

周帆,海庆烽,蔡得胜,等.基于基流分割集成技术与SWAT模型耦合运用的植被变化基流时空响应模拟[J].水利水电技术(中英文),2026,57(2):122-136.DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.009

ZHOU Fan,HAI Qingfeng,CAI Desheng,et al.Simulation of spatiotemporal response of baseflow to vegetation variations based on coupled application of ensemble baseflow separation technique and SWAT model[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2026,57(2):122-136.DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.009

# 基于基流分割集成技术与SWAT模型耦合运用的 植被变化基流时空响应模拟

周帆,海庆烽,蔡得胜,王盛萍,马梦瑶,曲思仪,李文欣,王柯文,刘逸瑶  
(华北电力大学水利与水电工程学院,北京 102206)

**摘要:**【目的】基流是径流中相对稳定的组成部分。精确刻画流域基流的时空分布特征,特别是植被变化影响作用下的基流响应,对水资源缺乏的北方山区水资源管理和流域管理具有重要意义。【方法】本文耦合运用SWAT模型与数值模拟基流分割集成技术,以小滦河流域为例,分析研究区基流的时空变化,并探讨植被变化等对流域基流的影响控制。【结果】结果表明:(1)SWAT模型与基流分割集成技术的耦合运用可较好模拟基流较少地区的水文过程,基流模拟效果较好,决定系数高达0.9,该方法技术具有较强的适用性;(2)2006—2020年期间,小滦河流域年尺度和生长季径流、基流整体呈减少趋势,但趋势不显著;而非生长季径流、基流则显著增加( $p < 0.05$ );(3)研究期内,流域约35.85%的面积片区基流基本稳定,上中下游各部均有分布;在接坝山地片区,部分子流域基流量甚至呈显著增加(占流域的22.47%);而在坝上高山草甸片区,基流量则呈轻微减少(占流域的18.32%)或显著减少趋势(占总面积的19.82%);(4)植被是研究流域基流过程改善的重要影响因素之一,接坝山地大部片区植被NDVI与基流呈正相关关系,部分子流域甚至呈显著正相关(占总流域10.68%),表明植被恢复一定程度有利于该研究区基流过程的改善。【结论】当前,研究区植被覆被增加对基流过程具有一定正向影响控制作用,但由于存在春季融雪水补给等过程的交互影响,未来气候变化下植被对基流的影响控制需要持续观测探讨。

**关键词:** SWAT模型;基流分割集成技术;基流时空变化;小滦河流域;影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0122-15



听语音  
聊科研  
与作者互动

## Simulation of spatiotemporal response of baseflow to vegetation variations based on coupled application of ensemble baseflow separation technique and SWAT model

ZHOU Fan,HAI Qingfeng,CAI Desheng,WANG Shengping,MA Mengyao,QU Siyi,LI Wenxin,  
WANG Kewen,LIU Yiyao

(School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

收稿日期: 2025-02-26; 修回日期: 2025-05-13; 录用日期: 2025-05-16; 网络出版日期: 2025-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1302501-02)

作者简介: 周帆(1998—),女,硕士研究生,主要从事流域水文研究。E-mail: zhoufan2128@163.com

通信作者: 王盛萍(1978—),女,副教授,博士,主要从事流域水文、生态水文、水文模型模拟研究。E-mail: wangshp418@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract** [Objective] Baseflow is a relatively stable component of runoff. Accurately characterizing the spatiotemporal distribution characteristics of baseflow in river basins, especially its response to vegetation variations, is crucial for water resource and river basin management in the water-scarce mountainous areas of northern China. [Methods] The SWAT model was coupled with the numerical simulation-based ensemble baseflow separation technique. Taking the Xiaoluan River Basin as an example, the spatiotemporal variations of baseflow in the study area were analyzed, and the controlling effect of vegetation variations on river basin baseflow were investigated. [Results] The result showed that: (1) the coupled application of the SWAT model and the ensemble baseflow separation technique could effectively simulate the hydrological processes in areas with limited baseflow. The baseflow simulation performed well, with a coefficient of determination as high as 0.9, demonstrating strong applicability of this method. (2) From 2006 to 2020, the annual and growing-season runoff and baseflow in the Xiaoluan River Basin showed an overall decreasing trend, although the trend was not significant. In contrast, the runoff and baseflow during the non-growing season increased significantly ( $p < 0.05$ ). (3) During the study period, baseflow remained generally stable in approximately 35.85% of the river basin area, with distribution across the upper, middle, and lower reaches. In the mountainous area near the dam, baseflow in some sub-basins even showed a significant increase (accounting for 22.47% of the river basin area). In contrast, in the alpine meadow area above the dam, baseflow showed a slight decrease (accounting for 18.32% of the river basin area) or a significant declining trend (accounting for 19.82% of the total area). (4) Vegetation was one of the important influencing factors for the improvement of baseflow processes in the study basin. In most parts of the mountainous area near the dam, NDVI and baseflow showed a positive correlation, and some sub-basins even showed a significant positive correlation (accounting for 10.68% of the total river basin), indicating that vegetation restoration was conducive to the improvement of baseflow processes in the study area to a certain extent. [Conclusion] At present, the increase in vegetation cover in the study area has a certain positive controlling effect on baseflow process. However, due to the interaction of processes such as spring snowmelt recharge, the controlling effect of vegetation on baseflow under future climate change requires continuous observation and investigation.

**Keywords:** SWAT model; ensemble baseflow separation technique; spatiotemporal variations of baseflow; Xiaoluan River Basin; influencing factors

## 0 引言

基流(Base flow,  $b$ )作为径流的重要组成部分,是来自地下水或其他延迟的水流分量,它反映了地表水和地下水之间的关系,在维持河流生态功能、保障旱季生产和生活用水、揭示地表水与地下水交换规律等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。基流是河流在无降水补给时的主要水源,尤其在枯水期,其稳定性对河流生态系统的健康和人类社会的可持续发展具有重要意义。

关于基流变化及其影响因素的研究长期以来受各界广泛关注。特别是植被变化对基流的影响存在复杂的双重作用机制。一方面,植被覆盖的增加可能通过提高蒸散发量减少地表径流,从而降低基流<sup>[2-4]</sup>;另一方面,植被的根系可以改善土壤的渗透性和孔隙度,增加地下水的补给,从而提高基流<sup>[5-6]</sup>。尽管已有研究对基流变化及其影响因素进行了探讨,但目前仍存在较大的研究分歧。一方面,气候因素(如降水、气温)对基流的影响机制尚未完全明确;另一方面,植被、土壤质地和地形地貌等下垫面条件对基流的综合影响也未得到充分揭示。在气候变化背景下,

准确评估基流的时空变化及其影响因素对保障区域水资源的可持续供给和生态安全至关重要<sup>[7-10]</sup>。

基流通常很少能够直接观测获得,需要通过模型模拟或数值模拟等不同方法进行估算<sup>[11-12]</sup>。目前,较多基于物理过程的水文模型可有效模拟基流及其时空变化,如:MIKESHE、MODFLOW、TOPMODEL、SWAT等。这些模型通过模拟地表水和地下水的相互作用,能够较为准确地估算基流的时空分布。其中,SWAT模型由于其操作效率高、时间持续性、易于获取数据源,以及考虑有部分物理机制的特点被广泛应用于径流及基流模拟<sup>[13]</sup>。此外SWAT模型能够模拟不同尺度(如水文响应单元、子流域)的水文过程,为解决中小尺度流域水文数据缺失问题提供了有效解决方案<sup>[14-17]</sup>。

然而,SWAT模型主要侧重于地表水过程的模拟,对地下水过程进行了简化,因此其地下水模拟效果不佳,往往需要对模型进行一定改进和优化<sup>[18-20]</sup>。除了对SWAT模型中含水层结构、含水层与河流水流交换等代码直接进行修正以外<sup>[18-21]</sup>;部分研究将SWAT模型与其他地下水模拟模型(如MODFLOW)进

行耦合, 以达到地下水的合理模拟效果<sup>[19-22]</sup>; 此外, 部分研究将数字滤波等数值模拟基流分割技术与SWAT耦合, 进而实现基流的有效模拟及空间可视化<sup>[23-24]</sup>。

由于气候、水文地质等条件的复杂性, 目前并没有普遍适用的基流分割技术。其中, 数值模拟法包括数字滤波法、基流指数法、时间步长法(HYSEP)、平滑最小值法、PART法, 相关方法计算速度快、客观性强和操作简便, 被广泛使用<sup>[25]</sup>。在已开展研究中, 多局限于采用单一数值模拟基流分割技术来进行基流分割<sup>[13-15]</sup>。但即便对于同一流域, 不同数值模拟方法结果亦存在一定差异, 不同基流分割方法对于特定区域的适用性具有较大不确定性<sup>[26]</sup>。而集成模拟技术(Ensemble)是解决模型模拟不确定性的重要方法途径之一, 被广泛应用于水文水资源领域等相关研究<sup>[27]</sup>。通过集成模拟, 可有效考虑模型模拟不确定性, 促进变化环境下水文过程响应的正确理解。

因此, 为有效探讨植被变化影响作用下的水源流域基流过程响应, 本研究耦合基流分割集成技术与SWAT模型, 以北方山地具复杂地貌的小滦河流域为例, 开展水源区典型流域基流时空变化模拟。研究目

的在于: 一是探讨SWAT与基流分割集成技术耦合运用对于北方山地流域基流模拟的适用性; 二是通过耦合运用, 分析观测期内研究流域基流的变化趋势和基流变化的空间分布格局; 三是探讨植被相对于气候变化对流域基流过程的影响控制。

## 1 研究区概况

研究区为滦河水系上游小滦河流域, 位于内蒙古高原与燕山过渡带, 是京津冀地区重要水源地。小滦河发源于河北省北部, 流域面积为1 890 km<sup>2</sup>(见图1), 海拔为769~1 903 m, 上游地区为森林草原, 中下游流域山区为森林。流域属于大陆性季风气候区, 2006—2021年平均年降水量(*P*)为474 mm, 年均潜在蒸散量(*PET*)为1 430 mm, 年均温度为5.6 °C。降雪通常从11月持续到次年3月, 年均最大积雪深度为10.1 cm。流域主要土地利用类型为草地、森林和耕地。2006年开始, 当地政府开始推行更科学的林地管理政策, 截至2020年, 流域内森林覆盖率为41.5%, 主要树种为落叶松、云杉、樟子松、山杨和亚洲白桦树, 草地覆盖率为49.1%, 耕地覆盖率为9.2%, 主要农作物为玉米、土豆。土壤类型在中上游以砂壤、

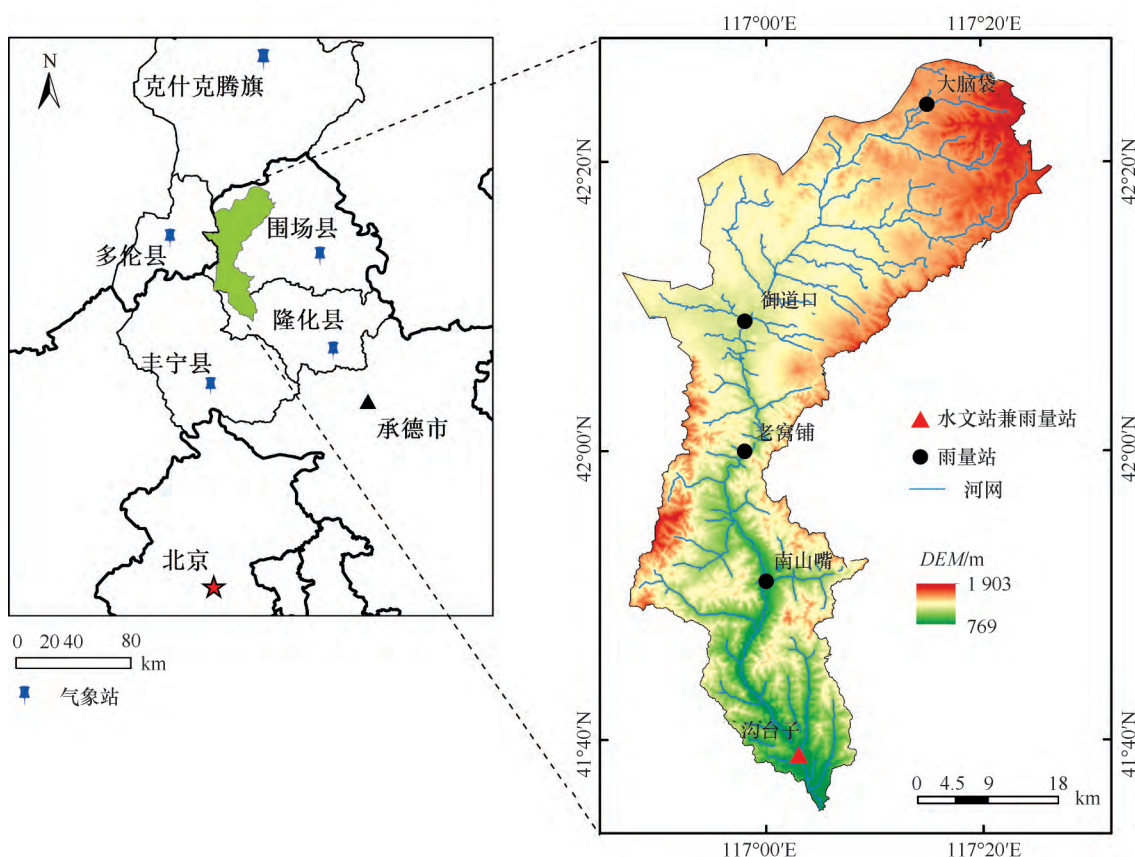


图1 小滦河流域地理位置及水文站分布

Fig. 1 Geographic location and distribution of hydrological stations in Xiaoluan River Basin

砾石为主,中游及下游以轻壤和中壤为主。从地质结构看,位于坝上准平原化的第四系堆积区,地层岩性露头较少且单一,下伏地层岩性多以玄武岩为主,在北部山地地区出露花岗岩。研究区内地下水类型主要为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙—孔隙水和玄武岩孔洞—裂隙水。

## 2 方法

### 2.1 数据收集

研究收集了流域出口沟台子水文站的日值径流量数据(2006—2020年),来源于海河流域水文年鉴(见图1)。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)下载于中国地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率30 m。土地利用数据来自YANG等<sup>[28]</sup>制作的数据集,分辨率为30 m。从国家气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>)收集了逐日气象资料。这些资料包括降水量、最高温度、最低温度、平均温度、风速、相对湿度、太阳辐射以及日照时数等。土壤数据来源于联合国粮农组织官网HWSD数据库(<http://www.fao.org/>)提供的1:100万土壤数据集。潜在蒸散发(PET)来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),分辨率为1 km。月度归一化植被指数(NDVI)来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),分辨率为1 km;月度NDVI算数平均后获得年度NDVI。

### 2.2 SWAT 径流模拟

本研究基于DEM数据,将小滦河流域划分为25个子流域;然后导入处理好的土地利用与土壤数

据,划分流域水文响应单元;导入气象数据,进行径流日值模拟。参照相关文献初步选取21个灵敏参数,采用SWAT-CUP软件中的SUFI-2算法对构建的模型进行参数率定,然后结合率定结果进行手动调整,最终确定了15个与水量模拟过程相关的参数。以2006年作为模拟预热期,2007—2012年和2013—2020年分别作为校准期和验证期。以决定系数( $R^2$ )和纳什效率系数( $NSE_Q$ )作为评价指标, $R^2$ 取值 $[0, 1]$ , $NSE_Q$ 取值 $[-\infty, 1]$ ,二者取值越接近于1,表明模型模拟效果越好。当 $R^2 > 0.75$ 、 $NSE_Q > 0.50$ 时,一般认为模型模拟结果达到了满意结果,且结果是可信的<sup>[23]</sup>。

### 2.3 基流分割集成模拟

数值模拟法是对径流序列进行基流分割的主要技术,广泛应用于水文领域<sup>[11 25 29]</sup>。本研究利用2种基流指数法(BFI法),4种数字滤波法,3种时间步长法(HYSEP法)进行基流分割,其基流分割方法如表1所列。

为选择出适用于小滦河流域的基流分割方法,研究分两步进行操作。参照文献普遍采用的方法,首先采用基流指数BFI( $BFI = b/Q$ )评估基流分割方法的稳定性<sup>[2]</sup>。随后,将表1中提供的不同方法的基流估算值与年枯水基流( $b_{index}$ )进行比较,年枯水基流的计算详见MO等<sup>[35]</sup>的研究,依据纳什效率系数( $NSE_b$ )和平均相对误差(MRE)评价数值模拟效果,选择适用于研究区的基流分割方法。基流分割技术分别应用于流域出口及子流域径流模拟序列。为减少不同分割方法造成的不确定性,采用集成技术模拟基流。为减少模型复杂性,集成模拟时各成员模型权重设置为

表1 基流分割方法  
Table 1 Baseflow separation methods

方法	公式		来源
数字滤波法	$F_1$	$S_t = \alpha S_{t-1} \pm \frac{1+\alpha}{2}(Q_t - Q_{t-1}), b_{t1} = Q_t - S_t$	[30]
	$F_2$	$S_t(i) = \frac{3\alpha-1}{3-\alpha}S_t(i-1) + \frac{2}{3-\alpha}[Q(i) - \alpha Q(i-1)], b_{t2} = Q_t - S_t$	[31]
	$F_3$	$b_{t3} = \frac{\alpha}{2-\alpha}b_{t-1} + \frac{1-\alpha}{2-\alpha}Q_t$	[32]
	$F_4$	$b_{t4} = \frac{\alpha}{1+\beta}b_{t-1} \pm \frac{\beta}{1+\beta}Q_t$	[32]
基流指数法	$B_F$	$b_F/Q$	[33]
	$B_K$	$b_K/Q$	[33]
HYSEP法	$F_i$	$b_{F_i} = 2N^* \text{ days}$	[34]
	$S_i$	$N = A^{0.2}$ $b_{S_i} = 0.5(2N^* - 1) \text{ days}$	[34]
	$L_m$	$b_{L_m} = 0.5(2N^* - 1) \text{ days}$	[34]

注:  $S_t$  为地表径流;  $b$  为基流;  $Q_t$  为总径流;  $\alpha$  为滤波因子;  $\beta$  为固定参数;  $N$  为地表径流停止后的天数;  $A$  为流域面积( $\text{km}^2$ );  $2N^*$  为奇数,通常是最接近  $2N$  的3~11之间的整数。

$1/n^{[27-36]}$ , 具体公式为

$$NSE_b = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (b_i - b_{index-i})^2}{\sum_{i=1}^n (b_{index-i} - \bar{b}_{index})^2} \quad (1)$$

式中,  $NSE_b$  是 Nash-Sutcliffe 效率系数;  $b_i$  是第  $i$  年 ( $i=1, 2, \dots, 15$ ) 通过各种基流分割方法估算的年基流 (mm);  $b_{index-i}$  是通过第  $i$  年枯水指数 ( $Q_{90}/Q_{50}$ ) 估算的年度基流量 (mm);  $\bar{b}_{index}$  是通过枯水指数 ( $Q_{90}/Q_{50}$ ) 估算的历年平均年基流量 (mm)。

平均相对误差 ( $MRE$ ) 计算公式为

$$MRE = \left| \frac{b_i - \bar{b}_{index}}{\bar{b}_{index}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

基流集成模拟估算公式<sup>[36]</sup>为

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} b_i \quad (3)$$

式中,  $b_i$  是集成之后的基流 (mm);  $n$  是符合要求的基流分割方法的数量;  $b_i$  是符合要求的基流分割方法估算的基流 (mm)。

## 2.4 SWAT 模型与基流分割集成技术的耦合运用

如前所述, 直接运用 SWAT 开展基流模拟时通常表现有明显局限性, 特别是对于干旱半干旱区, SWAT 并不能有效模拟基流出流过程<sup>[37-38]</sup>。此外, 由于该研究区存在较长时间的积雪, 流域内融雪径流受气象因子、地形、下垫面等多重因素的影响, 而 SWAT 模型主要依赖气温等气象因子, 并通过经验公式来计算积雪量和融雪径流, 这往往导致融雪径流模拟精度偏低<sup>[39-41]</sup>。因此, 本研究耦合 SWAT 模型以及基流分割集成技术模拟估算研究流域基流, 即: 基于 SWAT 模型模拟产生各子流域径流过程, 再运用基流分割集成技术模拟基流。此外, 参考孙志伟等<sup>[23]</sup>相关研究, 将各子流域的基流特征值提取到子流域中心点上, 利用克里金插值法 (Kriging), 获取流域基流空间分布。

分别探讨小滦河流域水文年 (4 月至次年 3 月)、生长季 (4 月至 9 月)、非生长季 (10 月至次年 3 月) 基流的时空分布动态。依据 Mann-Kendall 趋势检验探讨基流时变趋势, 并依据偏相关性分析探讨识别影响基流空间分布格局的气候、植被变化等主要环境要素控制。

## 3 结果和分析

### 3.1 SWAT 与基流分割集成技术耦合模拟

图 2 展示了 2007—2020 年实测与模拟径流过程

的对比分析。尽管在率定阶段模型过高模拟其峰值流量, 而验证阶段模型低估模拟峰值流量, 但整体上模型可有效模拟反映径流的动态变化。从模拟性能指标来看, 校准期 (2007—2012 年) 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.95, 纳什效率系数 ( $NSE_Q$ ) 为 0.86, 验证期 (2013—2020 年)  $R^2$  和  $NSE_Q$  分别为 0.81 和 0.78。参照相关研究指标判定依据 (即  $R^2 > 0.75$ 、 $NSE_Q > 0.50$ ), 认为本研究 SWAT 模型模拟具有一定有效性。

研究中率定阶段峰值模拟偏高, 而验证阶段则偏低, 主要由于研究流域前后阶段土地利用与植被发生较大变化, 流域产流过程与机制亦相应发生变化。具体而言, 与前期 (2007—2012 年) 相比, 后期 (2013 年后) 植被覆盖显著提升, 流域降雨-地表径流响应较缓较慢, 而前期降雨-地表径流则响应相对较快。由于研究前后阶段采用统一的土地利用与植被数据进行模型输入, 参数校验时, 参数率定以权衡控制不同阶段模型模拟性能为目的, 这导致参数所模拟表征的产流过程与机制在不同阶段会过高 (前期) 或过低 (后期) 模拟峰值响应, 呈现分异特性。

验证期 (2019—2020 年) 模拟性能总体较校准期有所下降可能与研究期间降雨季节分配变化亦部分相关。在校准期 (2007—2012 年), 降水主要集中在夏季, 且冬季流域常出现断流现象。而在 2013—2020 年期间, 尽管降雨总量并未显著减少, 但降雨的年内分配发生了变化: 夏季降雨量减少了约 5%, 而秋冬季降雨量增加了约 7%, 导致冬季不再出现断流现象。

图 3 展示了基流分割不同数值模拟及集成模拟产生的基流指数  $BFI$ 。不同基流分割方法结果有一定差异。 $F_i$ 、 $S_i$  和  $L_m$  的  $BFI$  值始终高于其他方法, 平均值分别为  $0.57 \pm 0.07$ 、 $0.57 \pm 0.07$  和  $0.51 \pm 0.11$ , 其变差较大表明不确定性也较高 (见图 3); 而  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $B_F$  和  $B_K$  的  $BFI$  值比较接近, 平均值分别为  $0.35 \pm 0.07$ 、 $0.38 \pm 0.04$ 、 $0.38 \pm 0.04$ 、 $0.36 \pm 0.03$ 、 $0.39 \pm 0.10$  和  $0.38 \pm 0.09$ , 不确定性较小 (见图 3)。参照相关研究<sup>[13-42]</sup>, 以枯水指数法为对照, 计算获得不同数值模拟方法的模拟性能。其中,  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  的  $NSE_b$  值均超过 0.6,  $MRE$  小于 16% (见表 2);  $B_F$  和  $B_K$  也表现出色, 在校准和验证期间的  $NSE_b$  值均高于 0.7 (见表 2)。据此, 研究选择采用  $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $B_F$  和  $B_K$  这 5 种方法进行集成模拟测算, 集成结果在校准和验证期间的  $NSE_b$  值均高于 0.7,  $MRE$  均小于 10%。基流集成模拟结果与年枯水基流的相关性如图 4 所示, 决定系数 ( $R^2$ ) 高达 0.9, 表明基流集成模拟效果较好。

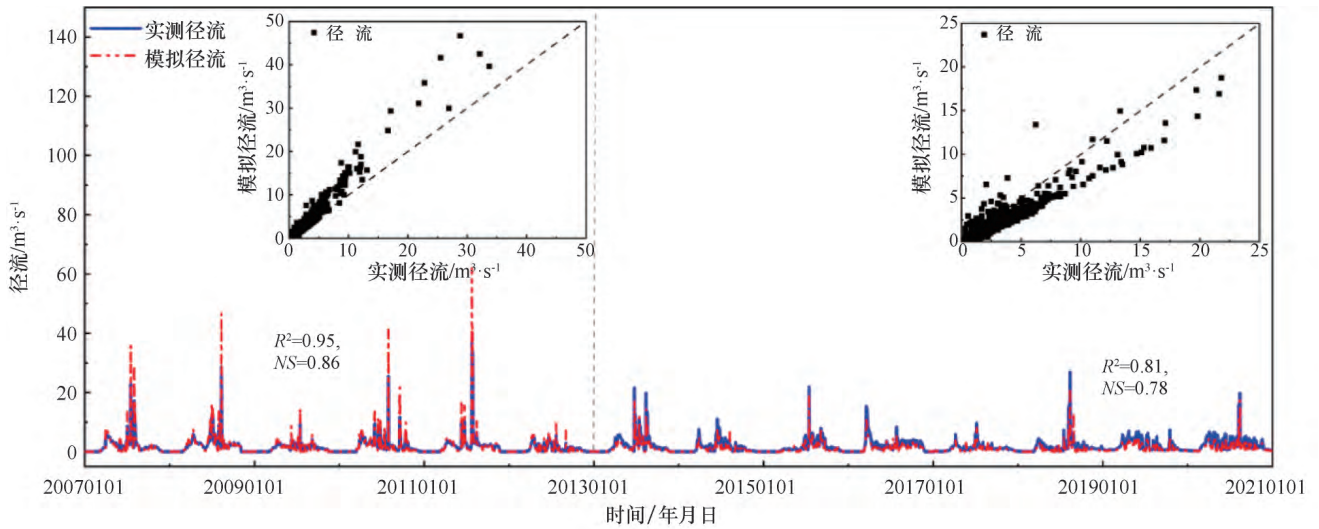


图2 2007—2020年实测与模拟径流过程对比

Fig. 2 Comparison between measured and simulated runoff processes (2007—2020)

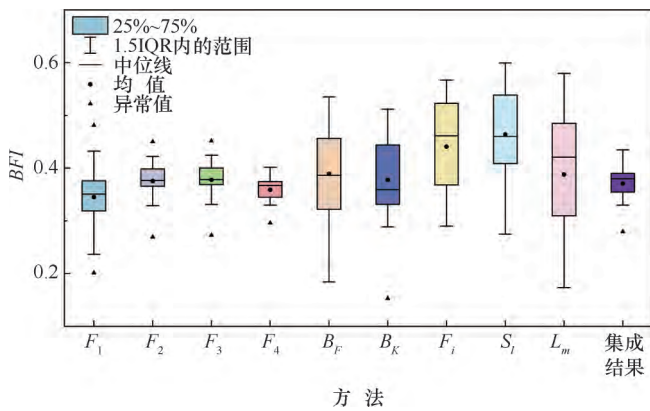


图3 不同数值模拟基流分割方法得到的BFI的统计评估

Fig. 3 Statistical evaluation of BFI obtained from different numerical simulation-based baseflow separation methods

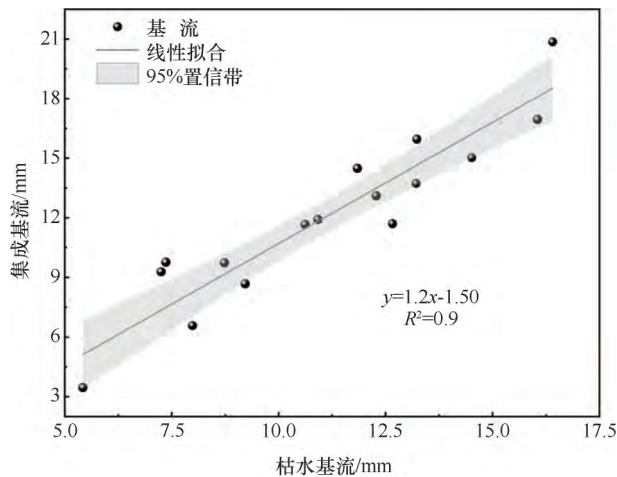


图4 集成模拟与年枯水基流法基流估算对比

Fig. 4 Comparison of baseflow estimation between ensemble simulation and annual low-flow baseflow method

表2 集成基流分割技术和单一基流分割技术的性能表现

Table 2 Performance of ensemble and individual baseflow separation techniques

方法	率定期		验证期	
	$NSE_b$	$MRE/\%$	$NSE_b$	$MRE/\%$
$F_1$	0.90	1.0	0.38	-6.6
$F_2^*$	0.95	3.2	0.93	1.6
$F_3^*$	0.93	3.7	0.99	2.2
$F_4^*$	0.97	2.5	0.95	3.0
$B_F^*$	0.70	13.7	0.79	3.2
$B_K^*$	0.76	8.8	0.74	0.2
$F_i$	0.62	29.8	0.59	-25.6
$S_l$	0.53	28.2	0.69	12.9
$L_m$	0.53	21.3	0.63	0.8
集成结果	0.92	5.4	0.91	0.8

注: 在本研究中, 需要对不同数值模拟方法的参数进行率定, 选取2006—2012年为率定期, 2013—2020年为验证期, 把校准和验证期间  $NSE_b$  值大于0.6且  $MRE$  值小于 $\pm 16\%$ 的方法用来构成集成分割技术; 星号(\*)表示集成分割技术中包含的方法。

本研究中  $BFI$  数值整体偏高, 变化范围 0.36 ~ 0.39。与其他研究相比, 例如: 位于华北土石山区的潮河流域多年平均基流指数值为  $0.32 \pm 0.020$ <sup>[26]</sup>, 白河流域不同年份期间的基流指数值甚至大于 0.65<sup>[43]</sup>, 本研究  $BFI$  与其他研究数值相当, 证实  $BFI$  估值合理有效。此外, 前述不同数值模拟方法  $BFI$  估值亦较为接近, 进一步侧面证实  $BFI$  数值的有效性。

### 3.2 基流时空分布

#### 3.2.1 基流的时变特征

小滦河流域 2006—2020 年期间出口径流和基流模拟结果表明, 流域径流和基流在年内均呈现“双峰型”的特点(见图5), 径流峰值出现在4月和7月, 峰值分别为  $(4.3 \pm 1.5)$  mm 和  $(5.4 \pm 2.8)$  mm;

基流则在4月和8月达到最大值, 分别为(1.4±0.5) mm和(1.6±0.8) mm。*BFI*在3月最小, 4—9月呈小幅度波动变化, 10月开始上升。丰水期*BFI*相对较小, 枯水期*BFI*相对较大且均大于0.5, 表明枯水期基流是径流的主要来源。4月经流和基流同时达到峰值流量主要与该地区的季节性冻融作用有关<sup>[44]</sup>; 由于该地区大部分降水发生在6—8月, 约占年降水量的60%, 因此, 7月经流量又一次达到峰值。地下水释水往往存在一定程度滞后效应<sup>[45]</sup>, 因此基流在8月达到峰值。

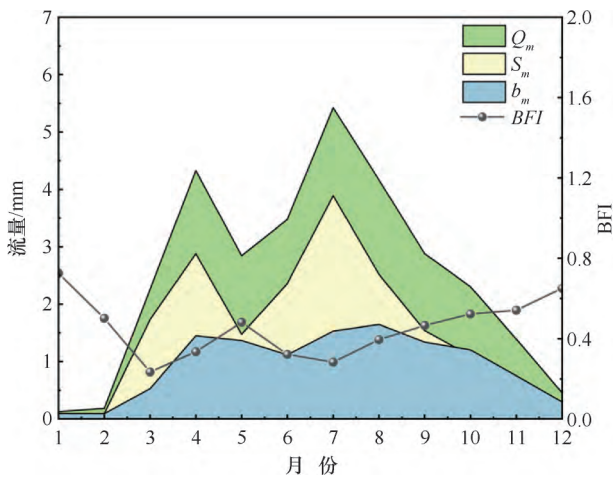


图5 小滦河流域径流、地表径流、基流和基流指数的年内分布情况

Fig. 5 Intra-annual distribution of runoff, surface runoff, baseflow, and baseflow index in Xiaoluan River Basin

研究流域基流呈现显著的季节波动变化, 推断与研究区有融雪补给径流等过程相关。尽管流域非生长季降水较少, 但冬季有较长时间降雪, 通常从11月持续到次年3月, 部分年份次年4月仍有降雪发生, 年均积雪深可达10 cm以上。与此同时, 冬季气温较低, 流域地表冻土层厚度可达288 cm<sup>[46]</sup>, 阻碍降水/

融雪水下渗补给地下水, 导致基流仅依赖深层地下水缓慢补给, 因此基流量甚少; 而3—4月, 随着气温逐渐回升, 土壤逐渐解冻, 包气带土壤渗透性能逐渐恢复, 叠加生长季降水(4—9月降水量占全年85%), 导致基流量显著上升, 基流呈现显著的季节波动变化过程。

从年际变化来看, 2006—2020年期间小滦河流域总径流、基流整体虽然有所下降, 但趋势不显著[见图6(a)], 径流下降速率为 $-0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-2}$ , 基流的下降速率为 $-0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-2}$ 。同期, 流域年降水变化不显著, 而植被覆被增加[见图7(a)], *NDVI*呈显著增长趋势( $p < 0.05$ ), 这表明植被增长并不显著影响流域总径流和基流变化。分析生长季总径流与基流变化, 其结果与年尺度相似, 降水变化不显著, 植被虽然显著增加, 但总径流与基流减少趋势不显著, 径流、基流下降速度分别为 $-0.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-2}$ 和 $-0.25 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-2}$ 。区别于年尺度和生长季, 非生长季总径流和基流呈显著增加趋势( $p < 0.05$ ) [见图6(c)], 特别是在2014年, 径流和基流呈显著上升趋势。该时期降水变化同样不显著, 初步分析认为这与流域植被改善部分相关。

植被恢复可改善土壤水分状况、改善土壤水源涵养能力。特别是当降水充沛时, 流域土壤湿度能够得以改善, 进而增大补给地下水可能性。已有研究表明, 在华北土石山区, 植被覆被增大未必减少土壤水分, 土壤湿度或土壤水分变化同时取决于其他水分可获得性等控制因素<sup>[47]</sup>。本研究尽管*NDVI*呈增大趋势, 植被耗水潜在增大, 但2015年、2016年、2018年和2020年降水较多, 生长季降水量均超过400 mm。因此, 在植被潜在改善土壤持水性、当年降水较多等共同因素作用下, 流域土壤湿度整体得以改善, 生长季总径流及基流因而并未呈显著减少趋势<sup>[48]</sup>; 而非

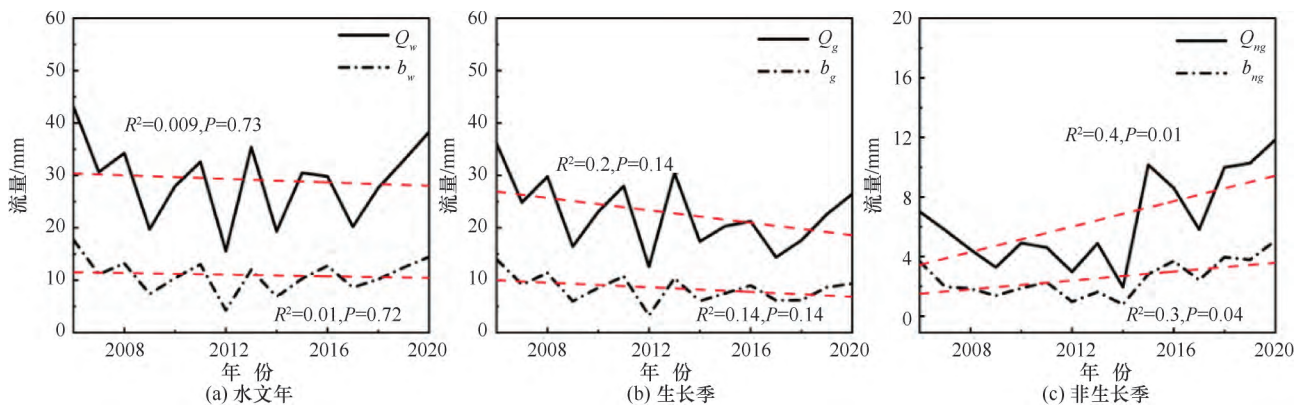


图6 小滦河流域径流和基流在年尺度、生长季和非生长季尺度的变化情况

Fig. 6 Variations in runoff and baseflow at annual, growing season, and non-growing season scales in Xiaoluan River Basin

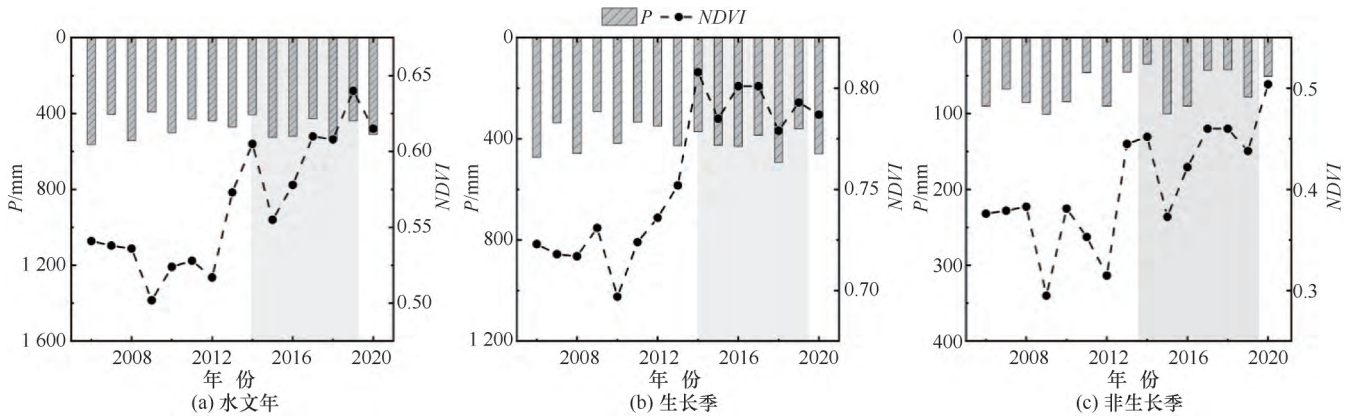


图 7 小滦河流域降雨  $P$  和  $NDVI$  在年尺度、生长季和非生长季尺度的变化情况

Fig. 7 Variations in precipitation ( $P$ ) and  $NDVI$  at annual, growing season, and non-growing season scales in Xiaoluan River Basin

生长季因春季融雪补给,加之植被对下垫面土壤水文性能的改善作用,其基流和总径流均呈增加趋势。总体来看,研究认为流域下垫面的湿润程度和地下水向河川径流的释水因流域植被恢复而得到部分改善。

### 3.2.2 基流的空间分布格局

多年平均基流在年尺度、生长季和非生长季的空间分布格局基本相似(见图 8)。在年尺度,多年平均基流值在小滦河流域上游西北部和中游地区较高(子流域 1、2、4、11、14、16 基流值  $>20$  mm),子流域 1 和 2 的基流值最高 ( $>25$  mm); 上游东南部和下游

的其他子流域基流值相对较低[见图 8(a)]。在生长季,上游基流值相对较高,尤其是子流域 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12,基流值  $>8.5$  mm; 下游地区基流值相对较低,子流域 18、21 的基流值最低 ( $<6.3$  mm) [见图 8(b)]。非生长季,在子流域 1、2、4、11、14、18 基流值相对较大 ( $<8$  mm),其他区域基流普遍较低 ( $<3$  mm) [见图 8(c)]。总体来看,流域上游坝上片区基流相对较高,而下游则基流相对较低。

图 9 展示了小滦河流域月尺度基流的空间分布特

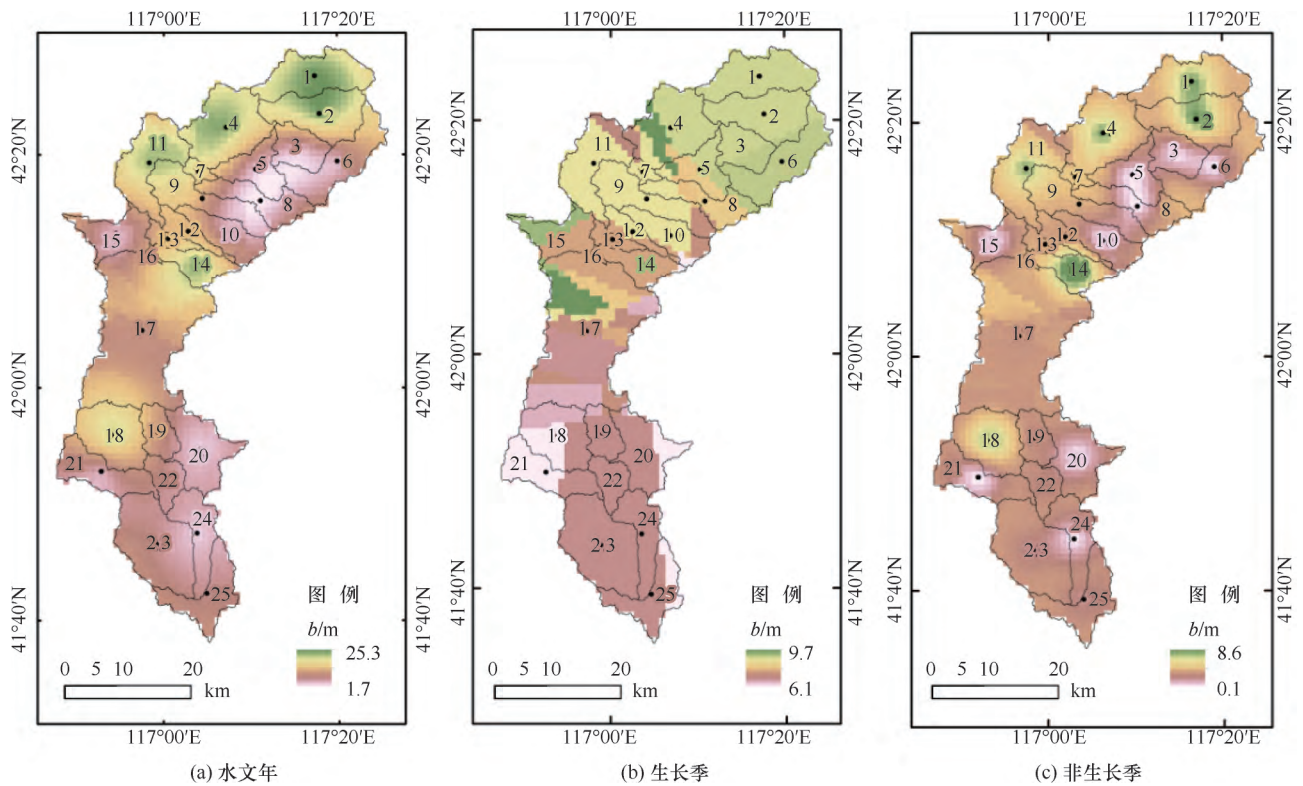


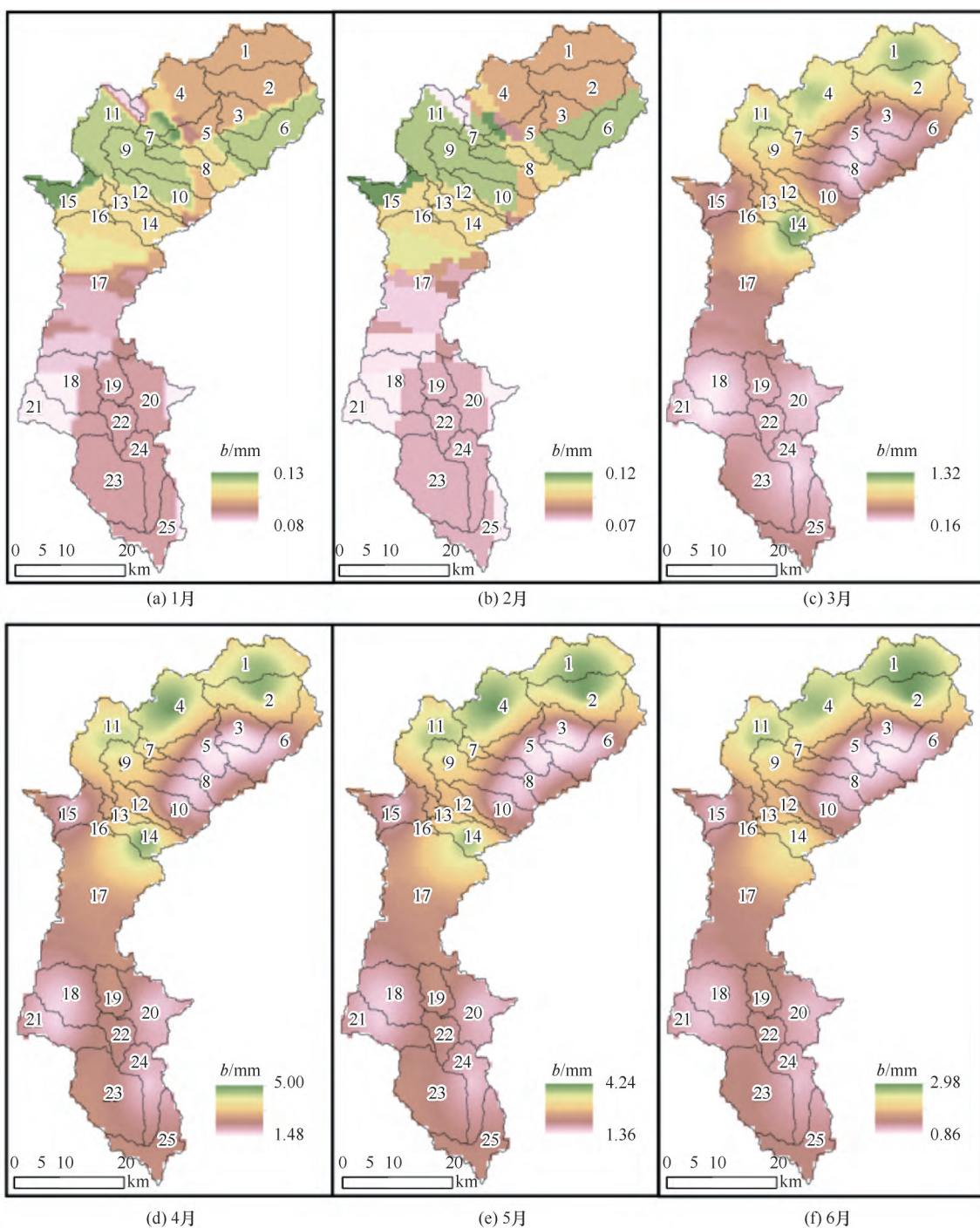
图 8 小滦河流域多年平均基流模拟空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of multi-year average simulated baseflow in Xiaoluan River Basin

征。与前述年际间基流空间分布格局相似: 整体来看, 月尺度流域上游基流相对较多, 而中下游则相对较少。但流域中上游在冬季 12 月至次年 2 月基流空间分布较 3—11 月亦有一定差异, 即: 12 月至次年 2 月流域最上游片区(如: 子流域 1、2、4)较中上游剩余片区基流要少; 而 3—11 月, 则子流域如: 3、5、6、8、10 较中上游剩余片区要低。推断中上游基流空间分布格局随季节发生变化与各子流域间地形地貌、植被覆被, 以及降水、降雪、融雪水补给、植被用水等过程差异较大密切相关。例如, 最上游片区子

流域(1、2、4)土层深厚、地势相对平缓, 多为坝上高山草甸, 冬季气温低, 1 月平均气温  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最大冻土层厚达  $288\text{ cm}^{[46]}$ , 因此, 冻土阻碍地下水渗透补给, 基流相对周围地势变化较快的接坝山地片区要小; 而随着 3 月气温回升, 则融雪逐渐补给地下水, 加之草甸植被用水较少, 基流相对增多; 而周围山地子流域片区则因土壤融雪水贮水相对较少, 加之林地植被蒸发散增大, 导致基流相对较低。

图 10 为基于 Mann-Kendall 趋势检验 ( $\alpha = 0.05$ ) 的流域水文年、生长季和非生长季尺度基流变化趋



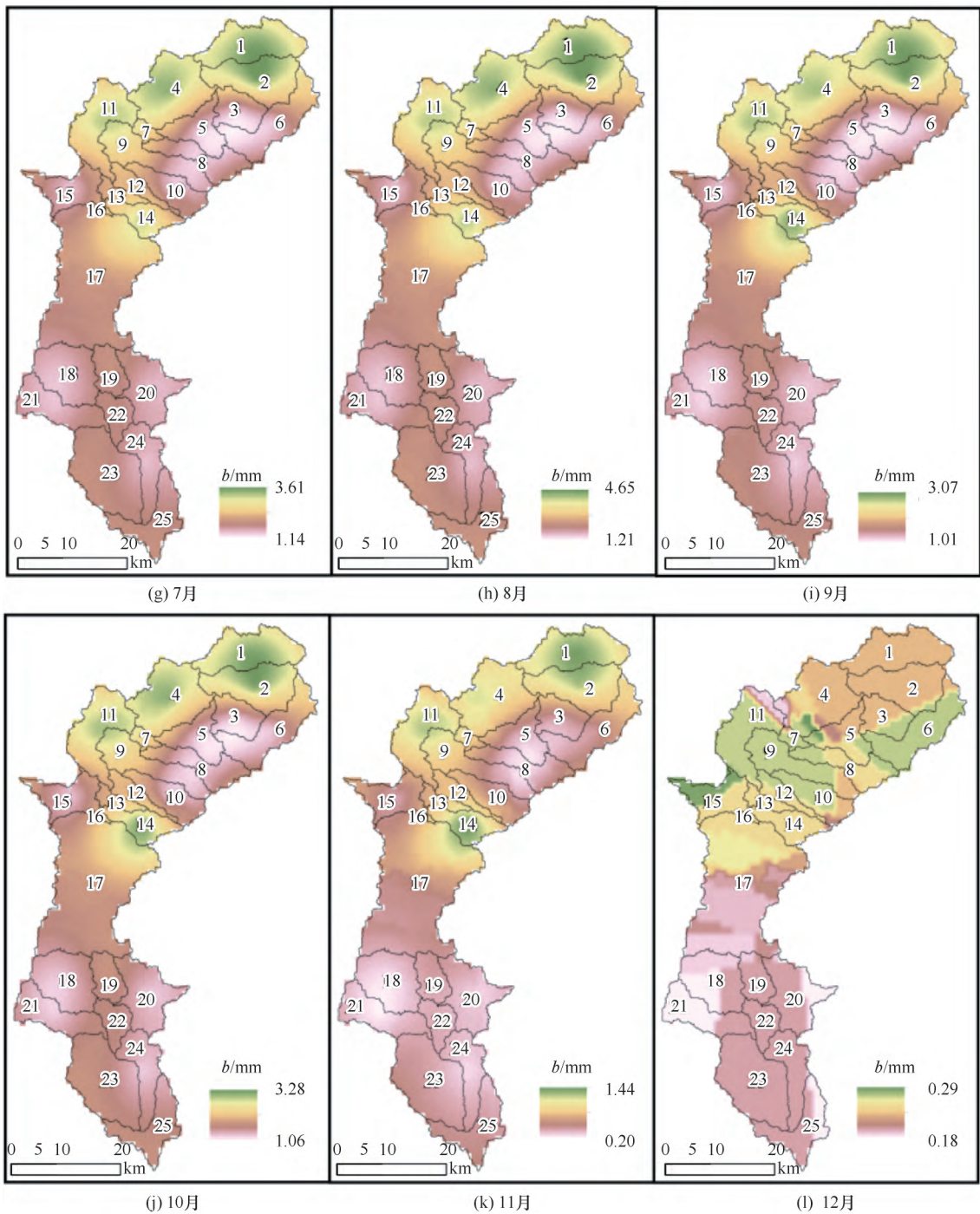


图9 小滦河流域多年平均基流年内空间分布情况

Fig. 9 Spatial distribution of multi-year average intra-annual baseflow in Xiaoluan River Basin

势的空间分布格局。在年尺度,基流基本不变的区域占流域总面积的35.85%,分布在流域各部;基流显著增加的区域占总流域的22.47%,主要分布在地形地势变化较复杂的片区(如:子流域3、5、6、8、9、10、14、15、18、20、21、24);剩余片区则基流轻微减少(占流域18.32%)或显著减少(占19.82%),主要分布在地势变化较少的上游部分片区(如:子流

域1、2、4、7、9、11)。在生长季,流域基流基本不变的区域占绝大部分地区(约占总面积的90%),个别片区甚至有轻微增加趋势(如:子流域10、14、15、18、21、20、24)。在非生长季,基流基本不变的区域占流域总面积的59%,剩余部分区域则出现基流显著增加趋势,占总流域25%,仍然主要分布在地形变化较复杂的片区(如:子流域3、5、6、8、

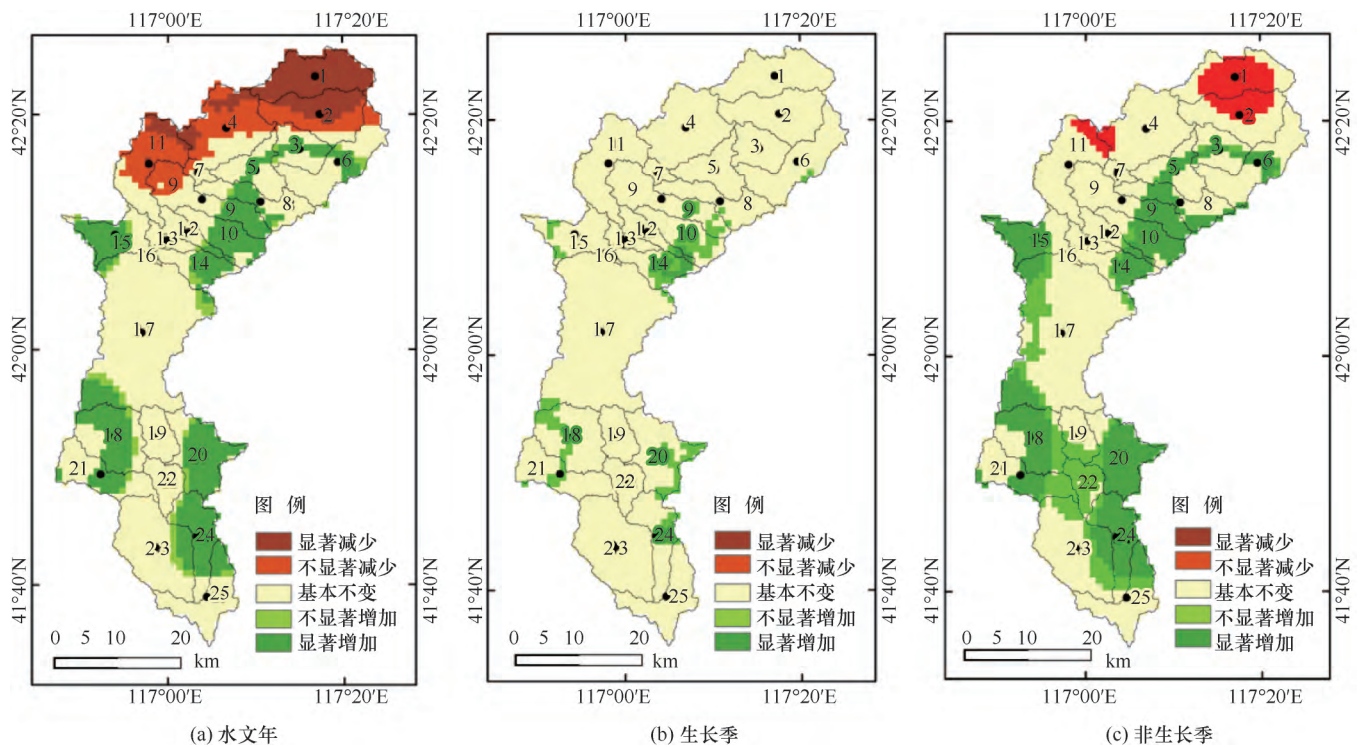


图 10 2007—2020 年小滦河流域基流变化趋势分布格局

Fig. 10 Spatial distribution patterns of baseflow variation trends in Xiaoluan River Basin (2007—2020)

9、10、14、15、18、20、21、24)；而在坝上高山草甸个别片区(如：子流域 1、2、4)则有轻微下降趋势(约占总流域的 6%)。

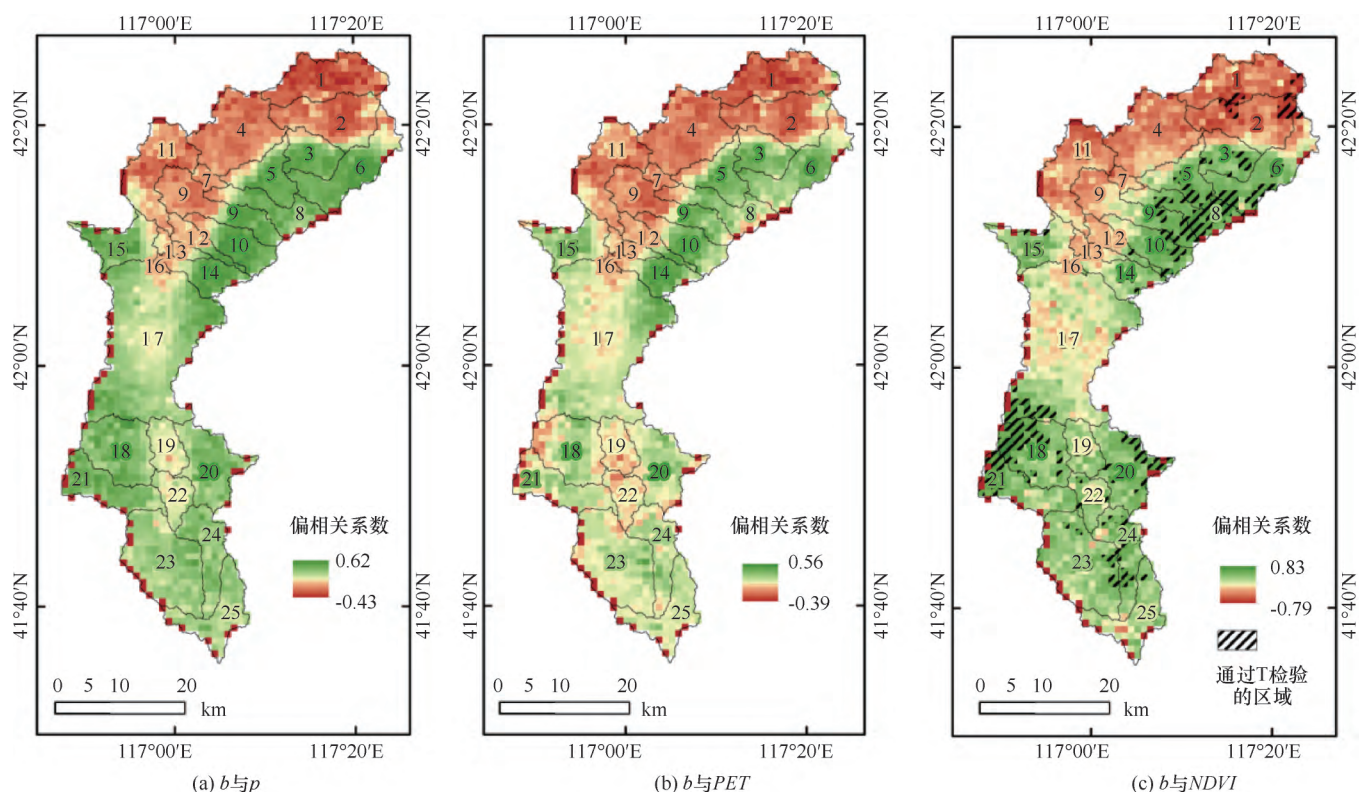
### 3.3 潜在环境要素对基流分布的影响控制

采用偏相关性分析揭示年基流量与气候(降水量  $P$ 、潜在蒸散量  $PET$ )和植被( $NDVI$ )之间的空间相关程度,并进行  $T$  检验(见图 11)。结果表明,降雨( $P$ )与基流在流域上游部分地区(子流域 3、5、6、8、10、14、15)和中下游地区有显著正相关( $p < 0.05$ ),表明降水可补充地下水,提升基流量。特别是在中下游地区,由于土壤类型以轻壤和中壤为主,加之主要土地利用类型林地对土壤水文的改善作用,因此,在降水充足时,可有效改善地下水补给,从而提高基流排放<sup>[49-52]</sup>。流域上游北部区域(子流域 1、2、4、7、9、11、12、13、16)基流量与降水出现显著负相关关系( $p < 0.05$ ),推断与该区域特定的水文地质条件有关。上游片区多为坝上高山草甸,地势平缓,土层深厚,地下水侧向运移速率较小,导致降水入渗补给后向基流的响应存在显著时滞。当季降水通常难以及时转化为当季基流,形成“降水—基流解耦”现象<sup>[47-54]</sup>。因此,在短期尺度下,降水与基流表现出一定的负相关关系。

从基流与  $PET$  的相关关系来看,流域大部分片

区(子流域 3、5、6、8、10、14、15、18、20 等)  $PET$  与基流呈显著正相关关系( $p < 0.05$ )。推断与这些区域具有一定且有效的融雪补给径流过程有关。如前所述,流域冬季平均积雪深度达  $10.1 \pm 6.4$  cm,而相关片区内地形地势变化较快,因此,随着春季气温回升,融雪水可随地势有效补给地下水,促进基流排放<sup>[53-55]</sup>。同降水对基流的负向控制相似,在上游高山草甸部分片区,即:子流域 1、2、4、7、9、11、12、13、16 等,  $PET$  与基流量亦呈现显著负相关关系( $p < 0.05$ ),推断仍与该片区地势平缓、土层深厚、最大冻土层厚度达 288 cm 等过程有关,因此,即便有部分春季融雪水补给,但对基流的补给效率有限,  $PET$  并不能有效增大基流释放。

从植被对基流的影响控制来看,除上游坝上高山草甸片区以外,植被对基流的影响在流域大部呈正相关关系,特别是在部分子流域呈显著正相关关系(子流域 3、5、6、8、9、10、18、20、21、22、23、24 等),面积达 10.68% [见图 11(c)],表明植被覆被增加有利于改善流域基流量,这一结果与北京山区半城子流域的研究结果一致<sup>[56]</sup>。推断认为这种改善作用主要是因为林地改善了土壤水文特性<sup>[57-58]</sup>,特别是对于地形地势变化较大的山区,土壤入渗水分可顺地势有效侧向补给基流。而对于地势平缓、土层深

图 11  $b$  与  $P$ 、 $PET$ 、 $NDVI$  的偏相关系数空间分布Fig. 11 The spatial distribution of partial correlation coefficients between  $b$  and  $P$ ,  $PET$ ,  $NDVI$ , respectively

厚的坝上高山草甸, 如上游的部分子流域(子流域 1、2、4、7、11、12、13), 则因地势平缓、土层深厚, 水侧向运移与补给径流过程缓慢, 加之植被类型以高山草甸为主, 植被根系对土壤水文特性改善有限, 因此,  $NDVI$  与基流  $b$  呈现一定程度的负相关关系, 个别子流域为显著负相关(子流域 1、2), 但仅占流域总面积的 1.02%。

#### 4 模型的局限性

(1) 融雪径流是冻土层土壤的流域径流的重要水分来源之一, 亦是构成区域基流的重要组成部分。如前文所述, SWAT 模型以气温为驱动, 通过经验公式和参数模拟融雪径流, 因此, 关于融雪径流模拟过程具有较大局限性, 特别是对于北方干旱半干旱区域精细尺度上枯水径流过程的模拟, 模拟效果较差。本研究耦合 SWAT 与基流分割数值模拟方法并集成不同方法, 该方法框架有效模拟再现了枯水径流基流的时空变化特征。但模型构建时相关参数仍基于国外研究区域统一设置, 在本研究仍具有一定不足。因此, 耦合模型的运用可进一步结合流域积雪和冻土覆盖等数据特性, 通过优化模型参数提高模拟精度。

(2) 本研究采用 2020 年土地利用数据驱动 SWAT

模型以简化建模过程, 但研究区  $NDVI$  变化趋势显示, 2013 年后植被覆盖度显著提升。这一下垫面条件的动态变化显著影响流域产流过程与机制, 进而影响流域峰值响应, 导致模型模拟在不同阶段呈现分异的系统性偏差, 即: 前期径流模拟峰值(2007—2012 年) 偏大, 而后期则偏小。因此, 本耦合模型当前对于下垫面变化较大的区域仍具有一定局限性。模型在实际应用时可考虑采用动态变化的土地利用与植被设置, 以进一步提升模型模拟精度。

#### 5 结论

本文基于 SWAT 模型与基流分割集成技术耦合运用, 模拟分析小滦河流域 2006—2020 年基流动态变化, 其主要结论如下。

(1) SWAT 模型与基流分割集成技术的耦合运用可有效改善 SWAT 不能有效模拟基流较少的北方山地流域基流过程等缺陷, 以小滦河流域为例, 耦合运用产生的基流与年枯水基流法计算的基流对比, 决定系数高达 0.9, 表明基流模拟效果好。

(2) 从年尺度和生长季来看, 2006—2020 年期间, 小滦河流域径流和基流总体呈轻微减少趋势, 趋势不显著; 而在非生长季, 流域径流、基流均显著增

加( $p < 0.05$ ),表明观测期内流域水文过程在一定程度上有所改善。

(3) 2007—2020年期间,流域上中下游各部基流基本稳定(占总面积35.85%);接坝地区山地海拔较高片区基流量呈显著增加趋势(占总流域22.47%);而在坝上高山草甸,部分区域基流则呈轻微减少或显著减少趋势,分别占流域总面积18.32%和19.82%。

(4) 总体而言,研究区植被覆被增加在一定程度上有利于改善流域枯水径流水文过程。具体表现为非生长季基流增加。此外,除坝上高山草甸片区NDVI与基流呈负相关关系以外,流域内接坝山地大部片区二者呈正相关关系,个别子流域甚至呈显著正相关,表明植被恢复在一定程度上有利于该研究区水文过程的改善。本研究中春季融雪水补给对植被与基流的响应关系有一定的影响交互作用。因此,未来气候变化下植被覆被增加对基流过程的正向影响是否持续将有待于继续观测探讨。

#### 参考文献(References):

- [1] GAN R, XU M S, YANG F, et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(11): 323.
- [2] YAN X, SUN J N, HUANG Y N, et al. Detecting and attributing the changes in baseflow in China's Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128957.
- [3] GAO Z L, ZHANG L, CHENG L, et al. Groundwater storage trends in the Loess Plateau of China estimated from streamflow records [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 281-290.
- [4] MARCOTTE P, ROY V, PLAMONDON A P, et al. Ten-year water table recovery after clearcutting and draining boreal forested wetlands of eastern Canada [J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(20): 4163-4172.
- [5] LIU W F, XU Z P, WEI X H, et al. Assessing hydrological responses to reforestation and fruit tree planting in a sub-tropical forested watershed using a combined research approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125480.
- [6] MA X, XU J C, LUO Y, et al. Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(8): 1179-1191.
- [7] 郭玉雪,江梓欣,许月萍,等. 基于电导率质量守恒的南方丘陵山区基流分割研究[J]. *水资源保护*, 2025, 4(6): 105-112.
- GUO Y X, JIANG Z X, XU Y P, et al. Research on baseflow separation in southern hilly and mountainous areas based on conductivity mass balance [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 4(6): 105-112.
- [8] 蒋磊,何亚男,顾西辉. 长江中下游流域基流时空变化特征及其影响因素分析[J]. *人民珠江*, 2024, 45(10): 76-87.
- JIANG L, HE Y N, GU X H. Temporal and spatial variation

characteristics of base flow and its influencing factors in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Pearl River*, 2024, 45(10): 76-87.

- [9] 岳思羽,李怀恩,赵丽. 气候和土地利用变化对渭河流域水资源短缺的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 95-101.
- YUE S Y, LI H E, ZHAO L. Impact of climate and land use changes on water scarcity in the Wei River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 95-101.
- [10] 殷书梅,赵礼涛,张艳敏. 汉江流域基流变化及主要气象影响因素分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(7): 23-26.
- YIN S M, ZHAO L T, ZHANG Y M. Base flow change and its climatic impact factors analysis in Hanjiang River Basin [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(7): 23-26.
- [11] 徐磊磊,刘敬林,金昌杰,等. 水文过程的基流分割方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3073-3080.
- XU L L, LIU J L, JIN C J, et al. Baseflow separation methods in hydrological process research: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3073-3080.
- [12] ECKHARDT K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1/2): 168-173.
- [13] DUAN H X, LI L, KONG Z G, et al. Combining the digital filtering method with the SWAT model to simulate spatiotemporal variations of baseflow in a mountainous river basin [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 56: 101972.
- [14] ABOELNOUR M, GITAU M W, ENGEL B A. A comparison of streamflow and baseflow responses to land-use change and the variation in climate parameters using SWAT [J]. *Water*, 2020, 12(1): 191.
- [15] 安晨,方海燕. 基于SWAT模型的妫水河流域径流空间分布特征[J]. *水文*, 2021, 41(4): 81-87.
- AN C, FANG H Y. Spatial distribution characteristics of runoff in Guishui River Basin based on SWAT model [J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(4): 81-87.
- [16] 甘容,徐孟莎,左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征[J]. *资源科学*, 2022, 44(9): 1824-1834.
- GAN R, XU M S, ZUO Q T. Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River Basin [J]. *Resources Science*, 2022, 44(9): 1824-1834.
- [17] 胡胜,杨冬冬,吴江,等. 基于数字滤波法和SWAT模型的灞河流域基流时空变化特征研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(3): 455-463.
- HU S, YANG D D, WU J, et al. Spatiotemporal variation characteristics of baseflow in the Bahe River Basin based on digital filter method and SWAT model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(3): 455-463.
- [18] NGUYEN V T, DIETRICH J. Modification of the SWAT model to simulate regional groundwater flow using a multicell aquifer [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(7): 939-953.
- [19] BAILEY R T, WIBLE T C, ARABI M, et al. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model [J]. *Hydrological*

- Processes, 2016, 30(23): 4420-4433.
- [20] SÁNCHEZ-GÓMEZ A, SCHÜRZ C, MOLINA-NAVARRO E, et al. Groundwater modelling in SWAT+: Considerations for a realistic baseflow simulation [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2024, 26: 101275.
- [21] 杨蕴, 郭勇, 王发飞, 等. 山谷型小流域地表水与地下水时空交互模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 32-41.  
YANG Yun, GUO Yong, WANG Fafei, et al. Integrated model for estimation of the interaction between surface water and groundwater based on in valley watershed [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 32-41.
- [22] GUZMAN J A, MORIASI D N, GOWDA P H, et al. A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 73: 103-116.
- [23] 孙志伟, 梁越, 钮新强. 基于数字滤波法的长江上游流域基流时空分布特征[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(11): 23-28.  
SUN Z W, LIANG Y, NIU X Q. Spatiotemporal variation characteristics of baseflow in the Upper Yangtze River based on digital filter method [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(11): 23-28.
- [24] LAMICHHANE M, PHUYAL S, MAHATO R, et al. Assessing climate change impacts on streamflow and baseflow in the karnali river basin, Nepal: A CMIP6 multi-model ensemble approach using SWAT and web-based hydrograph analysis tool [J]. Sustainability, 2024, 16(8): 3262.
- [25] 徐榕焱, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 352-359.  
XU R H, WANG X G, ZHENG W. Research progresses in baseflow separation methods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 352-359.
- [26] 曹文旭, 许行, 张志强. 气候变化和植被变化对潮河基流的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(24): 11295-11306.  
CAO W X, XU H, ZHANG Z Q. The impact of climate and vegetation changes on baseflow in the Chao River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11295-11306.
- [27] ADHIKARI R, VERMA G, KHANDELWAL I. A model ranking based selective ensemble approach for time series forecasting [J]. Procedia Computer Science, 2015, 48: 14-21.
- [28] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [29] AKSOY H, KURT I, ERIS E. Filtered smoothed minima baseflow separation method [J]. Journal of Hydrology, 2009, 372(1/2/3/4): 94-101.
- [30] NATHAN R J, MCMAHON T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses [J]. Water Resources Research, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [31] CHAPMAN T G. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon [J]. Water Resources Research, 1991, 27(7): 1783-1784.
- [32] CHAPMAN T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(5): 701-714.
- [33] WAHL K L, WAHL T L. Determining the flow of comal springs at New Braunfels, Texas [J]. Proceedings of Texas Water, 1995, 95(1995): 16-7.
- [34] SLOTO R A, CROUSE M Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis [J]. Water-resources investigations report, 1996, 96: 4040.
- [35] MO C X, RUAN Y L, XIAO X G, et al. Impact of climate change and human activities on the baseflow in a typical karst basin, Southwest China [J]. Ecological Indicators, 2021, 126: 107628.
- [36] 孙惠子, 粟晓玲, 眭大为. 基于最优加权组合模型的枯季径流预测研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 201-208.  
SUN H Z, SU X L, ZAN D W. Drought period stream-flow forecasting based on optimal weighted combination model [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011, 39(11): 201-208.
- [37] 翟婧雅, 金鑫, 金彦香, 等. 干旱区内陆河流域植被恢复对水文过程的影响[J]. 水电能源科学, 2023, 41(5): 26-29.  
ZHAI J Y, JIN X, JIN Y X, et al. The impacts of vegetation restoration on the hydrological processes in arid inland river basin [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(5): 26-29.
- [38] 张洪波, 支童, 卫星辰, 等. 基于SWAT-MODFLOW的黄河中游区径流过程模拟及对黄土高原变绿的响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 1-10.  
ZHANG H B, ZHI T, WEI X C, et al. Simulation of runoff process in the middle reaches of the Yellow River based on SWAT-MODFLOW model and its response to the greening of the Loess Plateau [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 1-10.
- [39] 赵红玲. 基于改进SWAT的东北寒区融雪径流模拟及预测[D]. 长春: 吉林大学, 2023.  
ZHAO H L. Snowmelt Runoff Simulation and Prediction in the Northeastern Cold Regions Based on Improved SWAT Model [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [40] ANDRIANAKI M, SHRESTHA J, KOBIERSKA F, et al. Assessment of SWAT spatial and temporal transferability for a high-altitude glacierized catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23(8): 3219-3232.
- [41] DHAMI B, HIMANSHU S K, PANDEY A, et al. Evaluation of the SWAT model for water balance study of a mountainous snowfed river basin of Nepal [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(1): 21.
- [42] 农晓星, 聂卫波, 马孝义. 无定河流域风沙滩区河道基流变化规律与驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 103-113.  
NONG X X, NIE W B, MA X Y. Baseflow variation and driving factors in the blown-sand region of Wuding River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 103-113.
- [43] 王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 等. 密云水库白河流域基流演变特征[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3181-3190.  
WANG C Y, YAN T Z, ZHAI L M, et al. Change characteristics of baseflow in Bai River Basin of Miyun Reservoir based on comparison

- of separation methods [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42( 8): 3181-3190.
- [44] 周长乐, 种法政, 闫林, 等. 新疆石城子河流域径流量变化规律研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2024, 7( 12): 70-78.  
ZHOU Changle, ZHONG Fazheng, YAN Lin, et al. Study on the variation characteristics of runoff in the Shichengzi River Basin, Xinjiang. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2024, 7( 12): 70-78.
- [45] 董祥旺, 金晓媚, 张绪财, 等. 基于表面能量平衡模型的张承地区蒸散发研究[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50( 1): 13-20.  
DONG X W, JIN X M, ZHANG X C, et al. Research on regional evapotranspiration in the Zhangcheng area based on the SEBS model [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50( 1): 13-20.
- [46] 陈自然. 小滦河上游地区地下水流数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.  
CHEN Z R. Numerical Simulation of Groundwater Flow in the Upper Reaches of the Xiao Luan River Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [47] 李紫恬, 王盛萍, 袁亚男, 等. 华北土石山区不同密度油松人工林土壤含水量及其时间稳定性剖面分布[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35( 4): 491-499.  
LI Z T, WANG S P, YUAN Y N, et al. Profile distribution of soil moisture and its temporal stability under various planting densities in rocky mountain area of northern China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35( 4): 491-499.
- [48] 邢博, 金爱芳, 殷志强, 等. 基于多源数据的流域水平衡和水源涵养变化研究: 以坝上高原小滦河流域为例[J]. *地质通报*, 2022, 41( 12): 2114-2124.  
XING B, JIN A F, YIN Z Q, et al. Research of basin water balance and water conservation variation based on multi-source data: A case study of Xiaoluan River Basin in Bashang plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41( 12): 2114-2124.
- [49] 陈利群, 刘昌明, 李发东. 基流研究综述[J]. *地理科学进展*, 2006, 25( 1): 1-15.  
CHEN L Q, LIU C M, LI F D. Reviews on base flow researches [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25( 1): 1-15.
- [50] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性质[J]. *土壤学报*, 1979, 16( 3): 277-281.  
CHEN Z X, WANG R Z. The moisture retention of several important soils in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1979, 16( 3): 277-281.
- [51] 王富, 甄宝艳, 董智, 等. 坝上地区退耕还林地土壤水文生态特征[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8( 4): 61-66.  
WANG F, ZHEN B Y, DONG Z, et al. Eco-hydrological characteristics of soil on the forestland converted from farmland in Bashang plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8( 4): 61-66.
- [52] 赵宇寒, 曹建生, 朱春雨, 等. 壤中流形成机制及其生态水文效应研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30( 1): 38-46.  
ZHAO Y H, CAO J S, ZHU C Y, et al. Research progress on the formation mechanism of subsurface flow and its ecohydrological effects [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30( 1): 38-46.
- [53] ZHOU F, WANG S P, QU S Y, et al. Understanding hydrological process change due to re-vegetation in a mountainous watershed of northern China [J]. *Hydrological Processes*, 2025, 39( 3): e70103.
- [54] HARPOLD A A, MOLOTCH N P, MUSSELMAN K N, et al. Soil moisture response to snowmelt timing in mixed-conifer subalpine forests [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29( 12): 2782-2798.
- [55] JASECHKO S, BIRKS S J, GLEESON T, et al. The pronounced seasonality of global groundwater recharge [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50( 11): 8845-8867.
- [56] DING B B, ZHANG Y E, YU X X, et al. Effects of forest cover type and ratio changes on runoff and its components [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10( 3): 445-456.
- [57] CAO W X, LI Q H, XU H, et al. Vegetation dynamics regulate baseflow seasonal patterns of the Chaohe watershed in North China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53: 101797.
- [58] 穆兴民, 顾朝军, 孙文义, 等. 植被恢复改变黄土高原产流模式问题初探[J]. *人民黄河*, 2019, 41( 10): 31-39.  
MU X M, GU C J, SUN W Y, et al. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 2019, 41( 10): 31-39.

(责任编辑 王海锋)