

基于水文学法和 SWAT 模型的北川河流域生态需水量分析

王鹏全^{1,2}, 李润杰³

(1. 青海师范大学地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 青海民族大学土木与交通工程学院, 青海 西宁 810007;
3. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:为确定北川河流域生态需水量,采用线性趋势法、Mann-Kendall 检验法、Spearman 检验法分析了北川河流域 1959—2013 年径流变化趋势,并采用 Pettitt 检验、滑动 t 检验、滑动 F 检验和累积距平法综合诊断径流突变点,根据 Tennant 法和改进的年内同频率展布法确定的生态流量过程外包线计算河道内生态需水量,并基于 SWAT 模型计算了河道外生态需水量。结果表明:SWAT 模型在研究区具有适用性,模型性能符合“好”的标准,SWAT 模型模拟的降水量和蒸发量总体呈现增加趋势,产水量呈现减少趋势;北川河流域桥头水文站径流量呈现减少趋势,年平均减少率为 $0.104 \text{ m}^3/\text{s}$,径流突变点为 1990 年;北川河流域河道内生态需水量为 2.95 亿 m^3 ,河道外生态需水量为 9.95 亿~10.85 亿 m^3 ,生态总需水量为 12.90 亿~13.80 亿 m^3 。

关键词:生态需水量;水文学法;径流检测;SWAT 模型;北川河流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)04-0118-10

Ecological water demand analysis based on hydrological methods and SWAT model in the Beichuan River Basin//
WANG Pengquan^{1,2}, LI Runjie³ (1. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;
2. School of Civil and Transportation Engineering, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China; 3. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: To determine the ecological water demand of the Beichuan River Basin, the linear trend method, Mann-Kendall test method, and Spearman test method were employed to analyze the trend of runoff change in the Beichuan River Basin during 1959-2013, and the Pettitt test, sliding t -test, sliding F -test, and cumulative departure method were utilized to comprehensively diagnose the runoff breakpoint. The ecological water demand in the river channel was calculated based on the outer envelope of ecological flow processes obtained with the Tennant method and improved equal frequency dynamic calculation method, and the ecological water demand outside the river channel was calculated with the SWAT model. The results demonstrate that the SWAT model is applicable in the study area, and the model performance meets the criterion of “good”. Precipitation and evapotranspiration simulated with the SWAT model show increasing trends, while water yield shows a decreasing trend. The runoff at Qiaotou Hydrological Station in the Beichuan River Basin decreased at $0.104 \text{ m}^3/\text{s}$ per year during the research period, and the runoff breakpoint occurred in 1990. The ecological water demand of the Beichuan River Basin was 295 million m^3 in the river channel, and ranged from 995 million to 1 085 million m^3 outside the river channel, making the total ecological water demand of 1 290 million to 1 380 million m^3 .

Key words: ecological water demand; hydrological method; runoff detection; SWAT model; Beichuan River Basin

人类社会经济用水需求和对水资源过度开发导致流域生态系统退化,人与自然和谐共生正逐渐成为世界共识^[1]。国际水文十年科学计划第八阶段(IHP-VIII, 2013—2022 年)强调人类对水循环的影响,第九阶段(IHP-IX, 2022—2029 年)则重视在可

持续发展目标下确保水资源用于人类发展和生态系统健康。因此,复苏河湖生态环境、提升流域生态系统质量和稳定性、缓解人类活动和生态退化之间的矛盾是实现绿色、高质量、可持续发展的研究热点。

流域生态需水指在现状和未来特定目标下,将

基金项目:青海省基础研究计划项目(2024-ZJ-773);青海民族大学校级规划项目(23GH14)

作者简介:王鹏全(1989—),男,讲师,博士研究生,主要从事自然地理与生态水文研究。E-mail:wpq1314@126.com

通信作者:李润杰(1965—),男,研究员,主要从事水文水资源与水土保持研究。E-mail:rlj@126.com

生态系统结构、功能和生态过程维持在一定水平所需要的水量^[2]。生态需水量主要包括河道内生态需水和河道外生态需水,在水资源配置中必须重视生态用水量与耗水量调控^[3]。SL/T712—2021《河湖生态环境需水计算规范》系统提出了生态环境需水计算准则,河道内生态需水计算方法比较成熟,包括水文学法、水力学法、栖息地模拟法、整体分析法等,水文学法由于计算简单实用而广泛应用于河道内生态流量的计算^[4]。河道外生态需水量主要是维持河道外植被群落稳定的耗水量^[5],其计算方法有直接计算方法(面积定额法)、间接计算方法(以植被耗水量代替生态需水量)、水文模型法、水量平衡法等。近年来,绿水概念的提出进一步明确了水资源的生态效应^[6],绿水更多指土壤-植物生态系统的用水消耗,关系到流域农业和生态系统需求水量^[7]。SWAT(soil and water assessment tool)模型被广泛应用于流域水资源评估,由模型输出结果可得到产水量、深层含水层补给量、蒸发量、土壤含水量等^[8-9],从而计算河道外生态需水量。

北川河流域是青藏高原东部与黄土高原过渡地带重要的生态屏障区,区域生态环境脆弱,水资源安全保障形势严峻,协调好经济社会用水与生态环境需水之间的矛盾,实现人水和谐的最佳水资源调控和植被管理对实现流域生态保护和高质量发展具有重要的意义。本文通过分析北川河流域径流时间序列变化趋势及突变点,基于天然径流过程,采用Tennant法和改进的年内同频率展布法确定河道内生态需水量,并利用SWAT模型计算河道外生态需水量,以期水资源适应性管理、生态文明建设和区域高质量发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

北川河是湟水河北岸一级支流,发源于大坂山南麓的宝库河,流域面积3 371 km²。北川河流经西宁市大通回族土族自治县和城北区,于朝阳村附近汇入湟水河,河流长度152.4 km,是西宁市北部重要的生态屏障和水源涵养区。北川河上游主要支流有宝库河、黑林河和东峡河,宝库河建有“引大济湟”大型水利枢纽工程——黑泉水库,总库容1.82 亿 m³。流域年平均降水量为400~800 mm,降水量沿北川河河谷向两侧随海拔升高而逐渐增加,流域年均气温-6~6.2℃。流域内总人口约45.3万人,GDP约93.8亿元。北川河桥头水文站位于大通回族土族自治县桥头镇,其控制的流域范围接近于闭合,控制流域面积为2 774 km²,流量观测

时段长,该站天然径流量基本代表了其控制流域的天然水资源量^[10]。图1为研究区概况。

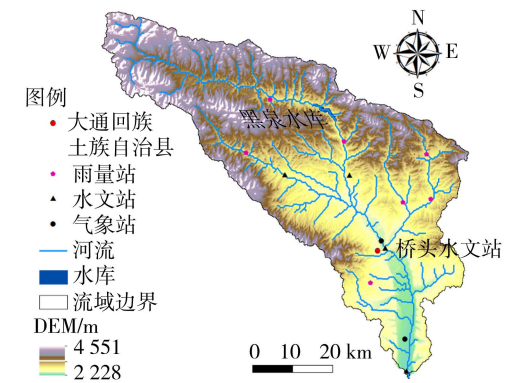


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

高程数据来自NASADEM数字高程产品(<https://earthdata.nasa.gov/esds>),坡度利用DEM数据生成。土地利用/覆被数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>),参考GB/T21010—2017《土地利用现状分类》,本文将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种主要类型。土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),并依据中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csd.cn/>)完善SWAT模型所需土壤数据集。降水、气温、相对湿度、风速、日照时数等气象数据来自国家气象信息中心(<https://data.cma.cn>),水文站实测月尺度径流数据来自青海省水文水资源测报中心。考虑到收集的站点气象数据和实测径流系列时间尺度不统一,为便于SWAT模型率定和验证,研究期确定为1959—2013年。采用ArcGIS10.6软件进行栅格数据的投影变换、裁剪、重分类等处理。SWAT模型栅格数据见图2。

2 研究方法

2.1 趋势分析与突变检验

采用线性趋势法、Spearman检验法^[11]、Mann-Kendall(M-K)检验法^[12-13]分析径流时间序列变化趋势。采用Pettitt检验^[14]、滑动 t 检验^[15]、滑动 F 检验^[16]、累积距平法^[17]4种方法综合诊断径流时间序列突变点。以突变点为界,将径流时间序列划分为基准期和变异期。

2.2 SWAT模型

SWAT模型是基于物理过程的半分布式流域水文模型,采用离散化方案将流域划分为子流域和水文响应单元^[18-19]。该模型将水文过程分为陆地产

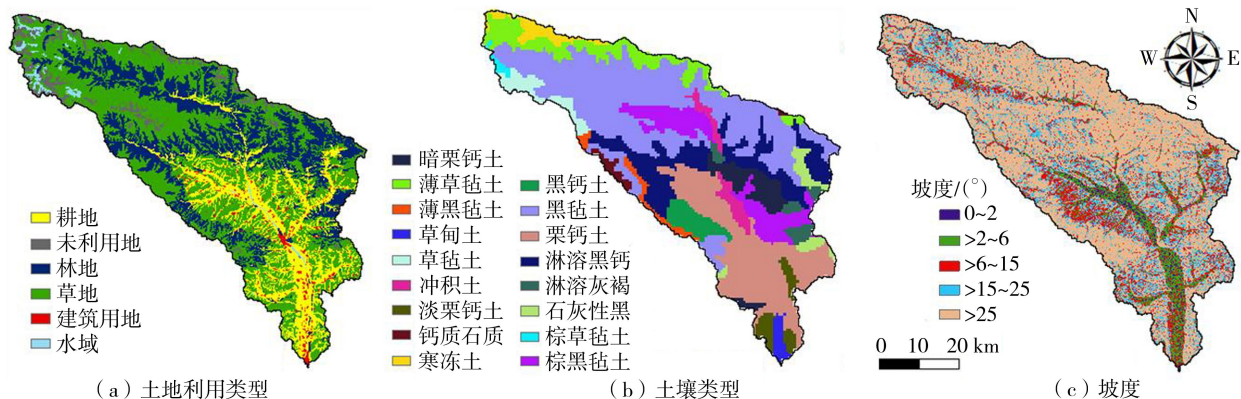


图2 SWAT模型栅格数据

Fig.2 Raster data of SWAT model

流阶段(即产流和坡面汇流部分)和河道汇流阶段,模型嵌套的关键水文过程模块有地表径流模块、蒸散发模块、土壤水分运动模块、地下径流模块和河道汇流模块^[20]。

将北川河流域划分为25个子流域,392个水文响应单元。采用Penman-Monteith方程计算潜在蒸发量,采用径流曲线数(soil conservation service-curve number,SCS-CN)法计算地表径流,采用马斯京根原理计算河道内汇流。利用SWAT-CUP软件内置的SUFI-2不确定性分析算法,选用23个参数对SWAT模型进行率定和验证,设置模型初次运行500次。SUFI-2算法确定的 $|t\text{-stat}|$ (参数系数与其标准误差的比值)越大,参数越敏感; P 值越小,参数越重要。本文将满足 $P<0.1$ 的参数作为关键敏感参数,采用自动率定和手动经验率定结合的方式调参,至纳什效率系数(NSE)不再提高为止^[21]。利用决定系数(R^2)、NSE、百分比偏差(PBIAS)、均方根误差与实测标准差的比值(RSR)4项指标评估SWAT模型模拟效果,评价指标计算和模型性能分级详见文献[22]。

2.3 生态需水量计算

2.3.1 河道内生态需水量

a. 方案1。利用SL/T 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》推荐的Tennant法,基于历史天然流量资料确定年内不同时段生态流量。根据河道内生态环境状况“良好”的准则,本文确定年内枯水期(11月至翌年3月)生态流量在同时段多年平均天然流量中的占比为20%,年内非枯水期(4—10月)生态流量在同时段多年平均天然流量中的占比为40%,设定径流突变点以前的流量过程近似于天然流量,选取基准期逐月多年流量均值作为Tennant法河道内生态需水量计算的基准。河道内生态需水量为

$$W_{ei,i} = 8.64K_eQ_iT_i \quad (1)$$

式中: $W_{ei,i}$ 为第*i*月河道内生态需水量,万 m^3 ; Q_i 为第*i*月多年平均天然流量, m^3/s ; T_i 为第*i*月天数, d ; K_e 为Tennant法生态流量占比,枯水期取20%,非枯水期取40%。

b. 方案2。采用改进的年内同频率展布法计算河道内生态流量动态变化过程,具体计算方法与步骤见文献[23-24]。

考虑到单一方法的局限性,本文采用方案1和方案2计算的年内生态流量外包线作为河道内生态需水过程。

2.3.2 河道外生态需水

植被在生态系统中起着主导作用,利用植被蒸散理论间接计算植被系统生态需水的方法比较成熟且精度良好^[25]。将植被系统分为天然植被和人工植被,天然植被主要指林地和草地,人工植被主要指农作物。为减少不确定性,采用两种方案计算河道外生态需水量。

a. 方案1。考虑到实际蒸发量受气候环境、植物生态特性与生长状况的综合影响,基于SWAT模型和ArcGIS软件计算各类植被的潜在蒸发量,并利用植被需水系数 K_e 修正,得到该植被类型的生态需水量。植被的综合需水系数确定是关键,根据常博^[26]在祁连山地区生态用水研究成果,林地综合需水系数为0.67,草地综合需水系数为0.35。本文参考联合国粮食及农业组织(FAO)推荐值,结合北川河流域主要种植作物类型(粮食作物、油料和蔬菜),选取农作物综合需水系数为0.75。河道外生态需水量为

$$W_{eo,1} = 0.1 \sum_{i=1}^m A_{pi} ET_{pi} K_{ci} \quad (2)$$

式中: $W_{eo,1}$ 为方案1计算的河道外生态需水量,万 m^3 ; ET_{pi} 为第*i*类植被分布区域的平均潜在蒸发

量,mm; K_{ci} 为第*i*类植被的综合需水系数; A_{pi} 为第*i*类植被的面积,km²; *m* 为植被类型数量。

b. 方案 2。以植物生长期耗水量代替生态需水量,该方法基于陆地植被生态系统的水量平衡关系,以生长期植被系统的蒸发量作为生态需水量,通过 SWAT 模型可以得到生态需水的时空分布,比较适合中小闭合流域生态需水计算。本文认为植被耗水量接近于实际蒸发量,北川河流域植被系统生长季一般为 5—10 月。具体计算过程为:利用 ArcGIS 软件对子流域按照林地、草地和耕地(以实际种植比例 79% 折算)面积进行分区统计,得到子流域植被覆盖面积;以各子流域植被覆盖面积与对应子流域多年平均实际蒸发量的乘积作为河道外生态需水量:

$$W_{eo,2} = 0.1 \sum_{i=1}^n A_{wi} ET_{wi} \tag{3}$$

式中: $W_{eo,2}$ 为方案 2 计算的河道外生态需水量,万 m³; ET_{wi} 为生长季第*i*个子流域的实际蒸发量,mm; A_{wi} 为第*i*个子流域面积,km²; *n* 为子流域数量。

3 结果与分析

3.1 径流变化趋势与突变点

图 3 为线性趋势法分析得到的北川河桥头水文站径流变化趋势,径流时间序列斜率为-0.104,表明 1959—2013 年径流呈减少趋势 ($P < 0.05$); Spearman 检验 ($P < 0.01$) 和 M-K 检验 ($P < 0.05$) 结果表明径流减少趋势显著。

径流突变点检验结果见图 4。滑动 *t* 检验(子

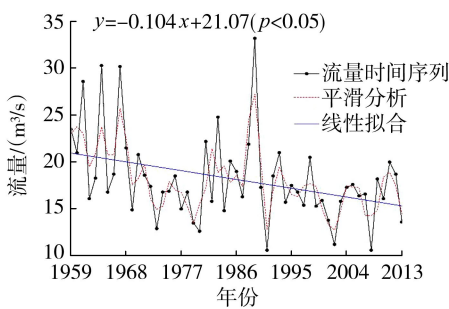


图 3 北川河桥头水文站径流变化趋势
Fig. 3 Runoff trend at Qiaotou Hydrological Station on the Beichuan River

序列长度为 5 a)、滑动 *F* 检验、Pettitt 检验、累积距平法得到径流时间序列可能突变点分别为 1998 年、1993 年、1998 年和 1990 年,不同径流突变检测方法得到的突变点存在差异,但都集中在 1990—1998 年。本文旨在研究生态需水量,且 SWAT 模型更适用于平稳径流时间序列,故采用累积距平法检测结果,将北川河桥头水文站径流突变点确定为 1990 年,将研究时段划分为基准期(1959—1990 年)和变异期(1991—2013 年)。

3.2 SWAT 模型率定和验证

依据基准期桥头水文站实测径流量对模型校准,设定 SWAT 模型预热期(1959—1960 年)、率定期(1961—1980 年)、验证期(1981—1990 年)。从 23 个参数中筛选出 6 个比较敏感的参数,采用 SUFI-2 算法通过调整参数得到其率定值(表 1)。率定期和验证期模拟流量与实测流量过程见图 5。率定期 *R*²、NSE、RSR 和 PBIAS 分别为 0.81、0.76、0.49、11.60%;验证期对应值分别为 0.89、0.84、

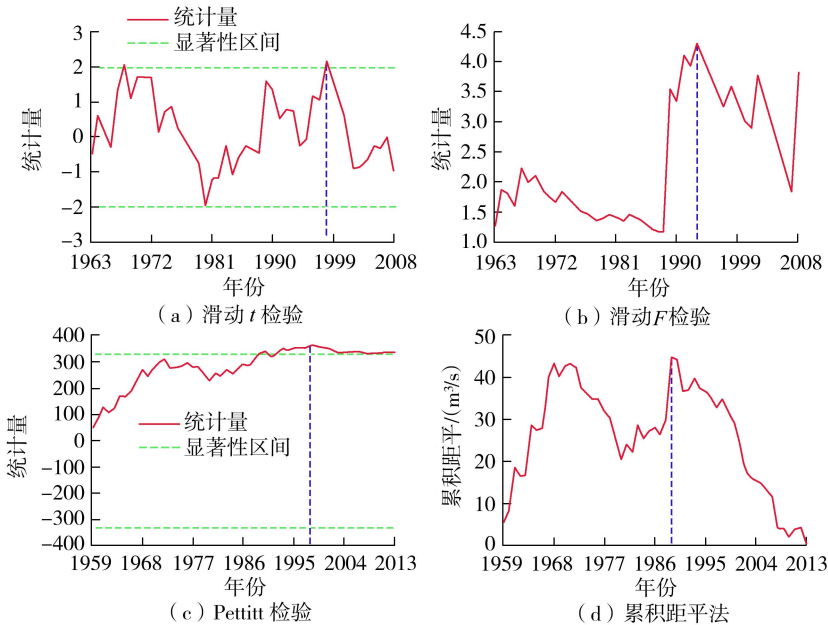


图 4 径流突变点检验结果
Fig. 4 Results of runoff breakpoint detection

表 1 关键敏感性参数及其率定值

Table 1 Key sensitive parameters and their fitted values

敏感性排序	参数标识符	参数名称	SWAT-CUP 参数率定初始范围	率定值	t-stat	P
1	R_CN2. mgt	SCS 径流曲线数	-0.5 ~ 0.5	-0.255	6.12	<0.01
2	V_RCHRG_DP. gw	深层蓄水渗透系数	0 ~ 1	0.095	3.46	<0.01
3	R_SOL_BD(). sol	土壤湿容重	-0.5 ~ 0.5	0.345	2.66	<0.01
4	R_SOL_AWC(). sol	土壤有效含水量	-0.5 ~ 0.5	-0.105	2.59	<0.01
5	V_ALPHA_BNK. rte	河岸基流 α 因子	0 ~ 1	0.615	2.54	0.011
6	V_ALPHA_BF. rte	基流 α 系数	0 ~ 1	0.775	1.84	0.066

注:参数标识符中 R 表示以率定值调整初始参数,计算公式为 $f' = f(1+r)$,其中 f' 、 f 分别为调整后的参数值和初始参数值, r 为率定值;V 表示以率定值替换初始值。

0.40、12.0%,根据文献[22]评价指标及评价等级,模型性能达到了“好”的标准。1961—1990 年模拟流量均值为 $17.0\text{ m}^3/\text{s}$,实测流量均值为 $19.3\text{ m}^3/\text{s}$,相对误差为 11.9%。因此,所建 SWAT 模型总体效果良好,可用于北川河流域径流模拟。

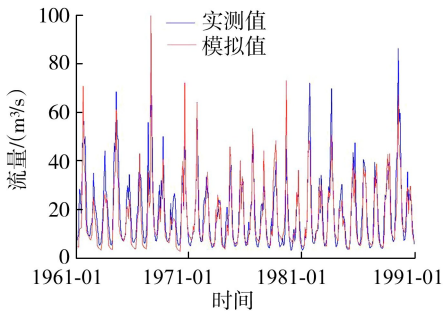


图 5 率定期和验证期模拟与实测流量过程

Fig.5 Simulated and observed flow processes in calibration and validation periods

3.3 水文过程模拟

将 SWAT-CUP 率定后的参数带回 SWAT 模型工程文件,模拟 1961—2013 年水循环过程。北川河流域降水量、产水量、实际蒸发量和潜在蒸发量在子流域的空间分布见图 6,时间变化见图 7。利用子流域进行面积加权可得,1961—2013 年北川河流域多年平均降水量、融雪量、实际蒸发量、产水量、潜在蒸发量分别为 561.58、25.13、400.40、166.46、691.61 mm。降水量和蒸发量总体上呈逐年增加趋势,产水量呈减少趋势。蒸发量增加与北川河流域实施大规模退耕还林还草有关,植被覆盖度不断提高导致生态耗水量增加,从而引起流域径流量衰减^[27]。

3.4 生态需水量分析

3.4.1 河道内生态需水量

将基准期径流时间序列作为天然平稳流量过

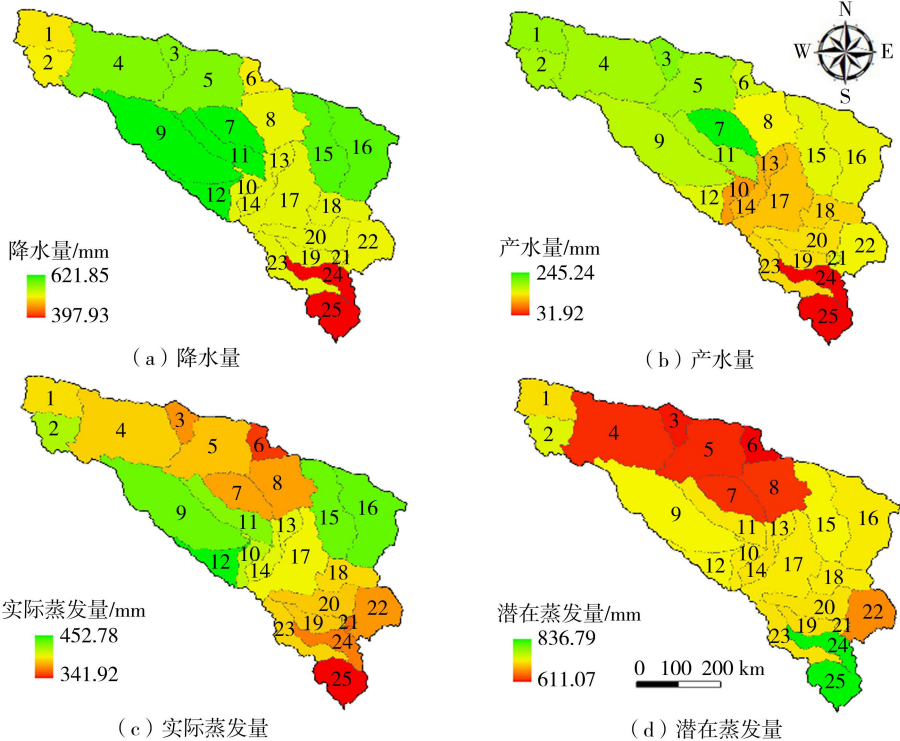


图 6 水循环要素在各子流域的分布

Fig.6 Spatial distributions of water cycle elements in different subbasins

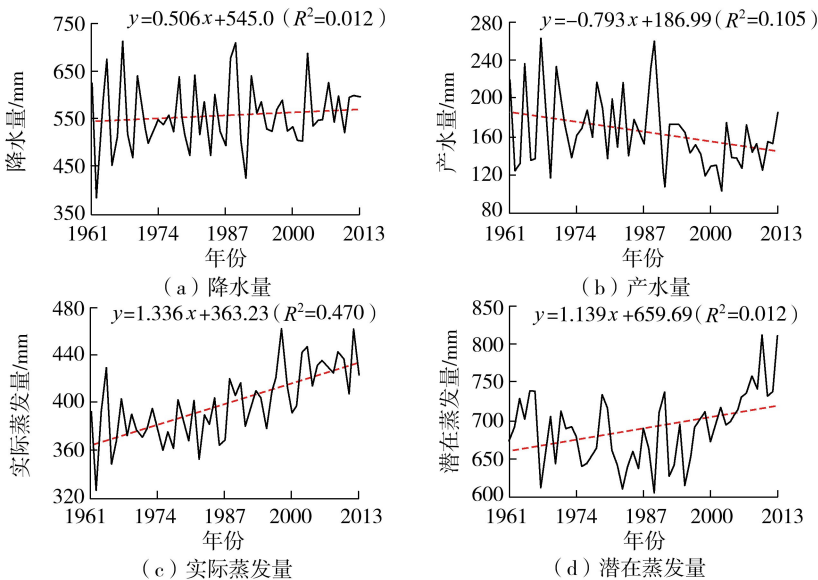


图7 水循环要素的时间变化

Fig.7 Temporal changes in water cycle elements

程,桥头水文站 1959—1990 年多年平均流量为 19.5 m³/s,多年平均径流量 6.15 亿 m³。方案 1 按照 Tennant 法“良好”标准计算,得到河道内生态需水量为 2.25 亿 m³,占基准期多年平均径流量的 36.6%。方案 2 采用改进的年内同频率展布法计算,得到河道内生态需水量为 2.78 亿 m³,占基准期多年平均径流量的 45.2%。两种方案流量过程外包线形成的河道内生态需水量为 2.95 亿 m³,占基准期多年平均径流量的 48.0%。北川河桥头水文站断面河道内生态流量过程见表 2。

表2 桥头水文站断面河道内生态流量过程

Table 2 Ecological flow process in river channel at section of Qiaotou Hydrological Station

月份	月均流量/ (m³/s)	生态流量/(m³/s)			生态流量 占比/%
		方案 1	方案 2	计算结果	
1	5.79	1.16	3.34	3.34	58
2	5.87	1.17	3.38	3.38	58
3	7.89	1.58	4.55	4.55	58
4	14.20	5.69	4.14	5.69	40
5	21.90	8.75	6.36	8.75	40
6	23.30	9.30	6.76	9.30	40
7	34.10	13.60	16.40	16.40	48
8	37.30	14.90	18.00	18.00	48
9	36.30	14.50	17.50	17.50	48
10	25.00	10.00	12.10	12.10	48
11	14.10	2.83	8.15	8.15	58
12	7.95	1.59	4.58	4.58	58

3.4.2 河道外生态需水量

方案 1 利用 ArcGIS 提取草地、林地和耕地的面积及各植被类型分布区的平均潜在蒸发量,利用式(2)计算得到草地、林地、耕地植被类型生态需水量,结果见表 3,河道外生态总需水量为 10.85 亿 m³。

表3 方案1 河道外生态需水量计算结果

Table 3 Calculation results of ecological water demand outside river channel in scheme 1

植被类型	面积/km²	平均潜在 蒸散发/mm	综合需水 系数	生态需水 量/亿 m³
草地	1606.34	686.72	0.35	3.86
林地	847.20	675.08	0.67	3.83
耕地	579.25	727.62	0.75	3.16

方案 2 中北川河流域多年平均实际蒸发量为 400.40 mm,其中生长季实际蒸发量为 340.82 mm,非生长季实际蒸发量为 59.58 mm,生长季实际蒸发量占全年的 85.12%。北川河流域多年平均蒸发量年内分配过程见图 8。利用式(3)计算得到河道外生态需水量为 9.95 亿 m³,各子流域河道外生态需水量空间分布见图 9。宝库河(4 号)、黑林河(9 号)和东峡河(16 号)子流域上游河道外生态需水量较大;1 号、2 号、3 号和 6 号子流域虽然地处流域上游,但海拔高、植被稀少、裸地分布较广,导致生态需水量较低。北川河下游桥头—朝阳阶段建设用地比较集中,林地和草地分布较少,河道外生态需水量也较小。

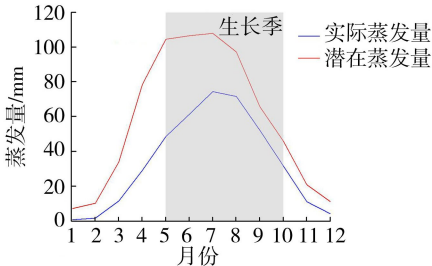


图8 蒸发量年内分配过程

Fig.8 Processes of intra-annual distribution of evapotranspiration

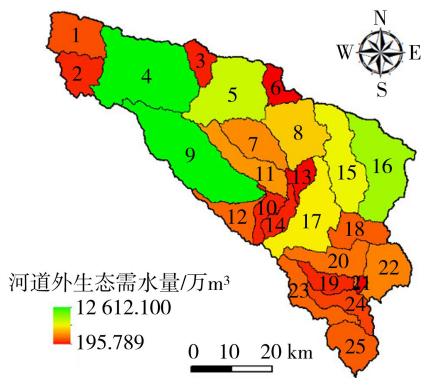


图9 方案2河道外生态需水量空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ecological water demand outside river channel in scheme 2

4 讨论

4.1 径流突变及其原因

径流时间序列突变点检测的准确性决定了基准期和变异期的划分,本文采用4种方法检测出径流突变点主要集中在1990—1998年,并选取1990年作为径流突变点。桥头水文站1959—1990年平均流量为 $19.5\text{ m}^3/\text{s}$,1991—2013年平均流量为 $16.2\text{ m}^3/\text{s}$,径流减少显著。刘哲等^[28]采用M-K非参数统计检验和滑动 t 检验两种方法得到北川河桥头水文站径流突变点为1969年,其采用滑动 t 检验的子序列长度为10 a,研究结果与本文结果相差较大。Wang等^[29]认为人类活动是导致北川河流域径流下降的主要因素,确定北川河流域径流突变点为1989年,与本文确定1990年作为径流突变点比较接近。黑泉水库是“引大济湟”工程重要的调节水库,该工程建成蓄水是导致径流变化的主要原因之一。此外,北川河流域灌区建设时间较早,北川渠、宝库渠、青林渠、塔哇渠等灌区农业耗水也是造成径流突变的原因。

4.2 河道内生态需水量

河道内生态流量是维持河流基本结构形态和生态功能良性发挥的水量,其具有阈值性和适宜性,是水量和水质的统一。河道内生态流量包含低流量、高流量、不同量级洪水以及流量脉冲等组分,以保证河道内物质输移、交换、扩散、转化、累积与释放,营造良好的生物栖息生境^[30]。本文采用Tennant法和改进的同频率年内展布法确定的流量过程外包线作为年内生态流量过程,可兼备两种方法的优点,具有一定的先进性。

根据《青海省主要河流生态基流流量指标分析报告》,北川河桥头水文站非汛期生态基流为 $2.02\text{ m}^3/\text{s}$,汛期为 $4.04\text{ m}^3/\text{s}$;根据《青海省水文手

册》,桥头水文站95%水文频率下最枯月平均流量为 $3.34\text{ m}^3/\text{s}$ 。生态基流是防止河道断流、避免水生生物群落遭遇无法恢复破坏的最小流量,而最枯月平均流量法适用于环境纳污所需的最小生态流量^[31],本文计算结果均大于上述成果。连煜^[32]研究表明,河流开发保留65%~95%的天然径流量,是保证河流维持自然或近自然状态的必要条件。本文计算的河道内生态需水量在多年平均径流量中的占比为48.0%,枯水期(11月至翌年3月)、平水期(4—6月)、丰水期(7—10月)生态流量在月均流量中的占比分别为58%、40%和48%,河道内生态流量更接近于SL/T 712—2021《河湖生态环境需水计算规范》所列的目标生态流量。

4.3 河道外生态需水量

国内外关于河道外生态需水量计算尚未有统一的方法,且各种方法都存在不同程度的缺陷^[5]。本文计算的河道外生态需水量主要是降水消耗性的“绿水流”,两种方案计算的河道外生态需水量比较接近。李文婷等^[33]研究表明,绿水资源作为植物生长的基础,对农业生产和维持陆地生态系统稳定具有不可替代的作用。方案1基于不同植被潜在蒸散能力,在水分供给充分且水热条件良好状态下计算得到的可能生态耗水,该方案并未获取年内各月植被需水系数,仅采用年综合需水系数,无法反映年内植被生态需水量的变化过程。方案2以植被多年平均实际耗水量代替生态需水量,植被耗水量采用SWAT模型输出的蒸发量代替,该方案可得到植被生态耗水量空间分布和年内分配过程。

本文计算北川河流域河道外生态需水量为9.95亿~10.85亿 m^3 。北川河流域多年平均降水量为18.93亿 m^3 ,河道外生态需水量在降水量中的占比为52.6%~57.3%。常博^[26]对祁连山地区生态用水量做了系统研究,其中大通回族土族自治县(占北川河流域面积的92%)林草地的生态用水量为10.21亿 m^3 ,生态用水占比为58%,与本文计算结果较为接近。

4.4 生态需水量适应性管理

北川河流域河道外植被系统的生态需水量约占总生态需水量的80%,加强流域植被管理十分关键。通过SWAT模型模拟得到流域实际蒸发量逐年增加,径流量呈减少趋势,突变点1990年以后桥头水文站实测径流深较基准期减少了37.8 mm,SWAT模型模拟的产水量减少了32.5 mm。青海省自2000年开始实施退耕还林(草)工程,植被建设规模已接近土壤水分承载力阈值,影响植被系统生态功能的正常发挥。

图 10 为北川河流域归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 时空变化,其中图 10(a)为利用 Sen 斜率估计和 M-K 检验得到的 2000—2018 年北川河流域空间分辨率为 1 km 的 NDVI 栅格数据变化趋势,NDVI 极显著增加 的面积为 2 183.7 km² ($P<0.01$),占北川河流域总面积 的 64.8%。NDVI 时间变化的一元线性回归斜率 为 0.004 (图 10(b), $P<0.05$),可以看出流域植被增 加趋势比较明显,势必导致生态耗水量增加,土壤水 分出现“旱化”现象。北川河流域是重要的生态屏 障区和水源涵养区,在黄河流域生态保护与高质量 发展战略背景下,需要转变和优化植被管理理念,按 照“宜林则林、宜草则草、林地结合”的原则实现从 扩大面积向质量提升转变。为保证北川河流域河流 廊道内生境质量良好和水生态、水环境健康,建议丰 水期、平水期和枯水期分别按照同期流量的 50%、 40% 和 60% 预留河道内目标生态流量。

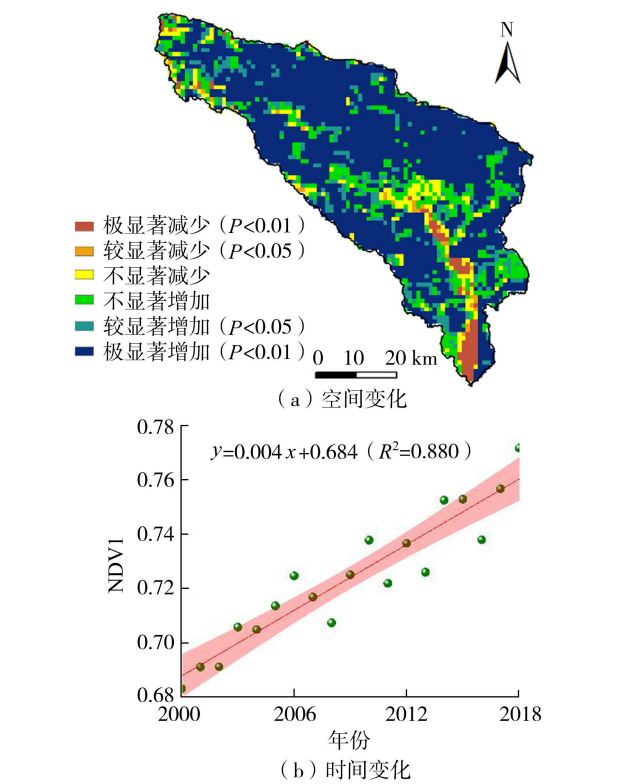


图 10 北川河流域 NDVI 时空变化

Fig. 10 Spatial and temporal variations of NDVI in the Beichuan River Basin

4.5 生态需水量不确定性分析

根据经验和模型相结合的方法确定了北川河流域生态需水量,可为河道内生态流量管理和植被生态需水量计算提供借鉴。生态需水量计算的不确定性主要表现在 3 个方面:

a. 未考虑径流消耗性生态用水,如湖泊和水库水面蒸发需水量、人工湿地补水、人工生态林及城镇

绿化需水量。北川河流域内水库水面面积为 4.43 km²^[34],根据《青海省水文手册》,桥头水文站多年平均水面蒸发量为 911.0 mm,SWAT 模型计算得到的研究区多年平均降水量为 561.6 mm,利用张殷钦等^[2]计算水面蒸发需水量的方法,得到研究区水库水面蒸发需水量为 155 万 m³;根据《西宁市水资源综合规划》,北川河湿地人工生态补水量为 244 万 m³,生态林及城镇生态环境需水量为 1531 万 m³。北川河流域径流消耗性生态用水量为 1930 万 m³,其在生态总需水量中的占比不足 2%,可忽略不计。

b. 本文利用 SWAT 模型输出的潜在蒸发量和实际蒸发量计算流域植被系统生态需水,由于模型对水循环要素模拟存在系统误差,河道外生态需水量计算也存在一定的不确定性。

c. 生态需水量确定要充分考虑不同用水和耗水主体之间在内涵上的交叉重复,避免简单的线性叠加,流域生态需水的耦合与解析需要进一步研究,以减少计算结果的不确定性。

5 结 论

a. 北川河流域生态需水量主要包括两个部分,一是径流非消耗性河道内生态需水;二是降水消耗性河道外植被系统生态需水。北川河流域总生态需水量为 12.90 亿~13.80 亿 m³。

b. 将突变点(1990 年)前的径流系列作为天然平稳流量过程,以 Tennant 法“良好”标准下年内生态需水过程和改进的年内同频率展布法计算的河道内生态需水过程的外包线作为河道内生态需水过程。研究期内,北川河流域河道内生态需水量为 2.95 亿 m³,桥头水文站断面枯水期、平水期、丰水期生态流量在月均流量中的占比分别为 58%、40% 和 48%。

c. SWAT 模型模拟北川河流域水文过程效果良好,流域实际蒸发量和潜在蒸发量均呈增加趋势,径流量和产水量呈减少趋势;研究期内,河道外生态需水量为 9.95 亿~10.85 亿 m³,占区域降水量的 52.6%~57.3%。

参考文献:

[1] 左其亭,张乐开,张羽,等. 人与自然和谐共生理论与实践[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(6):10-15. (ZUO Qiting, ZHANG Lekai, ZHANG Yu, et al. Theory and practice of harmonious symbiosis between human and nature[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 10-15. (in

- Chinese))
- [2] 张殷钦,康文健,乔海娟,等. 气候变化背景下流域生态需水预估:以好溪流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(2):313-323. (ZHANG Yinqin, KANG Wenjian, QIAO Haijuan, et al. Estimation of watershed ecological water demand under the background of climate change: a case study of Haoxi Watershed[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(2):313-323. (in Chinese))
- [3] 刘昌明,刘璇,于静洁,等. 生态水文学兴起:学科理论与实践问题的评述[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(3):412-423. (LIU Changming, LIU Xuan, YU Jingjie, et al. Ecohydrology on the upsurge: history and prospect of its theory and application [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58 (3):412-423. (in Chinese))
- [4] 高勋,陈星,卢娟娟,等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):55-61. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):55-61. (in Chinese))
- [5] 张琳,刘琼,白颖,等. 关于河道外生态需水的讨论[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(5/6):543-546. (ZHANG Lin, LIU Qiong, BAI Ying, et al. Ecological water demand of riverside[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45 (5/6):543-546. (in Chinese))
- [6] FALKENMARK M, ROCKSTRÖM M J. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2006,132(3):129-132.
- [7] 张杰,贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(4):6-10. (ZHANG Jie, JIA Shaofeng. Study on difference of blue-green water in Huangshui Basin and green water under different types of land use based on SWAT model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2013,24(4):6-10. (in Chinese))
- [8] 杨昊,倪福全,邓玉,等. 基于 SWAT 模型分析嘉陵江流域蓝、绿水资源量的时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):18-26. (YANG Hao, NI Fuquan, DENG Yu, et al. Temporal and spatial variation characteristics of blue and green water resources in Jialing River Basin based on SWAT model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2022,33(2):18-26. (in Chinese))
- [9] 李文婷,杨肖丽,任立良,等. 基于 SWAT 模型的黄河源区蓝/绿水资源时空分布特征研究[J]. 中国农村水利水电,2021(8):59-66. (LI Wenting, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of blue and green water resources in the Yellow River source region based on SWAT model[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(8):59-66. (in Chinese))
- [10] 杨明楠,朱亮,刘景涛,等. 植被恢复影响下河川基流的广义水资源效应变化研究:以黄河上游北川河流域为例[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(7):108-115. (YANG Mingnan, ZHU Liang, LIU Jingtao, et al. Variation in generalized water resources effect of river base stream under the influence of vegetation recovery: case of Beichuan River Basin in upstream of Yellow River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2022,36(7):108-115. (in Chinese))
- [11] 商放泽,王可昞,黄跃飞,等. 基于 Budyko 假设的三江源径流变化特性及量化分离[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(2):305-316. (SHANG Fangze, WANG Keyi, HUANG Yuefei, et al. Variation characteristics of runoff and the quantitative separation based on Budyko hypothesis in the Three-River Headwaters Region [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48 (2):305-316. (in Chinese))
- [12] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1):1-8. (in Chinese))
- [13] 吴国栋,刘廷玺,薛河儒. 一种基于 ITA 改进的水文气象序列趋势分析法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):1-6. (WU Guodong, LIU Tingxi, XUE Heru. An improved trend analysis method for hydro-meteorological time series based on ITA [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (1):1-6. (in Chinese))
- [14] 邹磊,夏军,张印,等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1):53-60. (in Chinese))
- [15] 谢志高,贾文豪,王霞雨,等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (6):128-136. (in Chinese))
- [16] 张献志,汪向兰,王春青,等. 黄河源区气象水文序列突变点诊断[J]. 人民黄河,2020,42(11):22-26. (ZHANG Xianzhi, WANG Xianglan, WANG Chunqing, et

- al. Diagnosis of abrupt change point of the meteorological and hydrological series in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42 (11): 22-26. (in Chinese)
- [17] 曲绅豪,周文婷,张翔,等. 黄河中游典型流域近 60 年水沙变化趋势及影响因素[J]. 水土保持学报,2023,37 (3): 35-42. (QU Shenhao, ZHOU Wenting, ZHANG Xiang, et al. Variation trend and influencing factors of water and sediment in the middle reaches of the Yellow River in recent 60 years [J]. Journal of Soiland Water Conservation,2023,37(3):35-42. (in Chinese))
- [18] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al. SWAT: model use, calibration, and validation [J]. Transactions of the ASABE,2012,55(4):1491-1508.
- [19] 贾玉雪,张奇,曾冰茹,等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报 (自然科学版),2023,51(2):8-16. (JIA Yuxue,ZHANG Qi,ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):8-16. (in Chinese))
- [20] 刘永伟,王文,刘元波,等. 基于 EnKF 法的径流数据同化对 SWAT 模型参数优化效果评估[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (2): 1-10. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Evaluation of the optimization effect of streamflow data assimilation on SWAT model parameters based on the EnKF approach [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(2):1-10. (in Chinese))
- [21] ABBASPOUR K C, ROUHOLAHNEJAD E, VAGHEFI S, et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model [J]. Journal of Hydrology,2015,524:733-752.
- [22] RAFEE S A A, UVO C B, MARTINS J A, et al. Large-scale hydrological modelling of the upper Paraná River Basin[J]. Water,2019,11(5):882.
- [23] 范肖予,肖娟,白露,等. 河道生态基流量的年内同频率展布计算法[J]. 水电能源科学,2017,35(3):24-26. (FAN Xiaoyu,XIAO Juan,BAI Lu,et al. Equal frequency calculation method of ecological base flow [J]. Water Resources and Power,2017,35(3):24-26. (in Chinese))
- [24] 王鹏全,吴元梅,杨旭亮. 考虑水文非一致性变异的河道基本生态流量[J]. 水利水运工程学报,2021(2):64-71. (WANG Pengquan, WU Yuanmei, YANG Xuliang. Study of basic ecological instream flow considering hydrological alterations under non-stationary [J]. Hydro-Science and Engineering,2021(2):64-71. (in Chinese))
- [25] 胡广录,赵文智,谢国勋. 干旱区植被生态需水理论研究进展[J]. 地球科学进展,2008,23(2):193-200. (HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, XIE Guoxun. Advances on theories of ecological water requirements of vegetation in arid area[J]. Advances in Earth Science,2008,23(2):193-200. (in Chinese))
- [26] 常博. 青海省祁连山地区生态用水研究[D]. 北京:北京林业大学,2018.
- [27] 朱亮,刘景涛,张玉玺,等. 基于水循环分析的水资源乘数效应评价:以黄河上游北川河流域为例[J]. 地学前沿,2022,29(3):263-270. (ZHU Liang, LIU Jingtao, ZHANG Yuxi, et al. Evaluation of water resource multiple effect based on the analysis of water circulation: an example of the Beichuan River Basin upstream of the Yellow River[J]. Earth Science Frontiers,2022,29(3):263-270. (in Chinese))
- [28] 刘哲,兰措. 青海北川河流域径流变化的机理研究:基于模型和统计两种方法[J]. 地理科学进展,2022,41(2):304-315. (LIU Zhe, LAN Cuo. Investigating the mechanisms of streamflow change in the Beichuan River Basin, Qinghai Province: based on modeling and statistic analyses[J]. Progress in Geography, 2022, 41 (2): 304-315. (in Chinese))
- [29] WANG Xianbang, HE Kangning, LI Ying, et al. Estimation of the effects of climate change and human activities on runoff in different time scales in the Beichuan River Basin, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: an International Journal, 2020, 26 (1): 103-119.
- [30] ZHANG Xianrun, ZHANG Danrong, DING Yuan. An environmental flow method applied in small and medium-sized mountainous rivers [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14 (4): 323-329.
- [31] 王中根,赵玲玲,陈庆伟,等. 关于生态流量的概念解析[J]. 中国水利,2020(15):29-32. (WANG Zhonggen, ZHAO Lingling, CHEN Qingwei, et al. Analysis of the ecological flow concept[J]. China Water Resources, 2020 (15): 29-32. (in Chinese))
- [32] 连煜. 生态流量与河流生态适应性管理研究[J]. 中国水利, 2020 (15): 33-34. (LIAN Yu. Research on ecological flow and river ecological adaptation management [J]. China Water Resources, 2020 (15): 33-34. (in Chinese))
- [33] 李文婷,杨肖丽,任立良. 赣江流域气候和土地利用变化对蓝绿水的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):166-173. (LI Wenting, YANG Xiaoli, REN Liliang. Effects of climate and land use changes on blue and green water in the Ganjiang River Basin [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):166-173. (in Chinese))
- [34] SONG Chunqiao, FAN Chenyu, ZHU Jingying, et al. A comprehensive geospatial database of nearly 100 000 reservoirs in China[J]. Earth System Science Data,2022,14(9):4017-4034.

(收稿日期:2023 - 10 - 21 编辑:施业)