

陈嘉哲, 赵彩杉, 张学珍. 2020. 21 世纪气候变化情景下环北极地区植被生长季与活动积温变化 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 543–554. CHEN Jiazhe, ZHAO Caishan, ZHANG Xuezheng. 2020. Changes in Vegetation Growing Season and Active Accumulated Temperature in Circum-Arctic Region under 21st Century Climate Change Scenario [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 543–554. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20014

21 世纪气候变化情景下环北极地区植被 生长季与活动积温变化

陈嘉哲^{1,2} 赵彩杉^{1,2} 张学珍^{1,2}

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

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 基于部门间影响模式比较计划 (ISI-MIP, Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) 对 CMIP5 中 5 个气候 (地球) 系统模式模拟结果的降尺度数据, 利用多模式集合预估了气候变化情景下 21 世纪环北极地区植被生长季与活动积温变化。研究发现: 1) 多模式集合模拟能够基本再现观测的初、终霜日及无霜期长度与 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布特征以及 1979~2004 年各指标变化趋势的空间分布特征, 但其对气候变化年际变率的模拟能力较弱; 2) 至 21 世纪末, 终霜日最多将提前 60 d, 初霜日将推迟 20~40 d, 无霜期延长幅度最高可达 100 d, 积温将增加 1000~1200 $^{\circ}\text{C}$ 。其中 RCP8.5 情景下, 各指标变幅最大, RCP2.6 情景下变幅最小; 3) 各指标变幅呈现出较大的空间差异, 亚欧大陆中西部的变幅普遍较大, 随着气候变暖, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温增加幅度表现出明显的纬度地带性, 南部增幅较大, 北部增幅较小。

关键词 气候变化 多模式集合 情景预估 北极地区

文章编号 1006-9585(2020)05-0543-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20014

Changes in Vegetation Growing Season and Active Accumulated Temperature in Circum-Arctic Region under 21st Century Climate Change Scenario

CHEN Jiazhe^{1,2}, ZHAO Caishan^{1,2}, and ZHANG Xuezheng^{1,2}

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP) downscaling data of simulations generated by five climate (Earth) system models in CMIP5, in this study, the multi-model collection was used to estimate the vegetation growing season and active accumulated temperature changes in the circum-Arctic region in the 21st century under various climate change scenarios. The research results show that: 1) Multi-model ensemble simulation can basically

收稿日期 2020-01-29; 网络预出版日期 2020-06-30

作者简介 陈嘉哲, 女, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用方面研究。E-mail: chenjiazhe2013@163.com

通讯作者 张学珍, E-mail: xzzhang@igsrr.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFA0603301, 中国科学院重点部署项目 ZDRW-ZS-2017-4

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0603301), Key Program from Chinese Academy of Sciences (Grant ZDRW-ZS-2017-4)

reproduce the observed spatial distribution characteristics of the initial and final frost days, length of the frost-free period, accumulated temperature of $>10^{\circ}\text{C}$, and change trends of these indicators from 1979 to 2004. However, its ability to simulate the spatial differences and interannual variability of climate change is weak. 2) By the end of the 21st century, the final frost day will advance by up to 60 days, initial frost day will be delayed by 20–40 days, frost-free period will extend up to 100 days, and accumulated temperature will vary by 1000–1200 $^{\circ}\text{C}$. Each of these indicators undergoes the greatest change under the RCP8.5 scenario, and the least change under the RCP2.6 scenario. 3) The changes in the indicators have large spatial differences, with the changes in the central and western parts of the Eurasian continent being generally larger. With the warming of the climate, increases in the accumulated temperature $>10^{\circ}\text{C}$ gradually show obvious zonality in the latitudinal direction, with a greater increase in the south.

Keywords Climate change, Multi-model ensemble, Scenario projection, Circum-Arctic region

1 引言

近年来,以全球变暖为代表的气候变化问题成为研究的热点,受到科学界广泛关注。气候变化与农业和粮食生产、水资源、能源安全、公共卫生等多方面有关,给人类的生存和发展带来一系列重大影响(戴声佩等, 2014)。IPCC 第五次报告显示,至 2100 年全球平均升温可能超过 2°C , 同时将伴随出现海平面上升、生物多样性锐减、极端天气事件频发等现象,人类生存将面临巨大的挑战(Stocker et al., 2013a)。

北极、南极和青藏高原并称为“地球三极”。北极地区作为地球 1/3, 对全球气候变化响应极为敏感, 是近百年来全球增暖最显著的区域(Johannessen et al., 2004; McGuire et al., 2006; Serreze and Francis, 2006; 陆龙骅等, 2011), 北极地区地表温度的上升幅度约为全球增幅的两倍(Pearson et al., 2013)。北极地区在历次 IPCC 报告中均受到重点关注, 也是世界气候研究计划(WCRP)及国际地圈—生物圈计划(IGBP)等多个国际计划关注的重点地区(Houghton, 1996; Houghton et al., 2001; 高登义等, 2008)。极地大部分地区被冰雪覆盖, 气候寒冷, 是全球大气的主要冷源, 在全球大气环流、天气气候形成及热量、动量及水分交换中起重要作用, 尤其是海冰通过隔绝大气与海水, 减少了表面热量和水汽通量, 海冰异常改变了局部能量平衡, 对大规模大气环流产生反馈(Zhao et al., 2004; 陆龙骅等, 2006, 2011; Overland and Wang, 2010)。在全球海洋温盐环流中, 极地的冷水下沉经海底向低纬度地区输送, 起到了启动作用(陆龙骅等, 2011)。因而北极地区气候变化成为当前全球气候变化研究的重点问题。

随着气候变暖, 气候异常与气候变率增大, 寒

潮和降温等事件发生更为强烈, 容易诱发霜冻等灾害。作为一种农业气象灾害, 霜冻指生长季中因土壤表面和植株体温度降低到 0°C 或 0°C 以下而引起的植物冻害(许艳等, 2009)。初、终霜日的提前或推迟, 无霜期长短的变化都会导致霜冻的时空格局发生改变, 研究霜期的变化特征对于减轻霜冻损失具有重要意义(潘淑坤等, 2013)。 10°C 是喜温植物生长的起始温度、喜凉植物迅速生长的临界温度, 也是多年生植物快速积累干物质的温度(曹萌萌等, 2014; 戴声佩等, 2014; 初征等, 2017), 因而 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温成为衡量热量资源的一个重要指标。

关于北极地区的气候变化, 前人已开展了一些研究。Chapman and Walsh (2007) 利用 IPCC 第 4 次评估报告中使用的 14 种全球气候模型研究了北极地表温度和海平面气压的变化, 分析结果表明, 模拟的 1981~2000 年地表温度通常比观测结果低 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$, 预计 21 世纪北极温度将升高, 海平面气压将减小。Sorteberg et al. (2007) 使用 IPCC 第 4 次评估报告提供的多模式集合模拟数据分析了 20 世纪及 21 世纪 SRES A2 情景下北极地区表面能量收支变化。Vavrus et al. (2008) 综合分析并评估了 CMIP3 数据集中 20 个全球气候模式(GCM)的 20 世纪末和 21 世纪末的北极云量的模拟。Koenigk et al. (2013) 利用全球耦合气候模型 EC-Earth2.3 的历史模拟(1850~2005 年)和未来模拟(2006~2100 年), 分析了在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下, 1850~2100 年北极地区海冰、湍流通量、气温、海平面气压、降水和蒸散发、云量与辐射强迫等变化, 结果显示近几十年来观察到的北极气候变化趋势在 21 世纪将延续及增强, 尤其是在高排放情景下。Overland et al. (2019) 综述了北极冰冻圈观测的变化特征及预测的未来变化趋势, 至 21 世纪中叶, 北极的年温度将升高约 4°C 。关

于北极地区生长季及热量资源的变化, Hansen et al. (2006) 分析了位于西格陵兰岛的北极站 (69°15'N, 53°31'W) 的气象数据, 发现在 1991~2004 年期间平均每年温升约 0.4°C, 累计冰冻天数减少了 50% 以上, 生长季天数从 1992 年的 36 d 增加到了 2003 年的 114 d; Førland et al. (2004) 使用观测数据及降尺度后的 ECHAM4/OPYC3 GSDIO 海气耦合模式数据, 研究了 1900~2050 年在 IS92a 情景下反映北极地区植被状况、能源消耗、霜冻情况的各气象指标的变化特征, 结果显示, 与 1961~1990 年相比, 大部分地区的生长季长度在最近几十年中有所增加, 至 2050 年该地区生长季将增加 3~4 周。综上可知, 北极地区气候变化的研究已取得了一系列重要进展, 但关于 RCP 情景下未来霜冻及生长季变化的研究相对较少, 且基于单个模式的结果, 其不确定性可能较大。

因而, 本文拟采用参与国际耦合模式比较计划第五阶段 (CMIP5) 的 5 个气候 (地球) 系统模式的模拟数据, 在分析其模拟能力的基础上, 通过多模式集合模拟, 诊断分析气候变化情景下 21 世纪环北极地区生长季与活动积温变化, 以期能适应全球气候变化提供科学依据。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

本文的研究区为环北极地区 (50°N 以北的陆地), 涉及加拿大、丹麦、芬兰、冰岛、挪威、瑞典、俄罗斯、美国等国家, 主要植被类型包括灌木、苔原、针叶林和湿地等 (Walker et al., 2005; Bi et al., 2013)。北极地区分布着大面积的藓类植物, 苔类植物、地衣以及藻类等低等植物。该地区动植物多样性均主要呈纬向梯度分布, 这种梯度分布表明, 北极地区的生物多样性对气候变化非常敏感 (Callaghan et al., 2004)。

2.2 数据来源

本文使用的数据是参与 CMIP5 计划的 5 个气候 (地球) 系统模式 (表 1) 的模拟结果经由 ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) (Warszawski et al., 2014) 统计降尺度的温度数据, 时间间隔为 1 d, 空间分辨率为 0.5°。ISI-MIP 通过统计误差订正方法——趋势偏差纠正方法对数据进行修正, 该方法利用分位数映射法, 基于传递函数将模拟历史数据的分布映射到观测值的分布, 并据此校正未来的预测, 以更好地匹配观测数据的概率分布, 同时保留了数据中的长期趋势 (Hempel et al., 2013)。每个模式的模拟数据包括历史模拟 (1850~2005 年) 和未来预估 (2006~2099 年) 两部分。CMIP5 根据对未来人口增长、技术发展和社会反应的一系列预测, 定义了 4 种温室气体排放情景 (RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5) (Taylor et al., 2012), 本文使用的未来预估部分涉及 3 个情景, 分别是 RCP2.6 (低碳排放情景)、RCP4.5 (中等强度的碳排放情景) 和 RCP8.5 (高碳排放情景)。研究表明, ISI-MIP 项目数据集能够较好地呈现区域的气温和降水变化 (Warszawski et al., 2014; McSweeney and Jones, 2016)。

本文使用的气象观测数据来自于欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的 ERA-Interim 逐日温度再分析数据, 空间分辨率为 0.5° (纬度) × 0.5° (经度) (Dee et al., 2011)。

2.3 研究思路与方法

本文的分析主要包括两个部分, 一是对模型的验证, 二是未来模拟预估。首先, 本文对比分析了多模式集合平均与观测数据所示的 1979~2004 年各生物气象参数空间分布、变化趋势空间分布及变化过程, 以此来验证气候系统模式对环北极地区的

表 1 5 个气候系统模式信息 (Stocker et al., 2013b)

Table 1 Information from five climate system models (Stocker et al., 2013b)

模式名称	分辨率	研发机构
GFDL-ESM2M	2.5° (纬度) × 2° (经度)	美国地球物理流体动力学实验室
HadGEM2-ES	1.875° (纬度) × 1.25° (经度)	英国哈德利气候中心
IPSL-CM5A-LR	1.9° (纬度) × 3.75° (经度)	法国Pierre-Simon物理学研究所
MIROC-ESM-CHEM	2.8125° (纬度) × 2.8125° (经度)	日本海洋地球科学与技术局、大气海洋研究所和国家环境变化研究所
NorESM1-M	1.9° (纬度) × 2.5° (经度)	挪威气候中心

模拟能力。其次,分别分析了2010~2039年、2040~2069年、2070~2099年3个时间片段,不同气候变化情景下各生物气象参数的变化趋势及其空间差异。

本文分析了4个气象指标,分别是终霜日、初霜日、无霜期和 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温。其中,连续5天滑动平均温度高于 0°C 的第一天为终霜日,连续5天滑动平均温度低于 0°C 的第一天为初霜日,终霜日与初霜日之间为无霜期。

3 结果与分析

3.1 模式对植被生长季与活动积温的模拟评估

从1979~2004年各纬度带初霜日、终霜日、无霜期长度以及 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化过程来看(图1),模拟与观测的变化特征基本相同。1979~2004年,终霜日呈现提前趋势,初霜日呈现推迟趋势,无霜期长度呈增加趋势,与此同时, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温呈增加趋势。但是,模拟的年际变率明显小于观测,且模式对 $50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 终霜日的模拟存在一定的系统偏差,主要表现为系统性推迟,因此导致模式低估了 $50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 地区无霜期长度,这可能与模拟的冬春季节温度偏低有关。Hempel et al. (2013)评估了1980~1999年经ISI-MIP校正后的GCM数据及校正前的GCM数据与观测值的差别,校正后的GCM数据有显著的改善;在大部分地区校正后的GCM数据与观测值相差不大,但在斯堪的那维亚半岛北部,校正后的GCM模拟温度仍然偏低。

如图2所示,模拟展示的环北极地区的终霜日、初霜日、无霜期和 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间格局与观测基本一致。大陆西部,即欧洲西部和北美大陆的西缘,是终年无霜的地区。自此向东,逐渐深入大陆内部,终霜日逐渐推迟,初霜日逐渐提前,无霜期逐渐缩短,呈现明显的东西分异特征。在大陆东岸,初、终霜日与无霜期长度则呈现出明显的纬度地带性,随着纬度的增加,终霜日逐渐推迟,初霜日逐渐提前,无霜期长度逐渐缩短。在大陆内部,初、终霜日与无霜期长度等值线则呈东南—西北走向,兼顾大陆东、西两岸的特征;自西南向东北方向,终霜日逐渐推迟,初霜日逐渐提前,无霜期长度逐渐缩短。

初、终霜日与无霜期长度的上述格局与北半球海陆位置关系及洋流密切相关。大陆西岸盛行暖流,

分别为北大西洋暖流和阿拉斯加暖流;自西向东,逐渐深入内陆,受暖流影响逐渐减弱,因此大陆西侧温度较同纬度地区偏高,冬半年表现尤为明显,由此导致自沿海至内陆,终霜日逐渐推迟,初霜日逐渐提前,无霜期长度逐渐缩短,呈现明显的东西分异。由于北大西洋暖流的强度远大于阿拉斯加暖流,上述现象在欧亚大陆西部较北美大陆西部更为明显。而在大陆东岸中、高纬度,盛行寒流,但是强度较弱,初、终霜日主要受控于气候的纬度地带性。

大陆东、西两岸 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布呈现较为明显的纬度地带性,随着纬度增加, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温逐渐减少,至加拿大北部、格陵兰岛,及俄罗斯北部的部分岛屿, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温已降至0,这与不同纬度接受的太阳热量资源不同有关。 $60^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 范围内,亚欧大陆西部无霜期长于大陆东部,而亚欧大陆西部 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温与大陆东部 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温相差不大,这一格局形成的主要原因在于大陆西岸为海洋性气候,而大陆东岸为大陆性气候。在暖流的作用下,大陆西岸的海洋性气候使得夏季总体温度偏低, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温并不因无霜期较长而较大。大陆东岸的大陆性气候则使得夏季温度较高,因此虽然无霜期较短,但是 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温却较大。

图3展示了1979~2004年,初、终霜日、无霜期长度及 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化趋势。模拟与观测的变化趋势总体基本一致,但是在局部地区呈现出一定差异。在亚欧大陆,观测与模拟的终霜日总体均呈现提前的趋势,初霜日总体呈现推迟的趋势,无霜期长度总体呈现增加的趋势。其中,大陆内部变化趋势最强,而大陆北部边缘的变化趋势较弱。在北美大陆,模拟的初、终霜日及无霜期长度的总体变化特征与亚欧大陆相同,而观测的初霜日和无霜期长度变化特征则与模拟结果有一定差异。观测的北美大陆中部至西北部初霜日呈明显提前趋势,由此导致无霜期长度呈缩短趋势。同时,欧亚大陆和北美大陆模拟的 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温均呈显著增加的趋势,其中欧亚大陆中部和欧洲西部的增加趋势较大,这一特征与观测现象基本一致。但是,模拟与观测的北美大陆西部的变化趋势呈现明显差异。

由此可见,CMIP5的多模式集合模拟能够基本再现观测的初霜日、终霜日、无霜期长度与 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布特征以及1979~2004年变化趋势的空间分布特征,但其对 $50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 地区

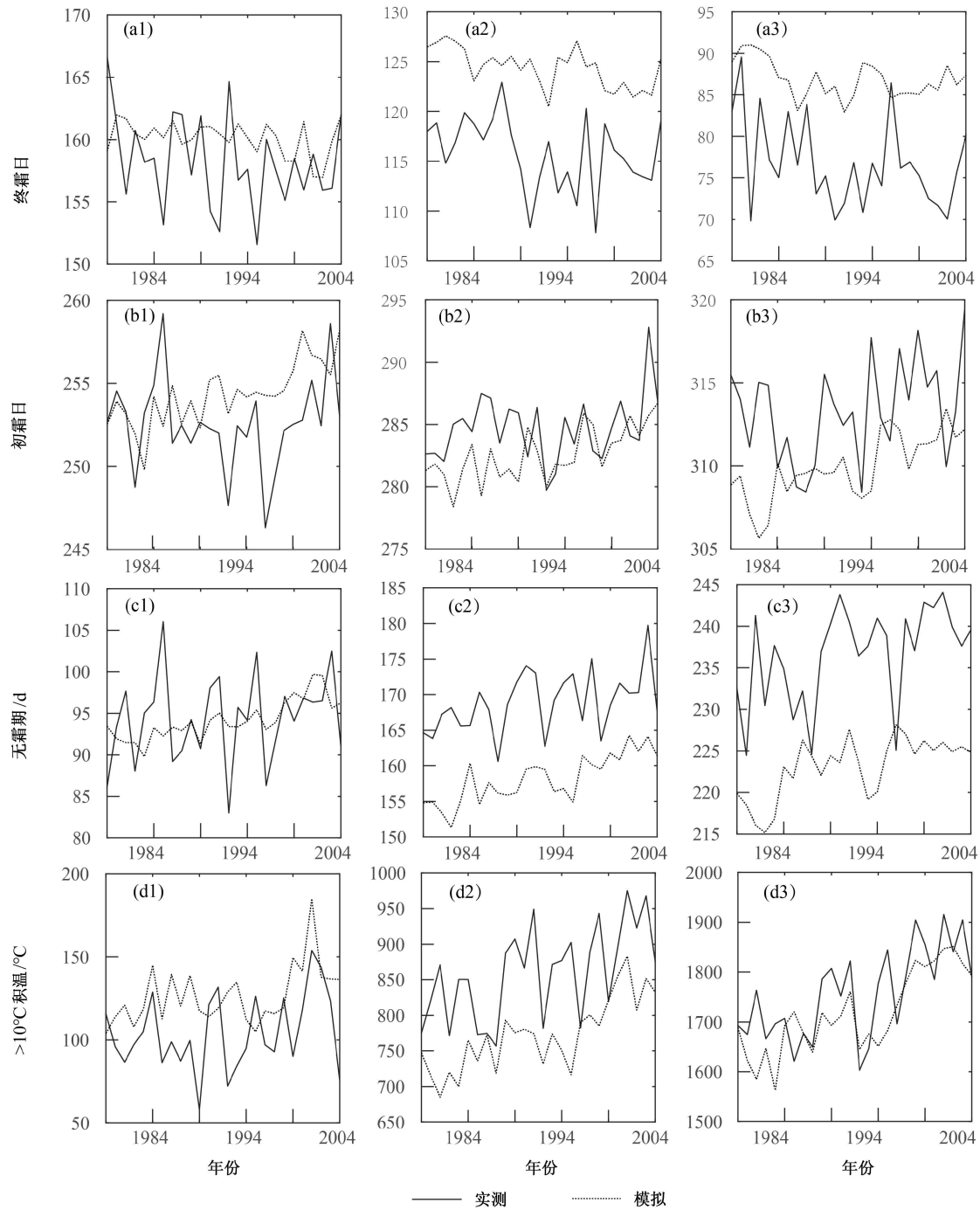


图 1 1979~2004 年 70°N~80°N (左列)、60°N~70°N (中列)、50°N~60°N (右列) 陆地平均的 (a1-a3) 终霜日、(b1-b3) 初霜日、(c1-c3) 无霜期、(d1-d3) >10°C 积温变化 (其中终霜日、初霜日均以数字表示, 比如 100 指一年中的第 100 天)

Fig. 1 Variations in the (a1-a3) final frost date, (b1-b3) first frost date, (c1-c3) frost-free period, and (d1-d3) accumulated temperature >10°C at land locations 70°N-80°N (left column), 60°N-70°N (middle column), 50°N-60°N (right column) from 1979 to 2004 (the final frost date and the first frost date are expressed in numbers, for example, 100 refers to the 100th day of year)

终霜日的模拟存在一定的系统偏差, 模式模拟终霜日存在一定的推迟。CMIP5 多模式模拟结果表现出较强的空间一致性和时间趋势性, 而空间异质性和年际间变率表现较弱, 由此体现了气候 (地球)

系统模式模拟气候变化空间差异和年际变率的能力较弱。

3.2 未来气候变化情景预估

如图 4 所示, 未来气候变暖情景下, 环北极地

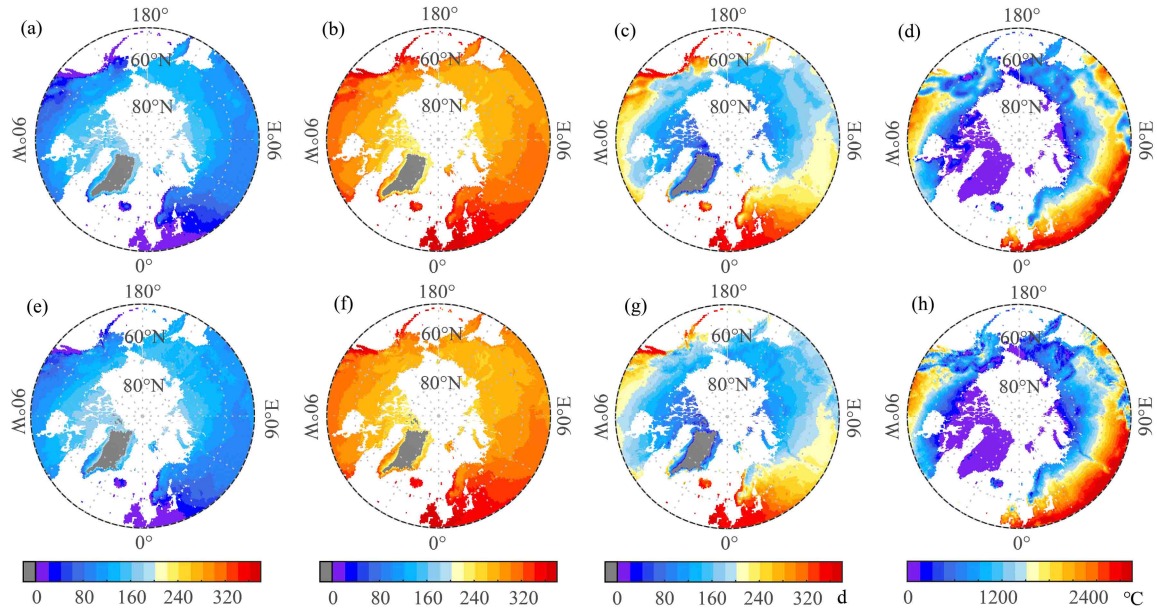


图2 1979~2004年平均的(a、e)终霜日、(b、f)初霜日、(c、g)无霜期、(d、h) >10℃积温的实测值(第一行)及模拟值(第二行)空间分布(灰色区域表示终年有霜地区;其中终霜日、初霜日均以数字表示,比如100指一年中的第100天)

Fig. 2 Spatial distributions of average observed values (first row) and average simulated values (second row) of (a, e) final frost date, (b, f) first frost date, (c, g) frost-free period, and (d, h) accumulated temperature >10 °C from 1979 to 2004 (gray areas indicate frost areas all year; the final frost date and the first frost date are expressed in numbers, for example, 100 refers to the 100th day of year)

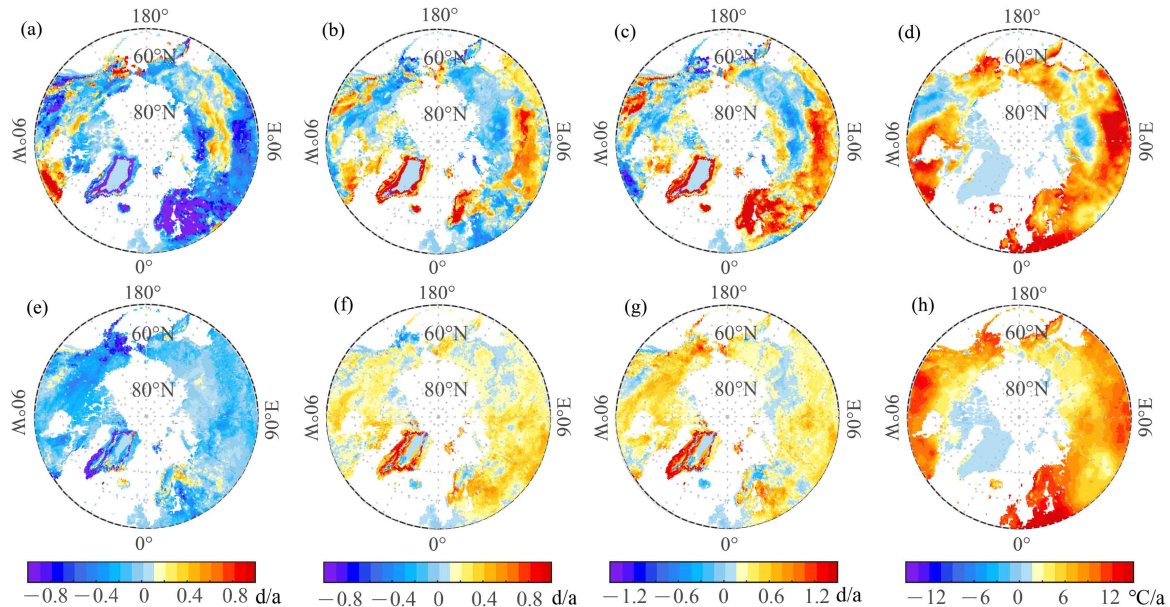


图3 1979~2004年(a、e)终霜日、(b、f)初霜日、(c、g)无霜期、(d、h) >10℃积温变化趋势(速率)实测值(第一行)及模拟值(第二行)的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the observed change rate (first row) and simulated change rate (second row) of (a, e) final frost date, (b, f) first frost date, (c, g) frost-free period, and (d, h) accumulated temperature >10 °C from 1979 to 2004

区终霜日普遍提前, 提前幅度(相对于参考期1971~2000年)依时间和气候变化情景而异, 并且呈现明显的空间差异。相比而言, 2010~2039年的提前幅度较小, 并且3种RCP情景下, 提前

幅度大致相当。主要原因是3种RCP情景在最近数十年内的排放量相差不大, 对气候系统产生的辐射强迫基本相当。就空间差异而言, 欧洲西部的提前幅度较大, 平均大约为15 d, 明显大于欧亚大陆

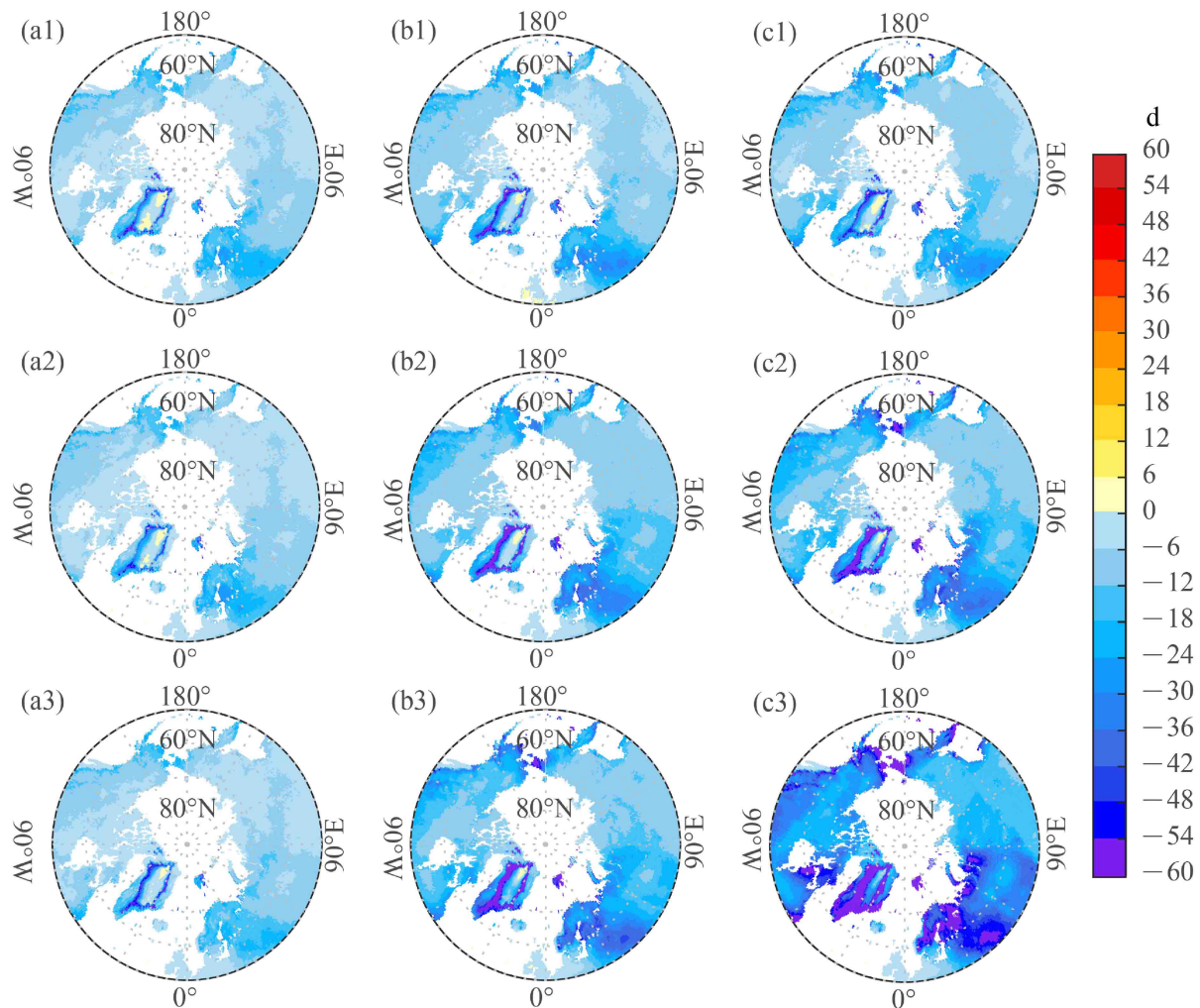


图4 (a1、a2、a3) 2010~2039年、(b1、b2、b3) 2040~2069年、(c1、c2、c3) 2070~2099年在RCP2.6情景下(第一行)、RCP4.5情景下(第二行)、RCP8.5情景下(第三行)环北极地区终霜日的变化幅度(参考期: 1971~2000年)

Fig. 4 Changes in the last frost dates in the Arctic region during (a1, a2, a3) 2010–2039, (b1, b2, b3) 2040–2069, and (c1, c2, c3) 2070–2099 under RCP2.6 scenario (first row), RCP4.5 scenario (second row), and RCP8.5 scenario (third row) (reference period: 1971–2000)

中、东部地区平均约 5 d 的提前幅度。同样, 北美大陆西部提前幅度稍大于中东部。

2040~2069 年的终霜日提前幅度较 2010~2039 年的提前幅度普遍增加, 3 种 RCP 情景下的提前幅度开始显现差异, RCP8.5 情景下的提前幅度最大, RCP4.5 情景下的提前幅度次之, RCP2.6 情景下的提前幅度最小, 这与 3 种排放情景的辐射强迫及升温幅度密切相关, RCP8.5、RCP4.5、RCP2.6 排放情景下的辐射强迫依次降低, 升温幅度依次减小。不过, 3 种排放情景下终霜日提前幅度的空间差异与前一个时期(2010~2039 年)保持一致, 仍旧是大陆西岸提前幅度大, 而中、东部提前幅度相对较小。例如, RCP4.5 情景下, 欧洲中西部及北欧提前幅度约为 30 d, 而亚欧大陆中部

和东部的提前幅度仅约 10 d。2070~2099 年的终霜日提前幅度与 RCP 情景的关系更加鲜明, 其中 RCP2.6 情景下的提前幅度与此前 2040~2069 年的提前幅度大致相当, RCP4.5 情景下的提前幅度较此前 2040~2069 年的提前幅度略有增加, 而 RCP8.5 情景下的提前幅度较此前 2040~2069 年的提前幅度明显增加。例如, RCP8.5 情景下, 欧洲中东部的提前幅度高达约 60 d, 而 2040~2069 年的提前幅度约为 40~50 d。终霜日提前的空间差异仍旧是大陆西岸提前幅度大, 而中、东部提前幅度相对较小。

随着气候变暖, 环北极地区未来初霜日普遍推迟(图 5), 推迟幅度(相对于参考期 1971~2000 年)依时间和气候变化情景而异, 并且呈现

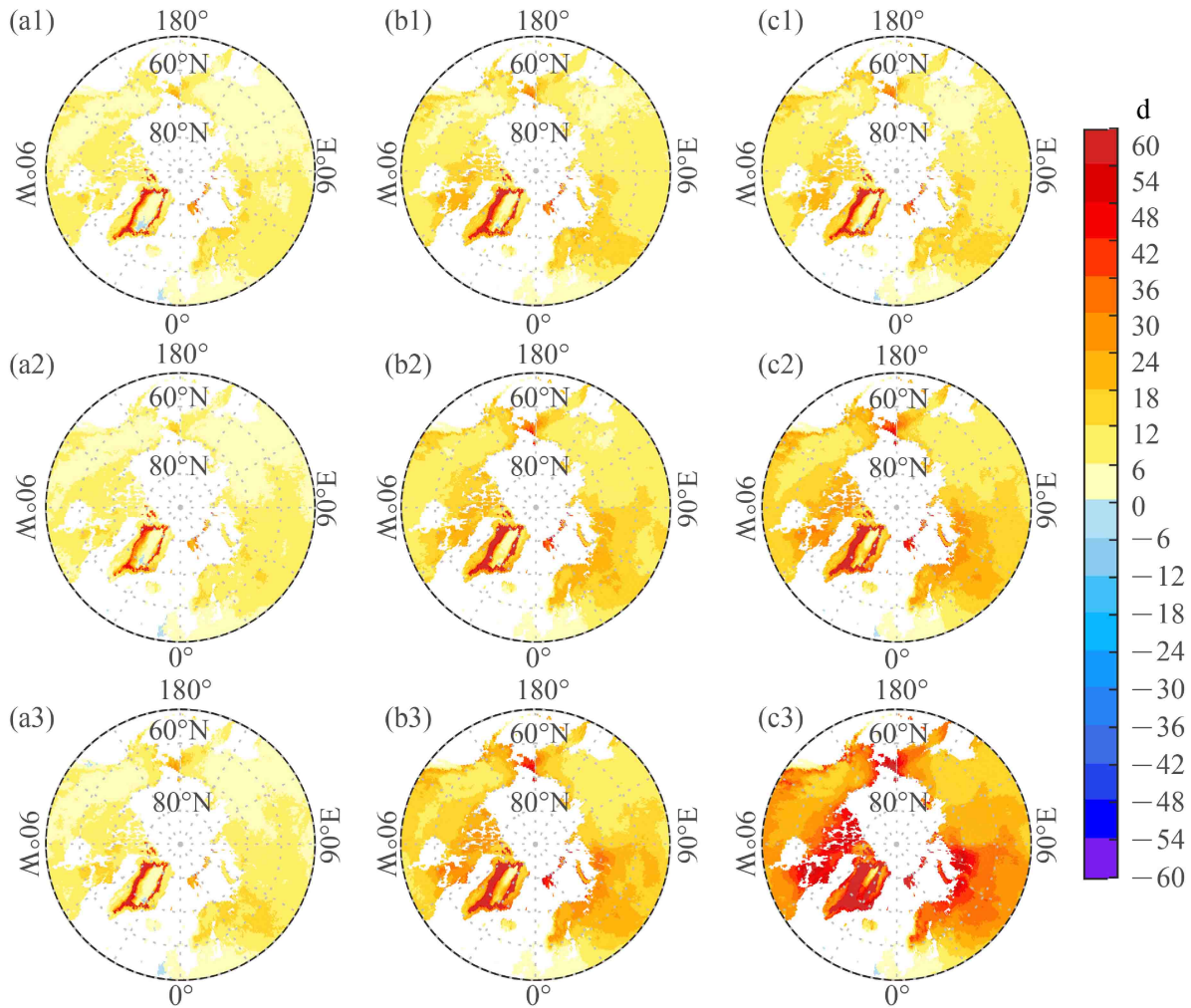


图5 同图4, 但为初霜日

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the first frost dates

明显的空间差异。相比而言, 2010~2039 年的推迟幅度较小, 并且 3 种 RCP 情景下, 推迟幅度大致相当。就空间差异而言, 亚欧大陆的西部, 特别是欧洲地区的推迟幅度较大, 平均推迟幅度约为 10 d, 而亚欧大陆东部的推迟幅度仅约为 5 d。在北美大陆, 西部推迟幅度较小, 而东部推迟幅度较大。这一空间格局表明, 大西洋两岸的初霜日推迟幅度较大, 而太平洋两岸的推迟幅度相对较小。2040~2069 年的初霜日推迟幅度较 2010~2039 年的推迟幅度普遍增加, 其中 RCP8.5 情景下的增幅最大, RCP2.6 情景下的增幅最小, RCP4.5 情景下的增幅居中。这是因为随着时间延长, 3 种排放情景下的人为温室气体排放对气候系统产生的辐射强迫差异日益明显。初霜日推迟幅度的空间格局与 2010~2039 年基本一致。2070~2099 年的初霜日推迟幅度更加因气候变化情景而异, 其中 RCP2.6

情景下, 推迟幅度与 2040~2069 年的推迟幅度基本一致, RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 推迟幅度进一步增加, 其中 RCP8.5 情景下的推迟幅度最大。21 世纪前期及中期, 初霜日变化空间格局与终霜日差别不大; 21 世纪后期, 初霜日变化空间格局与终霜日略有差别, 在亚欧大陆, 初霜日变化幅度的高值区位于 30°E~90°E 之间, 而终霜日变化幅度的高值区更小, 位于 30°E~60°E。

由于终霜日的提前和初霜日的推迟, 无霜期延长, 延长幅度 (相对于参考期 1971~2000 年) 依时间和气候变化情景而异。如图 6 所示, 3 种气候变化情景下, 2010~2039 年的延长幅度大致相当, 无霜日变化的空间格局与终霜日类似, 亚欧大陆西部欧洲部分无霜期延长幅度较大, 东部亚洲部分延长幅度较小; 北美地区无霜期延长幅度与亚欧大陆中部大致相当, 约为 10~20 d。2040~2069 年,

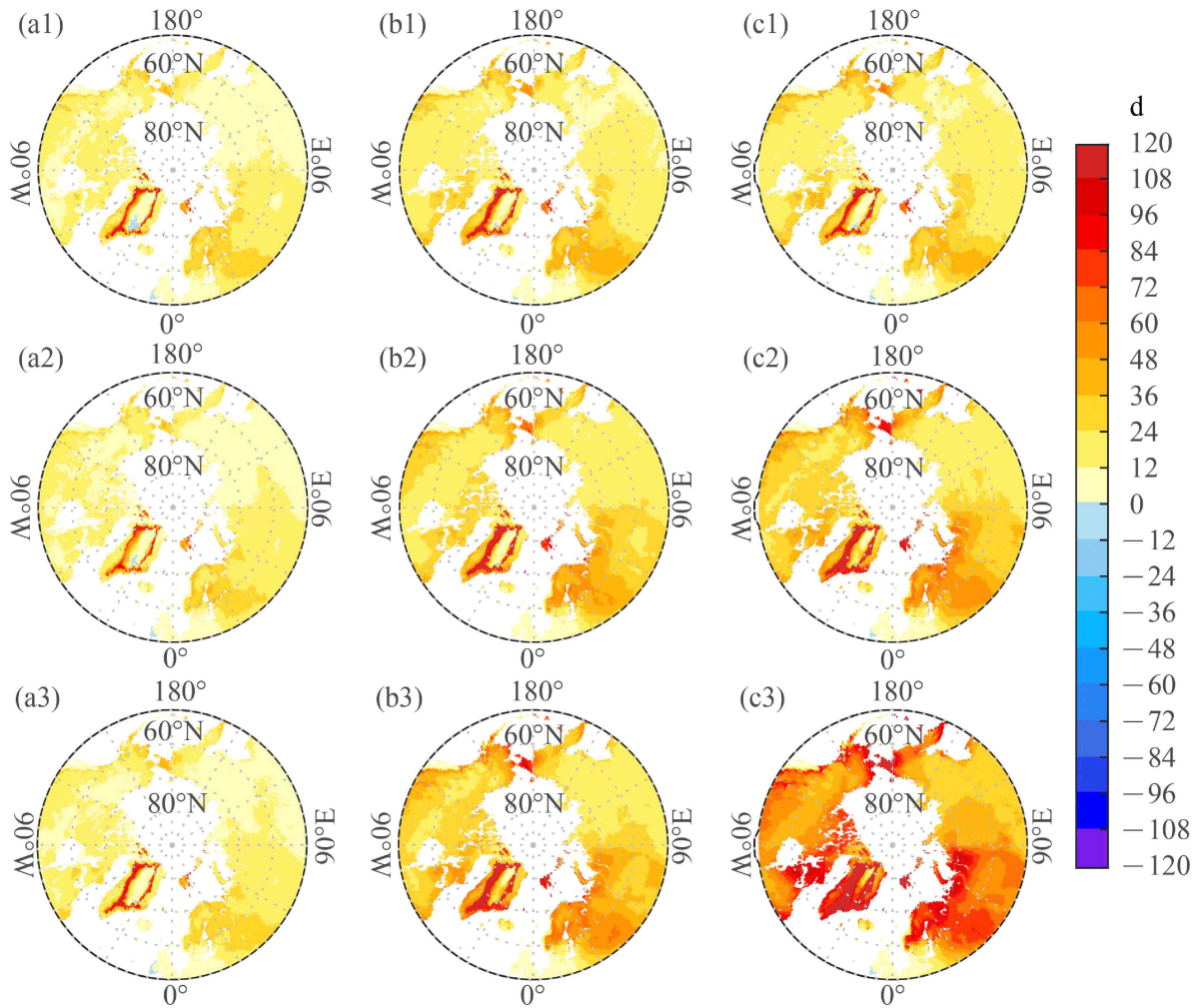
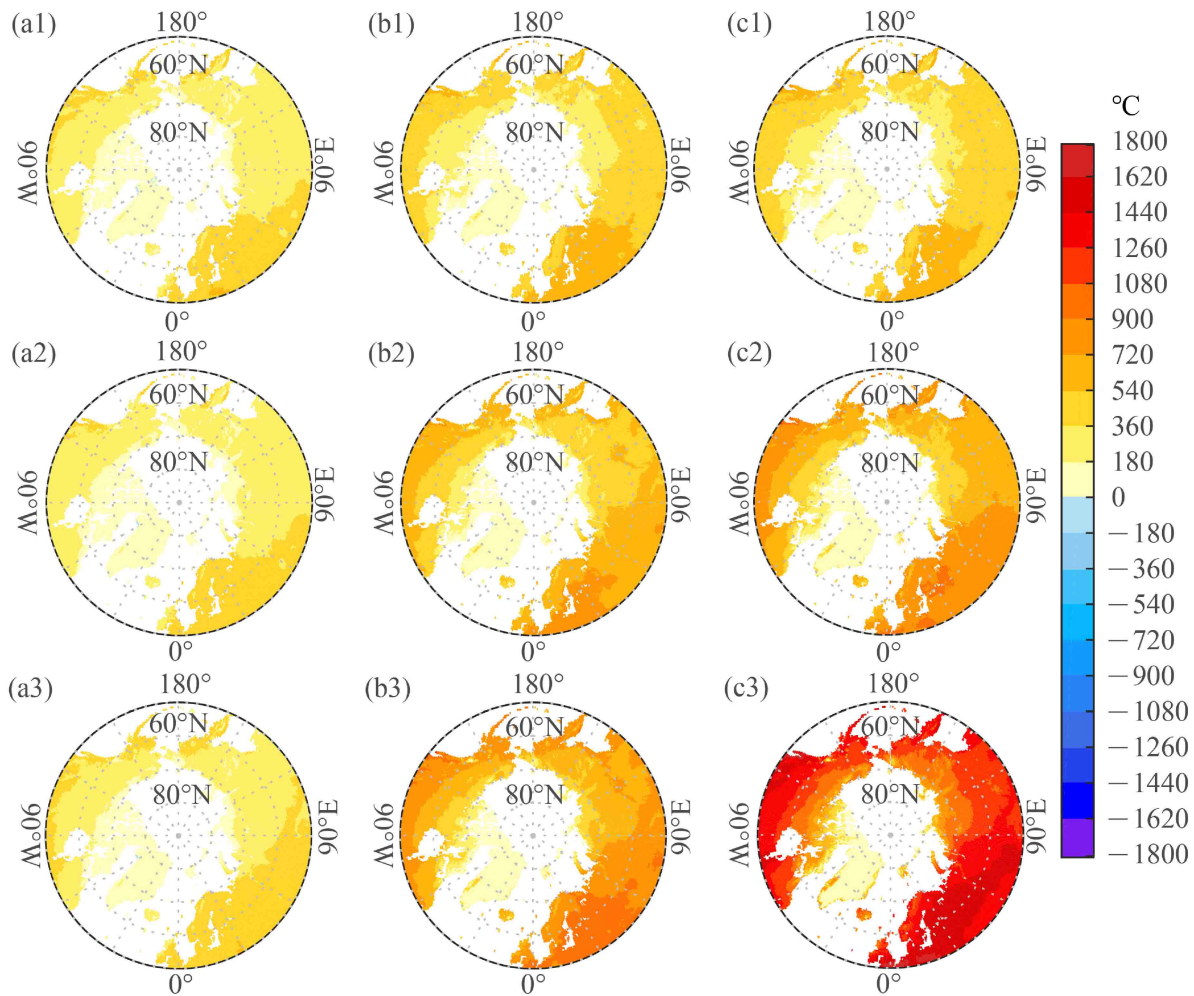


图6 同图4, 但为无霜期
Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the frost-free periods

各种气候变化情景下的无霜期延长幅度均大于此前 2010~2039 年的延长幅度。其中, RCP2.6 情景下的延长幅度最小, RCP8.5 情景下的延长幅度最大, RCP4.5 情景下的延长幅度居中。在空间格局方面, 基本维持前一个阶段的空间格局。2070~2099 年无霜期的延长幅度依气候变化情景而异, 其中 RCP2.6 情景下的延长幅度与 2040~2069 年的延长幅度基本一致, RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的延长幅度均较 2040~2069 年的延长幅度明显增加, 其中 RCP8.5 情景下的增幅最大。在空间格局方面, 欧亚大陆西部仍旧是无霜期延长幅度最大的地区, 其中北欧和格陵兰地区无霜期延长幅度高达 100 d 之多, 而欧亚大陆东部无霜期延长幅度较小, 大多不足 30 d。

伴随着无霜期的延长, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温也随之增

加。如图 7 所示, 3 种气候变化情景下, 2010~2039 年的 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温增加幅度 (相对于参考期 1971~2000 年) 大致相当, 变化的空间格局与终霜日提前的空间格局基本一致。2040~2069 年 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温较 2010~2039 年继续增加, 其中 RCP8.5 情景下的增幅最大, RCP2.6 情景下的增幅最小。其空间格局与前一个时段基本一致; 而在北美大陆, 东西差异显著弱化, 取而代之的是南北差异, 南部的增幅明显大于北部。2070~2099 年 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化依气候变化情景而异, 其中 RCP2.6 情景下, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化幅度与此前 2040~2069 年的变化幅度基本一致, RCP4.5 情景和 RCP8.5 情景下 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温呈继续增加之势, RCP8.5 情景下的增幅尤甚。在空间格局方面, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温增加幅度延续了 2040~2069 年的增加

图7 同图4, 但为 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温Fig. 7 Same as Fig. 4, but for the accumulated temperature $>10^{\circ}\text{C}$

幅度格局, 北美大陆 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温增加幅度表现出更明显的纬度地带性。与终霜日、初霜日变化的空间格局相比, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的变化表现出明显的纬度地带性。

4 结论与讨论

上述结果表明, 多模式集合模拟能够基本再现观测的初、终霜日及无霜期长度与 $>10^{\circ}\text{C}$ 积温的空间分布特征以及 1979~2004 年变化趋势的空间分布特征; 但多模式集合模拟对气候变化空间差异和年际变率的模拟能力较弱, 其对 $50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 地区终霜日的模拟存在一定的系统偏差, 模式模拟终霜日存在一定的推迟, 这可能与模拟的冬春季节温度偏低有关 (Hempel et al., 2013)。在全球变暖情景下, 2010~2039 年环北极地区终霜日将提前

5~15 d, 初霜日推迟 5~10 d, 无霜期延长 10~20 d, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温增加 200~300 $^{\circ}\text{C}$; 至 21 世纪末, 终霜日最多将提前 60 d, 初霜日将推迟 20~40 d, 无霜期延长幅度最高可达 100 d, 积温将变化 1000~1200 $^{\circ}\text{C}$, 其中 RCP8.5 情景下, 各指标变幅最大, RCP2.6 情景下变幅最小, RCP4.5 情景下的变幅居中。以上结果表明, 未来气候变化背景下环北极地区热量资源显著增加, 有利于植物的生长, 使得灌木丰度更高, 林木向北迁移 (Serreze et al., 2000)。

同时, 各指标变幅呈现出较大的空间差异。亚欧大陆中西部巴伦支海沿岸的变幅普遍更大, 这与 Sorteberg et al. (2005) 及 Koenigk et al. (2013) 的模拟结果类似; Koenigk et al. (2013) 的研究表明, 在所有排放情景下, 北大西洋巴伦支海的海冰减少最为明显, 北冰洋海表面气压降低, 同时大西洋东北部及西欧的北部海表面气压增加, 北欧海域

的西南风增强,增加了向北极的热量输送,导致通过巴伦支海口的热通量增加,促进了该地海冰融化及变暖;巴伦支海的海洋热传输是北极气候变化的重要影响因素 (Holland and Bitz, 2003; Årthun et al., 2019)。随着气候变暖, $>10^{\circ}\text{C}$ 积温增加幅度逐渐表现出明显的纬度地带性,南部增幅较大,北部增幅较小,这可能与海冰的影响有关,夏季在海冰融化之前,北冰洋地区表面温度一直保持在 0°C 附近,变暖的幅度较小 (Koenigk et al., 2013)。

本研究基于 ISI-MIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) 对 CMIP5 中 5 个气候 (地球) 系统模式模拟结果的降尺度数据,利用多模式集合预估了气候变化情景下 21 世纪环北极地区生长季与活动积温变化,分析了不同气候变化情景下环北极地区各气象指标的变化幅度与空间差异,为环北极地区应对气候变化提供了科学依据。但是,本研究尚有一些不足之处:气候模式具有一定的不确定性,本研究使用 5 个模式集合,数量偏少,未来可集合更多模式模拟结果;此外,受限于资料,本研究主要关注热量指标的变化,未考虑降水等其他指标。

参考文献 (References)

- Årthun M, Eldevik T, Smedsrud L H. 2019. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss [J]. *J. Climate*, 32(11): 3327–3341. doi:10.1175/JCLI-D-18-0750.1
- Bi J, Xu L, Samanta A, et al. 2013. Divergent Arctic-boreal vegetation changes between North America and Eurasia over the past 30 years [J]. *Remote Sens.*, 5(5): 2093–2112. doi:10.3390/rs5052093
- Callaghan T V, Björn L O, Chernov Y, et al. 2004. 环境变化背景下北极生物的多样性、分布及其适应性 [J]. *AMBIO-人类环境杂志*, 33(7): 380–393. Callaghan T V, Björn L O, Chernov Y, et al. 2004. Biodiversity, distributions and adaptations of Arctic species in the context of environmental change [J]. *AMBIO-A Journal of the Human Environment (in Chinese)*, 33(7): 380–393.
- 曹萌萌, 李俏, 张立友, 等. 2014. 黑龙江省积温时空变化及积温带的重新划分 [J]. *中国农业气象*, 35(5): 492–496. Cao Mengmeng, Li Qiao, Zhang Liyou, et al. 2014. Accumulated temperature variation and accumulated temperature rezone in Heilongjiang Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese)*, 35(5): 492–496. doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2014.05.002
- Chapman W L, Walsh J E. 2007. Simulations of Arctic temperature and pressure by global coupled models [J]. *J. Climate*, 20(4): 609–632. doi:10.1175/JCLI4026.1
- 初征, 郭建平, 赵俊芳. 2017. 东北地区未来气候变化对农业气候资源的影响 [J]. *地理学报*, 72(7): 1248–1260. Chu Zheng, Guo Jianping, Zhao Junfang. 2017. Impacts of projected climate change on agricultural climate resources in Northeast China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 72(7): 1248–1260. doi:10.11821/dlxb201707010
- 戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 等. 2014. 1960–2011 年华南地区界限温度 10°C 积温时空变化分析 [J]. *地理学报*, 69(5): 650–660. Dai Shengpei, Li Hailiang, Luo Hongxia, et al. 2014. The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in southern China from 1960 to 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 69(5): 650–660. doi:10.11821/dlxb201405008
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137(656): 553–597. doi:10.1002/qj.828
- Førland E J, Skaugen T E, Benestad R E, et al. 2004. Variations in thermal growing, heating, and freezing indices in the Nordic Arctic, 1900–2050 [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(3): 347–356. doi:10.1657/1523-0430(2004)036[0347:VITGHA]2.0.CO;2
- 高登义, 邹捍, 周立波, 等. 2008. 极地大气科学考察研究与展望 [J]. *大气科学*, 32(4): 882–892. Gao Dengyi, Zou Han, Zhou Libo, et al. 2008. Expedition research and prospect on atmospheric sciences in the polar regions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 882–892. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.15
- Hansen B U, Elberling B, Humlum O, et al. 2006. Meteorological trends (1991–2004) at Arctic Station, Central West Greenland ($69^{\circ}15'\text{N}$) in a 130 years perspective [J]. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 106(1): 45–55. doi:10.1080/00167223.2006.10649544
- Hempel S, Frieler K, Warszawski L, et al. 2013. A trend-preserving bias correction—The ISI-MIP approach [J]. *Earth Syst. Dynam.*, 4(2): 219–236. doi:10.5194/esd-4-219-2013
- Holland M M, Bitz C M. 2003. Polar amplification of climate change in coupled models [J]. *Climate Dyn.*, 21(3): 221–232. doi:10.1007/s00382-003-0332-6
- Houghton E. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 572.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 639–694.
- Johannessen O M, Bengtsson L, Miles M W, et al. 2004. Arctic climate change: Observed and modelled temperature and sea-ice variability [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 56(4): 328–341. doi:10.3402/tellusa.v56i4.14418
- Koenigk T, Brodeau L, Graversen R G, et al. 2013. Arctic climate change in 21st century CMIP5 simulations with EC-Earth [J]. *Climate Dyn.*, 40(11): 2719–2743. doi:10.1007/s00382-012-1505-y
- 陆龙骅, 卞林根, 效存德, 等. 2006. 极地大气科学与全球变化研究进展 [J]. *应用气象学报*, 17(6): 743–755. Lu Longhua, Bian Linggen,

- Xiao Cunde, et al. 2006. A study on polar atmospheric sciences and global change [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17(6): 743–755. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.06.012
- 陆龙骅, 卞林根, 张正秋. 2011. 极地和青藏高原地区的气候变化及其影响 [J]. *极地研究*, 23(2): 82–89. Lu Longhua, Bian Linggen, Zhang Zhengqiu. 2011. Climate change and its impact of the polar and the Tibetan Plateau regions [J]. *Chinese Journal of Polar Research (in Chinese)*, 23(2): 82–89. doi:10.3724/SP.J.1084.2011.00082
- McGuire A D, Chapin III F S, Walsh J E, et al. 2006. Integrated regional changes in Arctic climate feedbacks: Implications for the global climate system [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 31: 61–91. doi:10.1146/annurev.energy.31.020105.100253
- McSweeney C F, Jones R G. 2016. How representative is the spread of climate projections from the 5 CMIP5 GCMs used in ISI-MIP? [J]. *Climate Services*, 1: 24–29. doi:10.1016/j.cliser.2016.02.001
- Overland J, Dunlea E, Box J E, et al. 2019. The urgency of Arctic change [J]. *Polar Sci.*, 21: 6–13. doi:10.1016/j.polar.2018.11.008
- Overland J E, Wang M Y. 2010. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62(1): 1–9. doi:10.1111/j.1600-0870.2009.00421.x
- 潘淑坤, 张明军, 汪宝龙, 等. 2013. 1960—2011 年新疆初终霜日及无霜期的变化特征 [J]. *干旱区研究*, 30(4): 735–742. Pan Shukun, Zhang Mingjun, Wang Baolong, et al. 2013. Changes of the first frost dates, last frost dates and duration of frost-free season in Xinjiang during the period of 1960–2011 [J]. *Arid Zone Research (in Chinese)*, 30(4): 735–742.
- Pearson R G, Phillips S J, Loranty M M, et al. 2013. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change [J]. *Nat. Climate Change*, 3(7): 673–677. doi:10.1038/nclimate1858
- Serreze M C, Francis J A. 2006. The Arctic amplification debate [J]. *Climatic Change*, 76(3): 241–264. doi:10.1007/s10584-005-9017-y
- Serreze M C, Walsh J E, Chapin III F S, et al. 2000. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment [J]. *Climatic Change*, 46(1–2): 159–207. doi:10.1023/A:1005504031923
- Sorteberg A, Furevik T, Drange H, et al. 2005. Effects of simulated natural variability on Arctic temperature projections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32(18): L18708. doi:10.1029/2005GL023404
- Sorteberg A, Kattsov V, Walsh J E, et al. 2007. The arctic surface energy budget as simulated with the IPCC AR4 AOGCMs [J]. *Climate Dyn.*, 29(2–3): 131–156. doi:10.1007/s00382-006-0222-9
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 2013a. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 159.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 2013b. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 95–123.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93(4): 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Vavrus S, Waliser D, Schweiger A, et al. 2008. Simulations of 20th and 21st century Arctic cloud amount in the global climate models assessed in the IPCC AR4 [J]. *Climate Dyn.*, 33(7): 1099. doi:10.1007/s00382-008-0475-6
- Walker D A, Raynolds M K, Daniëls F J A, et al. 2005. The circumpolar arctic vegetation map [J]. *J. Veg. Sci.*, 16(3): 267–282. doi:10.1073/pnas.1312330110
- Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. 2014. The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. SUA*, 111(9): 3228–3232. doi:10.1073/pnas.1312330110
- 许艳, 王国复, 王盘兴. 2009. 近 50a 中国霜期的变化特征分析 [J]. *气象科学*, 29(4): 427–433. Xu Yan, Wang Guofu, Wang Panxing. 2009. Climatic change of frost in China in recent 50 a [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29(4): 427–433. doi:10.1111/j.1654-1103.2005.tb02365.x
- Zhao P, Zhang X D, Zhou X J, et al. 2004. The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall [J]. *J. Climate*, 17(17): 3434–3447. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3434:TSIEAI>2.0.CO;2