,FANG Y,ZHANG L,et al.Research on calculation method of ecological flow of Rangdu River based on SWAT model[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 443-448.

基于SWAT模型的灤渡河生态流量计算方法

谢培¹,方源^{1,2},张雷¹,孙宁¹,黄法铭¹,乔飞^{1*}

1.中国环境科学研究院

2.湖北大学资源环境学院

摘要 保障和管理河湖生态流量是加强水资源开发利用管控的基本要求,是实施长江大保护和高质量发展的重要内容。以灤渡河为例,提出了针对无实测流量的河流推算生态流量的方法。首先,利用SWAT水文模型模拟得到1990—2019年30年逐月流量过程,表明该河流流量由上游至下游逐渐增大,且具有明显的汛期和非汛期特征;其次,采用蒙大拿法、最小月平均流量法、近10年最枯月平均流量法和流量历时曲线法4种水文学计算方法,选取灤渡河干流重点控制断面进行生态流量计算,结果表明生态流量计算值介于10%~33%,呈现出流量历时曲线法>近10年最枯月平均流量法>最小月平均流量法>蒙大拿法的趋势;最后,经水质达标校核,分析得出灤渡河生态流量计算推荐方法为流量历时曲线法,年补水径流量约占年均径流量的30%。

关键词 生态流量;SWAT水文模型;水质达标校核;灤渡河

中图分类号:X171.1 文章编号:1674-991X(2022)02-0443-06 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210693

Research on calculation method of ecological flow of Rangdu River based on SWAT model

XIE Pei¹, FANG Yuan^{1,2}, ZHANG Lei¹, SUN Ning¹, HUANG Faming¹, QIAO Fei^{1*}

1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Resources and Environmental, Hubei University

Abstract Ensuring and managing the ecological flow of rivers and lakes is an essential requirement for strengthening the management and control of the development and utilization of water resources, and is an important part of the implementation of "Great Protection of the Yangtze River" and "high-quality development". A method for calculating ecological flow of rivers without measured runoff was proposed, with the Rangdu River taken as an example. Firstly, the monthly runoff process from 1990 to 2019 was simulated by SWAT hydrological model. The results showed that the runoff gradually increased from upstream to downstream, and presented obvious characteristics of flood season and non-flood season. Secondly, the ecological flow of the key control sections in the mainstream was calculated by four hydrological methods, e.g. Tennant method, minimum monthly average flow method, driest monthly average flow method in recent 10 years, and flow-duration curve method. The calculated ecological flow ranged from 10% to 33%, with the calculated flow trend in the order of flow-duration curve method > driest monthly average flow method in recent 10 years > minimum monthly average flow method > Tennant method. Finally, through water quality compliance accounting, it was concluded that the recommended method for calculating the ecological flow in the river was the flow-duration curve method, accounting for about 30% of the average annual flow.

Key words ecological flow; SWAT hydrological model; water quality compliance accounting; Rangdu River Basin

近年来,随着人口的急剧增长和经济的高速发展,水资源主要用于工农业生产及生活用水,生活、

生产用水与生态环境用水之间的矛盾日渐突出,致使水资源开发利用过度,甚至出现河道断流现象^[1-2],

收稿日期:2021-11-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404702);生态环境部部门预算项目(2021-ZX-XMLXHTSQ-0033)

作者简介:谢培(1992—),女,助理研究员,硕士,主要从事流域水环境模拟研究,xiepei198@163.com

* 责任作者:乔飞(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事环境规划与管理,qiaofei@craes.org.cn

既影响了生态环境的可持续发展,又在一定程度破坏了水生态环境^[3]。为调节水资源短缺与用水需求增加的矛盾,提出了生态流量的概念^[4]。生态流量指维持河流生态系统最低生存和运转功能的基础流量,即为河道内的最小生态流量^[5-6],对于保持河流生态系统健康极其重要。若低于该值,河道无法保障水文联通,水生生态系统将遭受破坏甚至短期内不能恢复^[7]。因此,研究生态流量能够科学调控和保障水资源。

我国现有水文监测站网建设还不完善,目前只在一些较大的河流上设有水文监测站。灈渡河是长江上游的一条小支流,无实测长时间序列径流量资料,笔者实地调研不同水期河流流量现状,发现该河流枯水期下游河段流量较小,局部无流量,甚至存在河道干涸现象,引发一系列水生态水环境问题。此外,该河流存在水利工程的开发建设及降水分布不均等情况,急需对其生态流量进行保障。

笔者针对无实测流量数据的灈渡河流域提出利用 SWAT 水文模型还原流量过程的方法,对比分析河流生态流量常用的计算方法并综合确定研究河段的生态流量,再基于水质达标校核得到生态补水的优化配置措施,以期为灈渡河流域水资源综合利用和水生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

灈渡河流域(108°06'E~108°18'E, 30°35'N~30°46'N)发源于铁峰山南麓的大沟垭口,经万州区分水镇、甘宁镇,于灈渡镇附近汇入长江(图 1)。灈渡河流域面积为 273 km²,河流全长 44 km,多年平均流量 4.36 m³/s,河道平均比降 11.5‰。灈渡河流域共涉及李河镇、分水镇、柱山乡、响水镇、甘宁镇和灈渡镇 6 个乡镇,甘宁水库位于灈渡河中上游,坝址控制集水面积为 149.5 km²。



图 1 灈渡河流域

Fig.1 Map of Rangdu River basin

2 研究方法

2.1 基于 SWAT 模型的水文过程模拟

SWAT 模型由美国农业部(USDA)农业研究中心于 1994 年开发^[8],是一种基于 GIS 的分布式流域水文模型^[9]。其适用于流域尺度,可以进行连续时间序列模拟,具有很强物理机制的分布式水文模型^[10-12],并广泛应用于水环境管理工作^[13-15]。模型主要模拟的水文过程分为陆面及水面 2 个过程:陆面主要包括产流和坡面汇流 2 个部分,需要输入水、沙、营养盐等物质的量;水面为河道汇流部分,主要为各物质

向出口的输送过程^[16-17]。在操作过程中,应首先根据数字高程模型(DEM)划定一定数量和面积的子流域分区,进而划分水文响应单元,即同一个子流域内有着相同土地利用类型和土壤类型的区域^[18]。每个水文响应单元内的水平衡是基于降水、地表径流、蒸发、壤中流、渗透、地下水回流和河道运移损失来计算的。水量平衡方程如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中:SW_t 为最终土壤含水量,mm;SW₀ 为初始土壤

含水量, mm; t 为模拟时间, d; R_{day} 为日降水量, mm; Q_{surf} 为日地表径流量, mm; E 为日蒸散发量, mm; W_{seep} 为土壤剖面地层的渗透量, mm; Q_{gw} 为地下水的回流量, mm。

2.2 生态流量计算方法

生态流量的计算方法主要包括水文学法、水力学法、生境模拟法和整体法 4 类^[19], 考虑到我国缺乏生态资料, 生境模拟法和整体法难于应用, 水力学法需要现场数据, 耗费较长时间和较大的人力物力, 应用较为困难。因此, 研究借鉴水文学法, 该方法基于天然流量, 通过确定比率来计算生态流量, 在流量较大且水文资料时间较长的河流使用率较高^[20]。水文学法主要包括蒙大拿法、最小月平均流量法、近 10 年最枯月平均流量法和流量历时曲线法等^[21]。

2.2.1 蒙大拿法

蒙大拿法于 1976 年由田纳特提出, 其根据历史流量资料确定不同时段的需水量, 取河道年均流量的百分比作为河流生态需水量的推荐值, 是当下应用较为广泛的一种生态流量计算方法^[17]。研究显示, 保持河流生态系统健康的最小流量为多年平均流量的 10%^[22]。国外确定非汛期为 10 月—次年 3 月、汛期为 4—9 月, 而我国因汛期、非汛期与国外确定方式不同, 因此, 在我国应用蒙大拿法时需将时间改为非汛期 10 月—次年 5 月、汛期 6—9 月。

2.2.2 最小月平均流量法

最小月平均流量法根据河流最小月多年平均流量作为生态流量, 计算公式如下:

$$W = \frac{T}{n} \sum_{i=1}^n \min(Q_{ij}) \times 10^{-8} \quad (2)$$

式中: W 为河流基本生态需水量, 10^8 m^3 ; Q_{ij} 为第 i 年第 j 月的平均流量, m^3/s ; T 为换算系数, 取 $31.536 \times 10^6 \text{ s}$; n 为统计年数, a^[23]。

2.2.3 近 10 年最枯月平均流量法

近 10 年最枯月平均流量法是基于水文学参数, 考虑水质影响的生态需水量的计算方法。国外一般使用 90% 保证率下最枯连续 7 d 的平均流量作为河流最小生态流量。而我国则根据最近 10 年的最枯月平均流量作为最小生态流量, 计算公式与最小月平均流量法相同, 其中 $n=10$, 主要侧重于河道需水量的计算。

2.2.4 流量历时曲线法

流量历时曲线法是利用历史流量资料形成各月流量历时曲线, 然后根据某个频率确定对应的生态

流量^[24]。汛期与非汛期所采用的生态流量对应的频率不同, 非汛期采用的频率为 90%, 汛期采用的频率为 50%^[25], 该方法不仅保留了采用流量资料计算生态流量的简单性, 同时也考虑了各月份流量的差异。

3 基于 SWAT 模型的生态流量水文过程模拟

3.1 模型数据库的建立

利用 SWAT 模型模拟月径流过程的主要输入参数, 包括地形特征、土地利用/覆被、土壤类型、气象以及其他参数。数字高程、土地利用和土壤类型均采用 2010 年的数据, 其中, 数字高程为 80 m 的 SRTM 数据, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>); 土地利用数据采用 landsat 系列影像, 来源于清华大学地球系统科学系构建的 FROM-GLC 系统; 土壤类型数据为 2010 年中国土壤特征数据集 1:100 万数据, 来源于国家青藏高原数据中心 (<http://data.tpcd.ac.cn/zh-hans/>); 气象数据采用 1990—2019 年的 CMADS 数据, 包括气温、降水、湿度、日照等基本气象要素逐小时数据。

3.1.1 子流域划分

河网提取及子流域的划分借助 SWAT 模型中的流域划分模块 (watershed delineation) 完成。考虑河流自然节点、水文站位置、水库位置等因素将灋渡河流域划分为 38 个子流域 (图 2)。



图 2 灋渡河子流域分布

Fig.2 Distribution map of Rangdu River sub basin

3.1.2 土地利用、土壤的加载和水文响应单元的设置

水文响应单元是 SWAT 模型的最小计算单元, 具有统一的土壤、土地利用属性和坡度等级。将土地利用数据与 SWAT 模型数据进行匹配, 考虑土壤数据, 按 $0 \sim 8^\circ$ 、 $8 \sim 15^\circ$ 和 $>15^\circ$ 3 个坡度类型进行水文响应单元定义, 并根据 CMADS 1.0 数据集, 将气温、降水、风速、日照等资料按照要求输入数据库。

3.2 模型的率定与验证

模型模拟得出 1990—2019 年近 30 年的月径流过程, 由于灞渡河流域无水文站用于模型率定和验证过程, 以重庆市生态环境局多年(1980—2015 年)平均径流量统计值为依据。选取灞渡河流域水量平衡进行模型率定, 模拟得到河流年均流量为 4.44 m³/s, 年均径流量为 1.4 亿 m³, 与该流域多年平均径流量(1.55 亿 m³)基本一致, 模拟值略小于多年平均值是由近年来灞渡河流域水资源开发利用强度增大所致。选取灞渡河上游甘宁水库进行模型验证, 模拟得出甘宁水库近 5 年和近 10 年平均流量分别为 2.33 和 2.68 m³/s, 与甘宁水库流域多年平均流量(2.9 m³/s)基本一致, 模拟结果具有合理性。

3.3 流量模拟结果

选取干流重要控制断面统计月流量, 控制断面的选取根据生态环境保护要求和基础资料条件确定。综合考虑了研究区水文、乡镇和入江河口等因素, 流域涉及的 6 个乡镇与控制断面的对应关系如表 1 所示。通过模型模拟灞渡河自然条件下长系列水文过程, 结果表明, 河流年平均流量由上游到下游逐渐增大, 分别为 0.688、2.694、3.160、4.159、4.465 和 4.639 m³/s。其中断面 38 为入江口断面, 汛期月平均流量为 6.921 m³/s, 非汛期月平均流量为 3.654 m³/s。该河流汛期和非汛期特征明显, 汛期各月流量约为月平均流量的 1.5 倍, 最小月流量出现在 2 月, 仅为月平均流量的 1/4。

表 1 乡镇与河网断面对应关系

Table 1 Correspondence of township and river network sections

乡镇名称	对应控制断面
李河镇	5
分水镇	17
柱山乡	18
龙沙镇	32
甘宁镇	36
灞渡镇	38

注: 控制断面编号与子流域编号一致。

4 灞渡河生态流量计算

4.1 基于水文学的生态流量分析

生态流量计算以 SWAT 水文模型模拟的 1990—2019 年的径流系列数据为依据, 表 2~表 5 为 4 种水文学法计算得到的逐月生态流量。依据 SL/Z 72—2014《河湖生态环境需水计算规范》中“对

于大江大河, 河流流量占多年平均流量的 5%~10%, 仍有一定河宽、水深和流速, 可以满足鱼类洄游、生存和旅游、景观的一般要求, 可以作为保持绝大多数水生生物短时间生存所必需的基本生态流量”。因此, 理论上以上 4 种水文学计算方法均可表征灞渡河生态流量, 生态流量计算值表现为流量历时曲线法(33%)>近 10 年最枯月平均流量法(18%)>最小月平均流量法(17%)>蒙大拿法(10%)。

4.2 基于水质达标的生态流量校核

由灞渡河国控和市控断面实测水质数据可知, 2015—2019 年灞渡河水质存在超过 GB 3838—2002《国家地表水环境质量标准》Ⅲ类标准限值的现

表 2 蒙大拿法生态流量计算结果

Table 2 Calculation results of ecological flow by Tennant method

控制断面	多年平均天然流量/(m ³ /s)	生态流量/(m ³ /s)		年均基本生态流量/(m ³ /s)	占多年平均天然流量的比例/%
		10月—次年5月	6—9月		
5	0.69	0.05	0.11	0.07	10.00
17	2.69	0.20	0.42	0.27	10.00
18	3.16	0.23	0.49	0.32	10.00
32	4.16	0.30	0.64	0.42	10.00
36	4.46	0.32	0.69	0.45	10.00
38	4.64	0.34	0.72	0.46	10.00

表 3 最小月平均流量法生态流量计算结果

Table 3 Calculation results of basic ecological flow by the minimum monthly average flow method

控制断面	多年平均天然流量/(m ³ /s)	年均基本生态流量/(m ³ /s)	占多年平均天然流量的比例/%
5	0.69	0.11	15.91
17	2.69	0.43	16.06
18	3.16	0.51	16.01
32	4.16	0.76	18.26
36	4.46	0.80	17.82
38	4.64	0.82	17.62

表 4 近 10 年最枯月平均流量法生态流量计算结果

Table 4 Calculation results of ecological flow based on the driest monthly average flow method in recent 10 years

控制断面	多年平均天然流量/(m ³ /s)	年均基本生态流量/(m ³ /s)	占多年平均天然流量的比例/%
5	0.69	0.12	17.33
17	2.69	0.47	17.28
18	3.16	0.54	17.19
32	4.16	0.79	19.01
36	4.46	0.83	18.67
38	4.64	0.86	18.50

表 5 流量历时曲线法生态流量计算结果

Table 5 Calculation results of ecological flow by flow-duration curve method

控制断面	多年平均天然流量/(m ³ /s)	基本生态流量/(m ³ /s)		年均基本生态流量/(m ³ /s)	占多年平均天然流量的比例/%
		10月—次年5月	6—9月		
5	0.69	0.163	0.339	0.22	32.23
17	2.69	0.647	1.357	0.88	32.78
18	3.16	0.758	1.619	1.05	33.08
32	4.16	1.069	1.965	1.37	32.88
36	4.46	1.137	2.044	1.44	32.23
38	4.64	1.265	2.089	1.54	33.18

象,主要表现为上游总磷浓度超标 0.2 倍,下游水质较好。考虑到水质达标对生态流量的要求,对计算得到的水质达标所需生态补水流量进行校核。

各控制断面年径流量由水文模型模拟的长时间系列水文数据计算得到,总磷浓度最大值取年内实测水质数据最大值(表 6),灞渡河下游满足Ⅲ类水质要求,仅上游(断面 5、17 和 18)存在总磷浓度超标现象,涉及李河镇、分水镇和柱山乡。补水所需径流量计算采用河流稀释混合模型,公式如下:

$$C_0 = (C_{\max} Q_R + C_0 Q_E) / (Q_R + Q_E) \quad (3)$$

式中: C_0 为水质标准浓度, mg/L; C_{\max} 为实测水质浓度最大值, mg/L; Q_R 为河流年径流量, m³; Q_E 为年补水设计径流量, m³。

表 6 1990—2019 年灞渡河流域总磷指标现状及基本生态流量计算结果

Table 6 TP indicator status from 1990 to 2019 and basic ecological flow calculation results

控制断面	年径流量/(10 ⁸ m ³)	总磷浓度最大值/(mg/L)	总磷浓度超标倍数 ¹⁾	Ⅱ类水补水径流量/(10 ⁸ m ³)	占年径流量的比例/%
5	0.217	0.247	0.235	0.102	14
17	0.850	0.260	0.301	0.512	30
18	0.268	0.262	0.312	0.086	12
32	0.085	0.104			
36	1.408	0.114			
38	1.463	0.118			

1) 为 GB 3838—2002《国家地表水环境质量标准》Ⅲ类水质标准超标倍数。

经计算,采用Ⅱ类水补水所需径流量占灞渡河年均径流量的 12%~30%,其中分水镇所需径流量最大,李河镇次之,柱山乡较小。综上,考虑到既符合水文学方法又保证流域水质达标,推荐的生态流量计算方法为流量历时曲线法,补水径流量占该流

域年径流量的 30% 左右。

5 结论

(1) 基于 SWAT 模型模拟灞渡河 1990—2019 年逐月流量过程,年平均流量由上游至入江口逐渐增大,入江口年平均流量为 4.639 m³/s。该河流汛期和非汛期特征明显,汛期各月流量约为月平均流量的 1.5 倍,最小月流量出现在 2 月,仅为月平均流量的 1/4。

(2) 4 种水文学计算方法计算的生态流量表现为:流量历时曲线法最大,为 33%;其次为近 10 年最枯月平均流量法(18%);最小月平均流量法为 17%;蒙大拿法最小,为 10%。

(3) 现状水文水质条件下,灞渡河上游涉及李河镇、分水镇和柱山乡区域水体尚不满足Ⅲ类水质要求,利用河流稀释混合模型,在保证水质达标的情况下校核生态流量得出,灞渡河推荐的生态流量计算方法为流量历时曲线法,补水径流量约占年均径流量的 30%。

参考文献

- [1] 周明华, 胡波. 对水资源过度开发的一些思考[J]. 科技资讯, 2019, 17(26): 56-57.
- [2] 李昌文. 基于改进 Tennant 法和敏感生态需求的河流生态需水关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [3] 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 Z X, WU W, YU S Y. Ecological baseflow: progress and challenge[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(4): 1-11.
- [4] 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): 67-71.
WANG H X, ZHANG A M, GUO W X, et al. A comprehensive assessment based on eco-hydrological method for ecological basic flow of urban rivers[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(7): 67-71.
- [5] 张建永, 王晓红, 杨晴, 等. 全国主要河湖生态需水保障对策研究[J]. 中国水利, 2017(23): 8-11.
ZHANG J Y, WANG X H, YANG Q, et al. Study on safeguard measures of ecological water demand for major rivers and lakes in China[J]. *China Water Resources*, 2017(23): 8-11.
- [6] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[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.
- [7] 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.
WU X J, LI H E, DONG Y, et al. Calculation of ecological basic

- flow of Weihe River based on basic flow ratio method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(10): 154-159.
- [8] 金婧靓, 王飞儿. SWAT模型及其应用与改进的研究进展[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(12): 111-114.
JIN J L, WANG F E. Research progress on SWAT model and its application and improvement[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(12): 111-114.
- [9] 李峰, 胡铁松, 黄华金. SWAT模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(3): 24-28.
- [10] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
WANG Z G, LIU C M, HUANG Y B. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin[J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86.
- [11] YOUNG R A, ONSTAD C A, BOSCH D D, et al. AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. Journal of Soil And Water Conservation, 1989, 44(2): 168-173.
- [12] 郭军庭, 张志强, 王盛萍, 等. 应用SWAT模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1559-1567.
GUO J T, ZHANG Z Q, WANG S P, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [13] 荣易, 秦成新, 孙傅, 等. SWAT模型在我国流域水环境模拟应用中的评估验证过程评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2571-2580.
RONG Y, QIN C X, SUN F, et al. Assessment of evaluation process of SWAT model application in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(11): 2571-2580.
- [14] 翟玥, 尚晓, 沈剑, 等. SWAT模型在洱海流域面源污染评价中的应用[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 666-671.
ZHAI Y, SHANG X, SHEN J, et al. Application of SWAT model in agricultural non-point source pollution investigation in Lake Erhai Watershed[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(6): 666-671.
- [15] 凌冰, 刘晓波, 黄伟, 等. 基于水文模型的缺资料流域缺水特征分析: 以岷江茫溪河流域为例[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(2): 241-248.
LING B, LIU X B, HUANG W, et al. Analysis of water scarcity characteristics in data-deficient watersheds based on hydrological model: taking Minjiang Tributary Mangxi River Basin as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(2): 241-248.
- [16] 苏东彬, 姚琪, 戴枫勇, 等. 基于GIS的SWAT模型原理及其在农业面源污染中的应用[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(10): 712-714.
SU D B, YAO Q, DAI F Y, et al. Study of SWAT model on agricultural non-point source pollution under GIS[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(10): 712-714.
- [17] 王中根, 刘昌明, 左其亭, 等. 基于DEM的分布式水文模型构建方法[J]. 地理科学进展, 2002, 21(5): 430-439.
WANG Z G, LIU C M, ZUO Q T, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J]. Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439.
- [18] NEITSCH S, ARNOLD J, KINIRY J, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [19] 穆文彬, 于福亮, 李传哲, 等. 河流生态基流概念与评价方法的差异性及其影响[J]. 中国农村水利水电, 2015(1): 90-94.
MU W B, YU F L, LI C Z, et al. Differences of river ecological base flow in concept and evaluation method and its influence[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(1): 90-94.
- [20] 朱敏翔, 杨柳, 杨超, 等. Tennant法在河流生态基流计算中的适用性探讨: 以福建省东南沿海地区为例[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 59-64.
ZHU M X, YANG L, YANG C, et al. Applicability of Tennant method in rivers in southeast coastal areas of Fujian Province[J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 59-64.
- [21] 董哲仁, 张晶, 赵进勇. 生态流量的科学内涵[J]. 中国水利, 2020(15): 15-19.
DONG Z R, ZHANG J, ZHAO J Y. Scientific connotation of ecological flow[J]. China Water Resources, 2020(15): 15-19.
- [22] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [23] 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): 175-179.
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 (Natural Science), 2013, 49(Suppl 1): 175-179.
- [24] WANG P F, WANG C, ZHU D Z. Hydraulic resistance of submerged vegetation related to effective height[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(2): 265-273.
- [25] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 664-673. □