

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0526

SU Huidong, JIA Yangwen, LIU Huan, et al. Runoff evolution simulation and attribution analysis in cold region basin based on WEP-L model [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1523–1530. [苏辉东, 贾仰文, 刘欢, 等. 基于WEP-L模型的寒区流域径流演变模拟及归因分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1523–1530.]

## 基于WEP-L模型的寒区流域径流演变模拟及归因分析

苏辉东<sup>1,2</sup>, 贾仰文<sup>1</sup>, 刘欢<sup>1</sup>, 李耀军<sup>3</sup>, 杜军凯<sup>1</sup>,  
牛存稳<sup>1</sup>, 甘永德<sup>4</sup>, 曾庆慧<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 3. 中国科学院 西北生态资源环境研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 73000; 4. 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:** 寒区在我国分布广泛,且多为我国主要江河的源头区,其水循环演变会对地区乃至全国的水资源情势产生重要影响。针对寒区冻土作用下特殊的水文特性,研究选择松花江、黄河、黑河、长江、雅鲁藏布江流域内5个典型寒区流域,采用改进的WEP-L模型模拟分析了寒区径流在1960—2010年的时空变化规律。同时,基于水文模拟法,设计不同气候变化与土地利用情景对各寒区流域径流变化进行了归因分析。研究表明:WEP-L针对不同的寒区流域逐月径流过程,取得了较好的模拟效果,NSE(纳什效率系数)基本在0.7以上,相对误差控制在 $\pm 15\%$ 内。5个流域的径流量变化趋势表现为弱显著性,但是黄河流域(唐乃亥以上)和黑河流域(莺落峡以上)的基流指数显著增加,说明这两个流域的河川基流占比不断增加,主要原因可能在于冰川融雪的增加。除了松花江流域(阿彦浅以上)外的四个寒区流域的气候变化对径流的影响较高,贡献率达到78%以上,是径流演变的主导作用。研究结果有助于增强对寒区水循环和水资源演变的认识,为应对未来变化环境下寒区水问题提供参考。

**关键词:** 寒区流域; WEP-L模型; 径流演变; 归因分析

**中图分类号:** P333.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1523-08

### 0 引言

由于气候变化和人类活动影响的日益加剧,占全球陆地面积25%的寒区水循环与水资源演变发生了显著变化。我国寒区广泛分布在西北和东北地区,占国土面积43%<sup>[1]</sup>。寒区的水循环、水平衡和水资源驱动机制等具有其自身特色,与非寒区相比存在很大差别<sup>[2]</sup>。寒区生态系统脆弱,对气候变化敏感,极易受到破坏且恢复力弱<sup>[3-4]</sup>,因此寒区水循环与水资源演变及其归因与其他地区的相比有着很大的区别。

流域径流演变的模拟,常用的分布式流域水文

模型有SHE<sup>[5-6]</sup>、TOPMODEL<sup>[7]</sup>、SWAT<sup>[8]</sup>、DHS-VM<sup>[9]</sup>、VIC<sup>[10]</sup>等。我国的许多学者针对国内自然地理特征与气候特点,在模型单元划分、对水文过程的描述以及模型求解方法等方面建立了具有我国流域特色的分布式水文模型,主要有WEP-L(贾仰文等<sup>[11]</sup>)、GBHM(杨大文等<sup>[12]</sup>)、DTVGM(夏军等<sup>[13]</sup>),以及郭生练模型<sup>[14]</sup>等。在寒区流域GBHM<sup>[15-16]</sup>应用比较多,此外,结合遥感和新安江模型<sup>[17]</sup>的CREST-snow模型<sup>[18-20]</sup>能适用于寒区流域融雪冰川径流过程模拟<sup>[21-22]</sup>。回归分析法<sup>[23-24]</sup>、集总式模型法<sup>[25-26]</sup>、分布式水文模拟法<sup>[27]</sup>是目前用于径流归因分析的主要手段。其中,回归分析法计算简

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2020-05-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2015CB452701); 国家自然科学基金项目(51379215; 51779272; 51909091)资助

作者简介: 苏辉东, 博士研究生, 主要从事水文模型研究. E-mail: shd17@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 刘欢, 博士, 工程师, 主要从事流域水循环模拟与水生态保护研究. E-mail: liuhuan@iwahr.com

捷,但对数据的一致性要求较高。集总式模型一般以概化形式描述流域水热过程,较少考虑其时空变异性。相比之下,WEP-L水文模拟法基于水文循环物理过程,可以精细化描述包括蒸散发、地下径流、地表径流、水热交换等多个水循环要素变化。基于WEP-L的分布式流域水文模型模拟径流的演变规律及归因分析,应用在黄河流域<sup>[28]</sup>、海河流域<sup>[29]</sup>的研究较多,且取得了不错的效果。但是在寒区流域的应用相对较少,且目前没有针对我国不同寒区流域的水资源演变规律和归因之间的差异性的研究。因此,本文对WEP-L的寒区模块中的寒区包气带的水文参数和模型结构进行一定的适应性调整,以我国5个典型的寒区流域为研究对象,模拟分析了寒区流域径流1960—2010年的时空演变规律。在此基础上,利用水文模拟法,定量辨识了土地利用和气候变化对径流演变的贡献。寒区水循环和寒区水资源演变的研究可以为未来变化环境下寒区水问题解决提供基础,实现寒区水资源的可持续发展。

## 1 研究区概况

为研究我国寒区流域水资源的演变规律及其归因分析,本文选取了5个寒区的典型流域,分别为松花江流域、黑河流域、黄河流域、长江流域、雅鲁藏布江流域,分别以阿彦浅、莺落峡、唐乃亥、小得石、奴各沙作为流域出口断面,集水面积分别达到 $5.7 \times 10^4$ 、 $1.0 \times 10^4$ 、 $12.2 \times 10^4$ 、 $11.7 \times 10^4$ 、 $10.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 寒区土壤冻融过程模拟

WEP-L模型以子流域套等高带为基本计算单元,采用了变水源区(VSA)产流理论,实现了对流域水分与能量交换过程的耦合模拟。针对寒区特点,采用“度日因子法”模拟积雪融雪过程。具体模型结构详见参考文献[11]。

研究发现,长江源区土壤饱和导水系数与其温度存在明显相关关系,温度下降将导致土壤饱和导水系数减小<sup>[30]</sup>。在模型研究中,一些学者以气温代替土壤温度,认为其下降到某一临界值后,土壤饱和导水系数会受到气温下降的影响呈指数减少<sup>[31-32]</sup>。经分析可知,土壤温度的下降会同时限制土壤的导水性能和蓄水性能。在黑河的葫芦岛流

域观测结果显示,随着土体温度下降,土壤中未冻水的含量近似呈指数降低,其中 $0^\circ\text{C}$ 和 $-10^\circ\text{C}$ 是土壤开始至完全冻结的临界值<sup>[33]</sup>。为此,本文采用日均气温代替土壤温度,修正模型中的土壤饱和含水量 $\theta_s$ 和土壤饱和导水系数 $k_s$ ,具体见下式。

$$\theta_s = \begin{cases} \theta_{s0}, T_a \geq T_c \\ \theta_{s0} e^{[a(T_a - T_c)]}, T_a < T_c \end{cases} \quad (1)$$

$$k_s = \begin{cases} k_{s0}, T_a \geq T_c \\ k_{s0} e^{[a(T_a - T_c)]}, T_a < T_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\theta_{s0}$ 和 $k_{s0}$ 分别为未冻结时土壤的饱和含水量和饱和导水系数; $T_a$ 和 $T_c$ 分别为日均气温和临界气温( $^\circ\text{C}$ ); $a$ 为参数。 $T_c$ 和 $a$ 的初值为 $0^\circ\text{C}$ 和0.25。

### 2.2 径流演变归因分析方法

将长系列径流分为基准期和人类活动影响期两个时段,进而采用校验后的WEP-L模型对比分析不同情景下的径流变化,确定气候变化和土地利用变化对径流变化的贡献大小。具体步骤如下:

(1)以基准期的气象数据和土地利用数据作为输入,计算基准期的多年平均天然径流量 $R_{N1}$ ;

(2)以影响期的气象数据和基准期的土地利用数据作为输入,计算影响期的多年平均天然径流量 $R_{C2}$ ;

(3)以影响期的气候数据和影响期的土地利用数据作为输入,计算影响期的多年平均天然径流量 $R_{N2}$ 。本研究根据径流变化特点,将1960—1980年作为基准期,1981—2010年作为影响期。由此,径流变化的归因结果采用下式得到<sup>[34-35]</sup>。

$$\eta L = \frac{|R_{N2} - R_{C2}|}{|R_{N2} - R_{C2}| + |R_{C2} - R_{N1}|} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta C = \frac{|R_{C2} - R_{N1}|}{|R_{N2} - R_{C2}| + |R_{C2} - R_{N1}|} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\eta L$ 、 $\eta C$ 分别表示气候变化和土地利用对天然河川径流变化的贡献。

## 3 结果与分析

### 3.1 WEP-L模拟效果

采用相对误差(RE)和纳什效率系数(NSE)来评估模型模拟效果,计算公式如下:

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{\text{sim},i} - \sum_{i=1}^N Q_{\text{obs},i}}{\sum_{i=1}^N Q_{\text{obs},i}} \times 100\% \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs,i})^2}$$

(6)

式中： $Q_{sim,i}$  和  $Q_{obs,i}$  分别为月径流模拟与站点观测结果 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )； $N$  为月数； $\bar{Q}_{obs,i}$  为月实测年均值 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )。

对比分析黑河莺落峡断面以上流域和松花江阿彦浅断面以上流域的径流在模型改进前后的模

拟结果,结果见表 1、图 1 和图 2。改进模型较好反映了寒区枯水期(大致在每年的 10 月到次年的 5 月)的径流过程。若不考虑寒区土壤冻融影响,流域枯水期累计入渗偏大,径流偏小。通过模型改进,寒区水文模拟效果得到改善,NSE 值基本超过 0.7,RE 绝对值低于 15%。进一步分析发现,对于枯水期径流较大的流域,考虑土壤冻融影响后模型改善效果越显著。

表 1 考虑土壤冻融作用前后模型模拟结果对比  
Table 1 Comparison of model considering soil freeze-thaw effect and not considering

水文站	WEP-CN 模型	水文要素	时期	NSE	RE	
黑河莺落峡站	不考虑土壤冻融作用	逐月径流	率定期	1960—1980 年	0.43	-40.8%
			验证期	1981—2000 年	0.60	-32.9%
	考虑土壤冻融作用	逐月径流	率定期	1960—1980 年	0.84	8.0%
			验证期	1981—2000 年	0.82	-12.5%
松花江阿彦浅站	不考虑土壤冻融作用	逐月径流	率定期	1960—1980 年	0.58	-10.1%
			验证期	1981—2000 年	0.65	9.6%
	考虑土壤冻融作用	逐月径流	率定期	1960—1980 年	0.67	-2.8%
			验证期	1981—2000 年	0.72	1.3%

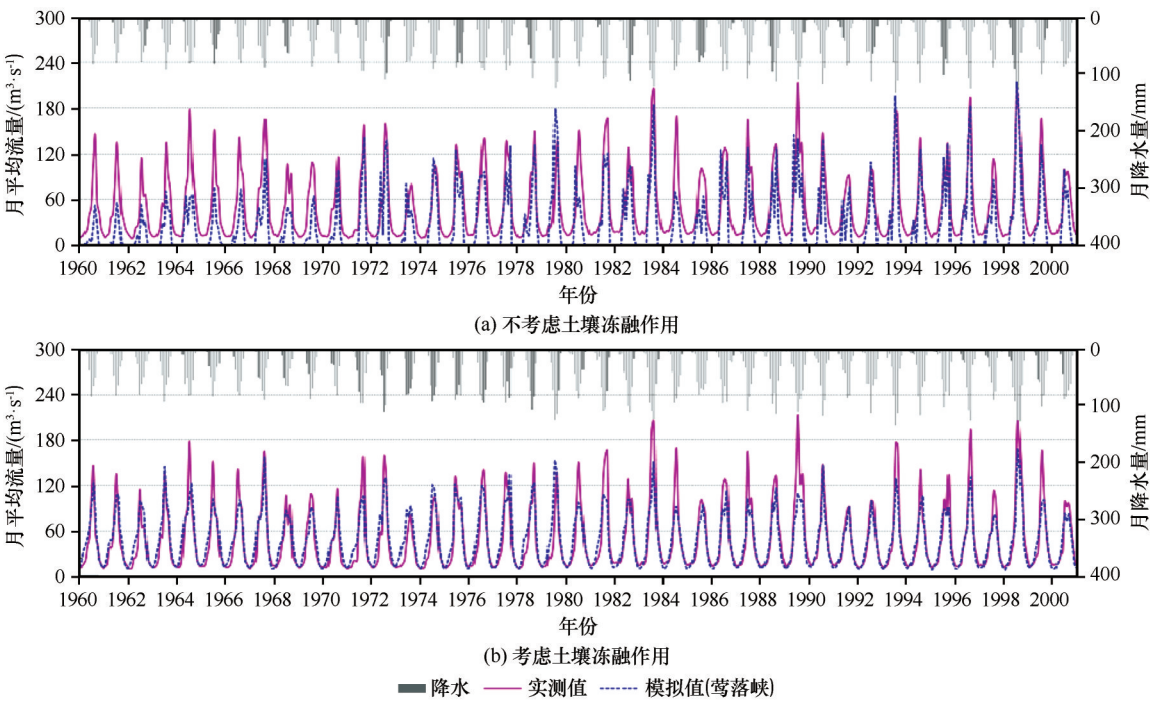


图 1 黑河源区莺落峡站逐月径流模拟结果

Fig. 1 Monthly runoff simulation results of Yingluoxia Station in Heihe headwater area

5 个典型寒区流域的径流模拟效果如图 3 及表 2 所示。可以看出,WEP-L 在不同的寒区流域径流得到了较好的拟合结果。

3.2 寒区径流演变规律

将河川径流分为地表径流  $R_s$  和河川基流  $R_g$ , 计

算年基流量占河川径流量的比值,即基流指数。其中,地表径流和河川基流的数据是通过 WEP-L 模型计算获得,地表径流包括降水坡面产流(超渗产流或蓄满产流)和壤中流,河川基流包括地下水补给河道水量。对比分析寒区 5 个典型流域的径流成分



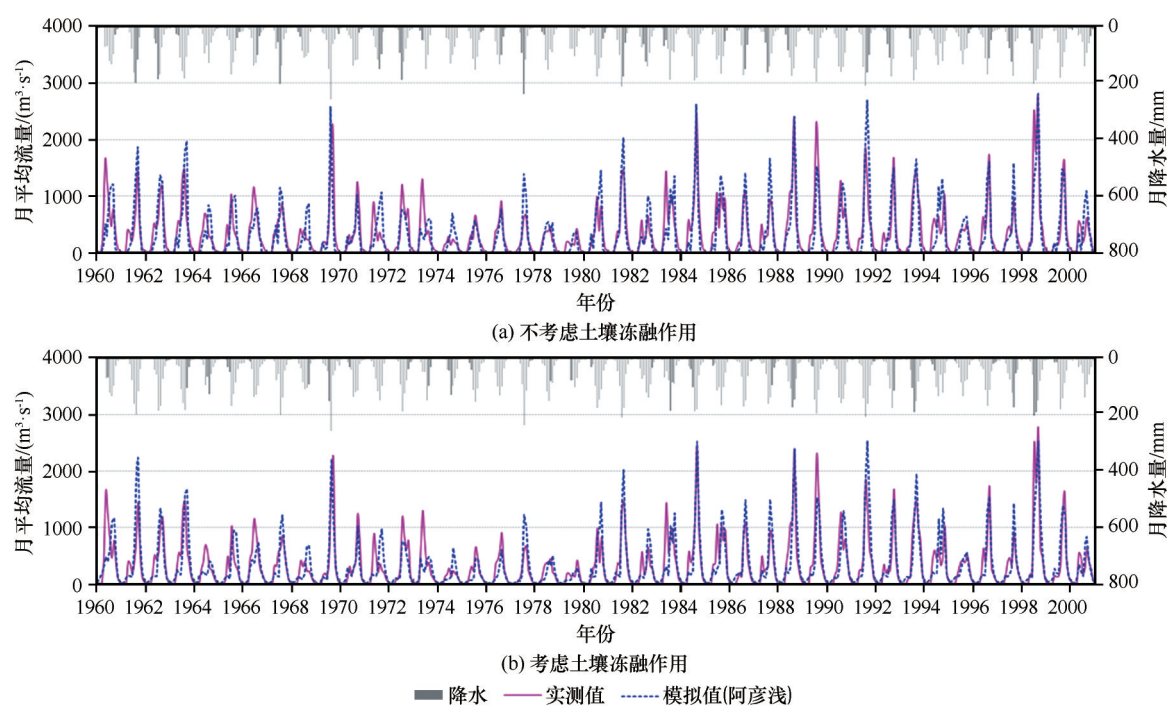


图2 松花江源区阿彦浅站逐月径流模拟结果

Fig. 2 Monthly runoff simulation results of A'yanqian Station in headwater area of Songhua River

表2 典型寒区流域的月径流模拟效果

Table 2 Monthly runoff simulation results of the representative watersheds in cold regions

水文站	所属流域	率定期(1960—1980年)		验证期(1981—2010年)	
		NSE	RE	NSE	RE
阿彦浅	松花江	0.67	-2.8%	0.72	1.3%
唐乃亥	黄河	0.83	-3.7%	0.82	-5.0%
小得石	长江	0.74	-10.7%	0.80	9.2%
莺落峡	黑河	0.84	8.0%	0.82	-12.5%
奴各沙	雅鲁藏布江	0.78	-9.4%	0.86	6.1%

及变化规律,结果见表3。对比已有研究成果,模型对径流组成(尤其是河川基流)及变化的模拟效果

表3 典型寒区流域河川径流组成及演变趋势

Table 3 Composition and evolution analysis of runoff in representative basins in cold regions

站名	年河川径流构成要项				M-K趋势统计值	
	地表径流 $R_s$		河川基流 $R_g$		$Q/$ ( $\times 10^8 \text{ m}^3$ )	基流 指数
	径流深/ mm	占比	径流深/ mm	占比		
唐乃亥	64.29	39.58%	99.06	60.42%	-0.63	2.55*
莺落峡	37.83	22.19%	132.67	77.81%	1.66	3.17**
奴各沙	47.49	35.27%	87.13	64.73%	-0.76	-0.20
小得石	259.71	60.68%	168.31	39.32%	0.26	-0.04
阿彦浅	103.22	64.89%	55.85	35.11%	0.83	-0.28

注: \*和\*\*分别表示通过 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 置信水平的显著性检验。

良好<sup>[36-38]</sup>。

黄河流域(唐乃亥以上)、黑河流域(莺落峡以上)、雅鲁藏布江流域(奴各沙以上)的基流指数分别为60.4%、77.8%和64.7%,说明河川基流在补给径流的作用显著强于坡面产流。尤其是黑河流域,基流指数高达77.8%。而长江流域(小得石以上)和松花江流域(阿彦浅以上)的基流指数较低,以地表径流为主。

通过 Mann-Kendall 趋势分析发现,5个典型流域的径流量变化趋势不具有显著性,但是黄河流域(唐乃亥以上)和黑河流域(莺落峡以上)的基流指数显著增加,且通过了 $P<0.01$ 的显著性检验,说明这两个流域的河川基流占比不断增加。其中,黑河流域(莺落峡以上)、松花江流域(阿彦浅以上)、长江流域(小得石以上)年径流呈现增加趋势。黄河

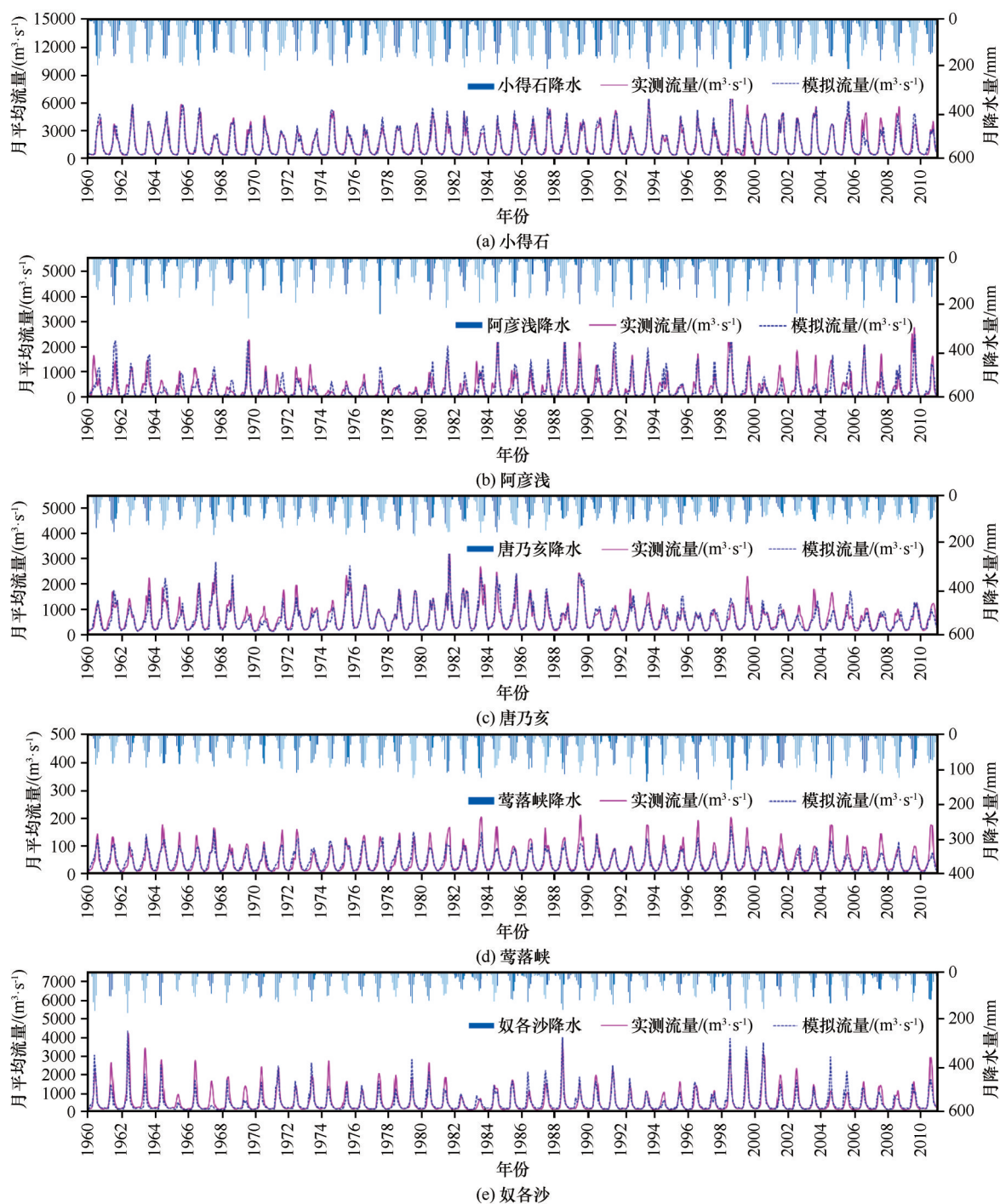


图3 典型寒区流域逐月径流模拟结果

Fig. 3 Monthly runoff simulation results of six representative basins in cold regions

流域(唐乃亥以上)和雅鲁藏布江流域(奴各沙以上)径流年际变化不大,呈微弱下降趋势。

### 3.3 归因分析

定量评估土地利用变化和气候变化对5个研究流域天然径流变化的影响,结果见表4。对比两个阶段(1960—1980年和1981—2010年),从表4可以看出,唐乃亥和奴各沙站的年径流量有所减少,而

阿彦浅、莺落峡、小得石站的径流量有所增加。进一步分析发现,黑河流域径流变化受气候条件的贡献最大,达到95.64%,而松花江流域则最小,为50.99%。对于黑河上游来说,气候变化是导致其径流增加的主导因素,因为黑河流域的土地利用方面,裸地、草地和森林是其主要类型,与1980年相比变化微小,对径流的影响较弱。这与杨明金等<sup>[39]</sup>的

研究结果一致。整体来看,寒区流域径流变化的主要因素是气候变化,松花江流域(阿彦浅以上)气候变化对径流变化的贡献率稍大于土地利用带来的影响,除了松花江流域(阿彦浅以上)以外,其余四个寒

区流域的气候变化对径流的影响较高,在78%以上。尤其是黑河流域(莺落峡以上)和雅鲁藏布江流域(奴各沙以上)的气候变化对径流的影响达到了95%以上,占主导作用,明显大于其他流域的结果<sup>[40-41]</sup>。

表4 土地利用和气候变化对流域径流影响的定量评估  
Table 4 Quantitative assessment of the impact of land use and climate change on runoff

站名	天然河川径流		气候变化		土地利用变化	
	变化量/( $\times 10^8$ m <sup>3</sup> )	变化率/%	影响量/( $\times 10^8$ m <sup>3</sup> )	贡献率/%	影响量/( $\times 10^8$ m <sup>3</sup> )	贡献率/%
阿彦浅	6.00	6.89	3.06	50.99	2.94	49.01
唐乃亥	-4.63	-2.29	-5.24	89.57	0.61	10.43
莺落峡	2.30	14.73	2.20	95.64	0.10	4.36
小得石	29.89	6.20	23.46	78.48	6.43	21.52
奴各沙	-7.86	-5.32	-7.49	95.25	-0.37	4.75

4 结论

本文利用改进后的WEP-L模型,以我国松花江、黄河、黑河、长江、雅鲁藏布江流域内5个典型寒区流域为研究对象,模拟分析了各流域径流1960—2010年时空演变规律。在此基础上,开展了土地利用和气候变化对径流演变的归因分析。得到以下主要结论。

(1)WEP-L在不同的寒区流域径流模拟中得到了较好的验证,NSE在0.72以上,相对误差绝对值控制在±11%以内。

(2)5个典型流域的径流量变化趋势不显著,而黄河流域(唐乃亥以上)和黑河流域(莺落峡站以上)的基流指数呈增加趋势,河川基流占比不断增加。

(3)除松花江流域(阿彦浅以上)外,其余4个寒区流域的气候变化对径流的影响较高,贡献率达到78%以上,是径流演变的主导作用。

参考文献(References):

[1] Cheng Guodong. Glaciology and geocryology of China in the past 40 years: progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(3): 213-226. [程国栋. 中国冰川学和冻土学研究40年进展和展望[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 213-226.]

[2] Wang Genxu. Research on the ecological environment change and comprehensive protection in the source area of the Yangtze River[J]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2000. [王根绪. 江河源区的生态环境变化及其综合保护研究[J]. 兰州: 兰州大学出版社, 2000.]

[3] Yang Jianping, Yang Suiqiao, Li Man, et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1436-1445. [杨建平, 杨岁桥, 李曼, 等. 中国冻土对气候变化的脆弱性[J]. 冰川

冻土, 2013, 35(6): 1436-1445.]

[4] Chen Xin, Jin Tiantian, Su Huidong, et al. Construction and application of health assessment index system for Lhasa River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 799-809. [陈歆, 靳甜甜, 苏辉东, 等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 799-809.]

[5] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1/2): 45-59.

[6] Xiao Senyuan, Yang Guang, He Xinlin, et al. Calibration of hydrological modelling by MIKE SHE for the Manas River Basin, Xinjiang, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 1-9. [肖森元, 杨广, 何新林, 等. 玛纳斯河流域MIKE SHE水文模型率定[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 1-9.]

[7] Kirkby M J, Beven K J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Journal, 1979, 24(1): 43-69.

[8] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009[R]. Texas Water Resources Institute Technical Report, No. 406. Temple, USA: Texas Water Resources Institute, 2011.

[9] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1665-1679.

[10] Liang Xu, Wood E F, Lettenmaier D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification[J]. Global and Planetary Change, 1996, 13(1/2/3/4): 195-206.

[11] Jia Yangwen, Wang Hao, Ni Guangheng, et al. Principles and Application of Distributed Watershed Hydrological Model[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2005. [贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.]

[12] Yang Dawen, Herath S, Musiak K. Development of a geomorphology-based hydrological model for large catchments[J]. Proceedings of Hydraulic Engineering, 1998, 42: 169-174.

[13] Xia Jun, Wang Gangsheng, Lü Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain modeling[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 789-796. [夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等.



- 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 789-796.]
- [14] Guo Shenglian, Xiong Lihua, Yang Jing, et al. A DEM and physically based distributed hydrological model[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2000, 33(6): 1-5. [郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于 DEM 的分布式流域水文物理模型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.]
- [15] Yan Yuna, Che Tao, Li Hongyi, et al. Using snow remote sensing data to improve the simulation accuracy of spring snow-melt runoff: Take Babao River basin as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 211-221. [闫玉娜, 车涛, 李弘毅, 等. 使用积雪遥感面积数据改善山区春季融雪径流模拟精度[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 211-221.]
- [16] Gao Bing, Yang Dawen, Liu Zhiyu, et al. Application of a distributed hydrological model for the Yarlung Zangbo river and analysis of the river runoff[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 40-44, 21. [高冰, 杨大文, 刘志雨, 等. 雅鲁藏布江流域的分布式水文模拟及径流变化分析[J]. 水文, 2008, 28(3): 40-44, 21.]
- [17] Zhao Renjun. The Xinanjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1/2/3/4): 371-381.
- [18] Wang Jiahu, Hong Yang, Li Li, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(1): 84-98.
- [19] Chen Xi, Long Di, Hong Yang, et al. Improved modeling of snow and glacier melting by a progressive two-stage calibration strategy with GRACE and multisource data: How snow and glacier meltwater contributes to the runoff of the Upper Brahmaputra River basin?[J]. Water Resources Research, 2017, 53(3): 2431-2466.
- [20] Han Zhongying, Long Di, Han Pengfei, et al. An improved modeling of precipitation phase and snow in the Lancang River Basin in Southwest China[J]. Science China (Technological Sciences), 2021, 64(7): 1513-1527.
- [21] Han Pengfei, Long Di, Han Zhongying, et al. Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 44-59.
- [22] Han Zhongying, Long Di, Fang Yu, et al. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 96-105.
- [23] Chen Xiyun, Guo Dongjing, Gao Xiaodong, et al. Runoff evolution and its impacting factors in the heshuichuan basin of the Jinghe River in the past 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(1): 114-120. [陈锡云, 郭东静, 高晓栋, 等. 泾河水川流域近 50 年径流演变特征及影响因素分析[J]. 地理科学, 2016, 36(1): 114-120.]
- [24] Mo Chongxun, Ruan Yuli, Mo Guiyan, et al. Studying response of runoff to climate change and human activities based on elastic coefficient[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(2): 41-45. [莫崇勋, 阮俞理, 莫桂燕, 等. 基于弹性系数法的径流对气候变化与人类活动响应研究[J]. 水文, 2018, 38(2): 41-45.]
- [25] Zhao Jing, Huang Shengzhi, Huang Qiang, et al. Detecting the dominant cause of streamflow decline in the loess plateau of China based on the latest budyko equation[J]. Water, 2018, 10(9): 1277.
- [26] Liu N, Harper R J, Smettem K R J, et al. Responses of stream-flow to vegetation and climate change in southwestern Australia[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 761-770.
- [27] Ding Xiangyi, Jia Yangwen, Wang Hao, et al. Impacts of climate change on water resources in the Haihe River basin and corresponding countermeasures[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(4): 604-613. [丁相毅, 贾仰文, 王浩, 等. 气候变化对海河流域水资源的影响及其对策[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 604-613.]
- [28] Jia Yangwen, Wang Hao, Zhou Zuhao, et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3/4): 606-629.
- [29] Jia Yangwen, Ding Xiangyi, Wang Hao, et al. Attribution of water resources evolution in the highly water-stressed Hai River Basin of China[J]. Water Resources Research, 2012, 48(2): W02513.
- [30] Cheng Yantao. The study in the infiltration process and the factors of the soil moisture in the permafrost alpine meadow[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. [程艳涛. 冻土高寒草甸草地土壤水分入渗过程及影响因素的试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.]
- [31] Jia Yangwen, Wang Hao, Yan Denghua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe River basin I. Model development and verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 534-542. [贾仰文, 王浩, 严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟(I)——模型开发与验证[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 534-542.]
- [32] Xu Jijun, Yang Dawen, Liu Zhiyu, et al. Large scale distributed hydrological model and its application to the upstream of Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 182-190. [许继军, 杨大文, 刘志雨, 等. 长江上游大尺度分布式水文模型的构建及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 182-190.]
- [33] Chen R S, Song Y X, Kang E S, et al. A cryosphere-hydrology observation system in a small alpine watershed in the Qilian mountains of China and its meteorological gradient[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2014, 46(2): 505-523.
- [34] Wang Guoqing, Zhang Jianyun, He Ruimin. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 853-858. [王国庆, 张建云, 贺瑞敏. 环境变化对黄河中游汾河径流形势的影响研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 853-858.]
- [35] Lin Kairong, He Yanhu, Chen Xiaohong. Identifying the quantitative effect of climate change and human activity on runoff in the Dongjiang River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(11): 1312-1321. [林凯荣, 何艳虎, 陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312-1321.]
- [36] Jiang Yanan, Wang Lei, Wei Xiaomei, et al. Impacts of climate change on runoff of Jinghe River based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 262-270. [降亚楠, 王蕾, 魏晓妹, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化对泾河径流量的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 262-270.]
- [37] Yang Zhenghua. Basic flow calculation and change analysis in the upper reaches of Heihe River[J]. Ground Water, 2011, 33(3): 159-161. [杨正华. 黑河上游基流计算与变化分析[J]. 地下水, 2011, 33(3): 159-161.]
- [38] Chen Liqun, Liu Changming, Hao Fanghua, et al. Change of

- the baseflow and it's impacting factors in the source regions of Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 141-148. [陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 等. 黄河源区基流变化及影响因子分析[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(2): 141-148. ]
- [39] Yang Mingjin, Zhang Bo. The study on affecting factors of runoff changes at Yingluoxia station of Heihe River[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(2): 166-172. [杨明金, 张勃. 黑河莺落峡站径流变化的影响因素分析[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(2): 166-172. ]
- [40] Su Xiaoling, Kang Shaozhong, Wei Xiaomei, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(2): 153-159. [粟晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(2): 153-159. ]
- [41] Wang Guoqing, Zhang Jianyun, Liu Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff[J]. *China Water Resources*, 2008(2): 55-58. [王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. *中国水利*, 2008(2): 55-58. ]

## Runoff evolution simulation and attribution analysis in cold region basin based on WEP-L model

SU Huidong<sup>1,2</sup>, JIA Yangwen<sup>1</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>, LI Yaojun<sup>3</sup>, DU Junkai<sup>1</sup>,  
NIU Cunwen<sup>1</sup>, GAN Yongde<sup>4</sup>, ZENG Qinhuai<sup>1</sup>

(1. *The State Key Laboratory of Simulations and Regulations of Water Cycles in River Basins, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 3. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 4. *The State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China*)

**Abstract:** Cold regions are widely distributed in China, most of which are the headwaters of major rivers of China. Their runoff evolution will have an important impact on the regional even the whole country water resources. Aiming at the special hydrological characteristics under the action of frozen soil in cold region, five representative watersheds in cold regions including in Songhua River, Yellow River, Heihe River, Yangtze River and Yarlung Zangbo River basins are selected. The improved WEP-L model is used to simulate and analyze the temporal and spatial variation of runoff in cold region from 1960 to 2010. Meanwhile, based on the hydrological simulation method, different climate change and land use scenarios are designed to analyze the attribution of runoff changes in cold regions. The results show that: (1) The improved WEP-L has a good fit for runoff in different cold regions. The Nash efficiency coefficient is above 0.72, and the absolute relative error is within  $\pm 11\%$ . (2) The trend of runoff change in five typical basins is not significant, but the base flow index of Tangnaihai and Yingluoxia increased significantly, and passed the 0.01 significance test, indicating that the proportion of basal flow in these two basins is increasing. (3) In addition to the A'yanqian and A'nen watershed of the climate change in the four cold basins has a greater impact on runoff, more than 78%, which is the dominant role in runoff evolution. Relevant studies can provide reference for the study of water cycle and water resources evolution in cold regions.

**Key words:** cold region; WEP-L model; runoff evolution; attribution analysis

(责任编辑: 陈仁升; 编辑: 庞瑜, 周成林)