

引用格式: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[J].资源科学,2020,42(2):346-357.[Wang G, Chen H R, Wang P, et al. Surface runoff changes and their causes in the Russian pan-Arctic Region[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 346-357.] DOI: 10.18402/resci.2020.02.13

# 俄罗斯环北极地区地表径流变化及其原因

王冠<sup>1,2</sup>,陈涵如<sup>3</sup>,王平<sup>1</sup>,王田野<sup>1,2</sup>,于静洁<sup>1,2</sup>,刘昌明<sup>1</sup>,杨林生<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;

2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京 100101)

**摘要:**本文利用The Global Runoff Data Base (GRDB)和The Arctic Great Rivers Observatory (ArcticGRO)地表径流数据研究了1930年以来的俄罗斯环北极地区六大河流地表径流变化规律,并综述了气候变化和人类活动对地表径流的影响,为进一步科学理解气候变化和人类活动背景下的俄罗斯环北极地区的径流变化规律,进行水资源合理开发利用提供理论依据。结果表明:①北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河年径流量分别以每年1.53 m<sup>3</sup>/s、7.27 m<sup>3</sup>/s、15.37 m<sup>3</sup>/s、19.59 m<sup>3</sup>/s、38.41 m<sup>3</sup>/s、21.15 m<sup>3</sup>/s的速率呈增加趋势。径流的年内分布特征表现为春季和夏季的洪峰流量降低,冬季径流量增加,径流年内分配趋向更加均匀。②径流量的年际变化主要受气候变化影响,人类活动对大部分地区的年径流量影响不大,气候变化和人类活动两大因素共同驱动改变了径流的年内分布特征。研究结论对深入理解气候变化影响下的北极河流径流变化、探讨一带一路背景下的跨界水资源合作开发,以及制定北极变化的减缓和适应对策具有一定参考价值。

**关键词:**地表径流;气候变化;人类活动;环北极地区;俄罗斯

DOI :10.18402/resci.2020.02.13

## 1 引言

北冰洋是全球气候系统的重要组成部分,通过海冰的融化与冻结,以及海冰和低温低盐海水的对外输运来实现与全球气候的相互作用<sup>[1]</sup>。作为全球气候系统中最重要的热汇和冷源,北极的大气、海洋、海冰的运动直接或间接影响全球尺度的大气环流、海洋环流和气候变异,是全球气候变化的驱动器之一<sup>[2-4]</sup>。受此影响,包括北冰洋在内的北极地区是对全球气候变化最为敏感的地区之一。在全球变暖的背景下,过去的一个世纪里,环北极地区的气候与环境发生了比其他地区更为显著的变化,是气候变暖的放大器和指示器<sup>[5]</sup>。据观测分析,北极地区平均气温的上升速率是全球平均值的2~3倍<sup>[6]</sup>,北冰

洋海冰在过去几十年经历了显著的快速减少<sup>[7,8]</sup>。随着气候变暖,环北极地区的地表径流量呈现增加趋势,导致注入北冰洋的淡水量不断增加<sup>[9-11]</sup>。北冰洋淡水输入的增加,不仅引起了沿岸海水温度的不断升高,加速了海冰的进一步消融,而且对极地海洋气候与海洋生态系统产生了重要的影响<sup>[4,12,13]</sup>。此外,淡水输入量的变化通过影响北冰洋盐跃层的生长与消退<sup>[14,15]</sup>,导致海洋温盐环流与海冰的热力过程的变化<sup>[16]</sup>。环北极地区陆地径流量的持续增加通过影响北冰洋的海冰输出,可能会抑制与整个气候系统密切相关的北大西洋温盐环流<sup>[10]</sup>,进而影响全球海洋温盐环流,从而引起全球气候系统的不稳定<sup>[17]</sup>。

俄罗斯环北极地区注入北冰洋的地表径流量

收稿日期:2019-10-10 修订日期:2019-12-15

基金项目:国家科技基础资源调查专项子课题(2017FY101301;2017FY101302);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4);中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA2003020101)。

作者简介:王冠,女,河南新乡人,博士生,研究方向为生态水文。E-mail: wangg.16b@igsrr.ac.cn

通讯作者:王平,男,安徽肥西人,博士,副研究员,主要从事水文水资源研究。E-mail: wangping@igsrr.ac.cn

2020年2月

占北冰洋淡水输入总量的55.6%<sup>[1]</sup>,是北冰洋淡水输入的重要组成部分。在气候变化和人类活动的共同作用下,该地区河流的地表水资源年际变化显著,且呈现不同的径流量变化趋势<sup>[8]</sup>。近年来,围绕俄罗斯环北极地区地表径流量变化及其驱动因素分析主要集中在诸如鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河等流域<sup>[11,19-21]</sup>。本文通过梳理国内外现有研究成果,并结合地表径流实测资料,分析1930年以来俄罗斯环北极地区六大流域(北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河)地表径流变化,并探讨地表径流变化与气候要素及人类活动的关系,为探究全球变化背景下北极淡水输入变化及原因提供参考。

## 2 研究区概况

俄罗斯环北极地区位于亚欧大陆北端(30°E—180°E,50°N—80°N),面积约为1330万km<sup>2</sup>,占俄罗斯总面积的70.7%(图1)。该地区地形以平原与高原为主,地势总体上东高西低,南高北低。研究区大部分地区为温带大陆性气候,冬季严寒漫长,夏季温和且日照时间长,秋季开始出现降雪,并在早

春冰雪融化之后河冰解冻。北冰洋沿岸到北极圈附近为极地气候,气候终年严寒,几乎全年都被冰雪覆盖,多年冻土和湿地分布广泛<sup>[1]</sup>。

俄罗斯环北极地区的河流平均每年向北冰洋输送约29220亿m<sup>3</sup>淡水,占北冰洋总入流量的55.6%,是北冰洋重要的淡水来源<sup>[2]</sup>。该地区多年平均径流量大于3000 m<sup>3</sup>/s的河流共有6条,自西向东依次为北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河(图1),6条河流多年平均径流量的总和约占俄罗斯环北极河流总径流量的63.2%<sup>[11]</sup>(表1)。

该地区河流水电开发始于20世纪50年代中期<sup>[21]</sup>,水利工程建设在20世纪下半叶达到高峰。在西伯利亚和远东地区的许多河流上,都建有大型水利工程。俄罗斯环北极河流上共修建大型水利工程13座(水库库容>10亿m<sup>3</sup>),其中叶尼塞河8座,鄂毕河及其支流3座,勒拿河与科雷马河各1座。

## 3 数据来源及研究方法

### 3.1 数据来源

本文所使用的环北极地区地表径流数据来源于The Global Runoff Data Base (GRDB, <https://www.>

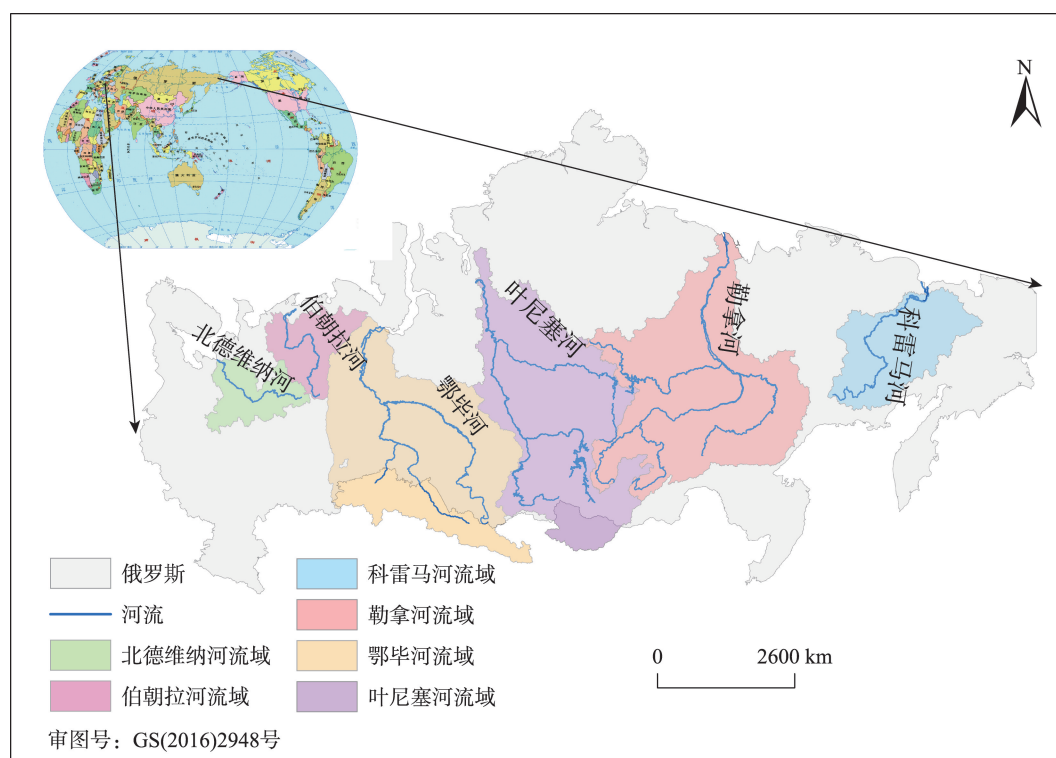


图1 俄罗斯北冰洋的6条主要河流和流域示意图

Figure 1 Six rivers into the Russian Arctic Seas and their basins

表1 俄罗斯环北极地区6条主要河流水文站点基本参数<sup>[11]</sup>Table 1 Basic characteristics of the six main rivers in the Russian Arctic area<sup>[11]</sup>

河流	站点名称	经度	纬度	年均径流量/(m <sup>3</sup> /s)	流域面积/(10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	径流数据时间序列
北德维纳河	UST'-PINEGA	41.92°E	64.13°N	3170	348	1930—2018年
伯朝拉河	UST'-TSIL'MA	52.28°E	65.42°N	3490	248	1932—2018年
鄂毕河	SALEKHARD	66.60°E	66.63°N	12700	2953	1930—2018年
叶尼塞河	IGARKA	86.48°E	67.43°N	18700	2440	1936—2018年
勒拿河	KYUSYUR	127.39°E	70.68°N	17200	2430	1935—2018年
科雷马河	KOLYMSKOYE	158.72°E	68.73°N	3300	526	1978—2018年

bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage\_node.html) 和 The Arctic Great Rivers Observatory (ArcticGRO, <http://www.arcticgreativers.org>)。GRDB 数据库建立于 1988 年,目前已包含了全球超过 9500 多个水文站点的径流数据,包括日径流数据和月径流数据,时间跨度为 1806 年至今,该数据在环北极流域的径流过程研究中得到广泛应用<sup>[23,24]</sup>。ArcticGRO 建立于 1990 年代中期,是一个涵盖北冰洋流水文、生态、地球化学变化方面相关资料的综合数据库<sup>[25]</sup>。

由于 GRDB 和 ArcticGRO 覆盖的时间序列不同,本文将两套数据进行一致性检验,并融合成一套完整时间序列的数据集。利用两套数据在 1999—2015 年的重叠数据进行检验,发现数据之间有很强的相关性 ( $0.95 < R < 1$ ),其相对误差较小 ( $0.0018 < \delta < 0.27$ ),两套径流数据具有高度一致性。因此本文选取 GRDB 数据库 1930—1998 年日径流数据和 ArcticGRO 数据库 1999—2018 年月径流数据,获得 1930—2018 年北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河月径流数据。

### 3.2 研究方法

本文利用线性回归法分析径流的变化趋势,线性回归方程是利用数理统计中的回归分析,来确定两种或两种以上变数间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法。通过最小二乘法原理,根据实测资料求出径流序列的斜率,计算公式如下:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: $y_i$ 为径流量; $\bar{y}$ 为径流量的平均值; $x_i$ 为年份; $\bar{x}$ 为年份的平均值; $i$ 为数据序号; $n$ 为序列长度。

在线性回归中,根据显著性检验方法所得到的

$p$ 值可以检验相关显著性,如 $p < 0.05$ 代表的是样本间的差异由抽样误差所致的概率小于 0.05。一般地, $p$ 值越小表明拟合越好。

为更好地反映径流量的年际变化,采用年径流变差系数  $C_v$  衡量径流序列的离散程度。 $C_v$  又称离差系数、离势系数,其公式为:

$$C_v = \frac{s}{Q} \quad (2)$$

式中: $s$ 为年径流量的标准差; $Q$ 为年径流量的多年平均值; $C_v$ 为年径流变差系数,用来衡量径流量年际变化的一个量, $C_v$ 值越大,径流量年际变化越大。

## 4 结果与分析

### 4.1 地表径流变化特征

自 20 世纪 30 年代起,俄罗斯环北极流域河流的年径流量整体呈上升趋势<sup>[11]</sup>,俄罗斯欧亚大陆六大河流的年径流量显著增加<sup>[10,26]</sup>,近年来欧亚北极河流年径流量大多高于长期多年年平均径流量<sup>[27]</sup>。在过去的几十年间,北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河年径流量分别以每年 1.53 m<sup>3</sup>/s、7.27 m<sup>3</sup>/s、15.37 m<sup>3</sup>/s、19.59 m<sup>3</sup>/s、38.41 m<sup>3</sup>/s、21.15 m<sup>3</sup>/s 的速率呈增加趋势(表 2)。俄罗斯环北极地区主要河流的径流变化明显(图 2),但是由于流域集水面积大、调节能力强、径流量大,这些河流年径流量的年际变异性变化相对较低(年径流变差系数  $C_v$  介于 0.09~0.24)。

北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河 6 条河流的年径流量整体呈上升趋势,但不同季节径流量的变化趋势却存在一定的差异性(图 3)。与已有研究结论基本一致<sup>[28-32]</sup>,自 20 世纪 30 年代以来,6 条河流冬季和春季的径流量均呈显著增加趋势。秋季径流量也基本呈增加趋势,但仅勒拿河和科雷马河具有统计显著性意义( $p < 0.05$ )。

2020年2月

表2 俄罗斯环北极地区6条主要河流四季及年均径流变化与变差系数

Table 2 Seasonal and annual average runoff trends of the six main rivers in the Russian Arctic area and coefficients of variation

	春		夏		秋		冬		年		Cv
	k (m <sup>3</sup> /s/a)	P	k (m <sup>3</sup> /s/a)	P	k (m <sup>3</sup> /s/a)	P	k (m <sup>3</sup> /s/a)	P	k (m <sup>3</sup> /s/a)	P	
北德维纳河	11.40	0.03*	-4.95	0.34	1.04	0.79	1.74	0.23	1.53	0.52	0.17
伯朝拉河	16.80	0.03*	1.23	0.90	5.28	0.16	3.40	0.00**	7.27	0.01**	0.15
鄂毕河	38.51	0.00**	-1.84	0.93	8.63	0.45	18.32	0.00**	15.37	0.06*	0.15
叶尼塞河	68.42	0.01**	-71.72	0.02*	15.55	0.19	70.77	0.00**	19.59	0.01**	0.09
勒拿河	76.47	0.00**	11.13	0.68	38.70	0.02*	27.14	0.00**	38.41	0.06*	0.13
科雷马河	21.15	0.03*	-13.73	0.72	27.59	0.03*	5.43	0.00**	9.92	0.35	0.24

注:  $k$  为线性拟合的斜率;  $p$  为线性拟合的显著性;  $Cv$  为变差系数; \*, \*\* 分别代表通过 0.05、0.1 的显著性水平检验。

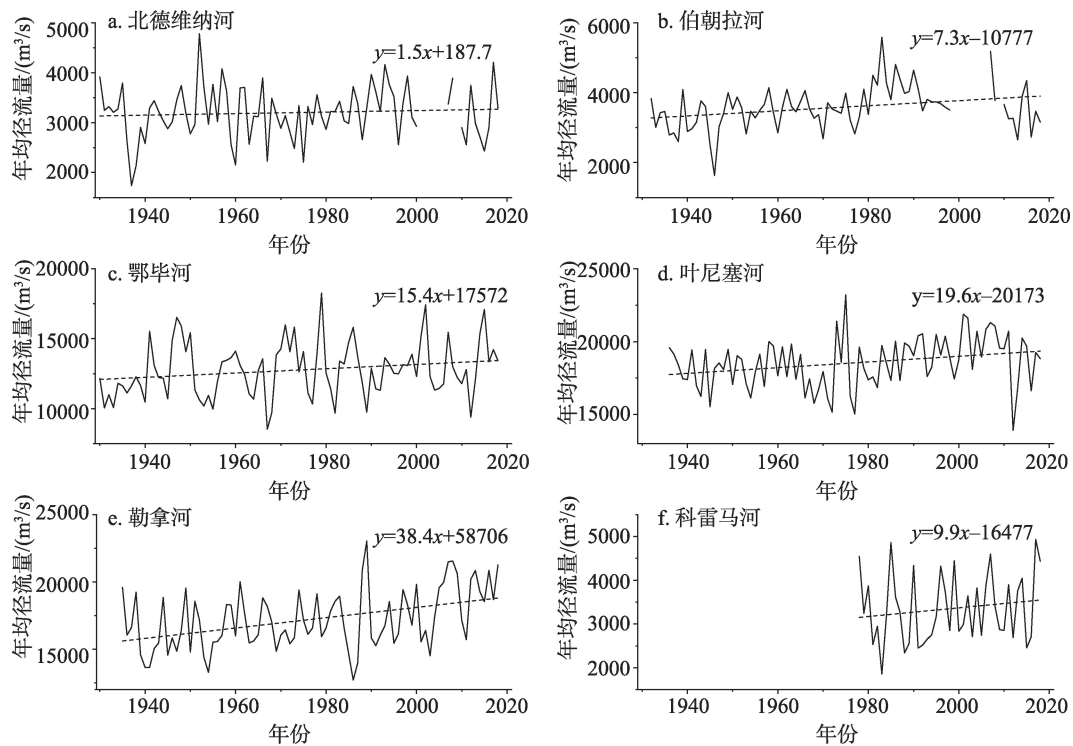


图2 俄罗斯环北极地区6条主要河流的年均径流量变化趋势

Figure 2 Trend of annual average runoff of the six main rivers in the Russian Arctic area

6条河流的夏季径流变化不尽相同:叶尼塞河夏季径流量呈显著的下降趋势,北德维纳河、鄂毕河和科雷马河具不显著的减少态势,而伯朝拉河和勒拿河径流则呈不显著的增大趋势。

伯朝拉河、勒拿河四季的径流量都增加,因此在整体上表现出年径流量显著增加的趋势。北德维纳河、鄂毕河、科雷马河、叶尼塞河尽管夏季径流呈减少态势,但更显著的春季、秋季和冬季的径流增加导致年径流量亦显著增加的趋势( $p < 0.05$ )。

降水、河冰解冻以及积雪融水是环北极地区河

流的径流主要来源,冻土和冰川融水同样是径流的重要来源。春季(北德维纳河)或春夏季(鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河等)的季节洪水在年径流中占比较大<sup>[1]</sup>,年最大径流量通常出现在5、6月<sup>[28]</sup>,年内分配极不均匀。6条河流,春季(3—5月)及夏季(6—8月)的径流量占年径流量的62%~85%,秋季(9—11月)径流量占20%左右,冬季(12月—次年2月)枯水期径流一般不超过10%(表3)。

表3显示了6条河流在1930—1959年、1960—1989年、1990—2018年3个时间段季节径流量占比

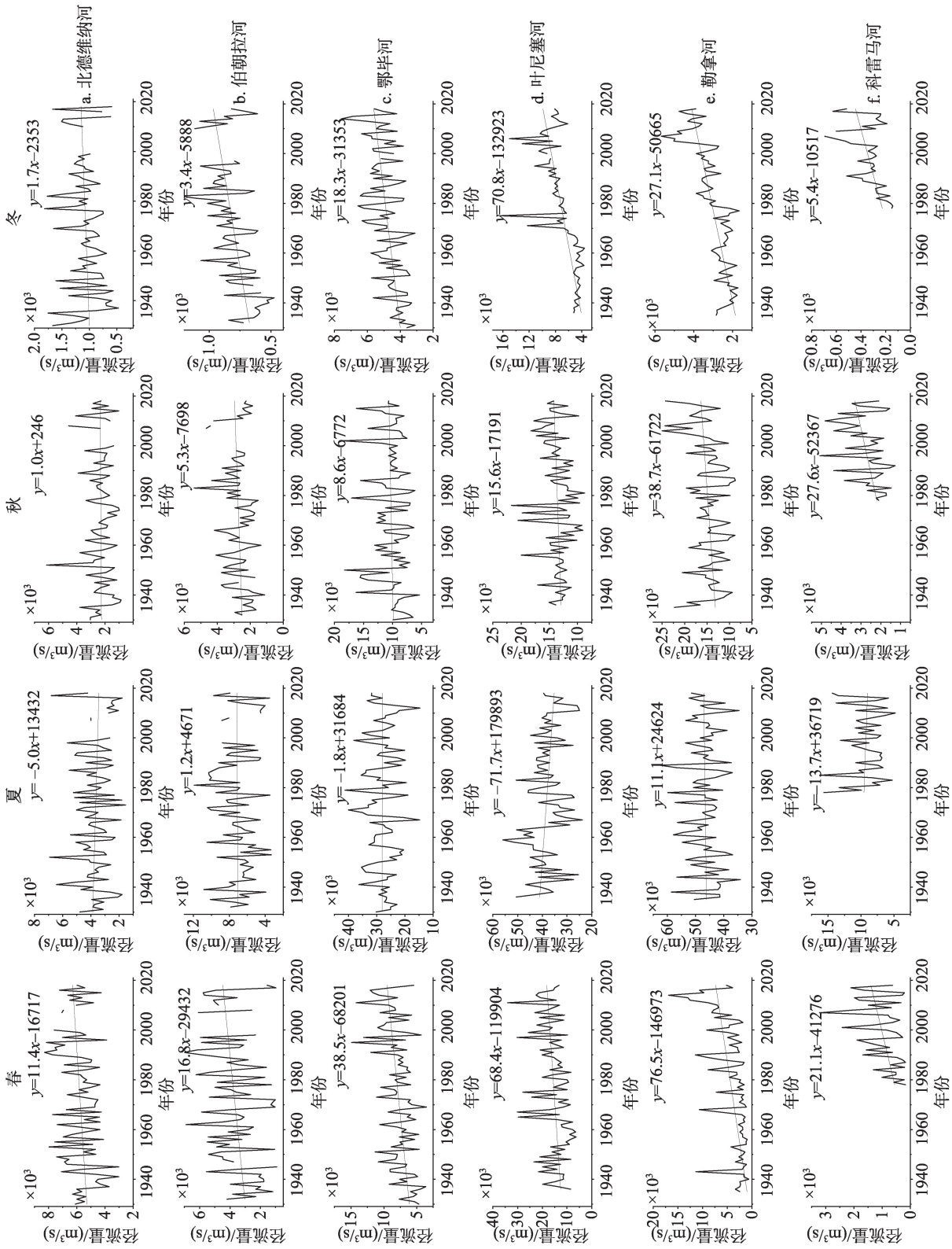


图3 俄罗斯北环北极地区6条河流的季节径流量变化趋势

Figure 3 Trends of seasonal river runoff of the six main rivers in the Russian Arctic area

2020年2月

表3 俄罗斯环北极地区6条主要河流1930—1959年、1960—1989年、1990—2018年3个时段年内分配百分比

Table 3 Annual distribution of runoff of the six main rivers in the Russian Arctic area and coefficients of variation during 1930-1959, 1960-1989, and 1990-2018

		1930—1959年	1960—1989年	1990—2018年
北德维纳河	春/%	43.56	44.15	48.23
	夏/%	30.00	29.31	26.52
	秋/%	18.53	17.78	16.74
	冬/%	7.91	8.76	8.51
伯朝拉河	春/%	25.67	23.15	31.64
	夏/%	49.86	52.77	43.69
	秋/%	19.30	18.34	18.66
	冬/%	5.17	5.74	6.02
鄂毕河	春/%	14.02	14.37	17.94
	夏/%	56.60	56.40	51.81
	秋/%	20.78	19.67	20.08
	冬/%	8.60	9.56	10.17
叶尼塞河	春/%	18.30	20.24	23.25
	夏/%	56.60	52.07	47.11
	秋/%	18.62	18.06	18.40
	冬/%	6.48	9.63	11.24
勒拿河	春/%	3.74	5.03	8.89
	夏/%	70.44	70.64	63.63
	秋/%	22.23	20.31	22.22
	冬/%	3.60	4.02	5.26
科雷马河	春/%	—	3.99	8.40
	夏/%	—	76.53	67.01
	秋/%	—	17.68	21.79
	冬/%	—	1.80	2.80

注:—代表数据缺失。

的变化情况。6条河流径流的季节占比具有明显的地区差异。西部的北德维纳河春季径流占比接近全年径流量的1/2。伯朝拉河、鄂毕河与叶尼塞河夏季径流占比最大,春季径流对年贡献率次之,同时冬季径流在年径流中占有一定的比重。位于海拔较高的勒拿河与科雷马河的夏季径流占比远高于其他季节,春季径流贡献率小于秋季,冬季径流在年径流中的比重并不明显。

6条河流在1930—1959年、1960—1989年、1990—2018年3个时间段,总体上春季和冬季径流量占比变大,夏季径流量占比变小。通过对季节径流占比进行线性拟合(图4),发现同样的规律,即春季和冬季径流占比有上升的趋势,而夏季径流相对

于年径流的占比下降,这可能与该地区显著的冬春季增温关系密切。

#### 4.2 气候变化及其对径流的影响

在过去的100多年间,环北极地区气温一直呈上升趋势,其气温上升速率约为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ <sup>[10,24]</sup>,约是全球平均水平的两倍<sup>[33]</sup>。与此同时,降水总体上呈现上升趋势,但不同季节和地区存在明显的季节差异和空间差异<sup>[34-36]</sup>。

由于寒区径流来源主要受温度控制,其过程对气候变化的响应非常敏感<sup>[37]</sup>。环北极地区的快速升温 and 降水变化通过影响径流形成条件(蒸发、融雪、冻土等),对地表径流具有显著的影响<sup>[24]</sup>。降水以降雨和降雪两种方式到达地表,夏季降雨可以直接进入河流,或渗入土壤成为地下水稳定地供应地表径流<sup>[31]</sup>,降雪则以积雪的形式覆盖在地表<sup>[35]</sup>,待气温升高时融化进入地表径流。降水变化直接决定着径流过程,气温上升通过影响冻土、融雪等要素对径流产生影响。其中,降水对于流域夏秋两个季节的径流有着重要影响,而气温的作用则更多的体现在冬春两个季节。

由于俄罗斯地区多年冻土分布广泛,且含冰量极高,活动层厚度增加会释放大量冻结水进入径流过程,因此显著增温导致的多年冻土退化是影响该地区径流变化的重要因素之一<sup>[31]</sup>。研究表明,北半球高纬度地区多年冻土的退化与流域产流能力的增加呈正相关关系<sup>[10,38]</sup>。冻土退化产生的地下水补给地表径流,尤其是在冬季和春季,这一作用对径流的影响尤为明显<sup>[39]</sup>。环北极地区河流的冬季径流量由于气温升高导致的冻土退化而增加。另一方面,积雪是影响冻土活动层水热状态最为重要的地表覆被类型之一。环北极地区冬季积雪的增多<sup>[36,40]</sup>,通过对土壤的保温作用,抑制了水分的冻结,有利于冬季的产流<sup>[41]</sup>。此外,冬季增暖有利于短期内冰雪消融,对春季径流产生影响。

融雪径流是高纬度地区水资源重要的组成部分,环北极地区河流的径流量很大一部分由融雪补给,春季径流量与融雪过程密切相关。西伯利亚冬季降雪增加<sup>[36]</sup>亦可导致这一地区河流的春季径流增加<sup>[42]</sup>。融雪过程与气温密切相关,环北极地区显著的春季气温上升( $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )<sup>[43]</sup>,使得融雪开始时间

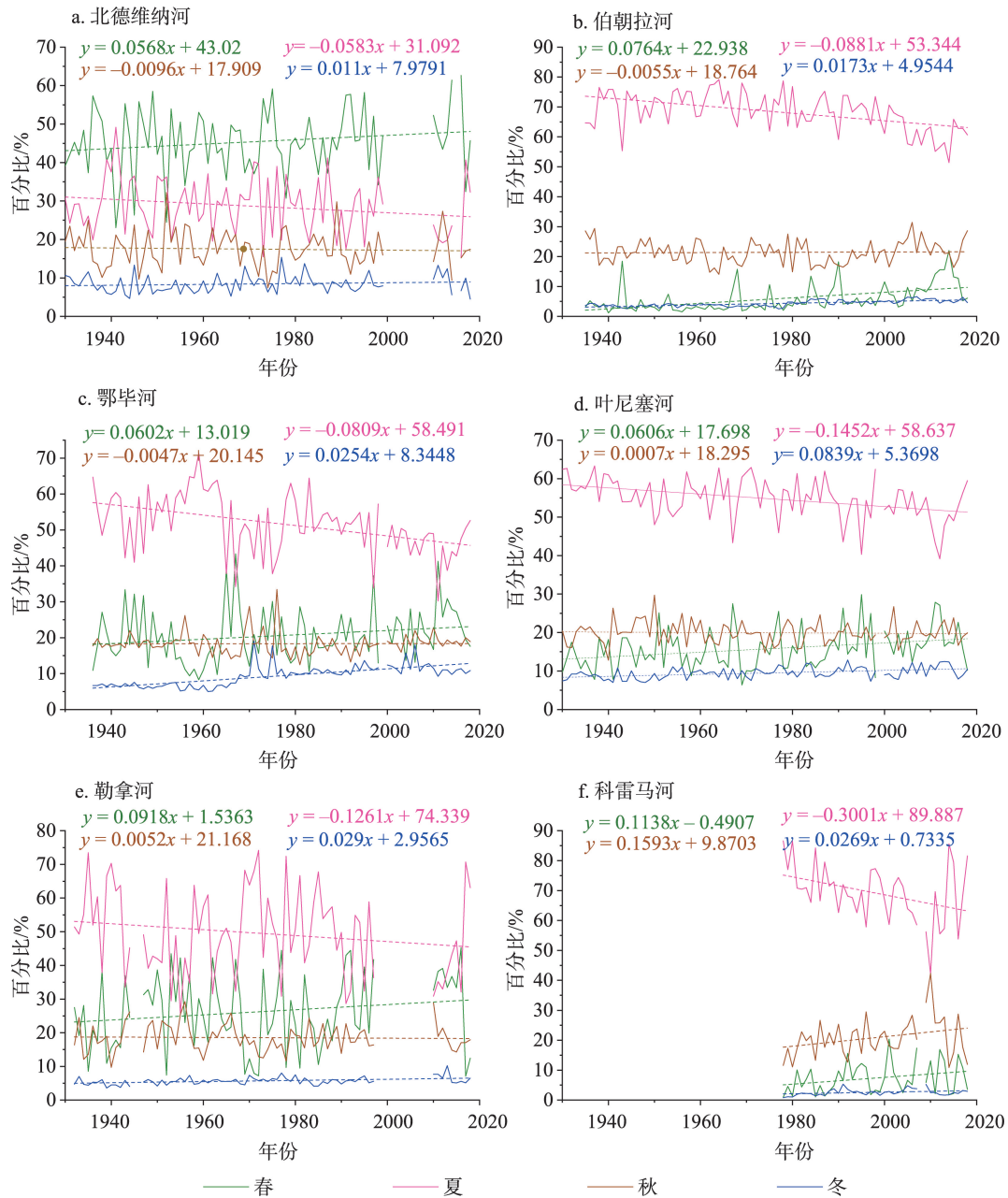


图4 俄罗斯环北极地区6条主要河流季节径流占比变化

Figure 4 Variation of seasonal runoff proportion of the six main rivers in the Russian Arctic area

从六月提前为五月<sup>[23,30]</sup>,导致春季径流增加<sup>[19,29]</sup>。未来气温的持续升高可能通过影响融雪过程对径流产生更大的影响<sup>[44]</sup>。此外,春季气温升高通过影响河冰的解冻过程来改变环北极地区河流径流的季节分布,20世纪的气温升高使得河冰解冻时间提前了10到15天,导致春季径流增加<sup>[45]</sup>。

环北极地区河流的夏季径流多由降水直接补给,夏季径流变化与降水变化较为一致。环北极流域

西部和中部的夏季降水减少<sup>[35]</sup>,这一地区的北德维纳河、鄂毕河、叶尼塞河夏季径流量也随之减少;东部地区的夏季降水增加,勒拿河夏季径流量也随之增加。另一方面,融雪径流和河冰解冻的提前导致春季径流增加的同时,使得夏季径流减少。受增温影响,冻土地区的土壤温度上升<sup>[30]</sup>,活动层加厚<sup>[31]</sup>,冻土融化增加,导致径流量增加。由于夏季气温升高,蒸发增加,夏季径流减少。Rawlins等<sup>[46]</sup>和Zhang

2020年2月

等<sup>[47]</sup>利用GCMs和VIC模型计算以及遥感数据定量反演环北极地区蒸发量,均发现近几十年蒸发量呈现增加趋势。高纬度地区的勒拿河和科雷马河,气温升高使得冻土融化带来的径流增加比其他几条河流更为明显。

秋季径流量同样受降水和冻土融化影响,由于气温升高,冻土融化增加,大部分河流的秋季径流有所增加。同样地,对于勒拿河和科雷马河,冻土融化带来的秋季径流增加更为显著,秋季径流呈现显著增加趋势。而西部地区秋季降水的普遍减少,抵消了一部分由于冻土融化带来的径流增加,使得西部几条河流秋季径流量的增加趋势不太显著。

#### 4.3 人类活动对径流的影响

一般地,大型水库修建及其蓄水等人类活动是影响河流径流变化的重要因素。水库蓄水一方面使得水库下游河川径流量减少,另一方面增加水面面积导致蒸发增强。有研究表明,1941—2014年间,水库建造导致俄罗斯环北极地区河流的总径流损失量累计超过5500亿 $\text{m}^3$ ,其76%由于水库初期蓄水,24%由于蒸发损失<sup>[48]</sup>。1960—1975年期间损失的水量最多,这与水利工程建设的高峰期相对应。水库蓄水初期会改变河流的水文参数,但其影响作用随着时间推移将逐渐减弱并趋于稳定<sup>[11]</sup>。现有资料统计分析得出,俄罗斯环北极地区每年约267亿 $\text{m}^3$ 的水通过水体表面蒸发损失<sup>[49]</sup>,其中水库修建产生的额外蒸发损失占总蒸发量的16%~75%,但蒸发变化对总径流量影响不大<sup>[11]</sup>。

综上所述,水库建设对俄罗斯环北极地区的年均径流量影响有限<sup>[21,38,48]</sup>。一方面,水利工程修建造成的水量损失在总径流量上的占比不高。1941—2014年的74年间,水库建造导致俄罗斯环北极地区河流每年损失约7.43 $\text{km}^3$ ,而该地区河流平均每年流向北冰洋的水量约2922 $\text{km}^3$ 。因此,由于水库建设造成的年均径流损失量仅占总径流量的0.25%,对径流量总体上影响不大。另一方面,水利工程修建对河流影响的时间和范围有限。水库蓄水虽然会使最初几年河流的水文参数发生变化,但河流在一段时间后会逐渐恢复原先的径流特征。此外,水利工程的调蓄作用对地表径流的影响沿河逐渐降低。梯级水库或大型水库对径流的影响相对较大,

但水库对径流的调节作用沿河向下游逐渐减小,径流特征将逐渐恢复到自然条件下的状态,尤其是河口附近径流受到水利工程的影响较弱。如远离北冰洋海岸的西伯利亚河流,沿河逐渐降低了水库对径流的影响,建库前后河口附近站点的径流量在统计上未发生显著变化<sup>[49]</sup>。但在俄罗斯环北极地区西北部几乎毗邻海岸的科拉半岛和卡累利亚,水库对调节河流河口水文状况产生很大影响<sup>[11]</sup>。

水库修建对该地区的年径流量影响不大,但其径流调节作用改变了河流的水文特征,许多大型欧亚北极河流的流量季节特征受到强烈的影响。经过长期的流量调节,水利工程建设已经极大地改变了径流的年内分布特征<sup>[21]</sup>。受到水库的调蓄作用影响,春季和夏季汛期水量减少,冬季枯水期水量明显增多<sup>[38]</sup>。与自然流量相比,叶尼塞河、勒拿河、科雷马河的春夏季节性洪水径流下降了27%~51%,冬季枯水期径流增长了28%~60%<sup>[9,11,49]</sup>。McClelland等<sup>[21]</sup>分析发现,水利工程建设对叶尼塞河径流季节性的影响最大,对鄂毕河和勒拿河径流季节性的影响其次,对科雷马河径流影响相对较小。

随着人类活动的加剧,除水库以外,人类取水量的增加也对该区河流的径流量及水文特征产生不同程度的影响<sup>[22,50]</sup>。由于人口密度低,俄罗斯环北极地区的水资源开发利用程度较低,经济活动对水资源的影响相对较小,对于大部分地区,取水尚未对水资源产生显著影响。鄂毕河的取水量占俄罗斯环北极地区总取水量的70%,其次是叶尼塞河(15%)、科拉半岛和卡累利亚北部的河流(8%)、北德维纳河(3%)、伯朝拉河(2%)和勒拿河(1%)<sup>[48]</sup>。在19世纪70年代末和80年代的用水量高峰期,取水较多的鄂毕河和叶尼塞河流域的取水量仅占其多年平均径流量的3.9%和0.8%<sup>[48]</sup>,而北德维纳河、伯朝拉河、勒拿河、科雷马河流域取水量仅不到多年平均径流量的1.5%<sup>[49]</sup>。经济用水对俄罗斯环北极流域的径流总体影响较小<sup>[49]</sup>,然而在一些地区,如科拉半岛和卡累利亚、北德维纳河河口、Norilsk工业区、叶尼塞河和鄂毕河流域南部、乌拉尔地区、受水电站调节的西伯利亚河流以及勒拿河流域的采矿业,水资源压力很大<sup>[11]</sup>。俄罗斯环北极地区80%~95%的取水来自地表径流,其余来自地下含水层<sup>[11]</sup>,



取水主要用于工业、热电厂和城市公共市政用水。工业用水主要集中在北德维纳河、鄂毕河、叶尼塞河流域。在鄂毕河、叶尼塞河和科雷马河流域,火力发电厂的用水量非常大。北德维纳河、勒拿河流域的水资源主要与城市公共市政用水有关<sup>[1]</sup>。当前从北极河流和相关地下水源取水的总量约206亿m<sup>3</sup>/a,预计到2025—2030年可能增加到372亿m<sup>3</sup>/a<sup>[1]</sup>,尽管这一取水量仅占俄罗斯环北极地区多年平均径流量0.01%左右,但增加的取水量势必会使得部分水资源紧缺地区的河川径流发生明显变化。

在一带一路、中蒙俄经济走廊建设等发展战略背景下,加强俄罗斯环北极地区淡水等资源的合作开发利用,对促进俄罗斯周边各国共赢发展具有重要意义<sup>[51-53]</sup>。但在气候增暖环境下,定量评估环北极河流径流过程对气候变化和人类活动的响应,是水资源开发利用和可持续发展的重要前提,同样是当前所面临的科学难题。

## 5 结论

俄罗斯环北极地区的地表径流是北冰洋淡水输入的重要组成部分。近年来,这一地区的河流年径流量发生了显著的变化,并呈现出不同的变化趋势。本文选取俄罗斯环北极地区六大河流为对象,初步揭示了1930年以来的地表径流变化规律,并综合分析了气候变化和人类活动对地表径流的影响。主要结论如下:

(1)作为全球气候变化最为敏感的地区之一,过去的一个世纪里,环北极地区平均气温的上升速率是全球平均值的2~3倍,气候与环境发生了比其他地区更为显著的变化。俄罗斯环北极地区地表水系发达,水资源丰富,平均每年向北冰洋输送约29220亿m<sup>3</sup>的淡水,注入北冰洋的地表径流量占北冰洋淡水输入总量的55.6%以上。其中北德维纳河、伯朝拉河、鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河和科雷马河6条大河的总径流量约占俄罗斯环北极河流总径流量的63.2%。

(2)在全球变暖的背景下,自1930年起,俄罗斯环北极流域的年径流量整体呈上升趋势。其中,鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河等在内的6条北极河流年径流量普遍呈上升趋势,尤其是冬季和春季径流量均呈显著增加趋势,秋季径流量同样呈增加趋势,但

在夏季6条河流的表现有所不同。从年内分配上看,春季和冬季径流占比有增加,夏季径流相对于年径流的占比减少,年内分配更加均匀。俄罗斯环北极地区地表径流的这一变化特征与这一地区快速升温 and 降水变化具有密切的联系。降水变化直接决定着径流过程,气温上升通则过影响蒸发、冻土、融雪等要素对径流产生影响。

(3)除气象要素外,水利工程的修建及经济用水等人类活动对径流过程同样具有重要影响。虽然由于建库初期蓄水及水库建设引起的水面面积增加带来的蒸发损失造成的水量损失在俄罗斯环北极地区总径流量中的占比不高,水利工程修建对这一地区的年径流量影响不大。但受到水库的调蓄作用的影响,许多大型欧亚北极河流的流量季节特征发生明显变化,即春季和夏季的洪峰流量降低,冬季径流量增加。由于人口密度低,经济用水对俄罗斯环北极流域的径流总体影响较小,然而叶尼塞河和鄂毕河流域南部、Norilsk工业区、受水电站调节的西伯利亚河流以及勒拿河流域的采矿区等地区,水资源压力很大。当前从北极河流和相关地下水源取水的总量预计未来几年可能持续增加,增加的取水量势必会使得水资源紧缺地区的河川径流发生明显变化。

作为气候变化的敏感区,全球气候变化背景下,探究俄罗斯环北极地区径流变化及其对气候变化和人类活动的响应关系,对于气候变化影响的减缓和适应研究以及对北极地区未来水资源的可持续利用具有重要参考价值。

**致谢:**感谢罗蒙诺索夫莫斯科国立大学(Lomonosov Moscow State University)陆地水文系Dmitry V. Magritsky副教授在本文写作与修改过程中所提出的宝贵意见与建议。

## 参考文献(References):

- [1] 李丕学. 北极径流变化的关键气候因子及其对北冰洋海冰变化影响的研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2009. [Li P X. Dominant Climate Factors Influencing the Arctic Runoff and Association between the Runoff and Arctic Sea Ice[D]. Shandong: Ocean University of China, 2009.]

2020年2月

- [2] Walsh J E. The role of sea ice in climatic variability: Theories and evidence[J]. *Atmosphere-Ocean*, 1983, 21(3): 229-242.
- [3] Barry R G, Serreze M C, Maslanik J A, et al. The Arctic Sea Ice-climate system: Observations and modeling[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(4): 397-422.
- [4] Aagaard K, Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, 94(C10): 14485-14498.
- [5] 魏立新. 北极海冰变化及其气候效应研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. [Wei L X. Study on the Variation of Arctic Sea Ice and Its Effect on Global Climate[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.]
- [6] Screen J A. Climate science: Far-flung effects of Arctic warming[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(4): 253-254.
- [7] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C9): 20837-20856.
- [8] Morison J, Aagaard K, Steele M. Recent environmental changes in the Arctic: A review[J]. *Arctic*, 2000, 53(4): 359-371.
- [9] Lewis E L, Jones E P, Lemke P, et al. The Freshwater Budget of the Arctic Ocean[C]. Dordrecht: Springer, 2000.
- [10] Peterson B J, Holmes R M, McClelland J W, et al. Increasing river discharge to the arctic ocean[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2171-2173.
- [11] Magritsky D V, Frolova N L, Evstigneev V M, et al. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector[J]. *Polarforschung*, 2018, 87(2): 177-194.
- [12] White D, Hinzman L, Alessa L, et al. The arctic freshwater system: Changes and impacts[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2007, DOI: 10.1029/2006JG000353.
- [13] Carmack E C, Yamamoto-Kawai M, Haine T W N, et al. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 675-717.
- [14] Mephee M G, Stanton T P, Morison J H, et al. Freshening of the upper ocean in the Arctic: Is perennial sea ice disappearing?[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(10): 1729-1732.
- [15] Steele M, Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C5): 10419-10435.
- [16] Stokstad E. River flow could derail crucial ocean current[J]. *Science*, 2002, DOI: 10.1126/science.298.5601.2110a.
- [17] Vellinga M, Wood R A. Global climatic impacts of a collapse of the atlantic thermohaline circulation[J]. *Climatic Change*, 2002, 54(3): 251-267.
- [18] 王平, 王田野, 王冠, 等. 西伯利亚淡水资源格局与合作开发潜力分析[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2186-2194. [Wang P, Wang T Y, Wang G, et al. Spatial distribution and potential exploration of water resources in Siberia[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2186-2194.]
- [19] Bring A, Fedorova I, Dibike Y, et al. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 621-649.
- [20] Bring A, Shiklomanov A, Lammers R B. Pan-Arctic river discharge: Prioritizing monitoring of future climate change hot spots [J]. *Earth's Future*, 2017, 5(1): 72-92.
- [21] 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[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, DOI: 10.1029/2004jd004583.
- [22] Shiklomanov I A, Babkin V I, Balonishnikov Z A. Water resources, their use, and water availability in Russia: Current estimates and forecasts[J]. *Water Resources*, 2011, 38(2): 139-148.
- [23] Gelfan A, Gustafsson D, Motovilov Y, et al. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: Modeling and uncertainty issues[J]. *Climatic Change*, 2017, 141(3): 499-515.
- [24] Overeem I, Syvitski J P M. Shifting discharge peaks in Arctic rivers, 1977-2007[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2010, 92(2): 285-296.
- [25] Johnston S E, Shorina N, Bulygina E, et al. Flux and seasonality of dissolved organic matter from the Northern Dvina (Severnaya Dvina) River, Russia[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(3): 1041-1056.
- [26] Bobrovitskaya N N, Kokorev A V, Lemeshko N A. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1-2): 127-146.
- [27] Richter-Menge J, Druckenmiller M L, Jeffries M, et al. Arctic Report Card 2019[EB/OL]. (2019-12-10) [2020-02-05]. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
- [28] Goldman C R, Kumagai M, Robarts R D. *Climatic Change and Global Warming of Inland Waters*[C]. Chichester: Robarts Wiley-Blackwell, 2012.
- [29] Lammers R B, Shiklomanov A I, Vörösmarty C J, et al. Assessment of contemporary Arctic river runoff based on observational discharge records[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D4): 3321-3334.
- [30] Serreze M C, Bromwich D H, Clark M P, et al. Large-scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, DOI: 10.1029/2001jd000919.
- [31] Yang D, Kane D L, Hinzman L D, et al. Siberian Lena River hydro-

- logic regime and recent change[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, DOI: 10.1029/2002JD002542.
- [32] Yang D Q, Ye B S, Kane D L. Streamflow changes over Siberian Yenisei River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 296(1-4): 59-80.
- [33] Karl T R, Arguez A, Huang B, et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus[J]. *Science*, 2015, 348(6242): 1469-1472.
- [34] Wu P, Wood R, Stott P. Human influence on increasing Arctic river discharges[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, DOI: 10.1029/2004GL021570.
- [35] Vihma T, Screen J, Tjernström M, et al. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 586-620.
- [36] Gatak D, Deser C, Frei A, et al. Simulated Siberian snow cover response to observed Arctic sea ice loss, 1979-2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, DOI: 10.1029/2012JD018047.
- [37] Silverstein R P, Aryal S K, Durrant J, et al. Climate change and runoff in south-western Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 441-455.
- [38] Lawrence D M, Slater A G. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, DOI: 10.1029/2005gl025080.
- [39] 周京武, 阿不力米提·阿不力克木, 毛炜峰, 等. 天山南坡清水河流域径流过程对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 685-690. [Zhou J W, Abulimiti A, Mao W Y, et al. The responses of the runoff processes to climate change in the Qingshuihe River watershed on the southern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 685-690.]
- [40] Bulygina O N, Razuvaev V N, Korshunova N N. Changes in snow cover over Northern Eurasia in the last few decades[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045026.
- [41] 常娟, 王根绪, 高永恒, 等. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7289-7301. [Chang J, Wang G X, Gao Y H, et al. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permagrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7289-7301.]
- [42] Tananaev N I, Makarieva O M, Lebedeva L S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(20): 10764-10772.
- [43] Brown R D, Derksen C. Is Eurasian October snow cover extent increasing?[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024006.
- [44] 丁永建, 张世强. 冰冻圈水循环在全球尺度的水文效应[J]. *科学通报*, 2015, 60(7): 593-602. [Ding Y J, Zhang S Q. The hydrological impact of cryosphere water cycle on global-scale water cycle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(7): 593-602.]
- [45] Beltaos S, Prowse T. River-ice hydrology in a shrinking cryosphere [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(1): 122-144.
- [46] Rawlins M A, Steele M, Holland M M, et al. Analysis of the arctic system for freshwater cycle intensification: Observations and expectations[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(21): 5715-5737.
- [47] Zhang K, Kimball J S, Mu Q, et al. Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1-2): 92-110.
- [48] Koronkevich N I, Barabanova E A, Georgiadi A G, et al. Anthropogenic impacts on the water resources of the Russian Arctic Basin Rivers[J]. *Geography and Natural Resources*, 2019, 40(1): 22-29.
- [49] Magritskii D V. Anthropogenic impact on the runoff of Russian rivers emptying into the Arctic Ocean[J]. *Water Resources*, 2008, 35(1): 1-14.
- [50] Avakyan A B, Sharapov V A. Reservoirs of hydroelectric stations of the USSR[J]. *Hydrotechnical Construction*, 1970, 4(4): 375-380.
- [51] 熊琛然, 王礼茂, 张超, 等. 俄罗斯与中日两国能源地缘经济合作关系评价[J]. *资源科学*, 2019, 41(9): 1665-1674 [Xiong C R, Wang L M, Zhang C, et al. Evaluation on energy geo-economics cooperation relations of Russia with China and Japan[J]. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1665-1674.]
- [52] 杨洋, 董锁成, 李泽红. 中蒙俄经济走廊背景下中俄能源合作进展、驱动力、挑战及对策[J]. *资源科学*, 2018, 40(2): 237-249. [Yang Y, Dong S C, Li Z H. Progress, driving forces and challenges of Sino-Russian energy cooperation under the China-Mongolia-Russia economic corridor[J]. *Resources Science*, 2018, 40(2): 237-249.]
- [53] 巴兰尼科娃 A O, 程红泽. 俄中在北极地区的协作: 问题与前景[J]. *西伯利亚研究*, 2015, 42(1): 21-22. [Barannikova A O, Cheng H Z. Russian-Chinese collaboration in the Arctic: Problems and prospects[J]. *Siberian Studies*, 2015, 42(1): 21-22.]

## Surface runoff changes and their causes in the Russian pan-Arctic Region

WANG Guan<sup>1,2</sup>, CHEN Hanru<sup>3</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, WANG Tianye<sup>1,2</sup>,  
YU Jingjie<sup>1,2</sup>, LIU Changming<sup>1</sup>, YANG Linsheng<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Using the surface runoff data from the Global Runoff Data Base (GRDB) and the Arctic Great Rivers Observatory (ArcticGRO), this study analyzed the surface runoff variation characteristics of the six major river basins in the pan-Arctic region of Russia since 1930, and summarized the impacts of climate change and human activities on the surface runoff. The results provide a theoretical basis to further the scientific understanding of the runoff changes in the Arctic region of Russia under the background of climate change and increasing human activities, and for the rational development and utilization of water resources in the region. The results show that the annual runoff of the Severnaja Dvina, Pechora, Ob, Yenisei, Lena, and Kolyma Rivers increased at a rate of 1.53 m<sup>3</sup>/s, 7.27 m<sup>3</sup>/s, 15.37 m<sup>3</sup>/s, 19.59 m<sup>3</sup>/s, 38.41 m<sup>3</sup>/s, and 21.15 m<sup>3</sup>/s, respectively. The seasonal distribution characteristics of runoff are characterized by a decrease in flood peak flow during spring and summer, and an increase in runoff during winter. Seasonal distribution of surface runoff tended to be more even during the year. The change in annual runoff is mainly affected by climate change. In contrast, human activities have little effect on annual runoff in most areas. The two dominant factors, climate change and human activities, jointly drive the change in the annual distribution of runoff. Annual runoff of these rivers has increased as a result of global warming, while the annual distribution of runoff tends to be uniform under the combined effects of climate change and human activities.

**Key words:** surface runoff; climate change; human activities; pan-Arctic region; Russia