

引用格式:陈晓龙,王平. 1979-2017年北极陆地气候变化趋势[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1260-1274. [Chen X L, Wang P. Climate changes over the Arctic land during 1979- 2017[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1260- 1274.] DOI: 10.18402/resci.2021.06.16

1979—2017年北极陆地气候变化趋势

陈晓龙^{1,2}, 王平³

(1. 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 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)

摘要: 北极地区是受全球变暖影响最为显著的地区之一。北极升温速率超过全球平均速率的2倍, 这一“极地放大现象”和海冰的快速消融不仅造成当地环境的剧烈变化, 还深刻影响着中纬度的天气和气候系统。深入理解气候长期趋势的季节和地理分布特征, 有助于应对北极气候变化及其影响, 并为未来开发北极资源服务。考虑到北极地区观测台站稀疏带来的不确定性, 本文利用多套格点化的观测分析和ERA-Interim再分析资料, 结合线性趋势分析, 研究了1979—2017年60°N以北陆地地表温度、降水、气温日较差、年较差及相关极端气候指标的变化趋势。结果显示: ①各资料中气温变化的一致性很高, 但对于降水在2008年之后的变化, 不同资料差异较大, 可能是金融危机下可用台站数量急剧下降造成的。②ERA-Interim再分析资料能够很好地再现北极陆地温度和降水的整体增加趋势, 变化速率分别约 $(0.57 \pm 0.07) ^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 和 $(0.10 \pm 0.05) \text{ mm}/100\text{ a}$ 。春、秋、冬季升温趋势强, 而夏季升温趋势较弱。北冰洋沿岸地区升温速率最大, 局地可超过 $1.0 ^\circ\text{C}/10\text{ a}$ 。③降水的增加趋势在秋季最大。西伯利亚降水的增加与局地升温有很好的对应关系, 其中秋季西伯利亚东部平均和极端降水的增加趋势可达热力学约束的 $8\%/K$ 。④夏季气温日较差没有显著的变化趋势, 春季阿拉斯加和加拿大北部地区的气温日较差呈显著增大趋势, 其他区域则以减小趋势为主。气温年较差在北欧、阿拉斯加和加拿大北部呈减小趋势, 在西伯利亚西部和东部呈增加趋势。无论冬夏, 温度最小值的升高趋势比最大值更显著; 冬季温度最小值的升高趋势比夏季更显著。研究表明, 地表升温是北极陆地局地降水增加的重要驱动因素, 不同区域降水变化的差异则可能与环流变化有关; 观测台站数量的减少对降水趋势的监测有显著影响; ERA-Interim可作为北极地区观测分析资料的重要补充, 特别在台站稀疏地区和台站数量减少的时段, ERA-Interim可提供一致和可信的气候变化信息。

关键词: 北极陆地; 线性趋势; 地表气温; 降水; 气温日较差; 气温年较差; 极端气候指标

DOI :10.18402/resci.2021.06.16

1 引言

北极冰雪圈是气候系统的重要组成部分, 在维持地球能量收支平衡中起重要作用。随着全球变暖的加剧, 过去几十年内北极的气候环境发生了剧烈的变化, 且呈愈演愈烈之势。极地气温的快速升高和海冰、冰川的快速融化是最突出的现象, 例如2016年北极海冰面积处于历史最低值的时间长达4个月。温度上升和冰雪融化之间的正反馈关系使新裸露地表的温度比有冰雪覆盖时增加了 $4\sim 5 ^\circ\text{C}$ ^[1],

从而升温速率在北极地区被放大至全球平均的2~3倍^[2], 产生升温“极地放大”现象^[3,4]。近年来, 北极点附近的气温在极夜期间出现比气候均值高出 $20\sim 30 ^\circ\text{C}$ 以上、接近甚至超过 $0 ^\circ\text{C}$ 的极端事件越来越频繁^[5]。从不利的方面看, 这些变化不仅改变了北极局地的气象要素和地貌特征, 而且能够通过扰动大气波活动调整北半球中纬度地区的环流系统, 诱发极端天气和气候事件, 严重影响人口稠密的北美和欧亚大陆地区的社会经济生活^[6,7]。格陵兰冰盖的

收稿日期: 2020-09-01 修订日期: 2020-11-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602602); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4); 国家自然科学基金项目(41605057)。

作者简介: 陈晓龙, 男, 陕西蒲城人, 副研究员, 主要从事气候模拟和预估研究。E-mail: chenxl@lasg.ipa.ac.cn

2021年6月

消融带来的海平面上升也越来越成为需要人类社会认真面对的问题。从有利的方面看,北极地区温度上升扩大了适于人类活动的范围,海冰面积的减少使得北极航道适航时间和距离延长,有利于发展贸易,开发该地区丰富的矿产、渔业和旅游资源^[8-11]。

降水和气温作为反映水热资源的基本气象要素,是刻画北极气候变化的指标性变量。1980—2019年北极陆地(60°N以北)平均地表气温的升温速率约为0.56℃/10 a,是全球变暖最为显著的地区之一^[9];极端暖事件的频率和强度显著增加,冷事件则减少^[12]。2000年以来,北极地区的永久冻土层升温速率为0.4~0.9℃/10 a^[13]。北极陆地的升温趋势是非常明确的信号,但对于降水而言,因观测稀疏,其变化趋势有很大的不确定性^[14],并且随区域而异^[15]。西伯利亚环北极流域正在变暖变湿,不同流域的差异可能与下垫面状况有关^[16],同时地表径流在冬季呈现比较明显的增加趋势^[17];极端降水增加,而干旱事件可能减少^[18,19]。大气分析资料显示近几十年北极降水总体呈增加趋势^[20,21],但不同资料之间的不确定性很大^[22]。本文注意到降水分析资料中所使用的北极地区台站数量自1990年苏联解体以来逐渐减少,特别在2008年金融危机后急剧下降,这给观测资料所反映的气候变化信息的可靠性带来很大的挑战。由于变化趋势的计算受起止两端数据的影响很大,近几十年可用观测数据的减少可能是上述不确定性的一个重要来源。因此需要进行多套资料以及与再分析资料的对比分析,考察因台站数量减少给北极地区气温和降水变化研究带来的影响。

当前对北极气候变化关注最多的是北极海冰的快速减少及其升温的北极放大现象^[23,24],但对北极温度、降水趋势的季节差异特征探讨较少。关于极区温度和降水变化的关系以及平均态和极端事件变化异同的研究也较少。2018年《中国的北极政策》白皮书中已明确了未来共同开发北极、参与北极治理的基本方向。因此,充分认识当前北极的气候变化趋势,对于参与国际合作、拓展国际贸易、争取北极问题话语权也具有重要意义^[25,26]。本文通过比较多套观测和再分析资料,对北极陆地气温和降水的长期趋势进行分析,阐述其变化的季节特征,综合探讨降水和气温变化的关系,并比较极区气候

态变化与极端气候事件变化的异同,以期在未来在极区日益增多的人类活动提供科学支撑。

2 数据和方法

2.1 数据来源

研究使用多套基于观测的温度和降水分析格点数据和一套大气再分析数据。温度资料包括:①英国东安格利亚大学气候研究中心的CRU TS数据集v4.04的月平均气温,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[27];②美国国家大气海洋局(NOAA)提供的基于全球历史气候网络和气候异常监测系统(GHCN-CAMS)的月平均地表气温数据,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[28];③特拉华大学(University of Delaware)的月平均气温分析数据UDel v5.01,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[29];④伯克利地球组织(Berkeley Earth)的格点月平均气温分析数据,空间分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (<http://berkeleyearth.org/archive/data/>)。降水资料包括:①CRU TS v4.04的月平均降水,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[27];②基于全球降水气候中心(GPCC)的月平均分析数据GPCC v2018,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[30];③UDel v5.01的月平均降水分析数据,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^[29];④基于器测的陆地降水重建月平均分析数据(PREC/L),空间分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ^[31]。再分析数据为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-Interim,包含月平均和日平均的气温和降水资料,空间分辨率 $0.75^{\circ}\times 0.75^{\circ}$ ^[32]。除GPCC v2018数据截至2016年外,其余数据均可覆盖1979—2017年。利用双线性插值将所有数据统一到ERA-Interim的网格分辨率上。

2.2 分析方法

由于北极大多数地区缺乏长期可靠的日平均温度和降水观测数据,这里首先利用多套基于观测的月平均温度和降水分析资料对比评估ERA-Interim再分析数据,然后基于ERA-Interim的日平均数据考察极端气温和降水的长期趋势。

气温日较差定义为同一天日最高气温与日最低气温之差。气温年较差定义为一年内月平均最高和最低气温之差。极端气温指标采用季节内日最高温度最大值(Warmest Daily Temperature Max, TXx)、日最高温度最小值(Coldest Daily Temperature Min, TXn)、日最低温度最大值(Warmest Daily Temperature Max, TNx)和日最低温度最小值(Coldest Daily Temperature Min, TNn)。极端气温年较差

定义为一年内TX_x与TN_n之差。极端降水指标采用季节内最大连续5天降水量(Wettest Consecutive Five Days, RX5d)。气温和降水变化的参照值为1981—2010年气候态。冬季指12月—次年2月,春季指3—5月,夏季指6—8月,秋季指9—11月。

研究采用线性趋势分析和相关分析。将气象变量与时间(年份)进行最小二乘回归,回归系数即为线性趋势;相关系数采用Pearson相关。线性趋势和相关系数的显著性检验为 t 分布检验。

3 结果与分析

3.1 不同观测资料中北极气候变化趋势的异同

为了说明ERA-Interim再分析数据在北极陆地的适用性,图1和表1比较了其与多套观测分析资料中1979—2017年北极陆地(60°N以北)区域平均地表气温和降水相对于1981—2010年气候态的异常时间序列。对于气温而言,无论是年平均(图1a)还是各季节平均(图1c、1e、1g和1i),不同观测分析数据均表现出一致的升温趋势,彼此间差异很小;

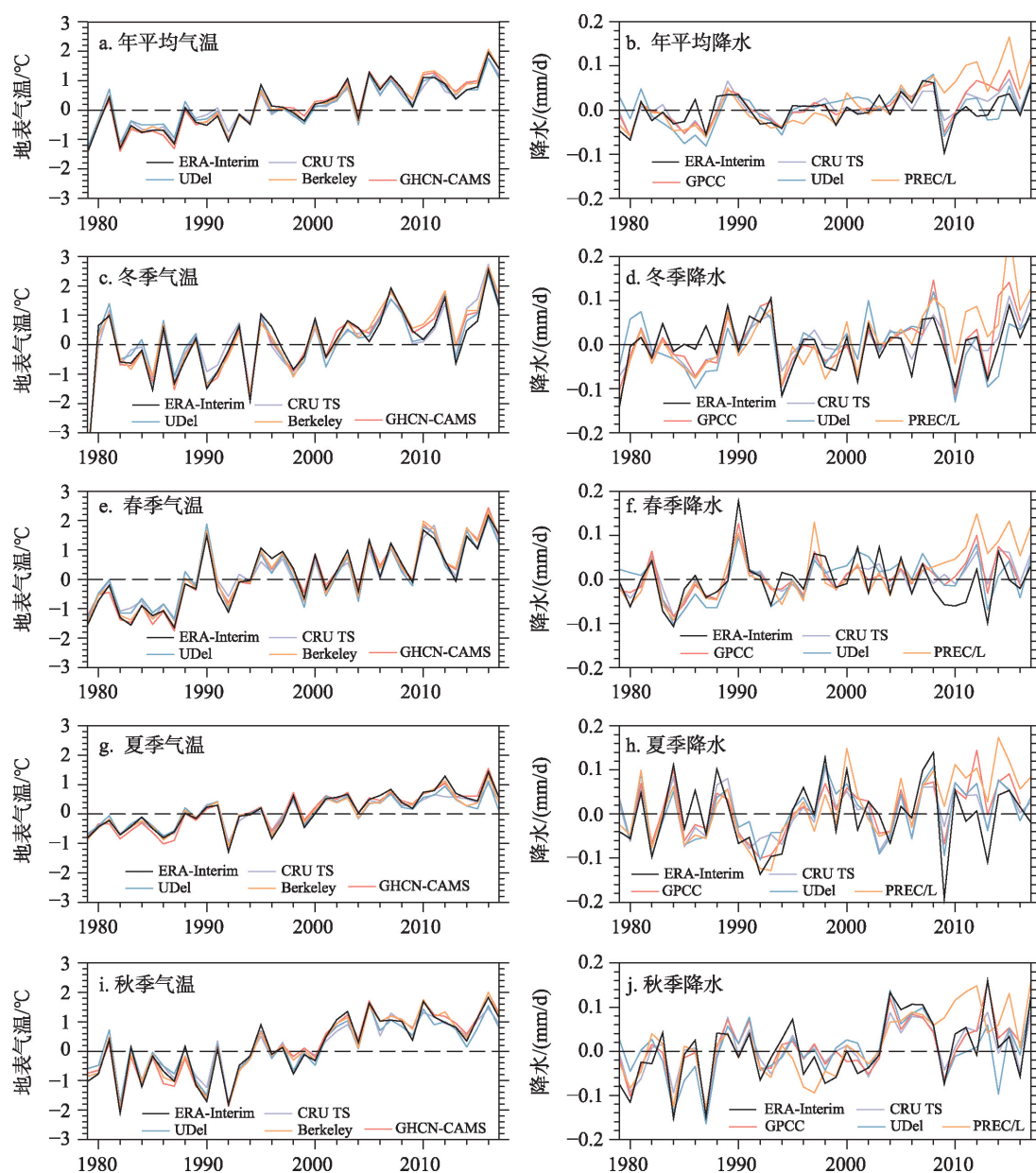


图1 1979—2017年北极陆地(60°N以北)区域平均地表气温和降水相对于1981—2010年气候态的异常时间序列

Figure 1 Time series of near-surface air temperature and precipitation anomalies relative to the 1981-2010 climatology averaged over the Arctic land (60°N north) (a, b. Annual mean; c, d. Winter; e, f. Spring; g, h. Summer; i, j. Autumn)

2021年6月

表1 4套观测分析资料和ERA-Interim再分析资料中1979—2017年北极陆地(60°N以北)地表气温的线性趋势

	the ERA-Interim reanalysis				
	年平均	冬季	春季	夏季	秋季
CRU TS	0.52±0.06 (0.98)	0.59±0.13 (0.96)	0.58±0.09 (0.97)	0.34±0.04 (0.97)	0.60±0.08 (0.97)
GHCN-CAMS	0.63±0.06 (0.99)	0.66±0.13 (0.98)	0.71±0.10 (0.98)	0.44±0.05 (0.98)	0.73±0.09 (0.97)
UDel	0.47±0.07 (0.99)	0.52±0.14 (0.98)	0.56±0.10 (0.97)	0.30±0.05 (0.98)	0.52±0.09 (0.99)
Berkeley	0.60±0.07 (0.99)	0.70±0.13 (0.97)	0.69±0.10 (0.99)	0.37±0.05 (0.99)	0.69±0.09 (0.99)
观测平均	0.55±0.06	0.62±0.13	0.64±0.10	0.36±0.05	0.63±0.09
ERA-Interim	0.57±0.07	0.58±0.14	0.67±0.10	0.42±0.06	0.66±0.10

注:不确定性用 $\pm 1\sigma$ 表示。括号中为ERA-Interim与对应观测分析资料的相关系数,均通过 t 检验1%的显著性水平,下同。

春、秋、冬季趋势强,而夏季趋势较弱(表1);ERA-Interim中气温的时间演变几乎与各观测分析重合(图1左列),相关系数接近1(表1);ERA-Interim年平均温度变化速率约 $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,而多套观测平均结果为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,两者非常一致,因此ERA-Interim的温度变化具有很高的可信度。

相对于温度,不同资料间降水变化的差异更大,特别是2008年以后差异更加明显(图1右列),这可能是近10多年来由于各种经济和政治原因^[33],特别是全球金融危机造成可用台站数量锐减所导致(图2)。尽管如此,各观测分析资料均显示北极陆地年平均降水呈增加趋势,其中秋季增加趋势最明显(表2)。4套观测资料中PRCE/L的趋势最强,UDel的趋势最弱,仅为前者的约1/5~1/2。ERA-Interim的年平均和季节平均降水与各观测分析数据的相关系数均超过了1%的统计显著性(表2),与CRU TS和GPCC的相关系数最高,均在0.70以上,表现出较好的观测再现能力。从年平均降水的趋

势看,ERA-Interim与CRU TS和UDel最接近;除秋季外,其他季节ERA-Interim降水的正趋势不显著,而各观测分析资料降水趋势明显大于ERA-Interim。由于这里给出的是整个北极陆地的区域平均,整体趋势不显著可能是不同区域正负趋势相抵的结果,因此下一小节将进一步分析趋势的空间特

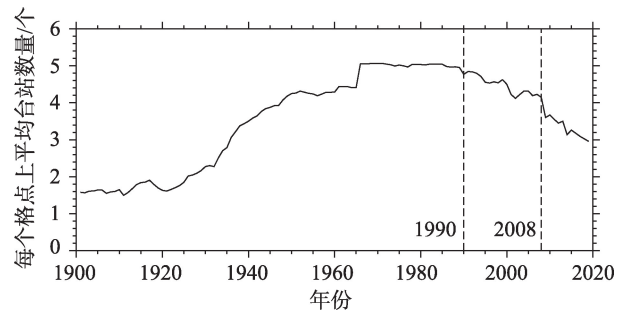


图2 CRU TS数据集1900—2020年北极陆地地区(60°N以北)平均每个格点上的台站数量的变化

Figure 2 The number of stations for each grid in the CRU TS dataset in the Arctic land (60°N north), 1900–2020

表2 4套观测分析资料和ERA-Interim再分析资料中1979—2017年北极陆地(60°N以北)降水的线性趋势

	the ERA-Interim reanalysis				
	年平均	冬季	春季	夏季	秋季
CRU TS	0.15±0.04 (0.75)	0.13±0.07 (0.81)	0.14±0.05 (0.74)	0.13±0.08 (0.73)	0.22±0.07 (0.88)
GPCC	0.20±0.04 (0.71)	0.19±0.09 (0.78)	0.14±0.06 (0.75)	0.19±0.08 (0.76)	0.26±0.08 (0.89)
UDel	0.13±0.05 (0.66)	0.07±0.09 (0.67)	0.11±0.06 (0.67)	0.14±0.08 (0.76)	0.19±0.09 (0.77)
PREC/L	0.37±0.05 (0.52)	0.38±0.08 (0.71)	0.33±0.07 (0.47)	0.35±0.09 (0.61)	0.42±0.08 (0.69)
观测平均	0.21±0.04	0.20±0.07	0.19±0.05	0.20±0.08	0.28±0.07
ERA-Interim	0.10±0.05	0.05±0.08	0.02±0.08	0.06±0.11	0.30±0.09

征。鉴于ERA-Interim降水的年际变化和长期趋势在2008年前(可用观测台站较为充足的时期)与各观测分析均非常吻合,因此,2008年后台站数目减少可能使观测分析资料高估了北极陆地降水的增加趋势。由于ERA-Interim由同一套系统输出,具有很好的时间一致性和变量间的自洽性,因此下文主要基于这一数据作进一步分析。

3.2 不同季节气温和降水的变化趋势的空间特征

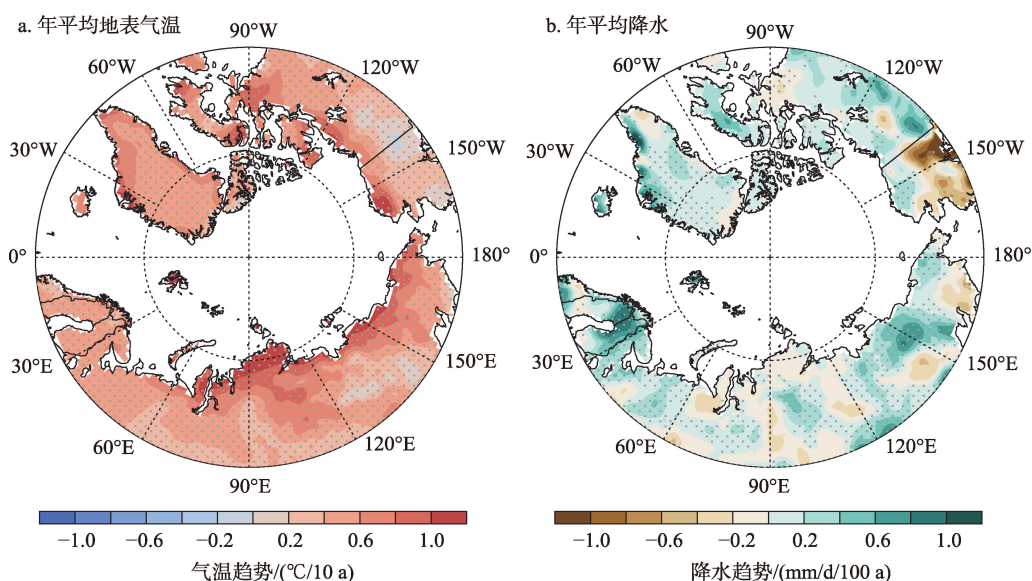
基于ERA-Interim再分析资料,1979年以来,北极大部分陆地年平均地表气温呈显著增加趋势,其中北冰洋沿岸地区升温速率最大,包括俄罗斯北部、加拿大北部、格陵兰岛东部和西部,局地可超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图3a)。欧洲(0°E — 60°E)、西伯利亚(60°E — 180°E)、阿拉斯加和加拿大北部(170°W — 60°W)、格陵兰岛(60°W — 20°W)平均升温速率分别约为 0.55 、 0.62 、 0.52 和 $0.57\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

从季节变化上看,北欧(0°E — 40°E)冬季升温速率最快(图4a),平均可达 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;其次为春、秋两季(图4b、4d);夏季升温最慢(图4c)。西伯利亚春季升温最快,几乎覆盖整个区域(图4b),可达 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;其次为秋季,最大值位于北部和东部(图4d);冬季升温最大值局限在中部,东部甚至出现降温趋势,但并不显著(图4a)。阿拉斯加和加拿大北

部升温在冬季和秋季最大,均约为 $0.70\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,且空间分布相似(图4a、4d)。格陵兰岛4个季节升温速率接近,最大值出现在秋季,约为 $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。整个北极地区夏季升温速率最小,原因是更多的热量用于融化海冰以及储存在海水中^[34];夏季升温的空间分布也较其他季节更为均匀,这与夏季对流层南北温度梯度较小,西风带槽脊活动较弱有关^[6]。

随着温度上升,大气中水汽含量增加,1979—2017年北极陆地年平均降水整体上也呈上升趋势,但空间分布与温度趋势相比更加不均匀,局部地区甚至出现降水减少趋势;降水极大值出现在北欧北部、西伯利亚东部和格陵兰岛东部沿岸;各观测分析资料与ERA-Interim结果有较好一致性(图3b)。

从季节变化上看,北欧地区冬、夏两季降水明显增加(图5a、5c),变化速率分别约为 0.67 和 $0.87\text{ mm/d}/100\text{ a}$,在秋季其南部呈显著的减少趋势(图5d)。北欧冬季降水与增暖中心有很好的对应关系,换算为局地温度升高 1 K 的降水变化,降水的增加速率相当于 $3.87\%/K$ 。西伯利亚降水整体增加的趋势主要发生在春、秋两季(图5b、5d),中心分别位于东部和西部,变化速率分别约为 0.42 和 $0.81\text{ mm/d}/100\text{ a}$,将其与升温趋势的空间分布对比(图4b、4d),可以看到降水增加与升温中心也一致,换

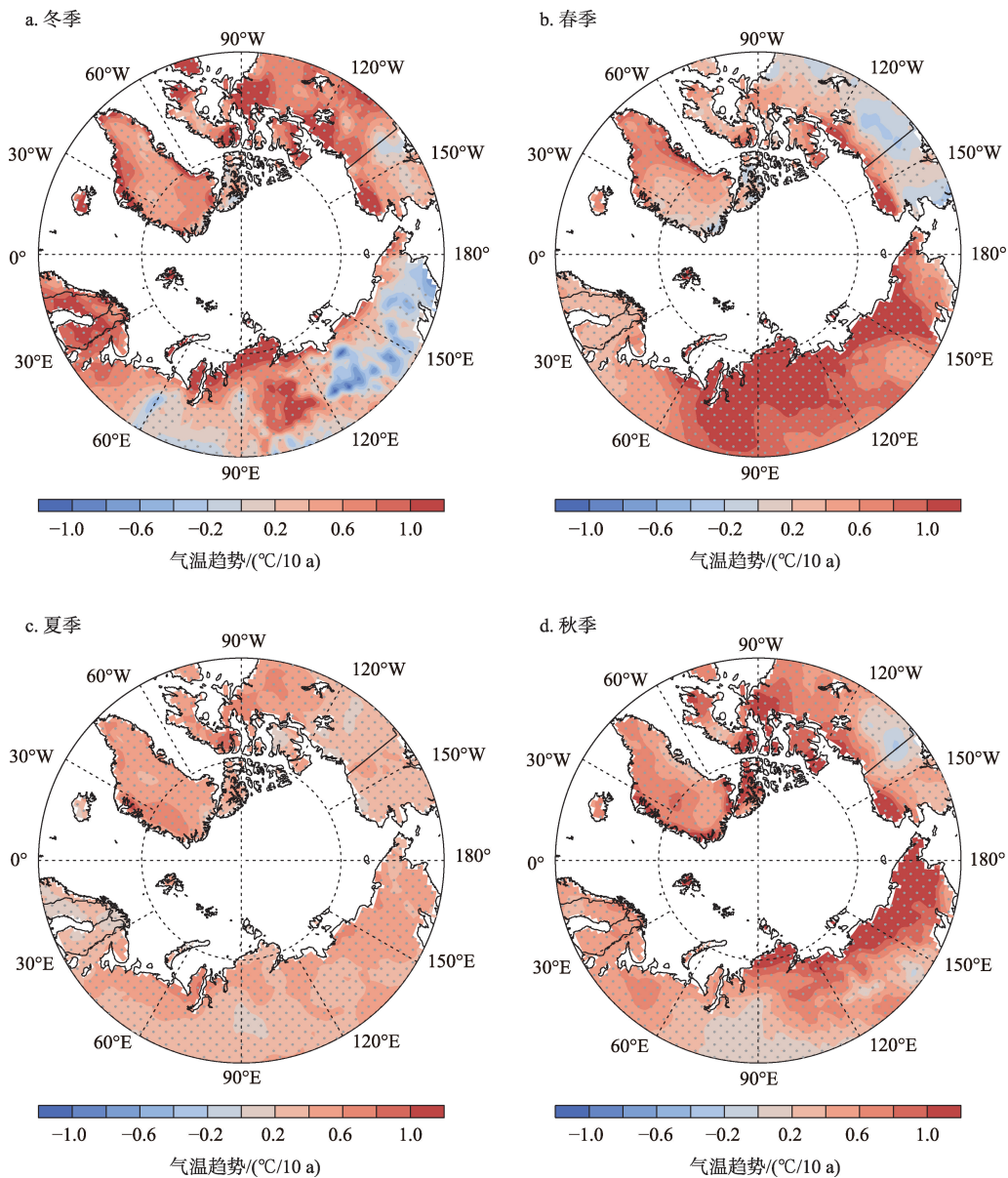


注:阴影表示4套观测分析资料中至少有3套与ERA-Interim的趋势同号。

图3 1980—2017年北极陆地(60°N 以北)年平均(a)地表气温和(b)降水的线性趋势

Figure 3 Linear trends of annual mean (a) surface air temperature and (b) precipitation over the Arctic land (60°N north) during 1979–2017 based on ERA-Interim (Dotted shadings denote that at least 3 out of the 4 observational analysis datasets agree with the sign of trend in ERA-Interim)

2021年6月



注:阴影表示4套观测分析资料中至少有3套与ERA-Interim的趋势同号。

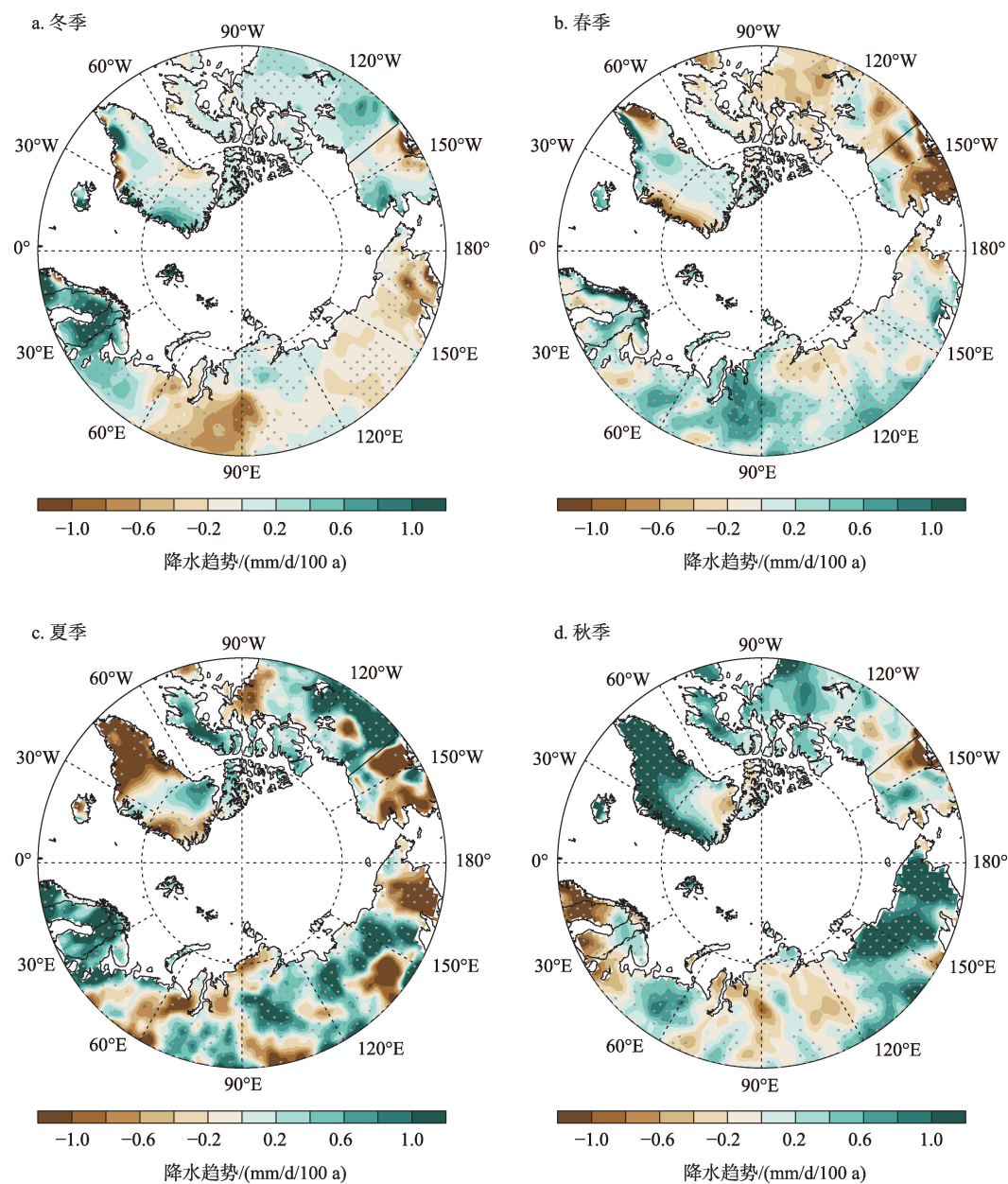
图4 1979—2017年ERA-Interim中北极陆地四季平均地表气温的线性趋势

Figure 4 Linear trends of seasonal surface air temperature over the Arctic land during 1979–2017 based on ERA-Interim (a. Winter; b. Spring; c. Summer; d. Autumn). Dotted shadings denote that at least 3 out of the 4 observational analysis datasets agree with the sign of trend in ERA-Interim)

算为局地温度升高1 K的降水变化,这一趋势分别相当于8.11%和2.88%/K。秋季西伯利亚东部降水增加速率接近克劳修斯-克拉贝龙方程的热力学约束(北极地区约(7.5%~8%)/K^[35]),说明大气水汽的增多对这一地区降水增加起主要作用;冬季北欧和春季西伯利亚西部降水增加速率小于理论值,可能是由环流减弱造成的^[36]。夏季西伯利亚中部降水也呈显著增加趋势,但同时东部和西部降水出现减少

趋势,整体趋势不显著(图5c)。

加拿大北部降水在夏季有显著增加趋势(图5c),冬、秋季降水也有明显增加(图5a、5d),但春季出现较弱的减少趋势(图5b)。阿拉斯加春、夏两季降水有明显的减少趋势,其中春季的减少趋势在各资料间一致性较好,但夏季趋势的一致性较差(图5b、5c);冬、秋两季则表现为北部增加、南部减少(图5a、5d)。格陵兰岛年平均降水整体呈增加趋势(图



注:阴影表示4套观测分析资料中至少有3套与ERA-Interim的趋势同号。

图5 1979—2017年ERA-Interim中北极陆地四季平均降水的线性趋势

Figure 5 Linear trends of seasonal precipitation (mm/d/100 a) over the Arctic land during 1979–2017 based on ERA-Interim (a. Winter; b. Spring; c. Summer; d. Autumn). Dotted shadings denote that at least 3 out of the 4 observational analysis datasets agree with the sign of trend in ERA-Interim)

3b),但不同季节和区域会出现正负趋势相抵的情况,特别是夏、秋两季,主要表现为格陵兰岛南部夏季降水显著减少,而秋季显著增加(图5c、5d)。其他区域,降水增加通常对应温度升高带来水汽的增多,但考虑到夏、秋两季格陵兰岛升温速率和空间分布相近(图4c、4d),因此降水出现截然相反的趋势很可能是环流变化引起的。夏季降水显著的减少趋势与格陵兰阻塞高压增强和北大西洋涛动的

减弱趋势有关^[37]。

3.3 气温日较差的变化趋势

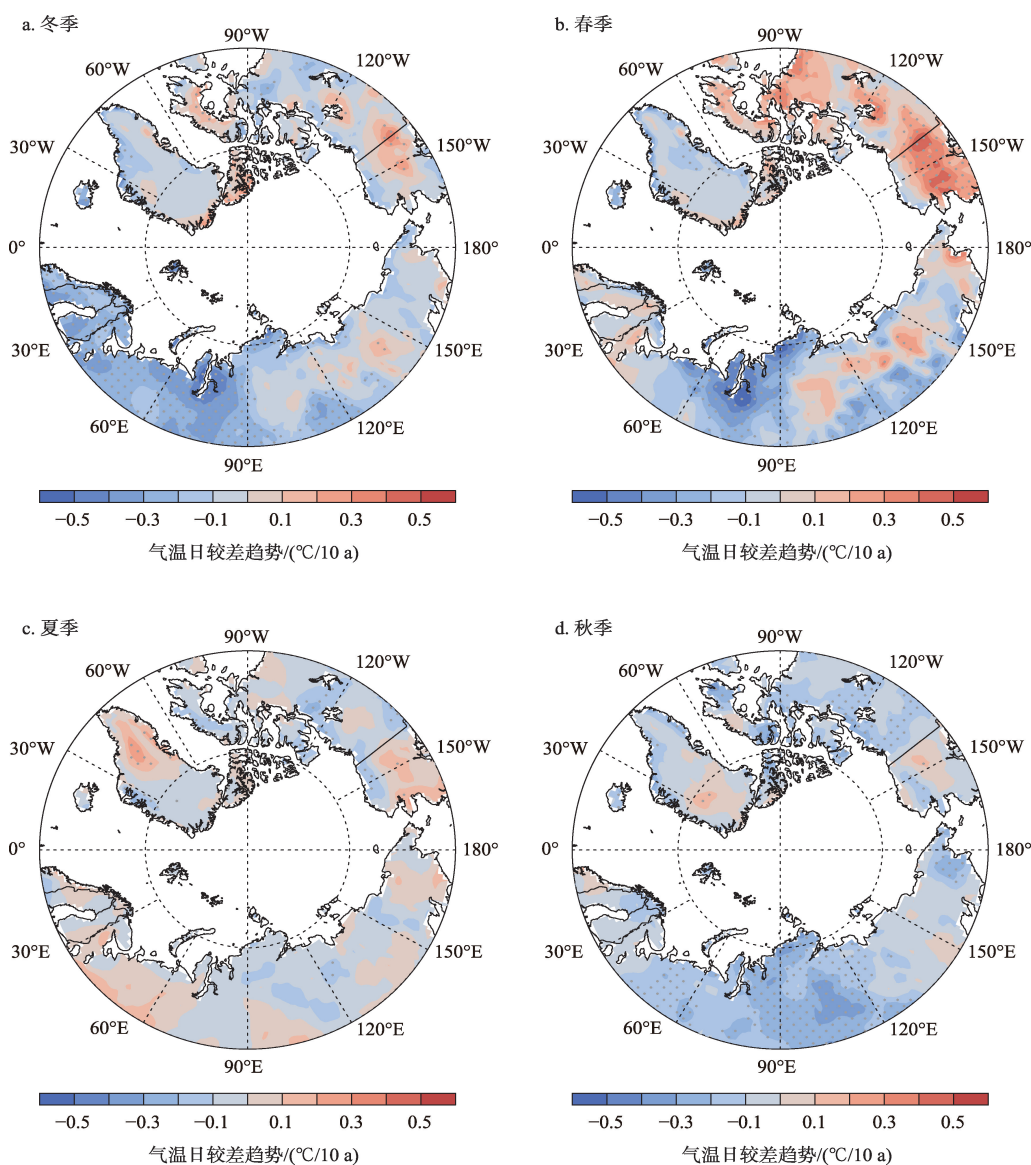
气温日较差是一天中最高温度和最低温度的差值,反映日尺度内温度变化的剧烈程度,是影响作物生长的关键因子之一。图6显示,1979—2017年气温日较差长期趋势存在明显的季节和区域特征。由于变暖背景下,日最高(白天)和最低(夜间)温度均呈增加趋势,若日较差增大,则表明白天最

高温度升高趋势大于夜晚最低温度的升高趋势,反之亦然。冬季欧洲地区气温日较差呈显著减小趋势,约 $-0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图6a)。西伯利亚西部在冬、春、秋三季的气温日较差均呈显著减小趋势(图6a、6b、6d),其中冬春两季变化速率约 $-0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,秋季约 $-0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;冬、春两季西伯利亚中部地区局地可能出现气温日较差增大的现象(图6a、6b)。春季阿拉斯加和加拿大北部地区的气温日较差呈显著增大趋势(图6b),区域平均的变化速率约为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,局地可超过 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。夏季整个北

极陆地的气温日较差没有显著的变化趋势(图6c)。

3.4 气温年较差的变化趋势

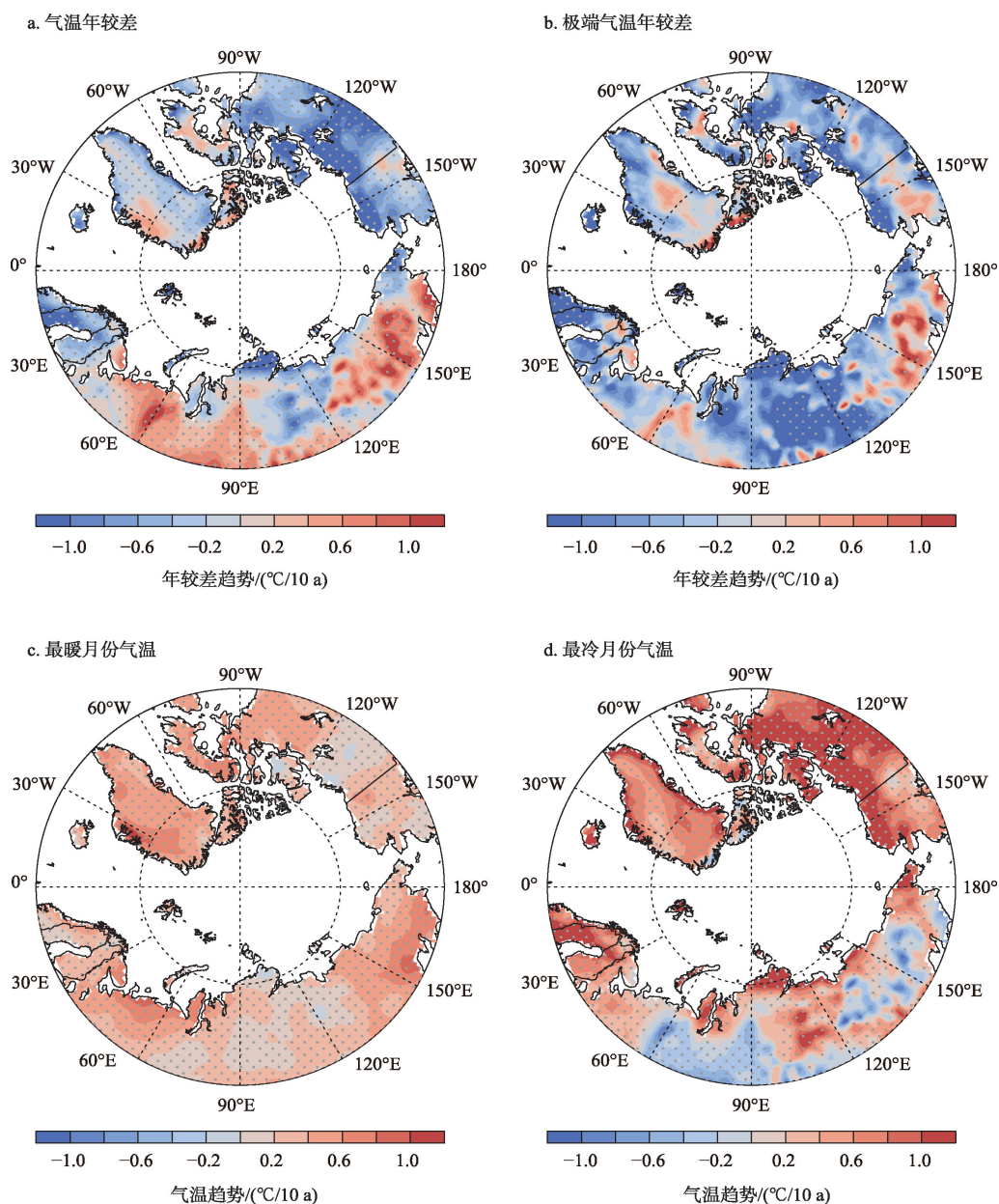
气温年较差对农作物和植被的跨季节生长以及农业活动的安排有重要影响^[38]。图7中,ERA-Interim中气温年较差的趋势与4套观测分析资料呈现很好的一致性。气温年较差在北欧、阿拉斯加和加拿大北部呈减小趋势,变化速率分别约为 -0.69 和 $-0.78\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;在西伯利亚西部和东部呈增加趋势(图7a),变化速率分别约为 0.29 和 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。最暖月份的温度变化趋势(图7c)与夏季平均温度的



注:阴影表示通过 t 检验5%的显著性水平。

图6 1979—2017年ERA-Interim中北极陆地四季平均气温日较差的线性趋势

Figure 6 Linear trends of diurnal temperature range over the Arctic land during 1979–2017 based on ERA-Interim (a. Winter; b. Spring; c. Summer; d. Autumn. Dotted shadings indicate values exceeding the 5% significance level)



注: a、c、d 中阴影表示 4 套观测分析资料中至少有 3 个与 ERA-Interim 的趋势同号; b 中阴影表示通过 t 检验 5% 的显著性水平。

图7 1979—2017年ERA-Interim中北极陆地(a)气温年较差、(b)极端气温年较差、(c)最暖月份气温和(d)最冷月份气温的线性趋势

Figure 7 Linear trends of (a) annual temperature range, (b) extreme annual temperature range, surface air temperature in (c) warmest and (d) coldest month over the Arctic land during 1979-2017 based on ERA-Interim (In a, c, d, dotted shadings denote that at least 3 out of the 4 observational analysis datasets agree with the sign of trend in ERA-Interim; while in b they mean values exceeding the 5% significance level)

趋势相近(图4c),而最冷月份的温度变化趋势(图7d)明显强于冬季平均温度的趋势(图4a),特别是西伯利亚西部的变冷和阿拉斯加、加拿大北部的变暖。由于最暖月份的升温趋势的空间分布较均匀(图7c),气温年较差的趋势主要由最冷月份的温度趋势决定(图7d)。

日最高温度最大值(TXx)与日最低温度的最小值(TNn)之差反映了气温年较差的最大范围。这一极端值的趋势特征(图7b)与基于月平均指标的结果(图7a)在北欧、阿拉斯加和加拿大北部较为相似,但在西伯利亚中西部有明显区别,主要是因为TNn在这一区域出现显著的升温(图8)。

2021年6月

3.5 极端气候指标的变化趋势

图8为1979—2017年北极陆地地区冬、夏两季日最高气温的极端高值(TXx)、最高气温的极端低值(TXn)、日最低气温的极端高值(TNx)和日最低气温的极端低值(TNn)的线性趋势。无论冬季还是夏季, TXn和TNn(图8c、8d、8g、8h)的升温趋势比TXx和TNx(图8a、8b、8e、8f)更大;冬季TXn和TNn(图8c、8g)的升温趋势比夏季更大(图8d、8h)。

冬季西伯利亚中部(110°E—140°E)TXx出现减小趋势(图8a), 变化速率约 $-0.64\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 比平均温度的变化趋势更显著(图4a)。这一变冷趋势可能与巴伦支-喀拉海区域的海冰快速减少有关, 其通过扰动大气环流使乌拉尔山高压脊和东亚大槽增强, 导致西伯利亚地区寒潮爆发更加频繁^[39]。而TXn、TNn则相反(90°E—120°E; 图8c、8g), 平均升温速率约 $1.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。升温速率的区域差异可能

是由不同的环流变化导致的, 因此环流对极端高值的影响比对极端低值更加明显。

夏季东欧、西伯利亚东部、加拿大北部和格陵兰岛北部的TXx和TNx均呈显著增加趋势(图8b、8f); 东欧、西伯利亚北部的TXn和TNn也呈增加趋势(图8d、8h)。东欧夏季TXx和TXn双双增加意味着热浪事件强度会越来越大, 频率也会相应增加。

各个季节极端降水变化趋势的空间分布(图9)与季节平均降水(图5)相似, 但由于缺乏可靠观测资料的检验, 在许多地区无法确定ERA-Interim中极端降水变化的显著性。冬季极端降水在西伯利亚中西部有减少趋势(图9a); 秋季极端降水在西伯利亚东部出现显著增加趋势, 其变化速率可达 $3.58\text{ mm/d}/100\text{ a}$, 相当于 $7.91\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ (图9d), 与平均降水的增长率相当, 符合克劳修斯-克拉贝龙方程的热力学约束。

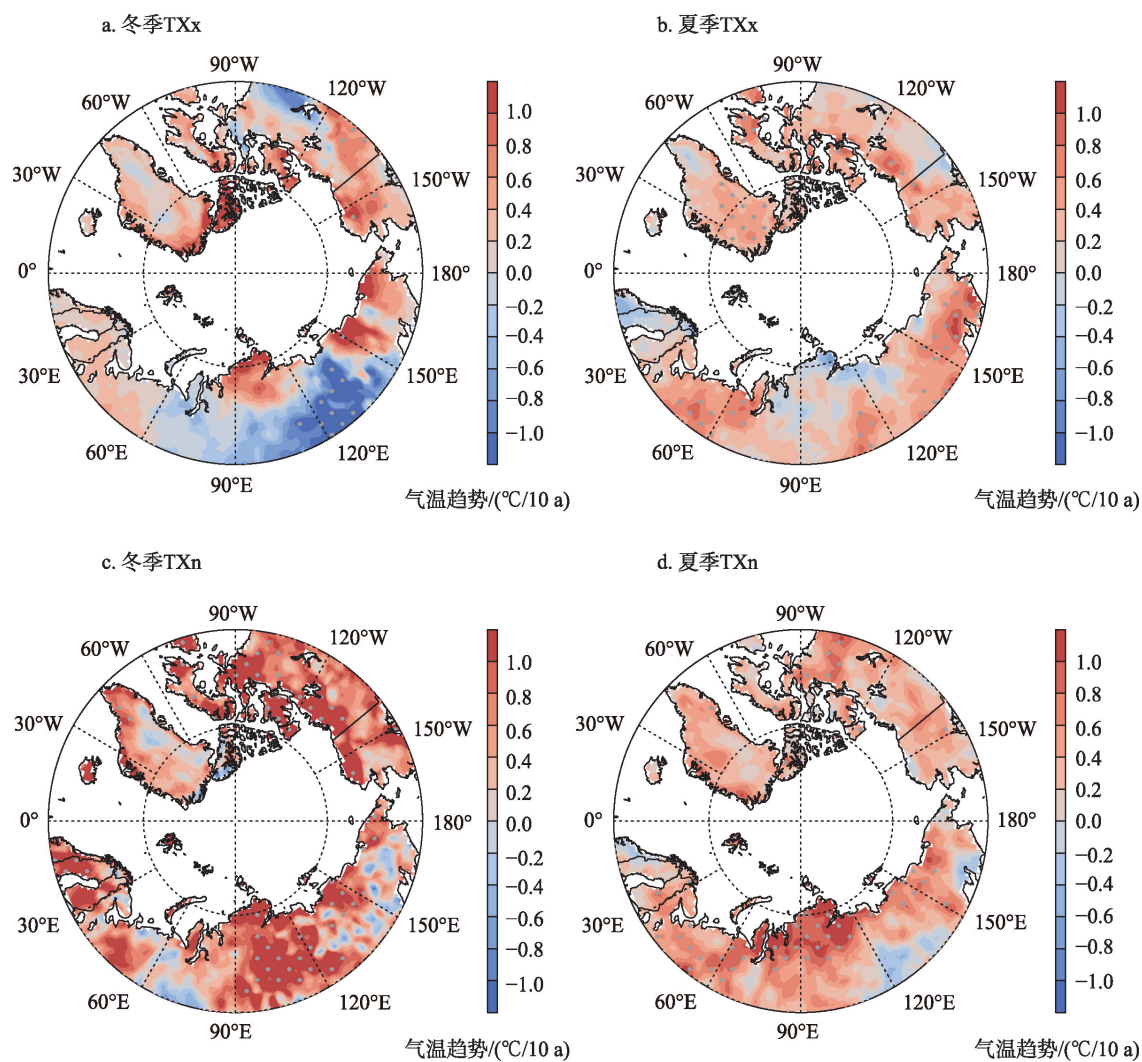
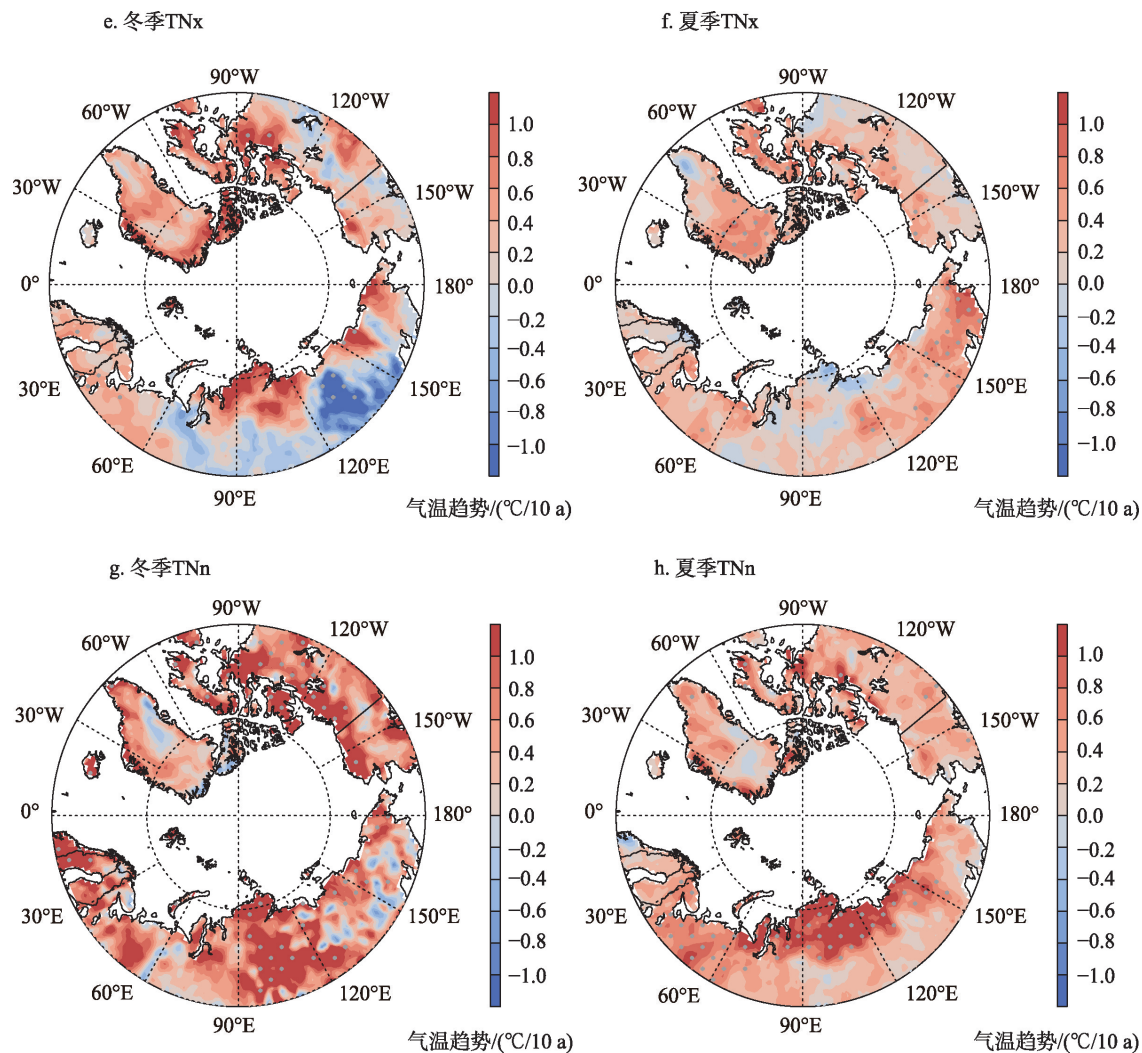


图8(续)



注:阴影表示通过 t 检验5%的显著性水平,下同。

图8 1979—2017年ERA-Interim中北极陆地地表气温极端指标的线性趋势

Figure 8 Linear trends of extreme temperature indices in (left column) winter and (right column) summer over the Arctic land during 1979–2017 based on ERA-Interim (a, b. Maximum of daily maximum temperature (TXx); c, d. Minimum of daily maximum temperature (TXn); e, f. Maximum of daily minimum temperature (TNx); g, h. Minimum of daily minimum temperature (TNn). Dotted shadings indicate values exceeding the 5% significance level, the same below)

4 结论与讨论

4.1 结论

本文研究利用ERA-Interim再分析数据,与4套基于台站观测的气温和降水月平均分析资料进行对比,分析了1979—2017年北极陆地地区的气候变化趋势,探讨了趋势季节特征以及气温和降水变化之间的关系,进一步利用ERA-Interim的日平均数据分析了极端气候指标变化的季节和区域差异性。主要结论如下:

(1)不同观测分析资料中北极陆地近40年升温趋势一致,差异较小,变化速率约 $0.57^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$;降水也呈一致的增加趋势,但主要受2008年以后台站数目锐减的影响,线性趋势的具体数值在不同资料间差异较大。ERA-Interim能够较好地再现各观测分析资料中气温和降水的年际变化和长期趋势。各套资料均显示北极陆地春、秋、冬季升温趋势强,而夏季升温趋势较弱;秋季降水的增加趋势最大。除秋季外,观测分析资料较ERA-Interim中降水的趋

2021年6月

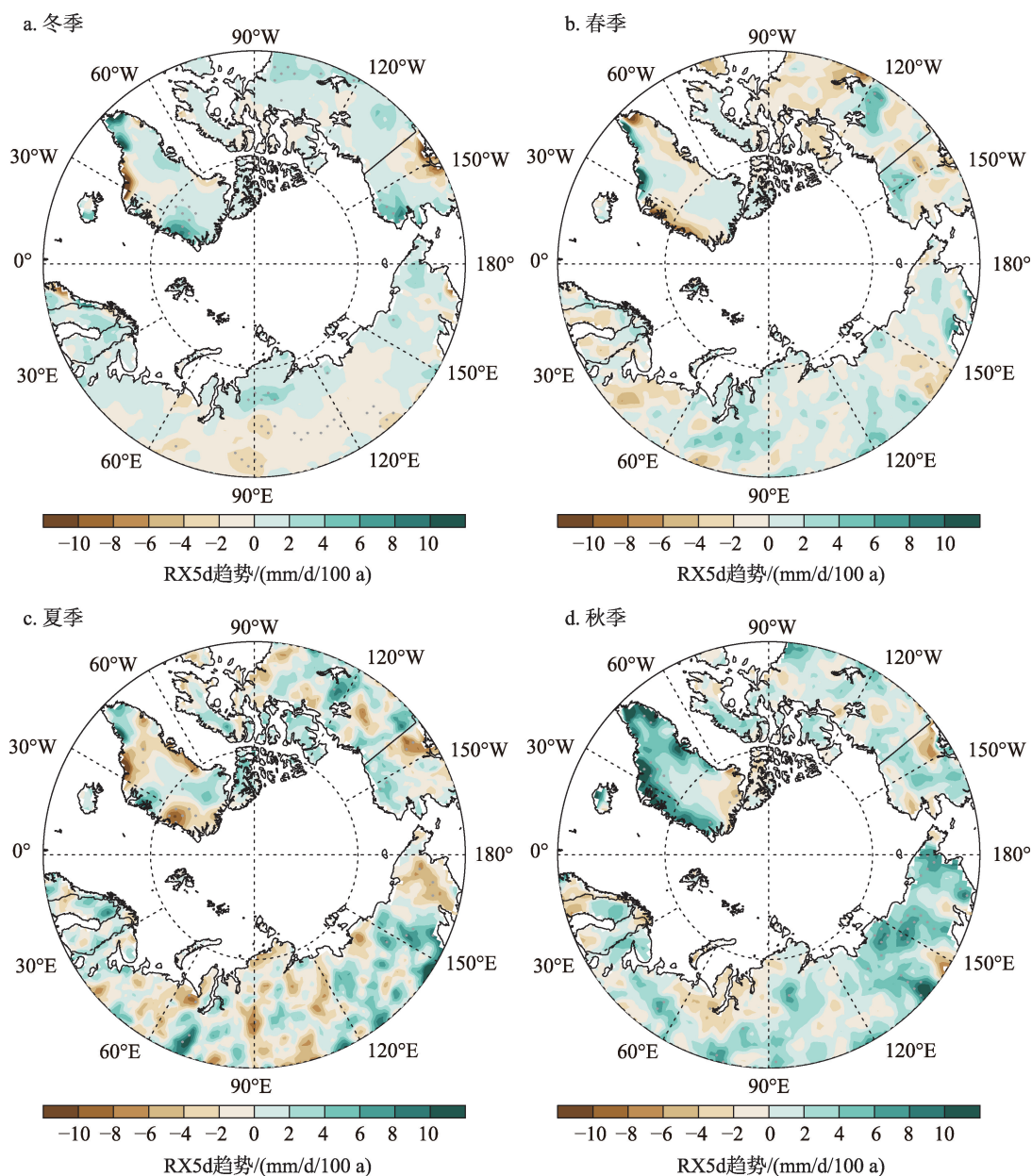


图9 1979—2017年ERA-Interim中北极陆地四季最大连续5天降水(RX5d)的线性趋势

Figure 9 Linear trends of maximum 5-d precipitation (RX5d) over the Arctic land during 1979-2017 based on ERA-Interim (a. Winter; b. Spring; c. Summer; d. Autumn)

势偏大,可能高估了2008年以后降水的增加。

(2)1979—2017年北极大部分陆地年平均地表气温呈显著增加趋势,其中北冰洋沿岸地区升温速率最大,平均约 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,局地超过 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。整个北极地区夏季升温速率最低;北欧冬季升温最快,西伯利亚春季升温最快,阿拉斯加和加拿大北部冬、春升温最快,格陵兰岛秋季升温最快。

(3)与升温趋势相比,降水趋势的空间分布更加不均匀。北欧地区冬、夏两季降水增加趋势显

著,西伯利亚降水整体增加的趋势主要发生在春、秋两季,与局地地表气温变化有很好的对应关系,其中秋季西伯利亚东部降水的增加趋势可达到热力学约束的 $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{K}$ 。受环流变化影响,格陵兰岛南部秋季和夏季降水趋势出现很强的正负相抵现象。

(4)冬季欧洲气温日较差减小趋势最为显著,西伯利亚西部气温日较差减小主要发生在冬、春、秋三季,变化速率为 $-0.2\sim-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。春季阿拉斯加和加拿大北部地区的气温日较差呈显著的增

大趋势。夏季气温日较差没有显著的变化趋势。气温年较差在北欧、阿拉斯加和加拿大北部呈减小趋势,速率约为 $-0.73\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;在西伯利亚西部和东部呈增加趋势,速率约 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

(5)无论冬季还是夏季,极端气温最小值(日最高和日最低)的升温趋势比最大值(日最高和日最低)更显著;冬季极端气温最小值的升温趋势比夏季更显著。冬季西伯利亚中部日最高温度最大值出现减小趋势,东欧地区夏季日最高温度最大值和日最高温度最小值均呈增加趋势,大大增加了热浪发生的风险。因缺乏可靠的观测资料,北极陆地极端降水的长期趋势信度较低。秋季西伯利亚东部极端降水有显著的增加趋势,与地表温度变化有较好的对应关系,可达 $8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{K}$ 。

4.2 讨论

北极陆地升温也存在随纬度增加而增大的现象,这可能与北冰洋海冰的融化有关。北极增暖放大会减小极地和低纬度的温度梯度,可能减弱中纬度的西风急流,出现更多弯曲的槽脊结构^[1,40],使沿急流传播的天气系统移动速度减慢,这可能导致中纬度出现更多持续时间更长的高低压系统,引发极端温度和降水事件^[41]。北极增暖下海冰面积的减少(蒸发出更多水汽)可能增加从北极输送到欧亚大陆的水汽,从而使大陆秋季的降雪增多^[42,43]。

不同观测分析资料和ERA-Interim再分析资料中气候变化趋势的一致性表明,ERA-Interim再分析结果在北极陆地区域表现出较好的性能。鉴于台站缺少等原因可能造成观测分析资料较大的不确定性,ERA-Interim再分析变量齐全、时空分辨率高的优点有助于进一步阐释北极地区更加精细尺度上的气候变化及其机理。

参考文献(References):

- [1] Wood K R, Overland J E, Salo S A, et al. Is there a "new normal" climate in the Beaufort Sea? [J]. *Polar Research*, 2013, DOI: 10.3402/polar.v32i0.19552.
- [2] Francis J A, Vavrus S J, Cohen J. Amplified Arctic warming and mid-latitude weather: New perspectives on emerging connections [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2017, DOI: 10.1002/wcc.474.
- [3] 赵进平, 史久新, 王召民, 等. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 985-995.

- [Zhao J P, Shi J X, Wang Z M, et al. Arctic amplification produced by sea ice retreat and its global climate effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(9): 985-995.]
- [4] Dai A G, Luo D H, Song M R, et al. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO_2 [J]. *Nature Communications*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-018-07954-9.
- [5] Moore G W K. The December 2015 North Pole Warming Event and the increasing occurrence of such events [J]. *Scientific Reports*, 2016, DOI: 10.1038/srep39084.
- [6] Coumou D, Capua G D, Vavrus S, et al. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2959.
- [7] 武炳义. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题[J]. *大气科学*, 2018, 42(4): 786-805. [Wu B Y. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 786-805.]
- [8] Anisimov O A, Vaughan D G, Callaghan T V, et al. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Meredith M, Sommerkorn M, Cassotta S, et al. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [10] 李振福, 汤晓雯, 姚丽丽, 等. 北极通道开发与中国石油进口通道格局变化[J]. *资源科学*, 2015, 37(8): 1639-1649. [Li Z F, Tang X W, Yao L L, et al. Development of the arctic channel and patterns of change in China's oil importing channels[J]. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1639-1649.]
- [11] 陈奕彤, 高晓. 北极海洋资源利用的国际机制及中国应对[J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2062-2074. [Chen Y T, Gao X. International regime for the use of Arctic marine resources and China's response[J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2062-2074.]
- [12] Sui C J, Zhang Z H, Yu L J, et al. Investigation of Arctic air temperature extremes at north of 60°N in winter [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36: 51-60.
- [13] Blunden J, Arndt D S. State of the climate in 2018 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1>.
- [14] Yang D Q. Double Fence Intercomparison Reference (DFIR) vs. Bush Gauge for "true" snowfall measurement [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509: 94-100.
- [15] Vincent L A, Zhang X, Brown R D, et al. Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(11): 4545-4560.
- [16] 黄其威, 刘诗奇, 王平, 等. 1936-2018年环北极典型流域气温与降水时空变化[J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2119-2131. [Huang Q W, Liu S Q, Wang P, et al. Spatiotemporal variability of temperature and precipitation in typical Pan-Arctic basins, 1936-2018 [J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2119-2131.]

2021年6月

- [17] 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.]
- [18] Khlebnikova E I, Rudakova Y L, Sall' I A, et al. Changes in indicators of temperature extremes in the 21st Century: Ensemble projections for the territory of Russia[J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2019, 44(3): 159–168.
- [19] Khlebnikova E I, Rudakova Y L, Shkolnik I M. Changes in precipitation regime over the territory of Russia: Data of regional climate modeling and observations[J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2019, 44(7): 431–439.
- [20] Lique C, Holland M M, Dibike Y B, et al. Modeling the Arctic freshwater system and its integration in the global system: Lessons learned and future challenges[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(3): 540–566.
- [21] 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.
- [22] Lindsay R, Wensnahan M, Schweiger A, et al. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic[J]. Journal of Climate, 2014, 27(7): 2588–2606.
- [23] 武丰民, 李文钊, 李伟. 北极放大效应原因的研究进展[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 232–242. [Wu F M, Li W K, Li W. Causes of Arctic amplification: A review[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 232–242.]
- [24] Chen J L, Kang S C, Meng X H, et al. Assessments of the Arctic amplification and the changes in the Arctic sea surface[J]. Advances in Climate Change Research, 2019, 10(4): 193–202.
- [25] 李鹤. 东北地区利用北极航道对欧贸易运输的竞争态势[J]. 资源科学, 2020, 42(11): 2092–2105. [Li H. Competition among trade passages between Northeast China and Europe: An analysis under the opening of the Arctic shipping route[J]. Resources Science, 2020, 42(11): 2092–2105.]
- [26] 康世昌, 郭万钦, 吴通华, 等. “一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响[J]. 地球科学进展, 2020, 35(1): 1–17. [Kang S C, Guo W Q, Wu T H, et al. Cryospheric changes and their impacts on water resources in the Belt and Road regions[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(1): 1–17.]
- [27] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 109.
- [28] Fan Y, van den Dool H. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948–present[J]. Journal of Geophysical Research Atmosphere, 2008, DOI: 10.1029/2007JD008470.
- [29] Willmott C J, Matsuura K. Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950–1999) [DB/OL]. (2001–07–01) [2020–09–01]. http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.ghcn_ts2.html.
- [30] Schneider U, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)[J]. Atmosphere, 2017, 8(3): 52–52.
- [31] Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. Global Land Precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2002, 3(3): 249–266.
- [32] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553–597.
- [33] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1): 79–107.
- [34] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. Nature, 2010, 464(7293): 1334–1337.
- [35] Stephens G L, Ellis T D. Controls of global-mean precipitation increases in global warming GCM experiments[J]. Journal of Climate, 2008, 21(23): 6141–6155.
- [36] Pfahl S, O'Gorman P A, Fischer E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 423–427.
- [37] Hanna E, Cropper T E, Jones P D, et al. Recent seasonal asymmetric changes in the NAO (a marked summer decline and increased winter variability) and associated changes in the AO and Greenland Blocking Index[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(9): 2540–2554.
- [38] 何奇瑾, 周广胜. 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3931–3939. [He Q J, Zhou G S. Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3931–3939.]
- [39] Zhang P F, Wu Y T, Simpson I R, et al. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents–Kara Sea sea ice loss[J]. Science Advances, 2018, DOI: 10.1126/sciadv.aat6025.
- [40] 效存德, 苏勃, 窦挺峰, 等. 极地系统变化及其影响与适应新认识[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 153–162. [Xiao C D, Su B, Dou T F, et al. Interpretation of IPCC SROCC on polar system changes and their impacts and adaptations[J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 153–162.]
- [41] Francis J A, Vavrus S J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(6): L06801.
- [42] Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather[J]. Nature Geoscience, 2014, 7: 627–637.
- [43] Jaiser R, Nakamura T, Handorf D, et al. Atmospheric winter response to Arctic sea ice changes in reanalysis data and model simulations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2016, 121(13): 7564–7577.

Climate changes over the Arctic land during 1979–2017

CHEN Xiaolong^{1,2}, WANG Ping³

(1. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, CAS, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The Arctic is one of the rapidly changing regions remarkably influenced by global warming. Polar warming amplification (warming rate two times larger than the global mean) and rapidly declining sea ice lead to not only dramatic changes in the local environment, but also profound effects on weather and climate system in the mid-latitude. An in-depth understanding of seasonal and geographical features of long-term trends can contribute to policy responses to climate change and its consequence, supporting Arctic resource development in the future. Using gridded observational analysis datasets and the ERA-Interim reanalysis, this study focused on linear trends of surface air temperature, precipitation, and related extreme indices in the land area north of 60°N during 1979–2017. The results show that temperature changes highly agree with each other while precipitation changes are distinct across the multiple data sources, especially after 2008, which is possibly caused by sharply decreased gauges in use under the global financial crisis. The ERA-Interim dataset can well reproduce the upward trends of near-surface air temperature and precipitation over the Arctic land, about $(0.57 \pm 0.07) ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ and $(0.10 \pm 0.05) \text{ mm}/\text{d}/100 \text{ a}$ for annual mean. The warming trend is strong in spring, autumn, and winter whereas weak in summer. Areas near the Arctic coasts have the largest warming rate, with local warming higher than $1.0 ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$. The increasing trend of precipitation in autumn is the largest. The precipitation increases in Siberia are well linked to the local surface warming. During autumn, increases in both the mean and extreme precipitation in eastern Siberia can be as high as the thermodynamically constrained $8 \text{ \%}/\text{K}$. No evident trend of diurnal temperature range is observed in summer. In spring, the diurnal temperature range in Alaska and northern Canada increases evidently whereas a decreasing trend emerges in other regions. Annual temperature range decreases in the Nordic, Alaska, and northern Canada while increases in western and eastern Siberia. In both winter and summer, warming trend of minimum temperature over the Arctic is larger than that of maximum temperature, which is also larger in winter than in summer. This study evidences that surface warming is an important driver of local precipitation increase over the Arctic land while circulation changes may create the geographical differences; decrease of observational stations has an obviously negative impact on monitoring the long-term trend of precipitation; ERA-Interim is an important alternative to observational analysis data in the Arctic land. Especially for regions with sparse weather stations and for periods when the number of available stations decreases, the ERA-Interim data can provide consistent and reliable climate change information.

Key words: Arctic land; linear trend; surface air temperature; precipitation; diurnal temperature range; annual temperature range; extreme indices