

# 气候变化对北极勒拿河流域年和季节径流的影响

吕韶燕<sup>1</sup>, 唐寅<sup>2</sup>, 汤秋鸿<sup>2,3</sup>, 李海明<sup>1</sup>, 肖瀚<sup>4</sup>, 谢定昇<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学海洋与环境学院滨海地下水利用与保护实验室, 天津 300457; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国环境科学研究院 国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 北极勒拿河流域径流是北冰洋的主要淡水来源之一, 对北极大气、海冰热力过程和海洋温盐环流产生重要影响。随着气候变化的加剧, 勒拿河流域径流的变化日趋显著。为探究勒拿河流域径流变化对气候变化的响应机制, 本文使用M-K趋势检验分析了1975—2014年勒拿河流域气候及径流的变化趋势并通过构建耦合融雪冻土模块的abcd-cr水文模型, 结合气候情景模拟和径流弹性系数分析, 对不同气候情景下年和季节尺度的径流变化量及径流对气温和降水变化的敏感性进行了定量估算。结果表明: ① 1975—2014年勒拿河年和季节尺度的平均气温均呈上升趋势; 年及夏秋季的平均降水呈上升趋势, 春冬季平均降水呈下降趋势; 年及春、秋、冬季径流呈显著上升趋势, 夏季径流呈减少趋势。② 气候情景模拟结果量化了降水变化和气温变化引起的年及季节径流的变化量。③ 敏感性分析结果表明年径流随降水的增加而增加, 随气温的升高而减少; 降水变化对季节径流的影响与年径流类似, 但引起的径流变化幅度在不同季节呈现显著差异, 其中夏季径流变化幅度最大, 冬季径流最小; 气温变化对季节径流的调节相较年径流更为复杂, 受蒸发的季节性与冻融过程的相互影响, 春季径流随气温的增加而增加, 其余季节径流随气温的增加而减少。

**关键词:** 勒拿河; 径流; 气候变化; abcd-cr模型; 敏感性

DOI: 10.11821/dlxb202411008

## 1 引言

勒拿河是流入北冰洋的第二大河流, 作为北冰洋最主要的淡水来源之一<sup>[1]</sup>, 勒拿河流域具有极其脆弱的生态环境, 是研究北极气候变化及环境响应的重点区域<sup>[2-4]</sup>。研究表明北极地区气候变化加剧<sup>[5-7]</sup>, 加速了勒拿河流域水文循环过程, 并对北极大气、海冰热力过程及海洋温盐环流产生影响<sup>[8]</sup>。勒拿河流域的气温增加使大陆架海的顶层变暖, 导致了海冰破裂, 对北极地区海冰减少的贡献率约为10%<sup>[9]</sup>。因此, 探究气候变化背景下勒拿河径流的变化规律及响应机制, 有助于揭示北极径流与气候之间的紧密联系, 为应对全球气候变化背景下的水资源管理和可持续发展提供科学依据。

历史时期径流的变化趋势作为研究气候变化对径流影响的一个重要切入点备受关注<sup>[10-11]</sup>。Tananaev等<sup>[12]</sup>研究表明1925—2013年期间勒拿河流域的年平均径流量和极端径流量均呈上升趋势; Berezovskaya等<sup>[13]</sup>研究发现1936—2001年该流域年径流量增加了10%。

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2024-09-30

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41901042); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19070302) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41901042; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19070302]

**作者简介:** 吕韶燕(1998-), 女, 山西汾阳人, 硕士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: shaoyan3333@163.com

**通讯作者:** 唐寅(1986-), 女, 贵州贵阳人, 副研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: tangyin@igsrr.ac.cn

虽然对勒拿河流域的水文循环已有较多研究,但以往的研究大多集中在分析年尺度上的径流变化,针对季节尺度径流变化的研究较少,而水资源季节尺度上的分布不均会直接导致不同季节水资源利用与管理的差异。

影响径流量变化的因素有很多,主要为气候因素(如降水、气温等)、下垫面因素(如地形、植被、冻土等)和人为因素。有研究结果表明勒拿河流域气候因素对径流量的影响远大于人为因素<sup>[14]</sup>。Liu等<sup>[15]</sup>利用趋势及相关性分析研究了北极4条河流(勒拿河、科雷马河、育空河和麦肯齐河)在3个冬季阶段(冬初、冬中、冬末)径流量对气候变化的响应,认为冬季径流量的增加与气温和降水的变化密切相关。随着气温升高,勒拿河流域的多年冻土大量融化,活动层厚度增加,土壤储水能力增强,导致径流的增加<sup>[16]</sup>;Suzuki等<sup>[17]</sup>发现西伯利亚四大流域(鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河)的融雪水是西伯利亚4个流域5月份径流增加的主要因素。前人研究已就气候变化背景下勒拿河径流的响应机制展开了充分讨论,但并未进一步量化各控制因子对勒拿河流域年或季节尺度的径流变化的影响程度,即关于该流域径流对各影响因子变化的敏感性尚不清楚。

气候变化对径流的影响评估遵循“气候情景—水文模拟—影响评估”模式<sup>[18]</sup>。气候情景设计的常用方法通常为应用全球气候模式(GCMs)的预估结果<sup>[19-21]</sup>,但GCMs存在较多限制,例如提供的气候变化情景需要降尺度到区域尺度以得到特定研究区的气候信息<sup>[22]</sup>,这一方面依赖地面数据的质量<sup>[23]</sup>,另一方面也要求很高的计算量,随着气候模型数量的不断增加,研究所需的计算成本也相应增加<sup>[24]</sup>。为了弥补GCMs气候情景降尺度的局限,很多研究则采用了气候情景假设法,该方法是在依据现有气候预测未来气候变化的基础上,对研究区月或年度的气候变化进行统一计算<sup>[25]</sup>。该方法在保留历史时期的主要水文气象过程的前提下,融合了气候模式预估的未来气候变化情景,最大限度地减少了计算成本,因而得到了广泛应用<sup>[26-28]</sup>。

水文模型是模拟和预估水文变化的重要工具,能够很好地描述径流的变化过程<sup>[29-30]</sup>。常用的水文模型主要分为两大类,集总式概念性水文模型和分布式物理水文模型。分布式物理水文模型考虑了流域特征及下垫面因素等,在物理过程的刻画、捕捉水文过程的空间异质性及精细时间尺度的水文模拟等方面具有较大的优势<sup>[31-33]</sup>;相较而言,集总式概念性水文模型虽不考虑下垫面特征及降雨不均匀性等因素对径流的影响,但该类模型具有结构简单、参数少、易优化且模拟精度高等特点,常常被用于观测资料稀缺地区的水文模拟研究<sup>[34-35]</sup>;如abcd模型在1981年被Thomas<sup>[36]</sup>提出后,在国内外得到广泛的应用<sup>[37-41]</sup>。Shahid等<sup>[42]</sup>利用abcd和Budyko两种不同的概念性水文模型来量化气候变化对径流的影响,结论表明两种方法的结果具有很好的一致性。为了运用abcd模型进一步描述高寒区冻融过程对水循环的影响,王晓树等<sup>[43]</sup>对该模型进行了修正,加入了依赖气温的水文过程和地下水蒸散发,提出abcd-cr模型,并对格尔木河源区近几十年的月径流量进行了重建,改进后的模型具有更好的模拟效果。随着集总式概念性水文模型的不断发展,该类模型在归因缺资料地区气候变化背景下的径流变化等方面得到了广泛应用<sup>[44-46]</sup>。

径流的弹性系数是评估径流敏感性的重要指标之一<sup>[47-48]</sup>。最早由Schaake<sup>[49]</sup>提出,最初仅考虑降水对径流的弹性系数,之后傅国斌等将年平均气温引入,确定了径流对降水、气温的弹性系数<sup>[50]</sup>。Cooper等利用气候弹性系数量化了美国西部沿海山区夏季最小径流量对冬季降水和夏季潜在蒸散发量的气候弹性<sup>[51]</sup>;李宝富等利用气候弹性系数探讨了中国西北干旱区径流对融雪期长度、温度和降水的敏感性<sup>[52]</sup>;Rasouli等基于物理的寒冷地区水文模拟平台(CRHM)通过考虑30种气候情景组合,利用气候弹性系数研究了科迪勒拉山脉北部的3个流域径流和雪况对降水和气温的敏感性<sup>[44]</sup>。前人研究表明,结合水文模型运用弹性系数可以更准确地量化径流对气候因素的敏感性<sup>[53-55]</sup>。

由于勒拿河流域可利用数据较少、流域面积大、参数化方案复杂、寒区冻融过程对流域径流的影响等因素,本文选取耦合融雪冻土模块的abcd-cr模型结合1975—2014年水文气象观测数据对研究区进行水文分析预估,目的在于揭示勒拿河流域年及季节尺度气象因子及径流的变化趋势;预估未来气候情景下勒拿河流域的径流变化;阐明勒拿河流域年尺度和季节尺度径流对气候变化的响应机制,为勒拿河流域水资源管理提供科学依据。

## 2 研究区概况与数据来源

### 2.1 研究区概况

勒拿河全长4400 km<sup>[56]</sup>,发源于西伯利亚中南部的贝加尔山脉,向北流入拉普捷夫海,进入北冰洋,流域面积约为246万 km<sup>2</sup>,78%~93%的面积分布有多年冻土<sup>[57]</sup>,是流入北冰洋的三大西伯利亚河流之一。流域出口水文站为Stolb水文站,位于70°40′48″N, 127°23′24″E,如图1所示。勒拿河流域属于大陆性温带和亚北极气候区,年平均降水量较低(200~500 mm),年均气温为-8℃,且随纬度升高而不断下降。勒拿河流域内水网密布,主要支流有维柳伊河、阿姆加河、阿尔丹河和维里海河;流域经过的行政区主要为萨哈共和国、伊尔库茨克州、布里亚特共和国、赤塔州、阿穆尔州及哈巴罗夫斯克边疆区;径流特征为春季融雪洪水、夏秋雨水洪水、冬季水位极低<sup>[58]</sup>,年平均径流量为17221 m<sup>3</sup>/s<sup>[59]</sup>,约占北冰洋淡水输入量的7%,仅次于叶尼塞河,是欧亚大陆北部河流中径流量第二大的流域<sup>[60]</sup>。勒拿河流域植被覆盖率分别为森林(84%)、灌木(9%)、草地(3%)、农田(2%)和湿地(1%)<sup>[61]</sup>。与西伯利亚其他大型河流相比,如鄂毕河和叶尼塞河,勒拿河流域内的经济活动较少,人类活动比较小<sup>[62]</sup>。

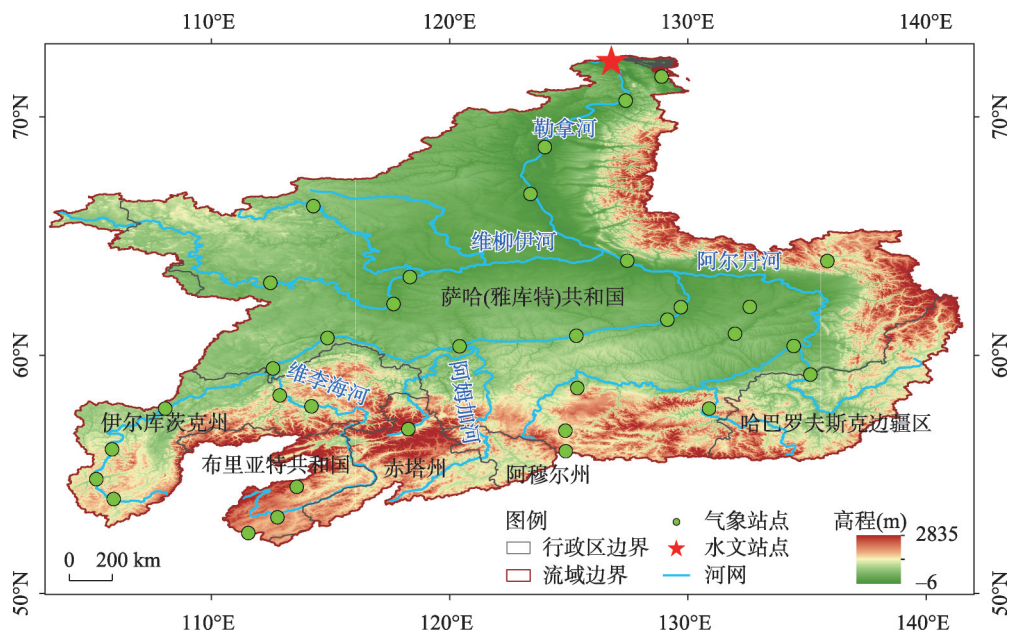


图1 勒拿河流域概况

Fig. 1 Overview of the Lena River basin

### 2.2 数据来源

本文所需的流域出口Stolb水文站径流数据来自俄罗斯水文气象部门,日降水量和平均气温数据来自全球降水气候中心(GPCC)勒拿河流域内34个气象站点的观测数据。



根据原始数据的数据质量和可利用情况等,将研究时段统一到1975—2014年期间,最小时间尺度统一为月尺度。为便于模型的校准和验证,将原始数据中的径流量通过除以控制站的集水面积换算为径流深,与降水量和潜在蒸散发量等统一单位。流域的面降水量和气温通过流域内所有气象站点的算数平均值计算求得。结合数据可利用情况和未来气候情景设计方案,潜在蒸散发采用Hamon模型通过月气温估算求得<sup>[63]</sup>。参照流域的气候特点,春、夏、秋、冬四季分别对应每年的3—5月、6—8月、9—11月、12—次年2月。

### 3 研究方法

#### 3.1 M-K趋势检验

Mann-Kendall (M-K) 趋势检验是一种非参数检验方法,该方法适用性广,且不受离群值和遗漏值干扰,因此在水文、气象等领域得到了广泛应用<sup>[64-65]</sup>。M-K趋势的斜率是根据泰尔—森斜率计算的<sup>[66]</sup>。M-K趋势检验方法中,假定要素的时间序列为 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,其中, $n$ 为样本序列的个数,则检测统计量 $S$ 的计算公式:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $x_j$ 、 $x_i$ 分别为第 $j$ 年、第 $i$ 年的具体值,进一步得到标准化统计量 $Z$ 如下式:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

本文中设定 $\alpha=0.05$ ,对应 $Z$ 统计量的双侧置信区间为 $\pm 1.96$ 。如果 $|Z| \geq 2.32$ ,则表示该序列在99%的置信水平上表现为极显著趋势;如果 $|Z| \geq 1.96$ ,则表示该序列在95%的置信水平上表现为显著趋势;反之,则表示该序列趋势不明显。 $Z > 0$ ,表示数据序列存在上升趋势;反之,存在下降趋势。

#### 3.2 abcd-cr模型

勒拿河流域位于高寒区,故研究选用了考虑水循环冻融过程的abcd-cr模型,该水文模型在原有abcd模型的基础上发展而来,在寒区水文模拟中得到广泛应用<sup>[43]</sup>,abcd-cr模型的原理如图2所示。模型考虑到积雪的存在,通过月平均气温将总降水量 $P$ 分为降雨量 $P'$ 和降雪量 $P^*$ 。当气温小于0时,降雪 $P^*$ 增加了积雪储存量 $S^*$ ,融雪径流 $D^*$ 为0,浅层冻土减少地下水的补给和排放;当气温大于0时,形成融雪径流 $D^*$ ,与降雨量 $P'$ 一同汇入土壤含水层,地下水的补给和排放也随之增大。假设地下水蒸散量 $E^*$ 与地

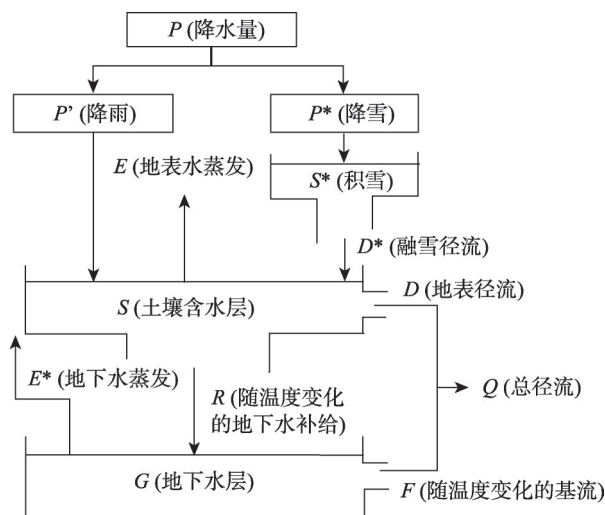


图2 abcd-cr模型<sup>[43]</sup>

Fig. 2 abcd-cr model

下水储存量 $G$ 和潜在蒸发量 $E_0$ 减去地表水蒸散量 $E$ 成正比，最终通过土壤含水层和地下水层水量平衡方程得到总径流。

abcd-cr模型有3个状态变量初值 $S_0$ 、 $G_0$ 和 $S_0^*$ ，模型待校准的参数包括7个，具体为 $a$ 、 $b$ 、 $c_0$ 、 $d_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $G_{\max}$ ，其物理意义及取值范围如表1所示。

3.3 模型的运行及评价

为消除初始状态对径流模拟的影响，校准前需要预热模型，预热期设定为1975年1月—1984年12月；将模型的校准期设为1985年1月—2004年12月，用于确定模型参数的最优值；模型的验证期设为2005年1月—2014年12月，用于评估模型性能。通过对比校准期和验证期的实测径流和模拟径流，评价模型的准确度。采用纳什效率系数（NSE）、平均相对误差（MRE）和确定性系数（ $R^2$ ）对模型的模拟效果进行评价<sup>[22]</sup>。当NSE越接近1时，模拟径流精度越优；当NSE<0时，模拟径流误差较大。MRE是模拟的径流深偏离实测径流深的数值，该数值越大，说明模拟值与实测值的偏差越大。当确定性系数 $R^2$ 越接近1时，模型模拟径流误差越小。

3.4 气候情景设计

本文的目的在于预估未来气候变化可能引起的径流变化量以及定量评估径流对降水和气温变化的敏感性。基于该实验目的，结合勒拿河流域的地理位置，设计了单一气候变化情景和降水、气温组合变化情景，并基于构建的abcd-cr水文模型开展相关情景假设试验分析，以阐明气候变化背景下流域径流的响应机制。

研究选择降水和气温的变化范围是基于最新的共享经济路径（SSP）估计的，SSP采用了CMIP6气候模式开发的一套由不同社会经济模式驱动的排放情景<sup>[67]</sup>。Nayak等<sup>[68]</sup>与Rasouli等<sup>[28]</sup>在探究气候情景对径流变化影响时，分别设计了 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的气温变化与 $\pm 20\%$ 的降水变化的气候变化情景；Cai等<sup>[69]</sup>及McCrystall等<sup>[70]</sup>研究表明在SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下，预计21世纪末包括勒拿河流域在内的北极地区的年降水量至少增加30%，升温幅度将高达3  $^{\circ}\text{C}$ 。结合勒拿河流域实际情况及数据分布，研究设计单一气温变化的情景具体包括：逐月平均气温分别变化0  $^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；单一降水变化的情景具体包括：逐月降水量分别变化0、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 。通过单一气温与降水变化情景的两两组合，获取降水和气温的组合变化情景，最终共设计了49种气候变化情景（表2），这些变化涵盖了在SSP1-2.6、SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下对勒拿河流域所在区域本世纪末的预估范围。

表1 abcd-cr模型参数意义及取值范围

Tab. 1 The physical meanings and ranges of parameters in the abcd-cr model

参数	物理意义	取值范围
$a$	土壤完全饱和和前径流倾向性	(0, 1]
$b$	蒸发量与土壤含水量的和	(0, 1000]
$c_0$	土壤水补给地下水的比例	(0, 1]
$d_0$	地下水出流速度	(0, $+\infty$ ]
$\alpha$	负气温影响的附加参数c	(0, 0.2]
$\beta$	融雪速度	(0, 0.2]
$G_{\max}$	潜在的最大地下水储存量	[1, 10]
$S_0$	土壤初始蓄水量	(0, b]
$G_0$	地下水初始蓄水量	(0, 500]
$S_0^*$	积雪和/或冰川中的固体水储量	(0, $+\infty$ ]

表2 设计的勒拿河流域气候变化情景

Tab. 2 Climate change scenarios in the Lena River basin

降水变化 $\Delta P$ (%)	气温变化 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-30	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$
-20	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$
-10	$S_{15}$	$S_{16}$	$S_{17}$	$S_{18}$	$S_{19}$	$S_{20}$	$S_{21}$
0	$S_{22}$	$S_{23}$	$S_{24}$	$S_{25}$	$S_{26}$	$S_{27}$	$S_{28}$
10	$S_{29}$	$S_{30}$	$S_{31}$	$S_{32}$	$S_{33}$	$S_{34}$	$S_{35}$
20	$S_{36}$	$S_{37}$	$S_{38}$	$S_{39}$	$S_{40}$	$S_{41}$	$S_{42}$
30	$S_{43}$	$S_{44}$	$S_{45}$	$S_{46}$	$S_{47}$	$S_{48}$	$S_{49}$

### 3.5 不同气候情景下的径流变化量

基于已校准好参数的abcd-cr模型模拟49种不同情景下1975—2014年的径流过程。径流的变化率公式为:

$$\eta = \frac{\overline{Q_{P+\Delta P, T+\Delta T}} - \overline{Q_{P, T}}}{\overline{Q_{P, T}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\eta$ 为径流的相对变化率;  $\overline{Q_{P+\Delta P, T+\Delta T}}$ 为降水增加 $\Delta P$ 、气温升高 $\Delta T$ 情景下模拟的年或者季节平均径流;  $\overline{Q_{P, T}}$ 为降水气温不变情景下模拟的年或者季节平均径流。

### 3.6 径流的弹性系数

径流的弹性系数定义为单位径流变化与单位气候变量变化的比率<sup>[71-72]</sup>:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial Q/Q}{\partial x/x} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_x$ 为径流的弹性系数;  $x$ 表示降水或气温;  $\partial Q/Q$ 和 $\partial x/x$ 分别为单位径流和单位气候变量的变化率。可理解为单位降水或气温每变化1%或1℃导致的单位径流变化的百分比,其绝对值越高,表明径流对该因素越敏感。本文中径流的弹性系数将基于单一控制气温或降水变量的气候情景模拟结果,通过线性拟合的气温或降水情景引起的径流变化率的斜率估算获取<sup>[44]</sup>。

## 4 结果与讨论

### 4.1 气温的变化趋势

1975—2014年勒拿河流域年平均气温呈极显著上升趋势( $Z=2.32$ ),气温增速为0.3℃/10a,符合全球变暖趋势,最高年平均气温为-5.9℃(2007年),最低年平均气温为-9.6℃(1987年)(图3a)。该流域多年平均月气温只有5—9月在0℃以上,其余月份均在0℃以下(图3b)。从20世纪70年代开始,各年代际的月平均气温与年平均气温有相似趋势,且根据图3b可以看出5—11月各年代际间月平均气温逐渐升高;12月—次年4月,各年代际间发生先升高再降低的变化。总体来说,5—11月增温最明显。

勒拿河流域在春季、夏季平均气温均呈显著上升趋势( $|Z|>2.32$ 、 $p<0.01$ ),秋季、冬季均呈不显著上升趋势( $|Z|<1.96$ )(图4)。夏季升温最为明显,气温增速为0.5℃/10a。春季最高温为1990年出现的-2.0℃,最低温为1980年出现的-8.9℃(图4a);夏季为气

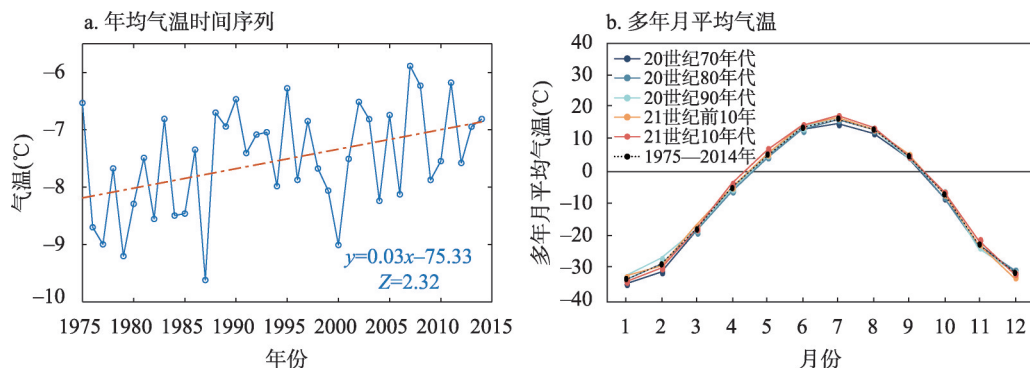


图3 1975—2014年勒拿河流域年均气温时间序列及多年月平均气温

Fig. 3 Time series of annual temperature during 1975-2014 and mean monthly temperature in the whole period and different decades in the Lena River basin

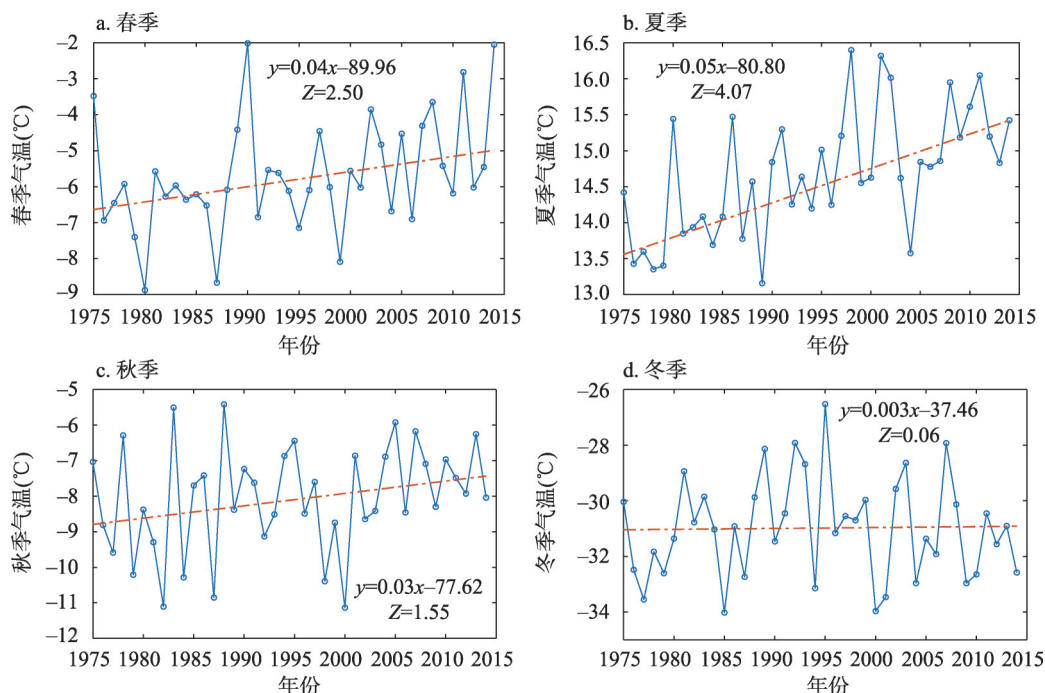


图4 1975—2014年勒拿河流域不同季节的平均气温时间序列

Fig. 4 Time series of seasonal temperature during 1975-2014 in the Lena River basin

温最高的季节,最高温为1998年出现的 $16.4^{\circ}\text{C}$ ,最低温为1989年出现的 $13.2^{\circ}\text{C}$ (图4b);秋季最高温为1988年出现的 $-5.4^{\circ}\text{C}$ ,最低温为2000年出现的 $-11.1^{\circ}\text{C}$ (图4c);冬季最高温为1995年出现的 $-26.5^{\circ}\text{C}$ ,最低温为1985年出现的 $-34.0^{\circ}\text{C}$ (图4d)。

#### 4.2 降水的变化趋势

1975—2014年勒拿河流域年平均降水量呈上升趋势,降水增速为 $3.8\text{ mm}/10\text{a}$ ,最高年降水量为 $489.0\text{ mm}$ (2013年),最低年降水量为 $269.3\text{ mm}$ (1984年,图5a)。该流域年内降水变化趋势为先减少后增加再减少,5月降水增量显著增加,7月为降水量峰值。从20世纪70年代开始,各年代际间降水变化呈波动趋势,总体来说,21世纪10年代7—8月降水量增加最为明显(图5b)。

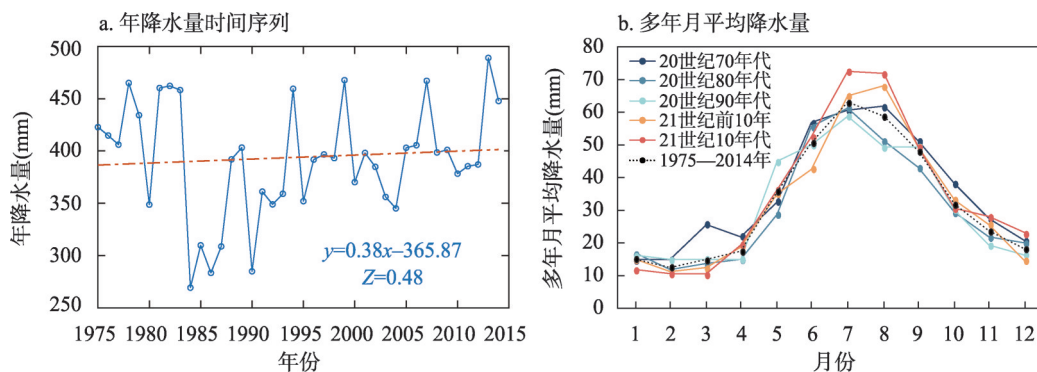


图5 1975—2014年勒拿河流域年降水量时间序列及多年月平均降水量

Fig. 5 Time series of annual precipitation during 1975-2014 and mean monthly precipitation in the whole period and different decades in the Lena River basin



勒拿河在春季、冬季呈不显著减少趋势 ( $|Z| < 1.96$ ) (图6a、6d), 夏季、秋季降水量均呈不显著增加趋势 ( $|Z| < 1.96$ ) (图6b、6c)。夏季降水增加最为明显, 增速为8.8 mm/10a; 春季降水增速最小, 为-0.8 mm/10a。从四季降水量分配来看, 夏季降水量占比最大, 多年均值达172.9 mm, 约占全年降水量的44%, 降水量最大值出现在1982年, 为290.6 mm, 降水最少出现在1990年, 为103.8 mm; 秋季降水约占全年降水量的27%, 为103.9 mm, 其次春季降水量均值为68.5 mm, 约占全年降水量的17%, 冬季降水量为46.5 mm, 占全年降水量的12%。

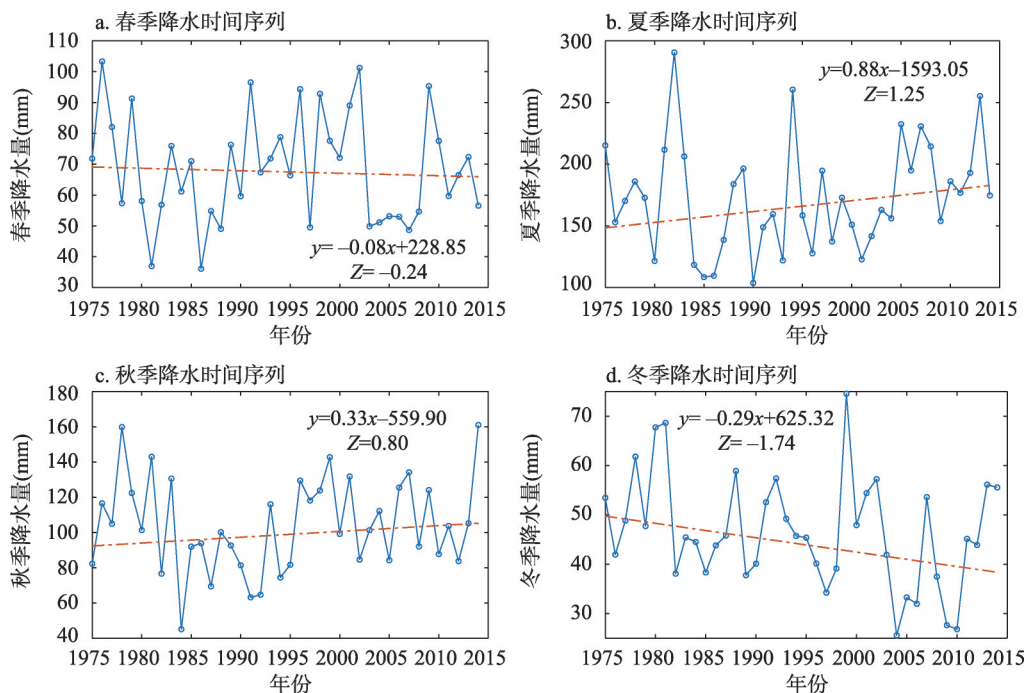


图6 1975—2014年勒拿河流域不同季节的降水时间序列

Fig. 6 Time series of seasonal precipitation during 1975-2014 in the Lena River basin

### 4.3 径流的变化趋势

1975—2014勒拿河流域年平均径流为273 mm, 年径流呈显著上升趋势 ( $|Z| > 1.96$ ), 增速为12 mm/10a (图7a)。该流域径流在各月的分配很不均匀, 差异极大 (图7b)。1—4月的径流均小于10 mm, 且有减少趋势; 5—6月径流明显增加, 于6月突增达到峰值, 而后迅速减少; 7—11月径流减速平缓, 至11—12月, 径流趋于稳定状态, 再次降至10 mm以下。因此, 夏季径流在年内占主导地位; 2000年之前的年代际径流年内变化趋势相似; 从21世纪10年代5月份开始, 月平均径流发生明显增加变化, 且6月份峰值相较之前有所下降。此现象与Suzuki等发现包括勒拿河在内的西伯利亚四条河流出现融雪期 (3—4月) 显著提前导致5月径流增大, 6月径流减少的现象一致<sup>[18]</sup>。

勒拿河流域春季、冬季径流均呈极显著增加趋势 ( $|Z| > 2.32$ ) (图8a、8d), 通过99%的显著性检验, 秋季径流呈显著增加趋势 ( $|Z| > 1.96$ ) (图8c), 夏季呈不显著减少趋势 (图8b)。春季径流增速为6.2 mm/10a, 增加最为明显。全球变暖导致的融雪期提前使春季径流呈增加趋势<sup>[72]</sup>; 此外, 融雪期的提前导致了夏季剩余冰量减少, 从而使夏季径流呈减少趋势<sup>[73]</sup>; 而秋季、冬季径流呈增加趋势主要受降水和冻土融化的影响<sup>[74-75]</sup>。



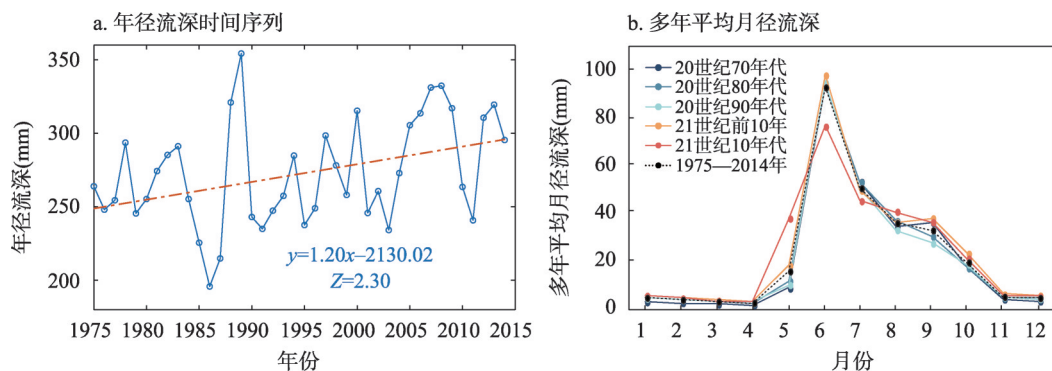


图7 1975—2014年勒拿河流域年径流时间序列及多年平均月径流

Fig. 7 Time series of annual streamflow during 1975-2014 in the Lena River basin and mean monthly streamflow in the whole period and different decades

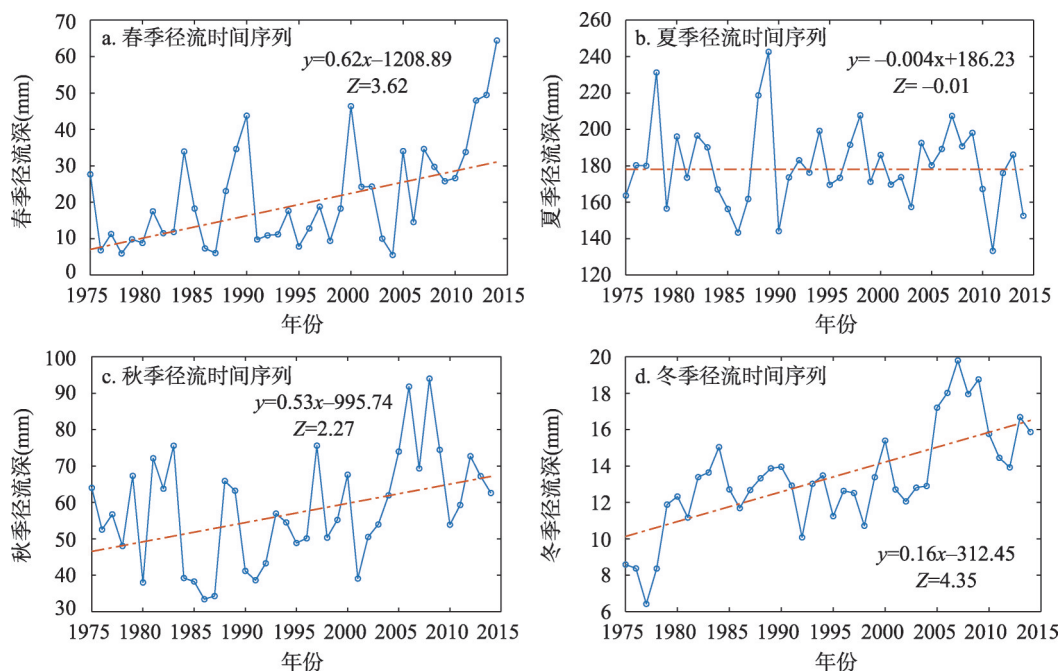


图8 1975—2014年勒拿河流域不同季节的径流时间序列

Fig. 8 Time series of seasonal streamflow during 1975-2014 in the Lena River basin

#### 4.4 abcd-cr模型的校准与验证

基于降水、气温、潜在蒸散发及径流数据，应用abcd-cr模型对勒拿河流域1975—2014年径流进行月尺度模拟（图9）。

abcd-cr模型预热得到的地下水初始蓄水量、土壤水初始蓄水量以及积雪和冰川中的固体水储量分别取1 mm、50 mm和70 mm。abcd-cr模型校准得到的7个参数的取值（表3），符合类似研究给出的参数范围。模拟径流的纳什效率系数（ $NSE$ ）、平均相对误差（ $MRE$ ）、确定性系数（ $R^2$ ），在校准期（1985—2004年）分别为0.87、8.79%、0.91；在验证期（2005—2014年）分别为0.80、10.23%、0.86（表4）。

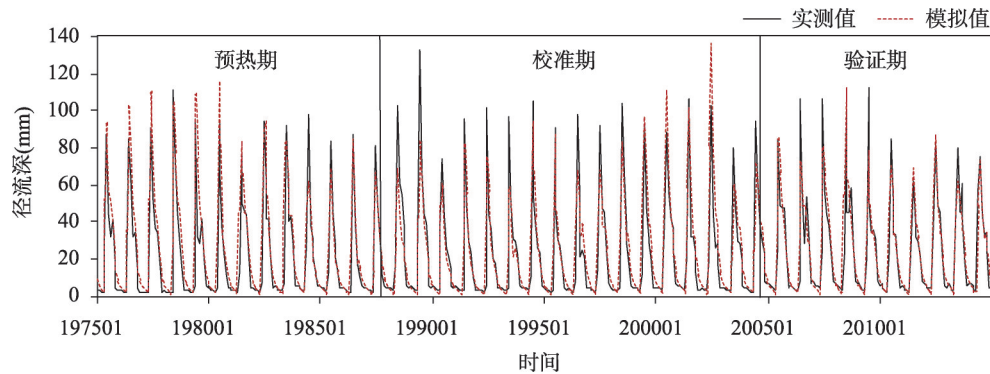


图9 abcd-cr模型模拟的月径流及实测月径流的时间序列  
Fig. 9 Time series of observation and simulated monthly streamflow by abcd-cr model

表3 参数模拟的校准值 Tab. 3 Values of calibrated parameters							表4 模型模拟效果评价结果 Tab. 4 Performance of abcd-cr model		
模拟参数							<i>NSE</i>	<i>MRE</i> (%)	<i>R</i> <sup>2</sup>
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i> <sub>0</sub>	<i>d</i> <sub>0</sub>	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>G</i> <sub>max</sub>	校准期	验证期	
0.001	231.990	0.999	0.699	0.102	0.045	12.740	0.87	0.80	0.91 0.86

根据*NSE*、*MRE*和*R*<sup>2</sup> 3项指标来看, abcd-cr模型在校准期与验证期均有较好表现, 验证期的模拟精度略低于校准期, 表明abcd-cr模型在勒拿河流域有较好的适用性, 可用于后续评估研究。但如表5所示, *MRE*在5月和11月的指标偏大, 表明这两月模拟的径流偏大, 模拟结果存在一定的不确定性。如图3b可知, 勒拿河流域5月的气温是由零下变为零上即融化过程开始启动的阶段, 而从11月开始, 气温基本接近最低温, 温度的变化幅度变化不大, 即该月是冻结过程趋于稳定的开始。换句话说, 5月和11月涉及的冻融过程都趋近于非稳态, 而在abcd模型假设中, 没有考虑非稳态的冻融过程, 因此, 这个模型的简化可能造成了模拟结果的偏大。类似的由于模型概化导致的误差也出现在多个北极地区的水文模拟研究中, 如Slater等将5个分布式模型的模拟结果与北极四大流域的观测结果进行了比较, 发现模型的水文过程往往与春季最大径流量不同步, 过早达到峰值<sup>[76]</sup>。虽然5月和11月的模拟值存在较大误差, 但其流量相对较小, 仅占年总径流量的5.82%和1.89%; 由于研究主要关注年和季节尺度的模拟径流, 总体而言对研究结论的影响不大。

表5 模型MRE 各月评价结果(%) Tab. 5 Monthly evaluation results of model MRE												
月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
校准期	10.35	5.25	20.08	55.16	196.10	15.71	9.27	4.41	1.82	5.27	104.43	55.34
验证期	10.75	16.31	27.59	57.69	53.73	11.61	11.21	4.92	11.88	3.44	99.38	33.56

4.5 气候变化对径流的影响

**4.5.1 不同气候情景下径流的变化量** 基于abcd-cr模型分别模拟了49种不同情景下的径流响应过程, 计算年径流变化率(图10)。降水变化是径流变化的主控因子, 当气温不变, 降水从-30%增加到30%时, 径流的变化幅度为10.33%到31.20%; 气温变化可以调节径流变化, 当降水不变, 气温从-3℃增加到3℃时, 径流的变化幅度在0.25%到5.12%。  
春季径流变化主要受气温影响, 当气温不变, 降水从-30%增加到30%时, 春季径流的变化幅度在9.74%到29.64%; 当降水不变, 气温从-3℃增加到3℃时, 春季径流的变

化幅度在13.39%到41.51%（图11a）。夏、秋、冬季径流的变化与年径流一致，主要受降水变化影响，当气温不变，降水从-30%增加到30%时，夏、秋、冬季径流的变化幅度在11.25% 到 34.61%、9.45% 到 28.69%、3.43%到12.82%；当降水不变，气温从-3℃增加到3℃时，夏、秋、冬季径流的变化幅度在0.33%到14.89%、1.62%到9.73%、0.84%到5.5%（图11b~11d）。

**4.5.2 径流对降水和气温变化的敏感性**  
基于对气温或降水单一控制变量的气候情景模拟结果计算得到径流的降水和气温弹性系数。如图12所示，年径流弹性系数 $\varepsilon_p$ 为1.03，表示气温不变时降水量每增加1%，年径流量增加1.03%，这可能是由于降水增加会加速冰雪融化<sup>[77]</sup>；年径流弹性系数 $\varepsilon_T$ 为-1.54，表明降水不变时气温每升高1℃，年径流量减少1.54%。值得注意的是（图12b），在

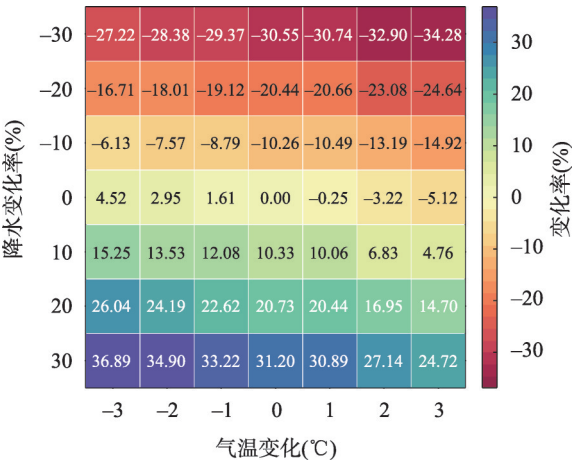


图 10 不同气候情景下年径流变化率分布热图

Fig. 10 Heat map of annual streamflow change rates under different climate scenarios

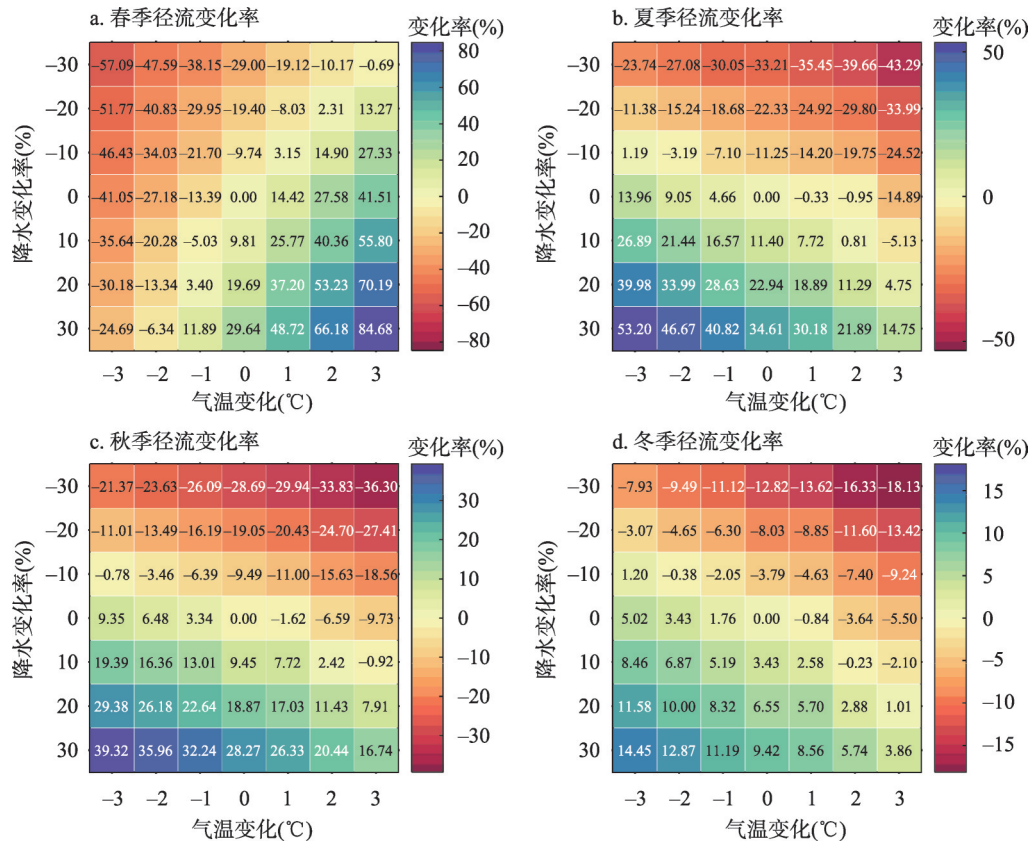


图 11 不同气候情景下季节径流变化率分布热图

Fig. 11 Heat map of seasonal streamflow change rates under different climate scenarios

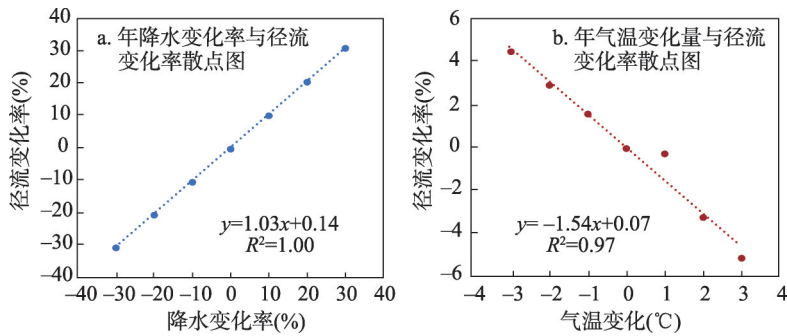


图 12 年降水变化率和气温变化量与径流变化率的散点图

Fig. 12 The scatter plot of annual precipitation change rates and temperature changes versus streamflow change rates

0℃以上的增温过程,径流变化随气温增加呈现比较显著的非线性变化特点。具体来看,当气温变化从0℃变为1℃,径流变化-0.25%;从1℃变为2℃,径流变化-3.22%;从2℃变为3℃,径流变化-5.12%。究其原因可能是当气温变化大于0℃,冻融过程对径流的影响更为显著。对比来看,在非寒区,如中国黄河花园口水文站以上流域,气温升高使径流减少的过程中径流并没有出现拐点<sup>[78]</sup>。因此,高寒区冻融的调节作用将影响流域径流对气温变化的敏感性。

在季节尺度上,春、夏、秋、冬季径流弹性系数 $\varepsilon_p$ 和 $\varepsilon_T$ 分别为0.98和13.75、1.13和-4.70、0.95和-3.16、0.37和-1.70。当气温不变,降水变化从-30%增加到30%(图13a),夏季径流弹性系数 $\varepsilon_p$ 最大为1.13,表明夏季径流对降水变化的响应更敏感,其次是春季径流弹性系数 $\varepsilon_p$ 为0.98,最小的是冬季径流弹性系数 $\varepsilon_p$ 为0.37。当降水不变,气温变化从-3℃增加到3℃(图13b),夏、秋、冬季径流弹性系数 $\varepsilon_T$ 均为负值,分别为-4.70、-3.16、-1.70,表明这3个季节径流随气温升高有不同程度的减少,这对冬季径流而言可能与实际不符,暗示模型对冬季冻融过程描述存在一定局限。春季径流弹性系数 $\varepsilon_T$ 为13.75,表明春季径流随着气温升高而增加,且春季气温弹性系数的绝对值 $|\varepsilon_T|$ 最大,春季径流对气温变化的响应更敏感,揭示了气温引起的冻融过程对春季产流的影响。

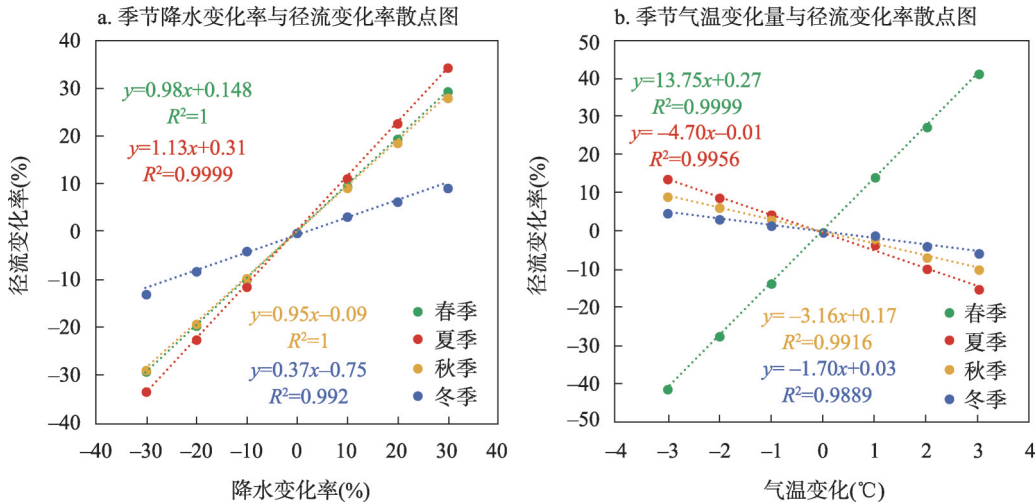


图 13 不同季节降水变化率和气温变化量与径流变化率的散点图

Fig. 13 The scatter plot of seasonal precipitation changes and temperature changes versus runoff changes



5 讨论

5.1 径流变化的响应机制

**5.1.1 年径流变化的响应机制** 本文重点分析了降水和气温对径流变化的影响。降水通过降雨和降雪两种方式到达地表，稳定地供应地表径流<sup>[74]</sup>。研究结果表明降水是勒拿河流域年径流变化的主控因子，与Zhang等使用5种CMIP6 GCM气候情景预估结果一致<sup>[59]</sup>。

同时，气温对径流的影响不容忽视。干旱区气温升高会使流域的蒸散发量增加，进而导致径流减少<sup>[50]</sup>。与此不同的是，位于高寒区的勒拿河流域，气温升高不仅会使流域蒸散发量增加，而且存在冻融的调节过程。如表6所示，当降水不变，气温从0℃增加到3℃，地表径流持续减少，而基流和融雪径流有先增加再减少的变化过程。冻融过程会使多年冻土退化，活动层厚度增加，土壤储水能力提高，增强了下渗能力<sup>[79]</sup>，从而抵消蒸发的影响使基流以及融雪径流增加。随着气温进一步地升高，增大蒸发量的同时冻土退化调节作用开始减弱，土壤含水率降低，净降水优先转化为土壤水分<sup>[75]</sup>，从而降低地下水补给率导致了基流减少，冰川积雪也随着温度升高而减少导致融雪径流也会减少。因此，径流对气温的响应过程与气温升高导致蒸散量的增加以及冻融过程的调节有关。

表6 降水不变气温升高情景下模拟的年径流中的各径流成分

Tab. 6 Components of simulated runoff under the scenario of the constant precipitation and increasing temperature				
	S <sub>25</sub> 降水不变气温不变	S <sub>26</sub> 降水不变气温升高1℃	S <sub>27</sub> 降水不变气温升高2℃	S <sub>28</sub> 降水不变气温升高3℃
地表径流(mm)	40.96	39.17	36.49	34.11
基流(mm)	133.84	134.84	129.44	127.28
融雪径流(mm)	132.58	132.61	131.56	130.26

除了降水和气温，植被、地形、土壤，人类活动等也对径流变化存在一定的影响。植被覆盖对西伯利亚流域径流变化的影响取决于环境条件和森林覆盖的空间分布<sup>[80]</sup>；在西伯利亚部分地区，由于上空较高的气温和较深的积雪覆盖，过去几十年来，多年冻土温度升高了2℃以上，活动层厚度增加了25%~30%，土壤储水能力提高，因此对于以永久冻土为主的流域，由于冻土融化而导致的基流对年径流的贡献将继续增加<sup>[81]</sup>。McClelland等评估了1936—1999年间欧亚北极六大流域径流变化的潜在影响因素，表明降水是径流变化的主控因素，其次，大坝建设、永久冻土的融化和火灾的增加都可能导致径流变化<sup>[82]</sup>。

**5.1.2 季节性径流变化的响应机制** 在季节时间尺度上，春季径流增速最明显是由于春季径流与降水、气温均呈正相关关系，若未来气温持续变暖，春季径流将会进一步增大，易发生洪水事件<sup>[56]</sup>；只有夏季径流呈下降趋势，而夏季径流与降水呈正相关关系，与气温呈负相关关系，如果降水和融化的永久冻土所产生的径流不能充分补偿缺水，该流域的夏季径流将进一步减少；秋、冬季径流显著增加，主要受降水的影响。Hiyama等利用陆面耦合模型和分布式水文模型，对1979—2016年勒拿河流域冬季径流对冻土融化和土壤湿度变化的影响进行分析，研究结果表明勒拿河流域冬季径流量的增加与气候变化引起的多年冻土融化和夏季净降水增加密切相关<sup>[75]</sup>。由此得知气温升高，多年冻土融化，冻土活动层变厚，同时夏季降水增加致使冬季地下水储量增加，从而导致冬季径流量显著增加。因此，若未来气温持续上升，极端径流事件可能会经常发生，需要针对不同气候变化影响的季节径流进行更精细的年内水管理。

## 5.2 北极大河径流变化及其气候敏感性

勒拿河、鄂毕河、叶尼塞河等流域作为环北极典型流域,其径流变化直接影响北冰洋的温盐环流,因而评估北极大河流域气候变化对于径流变化的影响一直是研究热点。在北极大河的现有径流变化研究中,都发现最近几十年出现了明显的径流变化。1936—2019年西伯利亚3条大河(鄂毕河、叶尼塞河和勒拿河)的径流分别增加了7.7%、7.4%、22.0%<sup>[81]</sup>,故勒拿河径流增加最为明显。Hudson等利用MIKE SHE水文模型结合GCM模拟结果构建气候变化情景结果表明,勒拿河及其主要支流的径流量将增加<sup>[83]</sup>;研究发现,麦肯齐河、勒拿河和叶尼塞河春季和冬季径流有明显的增加趋势,夏季有下降趋势,而鄂毕河冬季径流减少,夏季径流略有增加<sup>[84]</sup>。此外,气温升高导致融雪期从6月提前到5月,从而导致6月的最大径流量降低<sup>[18]</sup>,与本文结果均一致。胡弟弟等基于1936—2017年的水文气象数据,采用相关性分析方法,通过与其他研究对比简要分析了勒拿河各季节径流变化发生的原因<sup>[57]</sup>;隋翠娟等对进入北冰洋的4条主要河流分析,认为春季气温与春季径流量呈正相关,降水与径流量基本上为同步正相关<sup>[72]</sup>,这与本文的结论一致。但这种基于统计的分析方法未能对区域气候变化对径流的影响程度进行定量评估。本文针对气候变化对不同时间尺度下径流的影响程度进行了系统性研究,并定量评估了流域径流对气温和降水变化的敏感性。结果证实了以往研究的结论,即勒拿河流域径流量总体呈增加趋势,并加深了对季节性径流变化的认识,这些变化对气温升高和降水增加有不同的响应。由于径流变化涉及多种水文过程对气候变化的响应,因此,为了更好地了解气候变暖对泛北极流域径流的影响,对北极进行长期的气候水文观测是必不可少的。

## 5.3 不足和展望

本文深入分析了气候变化对勒拿河流域年及季节尺度径流变化的影响程度,但仍有诸多不足之处。首先,研究区的观测资料较为稀缺,为了解决这一问题,研究选用了观测数据要求较少的集总式概念性水文模型来重建流域的水文过程,但该类模型并未加入流域地形特征、土地利用类型、植被覆盖等因子,因而无法模拟水循环过程中的空间异质性,从而难以揭示勒拿河流域径流变化及其响应机制的区域规律。其次,流域径流的影响因素众多,本文只考虑了降水和气温对径流的影响,实际上,下垫面变化、人类活动等因素对勒拿河流域径流产生的影响也不可忽略。此外,本文的气候变化情景是采用对一年当中每月降水和气温统一增加或降低特定数值设定的,这样就难以刻画未来气候的季节性变化,从而使得模拟的季节性径流的变化量存在一定的不确定性。

综上,随着数据的积累和研究的深入,后期将进一步完善相关研究,通过搭建勒拿河流域的分布式物理水文模型,揭示气候变化对北极勒拿河流域年和季节径流影响的区域规律,并考虑下垫面变化和人类活动对径流的影响,更全面地阐明变化环境下流域径流的响应机制,最后采用全球气候模式(GCMs)提供的未来气候情景,更科学地预估流域未来的径流变化。

## 6 结论

本文基于M-K趋势检验分析了历史时期(1975—2014年)勒拿河流域气候及径流的变化趋势,构建了耦合融雪冻土模块的abcd-cr水文模型,结合气候情景模拟和径流弹性系数,定量评估了不同气候情景下年和季节尺度径流的变化量以及流域年和季节尺度径流对气温和降水变化的敏感性。本文的主要发现如下:

(1) 1975—2014年勒拿河年以及季节尺度平均气温均呈上升趋势,且只有5—9月在0℃以上;年以及夏秋季平均降水量呈上升趋势,秋冬季平均降水量呈下降趋势,夏季平均降水量增加最为明显,且7月降水量最大;年以及春、秋、冬季径流均呈显著上升趋势,夏季径流呈减少趋势且在年内占主导地位,21世纪10年代5月份的平均月径流发生明显增加变化,且6月份径流峰值相较之前有所下降。

(2) 气候情景模拟结果量化了降水变化和气温变化引起的年及季节径流的变化量。

(3) 基于敏感性分析的结果可知,对年径流而言,其弹性系数 $\varepsilon_p$ 为1.03和 $\varepsilon_T$ 为-1.54,说明年径流随降水的增加而增加,随气温的升高而减少;对季节径流而言,春、夏、秋、冬季径流弹性系数 $\varepsilon_p$ 分别为0.98、1.13、0.95和0.37,表明降水变化对其调节方式与年径流类似,但径流随降水的变化幅度在不同季节呈现显著差异,其中夏季径流变化幅度最大,冬季径流变化幅度最小;春、夏、秋、冬季径流弹性系数 $\varepsilon_T$ 分别为13.75、-4.70、-3.16和-1.70,表明气温变化对季节径流的调节则较年径流更为复杂,受蒸发的季节性与冻融过程的相互作用,春季径流随气温的增加而增加,其余季节径流则随气温的增加而减少。

## 参考文献(References)

- [1] Yang D Q, Ye B S, Shiklomanov A. Discharge characteristics and changes over the Ob River Watershed in Siberia. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(4): 595. DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0595:DCACOT>2.0.CO;2.
- [2] Ogneva O, Mollenhauer G, Juhls B, et al. Particulate organic matter in the Lena River and its delta: From the permafrost catchment to the Arctic Ocean. *Biogeosciences*, 2023, 20(7): 1423-1441.
- [3] Sanders T, Fiencke C, Fuchs M, et al. Seasonal nitrogen fluxes of the Lena River Delta. *Ambio*, 2022, 51(2): 423-438.
- [4] Gautier E, Dépret T, Caverio J, et al. Fifty-year dynamics of the Lena River islands (Russia): Spatio-temporal pattern of large periglacial anabranching river and influence of climate change. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 147020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147020.
- [5] Yang D Q, Kane D L, Hinzman L D, et al. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change: Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D23): e2002jd002542. DOI: 10.1029/2002JD002542.
- [6] Tang Q H, Zhang X J, Francis J A. Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1): 45-50.
- [7] Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 014036. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014036.
- [8] Vyazilova A E, Alekseev G V, Kharlanenkova N E. Impact of global warming on river inflow to the Arctic Seas. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, 47(6): 449-456.
- [9] Park H, Watanabe E, Kim Y, et al. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming. *Science Advances*, 2020, 6(45): eabc4699. DOI: 10.1126/sciadv.abc4699.
- [10] Yang W C, Jin F M, Si Y J, et al. Runoff change controlled by combined effects of multiple environmental factors in a headwater catchment with cold and arid climate in northwest China. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143995. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143995.
- [11] Makarieva O, Nesterova N, Post D A, et al. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. *The Cryosphere*, 2019, 13(6): 1635-1659.
- [12] Tananaev N I, Makarieva O M, Lebedeva L S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia: Trends in runoff in the Lena River basin. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(20): 10764-10772.
- [13] Berezovskaya S, Yang D Q, Hinzman L. Long-term annual water balance analysis of the Lena River. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1): 84-95.
- [14] Georgiadi A G, Koronkevich N I, Barabanova E A, et al. Assessing the effect of climatic and anthropogenic factors on the annual runoff of large rivers in European Russia and Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 381: 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012027.
- [15] Liu S Q, Wang P, Yu J J, et al. Mechanisms behind the uneven increases in early, mid- and late winter streamflow across four Arctic river basins. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127425. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127425.

- [16] Wang K, Zhang T J, Yang D Q. Permafrost dynamics and their hydrologic impacts over the Russian Arctic drainage basin. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 12(4): 482-498.
- [17] Suzuki K, Hiyama T, Matsuo K, et al. Accelerated continental-scale snowmelt and ecohydrological impacts in the four largest Siberian river basins in response to spring warming. *Hydrological Processes*, 2020, 34(19): 3867-3881.
- [18] Li Fengping, Zhang Guangxin, Dong Liqin. Studies for impact of climate change on hydrology and water resources. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(4): 457-464. [李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. *地理科学*, 2013, 33(4): 457-464.]
- [19] Kalugin A. Future climate-driven runoff change in the large river basins in eastern Siberia and the Far East using process-based hydrological models. *Water*, 2022, 14(4): 609. DOI: 10.3390/w14040609.
- [20] Zhao J Z, He S P, Wang H J. Historical and future runoff changes in the Yangtze River Basin from CMIP6 models constrained by a weighting strategy. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(2): 024015. DOI: 10.1088/1748-9326/ac3f61.
- [21] Xing W Q, Wang W G, Zou S, et al. Projection of future runoff change using climate elasticity method derived from Budyko framework in major basins across China. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 120-135.
- [22] Li H B, Sheffield J, Wood E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D10): e2009jd012882. DOI: 10.1029/2009JD012882.
- [23] Sunyer M A, Madsen H, Ang P H. A comparison of different regional climate models and statistical downscaling methods for extreme rainfall estimation under climate change. *Atmospheric Research*, 2012, 103: 119-128.
- [24] Kay A L, Rudd A C, Fry M, et al. Climate change impacts on peak river flows: Combining national-scale hydrological modelling and probabilistic projections. *Climate Risk Management*, 2021, 31: 100263. DOI: 10.1016/j.crm. 2020. 100263.
- [25] Aygün O, Kinnard C, Campeau S, et al. Landscape and climate conditions influence the hydrological sensitivity to climate change in eastern Canada. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128595. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128595.
- [26] Hay L E, Wilby R L, Leavesley G H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 387-397.
- [27] van Roosmalen L, Christensen J H, Butts M B, et al. An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark. *Journal of Hydrology*, 2010, 380(3): 406-419.
- [28] Rasouli K, Pomeroy J W, Whitfield P H. Hydrological responses of headwater basins to monthly perturbed climate in the North American Cordillera. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5): 863-882.
- [29] López-Ballesteros A, Senent-Aparicio J, Martínez C, et al. Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Arachthos River basin (NW Greece). *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 139299. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139299.
- [30] Tang Y, Wang D B. Evaluating the role of watershed properties in long-term water balance through a Budyko equation based on two-stage partitioning of precipitation. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 4142-4157.
- [31] Li Z L, Shao Q X, Xu Z X, et al. Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1-4): 76-83.
- [32] Devia G K, Ganasri B P, Dwarakish G S. A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 1001-1007.
- [33] He Y F, Yang H B, Liu Z W, et al. A framework for attributing runoff changes based on a monthly water balance model: An assessment across China. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128606. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128606.
- [34] Bai P, Liu X M, Xie J X. Simulating runoff under changing climatic conditions: A comparison of the long short-term memory network with two conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125779. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125779.
- [35] Wu Guangdong, Xu Jijun, Gupta H, et al. The "abcd" water balance model: Application to Xin'an River Basin and sensitivity analysis. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2019, 36(7): 23-27, 40. [吴光东, 许继军, Gupta H, 等. 新安江流域abcd水量平衡模型及参数敏感性分析. *长江科学院院报*, 2019, 36(7): 23-27, 40.]
- [36] Thomas J H A. Improved Methods for National Water Assessment. Washington DC: US Water Resources Council, 1981. DOI: 10.3133/70046351.
- [37] Wu Z H, Mei Y D, Chen J H, et al. Attribution analysis of dry season runoff in the Lhasa River using an extended hydrological sensitivity method and a hydrological model. *Water*, 2019, 11(6): 1187. DOI: 10.3390/W11061187.
- [38] Liang Manying, Li Yu, Zhou Huicheng. Future runoff prediction of Biliuhe Reservoir Basin based on selected GCM.



- Journal of China Hydrology, 2018, 38(4): 6-11, 77. [梁满营, 李昱, 周惠成. 基于气候模式筛选的碧流河水库流域未来期径流预估研究. 水文, 2018, 38(4): 6-11, 77.]
- [39] Baseri M, Mahjoobi E, Rafiei F, et al. Evaluation of ABCD water balance conceptual model using remote sensing data in ungauged watersheds: A case study: Zarandeh, Iran. *Environment Earth Sciences*, 2023, 82(5): 126. DOI: 10.1007/s12665-023-10807-4.
- [40] Guo W X, Hong F T, Yang H, et al. Quantitative evaluation of runoff variation and its driving forces based on multi-scale separation framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 43: 101183. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101183.
- [41] He S K, Chen K B, Liu Z J, et al. Exploring the impacts of climate change and human activities on future runoff variations at the seasonal scale. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129382. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129382.
- [42] Shahid M, Cong Z T, Zhang D W. Understanding the impacts of climate change and human activities on streamflow: A case study of the Soan River basin, Pakistan. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 134(1/2): 205-219.
- [43] Wang X S, Gao B, Wang X S. A modified abcd model with temperature-dependent parameters for cold regions: Application to reconstruct the changing runoff in the headwater catchment of the Golmud River, China. *Water*, 2020, 12(6): 1812. DOI: 10.3390/w12061812.
- [44] Rasouli K, Pomeroy J W, Whitfield P H. The sensitivity of snow hydrology to changes in air temperature and precipitation in three North American headwater basins. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: 127460. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127460.
- [45] He Y, Qiu H J, Song J X, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101729. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101729.
- [46] Xin Z H, Li Y, Zhang L, et al. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal streamflow. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 936-945.
- [47] Shi G S, Gao B. Attribution analysis of runoff change in the upper reaches of the Kaidu River basin based on a modified Budyko framework. *Atmosphere*, 2022, 13(9): 1385. DOI: 10.3390/atmos13091385.
- [48] Tang Y, Tang Q H, Zhang L. Derivation of interannual climate elasticity of streamflow. *Water Resources Research*, 2020, 56(11): e2020wr027703. DOI: 10.1029/2020WR027703.
- [49] Schaake J C. From climate to flow//Waggoner P E. *Climate Change and US Water Resources Chapter 8*. New York: John Wiley, 1990.
- [50] Fu G B, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow: Climate change effects on streamflow. *Water Resources Research*, 2007, 43(11): DOI: 10.1029/2007WR005890.
- [51] Cooper M G, Schaperow J R, Cooley S W, et al. Climate elasticity of low flows in the maritime western US mountains. *Water Resources Research*, 2018, 54(8): 5602-5619.
- [52] Li B F, Chen Y N, Chen Z S, et al. Variations of temperature and precipitation of snowmelt period and its effect on runoff in the mountainous areas of Northwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(1): 17-30.
- [53] Rasouli K, Pomeroy J W, Janowicz J R, et al. Hydrological sensitivity of a northern mountain basin to climate change. *Hydrological Processes*, 2014, 28(14): 4191-4208.
- [54] Chiew F H S, Whetton P H, McMahon T A, et al. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1995, 167(1-4): 121-147.
- [55] Tang Y, Tang Q H, Wang Z G, et al. Different precipitation elasticity of runoff for precipitation increase and decrease at watershed scale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 11932-11943.
- [56] Gautier E, Dépret T, Costard F, et al. Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 475-488.
- [57] Hu Didi, Kang Shichang, Xu Min. Climate change and its impact on runoff in Lena River Basin of Arctic from 1936 to 2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 216-223. [胡弟弟, 康世昌, 许民. 1936—2017年北极勒拿河流域气候变化及其对径流的影响. 冰川冻土, 2020, 42(1): 216-223.]
- [58] Gelfan A, Gustafsson D, Motovilov Y, et al. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: Modeling and uncertainty issues. *Climatic Change*, 2017, 141(3): 499-515.
- [59] Zhang S Y, Gan T Y, Bush A B G, et al. Evaluation of the impact of climate change on the streamflow of major pan-Arctic river basins through machine learning models. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129295. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129295.

- [60] Dickson R, Rudels B, Dye S, et al. Current estimates of freshwater flux through Arctic and subarctic seas. *Progress in Oceanography*, 2007, 73(3-4): 210-230.
- [61] Liu B Z, Yang D Q. Siberian Lena River heat flow regime and change. *Cold Region Hydrology in a Changing Climate*. 2011, 346: 71-76.
- [62] Ye B S, Yang D Q, Zhang Z L, et al. Variation of hydrological regime with permafrost coverage over Lena Basin in Siberia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D7): D07102. DOI: 10.1029/2008JD010537.
- [63] Tang Y, Tang Q H. Variations and influencing factors of potential evapotranspiration in large Siberian river basins during 1975-2014. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126443. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126443.
- [64] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245. DOI: 10.2307/1907187.
- [65] Kendall M G. *Rank Correlation Measures*. London: Charles Griffin, 1975.
- [66] Wu Y Y, Fang H W, Huang L, et al. Changing runoff due to temperature and precipitation variations in the dammed Jinsha River. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124500. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124500.
- [67] Zhou Tianjun, Chen Ziming, Chen Xiaolong, et al. Interpreting IPCC AR6: Future global climate based on projection under scenarios and on near-term information. *Climate Change Research*, 2021, 17(6): 652-663. [周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 等. IPCC AR6报告解读: 未来的全球气候: 基于情景的预估和近期信息. *气候变化研究进展*, 2021, 17(6): 652-663.]
- [68] Nayak A. The effect of climate change on the hydrology of a mountainous catchment in the western United States: A case study at Reynolds Creek, Idaho [D]. Logan: Utah State University, 2008.
- [69] Cai Z Y, You Q L, Wu F Y, et al. Arctic warming revealed by Multiple CMIP6 Models: Evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties. *Journal of Climate*, 2021, 34(12): 4871-4892.
- [70] McCrystall M R, Stroeve J, Serreze M, et al. New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6765. DOI: 10.1038/s41467-021-27031-y.
- [71] Yang H B, Yang D W. Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff: Derivation of climate elasticity of runoff. *Water Resources Research*, 2011, 47(7). DOI: 10.1029/2010WR009287.
- [72] Sui Cuijuan, Zhang Zhanhai, Liu Jiping, et al. Variation of Arctic runoff and its association with climate factors. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(4): 39-47. [隋翠娟, 张占海, 刘骥平, 等. 北极河流径流量变化及影响因子分析. *海洋学报*, 2008, 30(4): 39-47.]
- [73] Li P X, Zhang Z H, Liu J P. Dominant climate factors influencing the Arctic runoff and association between the Arctic runoff and sea ice. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(5): 10-20.
- [74] Wang Guan, Chen Hanru, Wang Ping, et al. Surface runoff changes and their causes in the Russian pan-Arctic Region. *Resources Science*, 2020, 42(2): 346-357. [王冠, 陈涵如, 王平, 等. 俄罗斯环北极地区地表径流变化及其原因. *资源科学*, 2020, 42(2): 346-357.]
- [75] Hiyama T, Park H, Kobayashi K, et al. Contribution of summer net precipitation to winter river discharge in permafrost zone of the Lena River basin. *Journal of Hydrology*, 2023, 616: 128797. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128797.
- [76] Slater A G, Bohn T J, McCreight J L, et al. A multimodel simulation of pan-Arctic hydrology. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, 112(G4): 2006JG000303. DOI: 10.1029/2006JG000303.
- [77] Li Shuai, Hou Xiaogang, Zheng Zhaojun, et al. Monitoring and analysis of snowline on Tianshan Mountains based on remotely sensed data from 2001 to 2015. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 364-372. [李帅, 侯小刚, 郑照军, 等. 基于2001—2015年遥感数据的天山山区雪线监测及分析. *水科学进展*, 2017, 28(3): 364-372.]
- [78] Wang Yongqiang, Liu Zhiming, Yuan Zhe, et al. Evaluation of impact of climate change on regional surface water resources. *Yellow River*, 2019, 41(8): 57-61, 67. [王永强, 刘志明, 袁喆, 等. 气候变化对黄河流域地表水资源量的影响评估. *人民黄河*, 2019, 41(8): 57-61, 67.]
- [79] Wu Xiaodong, Wu Tonghua. Permafrost degradation has important effects on climate and human society. *Chinese Journal of Nature*, 2020, 42(5): 425-431. [吴晓东, 吴通华. 多年冻土退化对气候和人类产生重要影响. *自然杂志*, 2020, 42(5): 425-431.]
- [80] Onuchin A, Burenina T, Shvidenko A, et al. Zonal aspects of the influence of forest cover change on runoff in northern river basins of Central Siberia. *Forest Ecosystems*, 2021, 8(1): 45. DOI: 10.1186/s40663-021-00316-w.
- [81] Wang P, Huang Q W, Pozdniakov S P, et al. Potential role of permafrost thaw on increasing Siberian river discharge. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 034046. DOI: 10.1088/1748-9326/abe326.
- [82] McClelland J W, Holmes R M, Peterson B J, et al. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D18): e2004jd004583. DOI: 10.1029/2004JD004583.

- [83] Hudson C E, Thompson J R. Hydrological modelling of climate change impacts on river flows in Siberia's Lena River Basin and implications for the Atlantic meridional overturning circulation. *Hydrology Research*, 2019, 50(6): 1577-1595.
- [84] Ahmed R, Prowse T, Dibike Y, et al. Recent trends in freshwater influx to the Arctic ocean from four major arctic-draining rivers. *Water*, 2020, 12(4): 1189. DOI: 10.3390/w12041189.

## Responses of annual and seasonal streamflow to climate change in the Lena River basin in Arctic region

LYU Shaoyan<sup>1</sup>, TANG Yin<sup>2</sup>, TANG Qiuhong<sup>2,3</sup>,  
LI Haiming<sup>1</sup>, XIAO Han<sup>4</sup>, XIE Dingsheng<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization & Protection, College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Groundwater Pollution Simulation and Control for Environmental Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Streamflow from the Lena River is one of the major sources of freshwater in the Arctic Ocean and has a significant impact on the Arctic atmosphere, sea ice thermal processes and ocean thermohaline circulation. In recent years, streamflow in the Lena River basin is changing significantly with intensified global warming. In order to investigate the response of streamflow to climate change in the Lena River basin, the study firstly analyzed the trends of precipitation, air temperature and streamflow in the basin from 1975 to 2014 using the M-K trend test. Then, we constructed the abcd-cr hydrological model by considering a coupled snowmelt and permafrost module. Based on the abcd-cr model, we simulated climatic scenarios and quantitatively estimated the relative changes of annual and seasonal streamflow and the elasticities of annual and seasonal streamflow to changes in air temperature and precipitation respected to different climate scenarios. Results showed that: (1) Both the annual and seasonal air temperatures in the Lena River showed increasing trends from 1975 to 2014; The annual, summer, and autumn precipitation presented increasing trends while the spring and winter precipitation showed decreasing trends; The annual, spring, autumn, and winter streamflow had significant increasing trends while the summer streamflow showed a non-significant decreasing trend. (2) The climate scenario simulation results quantified the variations in annual and seasonal streamflow resulting from changes in precipitation and air temperature. (3) The results of sensitivity analysis showed that annual streamflow increases with the increase of precipitation and decreases with the increase of air temperature; The impact of precipitation change on seasonal streamflow is similar to that of annual streamflow change. However, the impacts of air temperature varied in different seasons. Specifically, the relative change of summer streamflow is the largest, while that of winter streamflow is the smallest. The impact of air temperature on seasonal streamflow is more complex than that of annual streamflow due to the interactions between seasonal evaporation and freeze-thaw processes. With increasing air temperature, spring streamflow increases, while streamflow in other seasons decreases.

**Keywords:** Lena River; streamflow; climate change; abcd-cr model; sensitivity