

张颖娴, 孙劭, 刘远, 等, 2022. 2021 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象, 48(4): 459-469. Zhang Y X, Sun S, Liu Y, et al, 2022. Global major weather and climate events in 2021 and possible causes[J]. Meteor Mon, 48(4): 459-469 (in Chinese).

2021 年全球重大天气气候事件及其成因^{*}

张颖娴 孙 劭 刘 远 侯 威 王国复

国家气候中心, 北京 100081

提 要: 2021 年全球平均气温较工业化前偏高 1.11°C ($\pm 0.13^{\circ}\text{C}$), 为有气象记录以来的第七暖年。全球海洋持续升温, 海洋热容量和全球平均海面高度均创历史新高, 南北极海冰覆盖范围较常年偏小。年内, 全球各地重大天气气候事件频发, 欧亚多地遭受严重暴雨洪涝灾害, 北美和亚洲等地发生严重干旱, 北大西洋和北印度洋热带气旋异常活跃, 欧洲和北美等地遭受高温热浪和山火, 欧美及亚洲多地遭受寒流和暴风雪侵袭。成因分析表明, 7 月中旬中欧地区持续受切断低压控制, 大西洋和地中海的水汽持续不断输送至欧洲中西部, 给该地区带来了极端强降水事件并引发洪水; 2 月中旬对流层极涡从北极向南偏移至北美中部形成稳定的低压槽, 在低压槽、有利的低层水汽输送、前期平流层爆发性增温的共同作用下, 北美大部地区遭受极端低温和强暴风雪天气侵袭。

关键词: 气候异常, 重大天气气候事件, 气象灾害, 大气环流

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032201

Global Major Weather and Climate Events in 2021 and Possible Causes

ZHANG Yingxian SUN Shao LIU Yuan HOU Wei WANG Guofu

National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: The global surface temperature in 2021 was 1.11°C ($\pm 0.13^{\circ}\text{C}$) higher than the pre-industrial level, being the seventh warmest year on record. Ocean heat content and global mean sea level have reached record highs, while the Antarctica and Arctic sea-ice extents were lower than normal. Many high-impact weather and climate events occurred across the world in 2021, including torrential rains and floods in Eurasia, severe droughts in North America and Asia, frequent tropical cyclones in the North Atlantic and North Indian Ocean, heatwaves and wildfires in Europe and North America, cold spells and snowstorms in Europe, America and Asia as well as severe convective weather events in many regions. Cause analyses suggest that in mid-July, central Europe was continuously controlled by the cut-off low pressure, and the water vapor from the Atlantic and Mediterranean was transported to central and western Europe, bringing extremely heavy precipitation and floods. In mid-February, the tropospheric polar vortex migrated southward from the Arctic to central North America, forming a stable low-pressure trough. Under the combined action of the low-pressure trough, favorable low-level water vapor transportation and the stratospheric sudden warming in the early stage, extreme low-temperatures and severe snowstorms attacked most regions of North America.

Key words: climate anomaly, weather and climate event, meteorological disaster, atmospheric circulation

^{*} 国家重点研发计划(2019YFC1510202)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J068)共同资助

2022 年 3 月 4 日收稿; 2022 年 3 月 22 日收修定稿

第一作者: 张颖娴, 主要从事气候变化与灾害风险研究. E-mail: zhangyingxian@cma.gov.cn

通讯作者: 王国复, 主要从事灾害风险研究. E-mail: wanggf@cma.gov.cn

引 言

世界气象组织最新数据显示,尽管全球气温由于 2020—2022 年的拉尼娜事件暂时冷却,但 2021 年大气中的温室气体吸收热量达到创纪录的水平,因此 2021 年仍然是有记录以来最热的七个年份之一(WMO,2022)。2021 年全球平均气温较工业化前(1850—1900 年)偏高 1.11°C ($\pm 0.13^{\circ}\text{C}$),为有气象记录以来的第七暖年。全球海洋持续升温,为有现代观测记录以来最暖的一年,全球海洋上层 700 m 和 2000 m 的热容量同创历史新高(NOAA,2022)。全球海平面上升速率增加,2013—2021 年的上升速率达到 $4.4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,全球平均海平面在 2021 年达到历史最高水平(WMO,2021)。2021 年,北极海冰面积远低于常年值,南极海冰略低于常年值,其中 7 月上半月北极海冰面积创历史新低,9 月东格陵兰海的海冰面积创历史新低(WMO,2021)。

2021 年全球多地发生重大天气气候事件,包括全球多地遭受严重暴雨洪涝灾害,美洲和亚洲等地发生严重干旱,北大西洋和北印度洋热带气旋异常活跃,欧洲和北美等地遭受高温热浪和山火,北美、欧美和亚洲等地遭受寒流和暴风雪侵袭,强对流天气在世界各地频发等。据国际灾难数据库(Emergency Events Database,EM-DAT)和慕尼黑再保险公司数据统计(EM-DAT,2021;Munich,2022),2021 年全球气象水文灾害共造成约 2240 亿美元的经济损失,这一数据高于 2019 年(2100 亿美元)和 2020 年(1660 亿美元),给世界多地经济社会的可持续发展、人员生命及财产安全带来了重大的不利影响。

在全球变化背景下,极端天气气候事件是国家应对气候变化的优先重点,同时也是国际社会应对气候变化的重要领域(秦大河等,2015)。2000—2019 年,全球共发生了约 11000 次极端天气气候事件,共造成超过 47.5 万人丧生,经济损失约为 2.56 万亿美元(Eckstein et al,2021)。因此,国家气候中心长期关注中国和全球主要天气气候事件的发生发展、成因和影响(孙劭等,2019;尹宜舟等,2020;翟建青等,2021),这有利于全面了解气候变化对全球的影响以及加深对气象灾害风险管理的认识。本文系统性回顾了 2021 年全球气候概况以及年内发生的重大天气气候事件,并重点分析了 7 月欧洲中西部

严重暴雨洪涝灾害和 2 月北美强冬季风暴这两个典型气候事件的形成原因。所用的资料包括 CPC 全球气温格点资料集、GPCC 全球降水量观测资料集、NCEP/NCAR 大气再分析数据集、德国气象局气候数据中心的日降水量资料和 NOAA 北极涛动(Arctic oscillation,AO)指数。

1 全球主要气候特征

1.1 地表温度位列历史第七位

2021 年是历史少见的“双峰型拉尼娜”年,上一次全球拉尼娜事件发生于 2020 年 8 月,于 2021 年 4 月结束,之后在 2021 年 11 月再次形成,并持续至 2022 年。拉尼娜现象对天气和气候的影响通常与厄尔尼诺现象相反,具有暂时的全球降温效应,通常在拉尼娜事件发生的第二年最强。尽管全球气温因为 2020—2022 年的拉尼娜事件暂时冷却,但根据世界气象组织的统计,2021 年仍然是有记录以来最热的七个年份之一(图 1),2021 年,全球平均气温较工业化前(1850—1900 年)偏高为 1.11°C ($\pm 0.13^{\circ}\text{C}$),是 2015 年以来连续第七年较工业化前偏高 1°C (WMO,2022)。由于大气中温室气体吸收的热量达到创纪录水平,全球变暖和其他长期气候变化趋势预计将持续。

虽然 2021 年明显总体温暖,但全球各地的温度距平存在差异(图 2)。从美国和加拿大西海岸延伸到加拿大东北部和格陵兰岛,以及非洲中部至北部和中东的大部分地区温度均明显偏高,其中北美东北部和格陵兰岛的部分地区偏高 3°C 以上;西伯利亚西部和东部、阿拉斯加、中东太平洋地区、澳大利亚大部分地区和南极洲部分地区温度则低于常年,其中中东太平洋地区偏低的温度与年初和年底的拉尼娜现象相对应。从区域来看,非洲的年平均气温与 2019 年持平,是有记录以来的第三高,仅次于 2010 年(第二热)和 2016 年(最热);北美、南美、欧洲和亚洲的年平均气温都位居各自有记录以来最热的九年之列;虽然大洋洲的年平均气温高于常年值,但 2021 年是 2012 年以来最冷的一年(NOAA,2022)。

1.2 海洋热容量和海平面高度创历史新高,海冰面积偏小

2021 年全球海洋持续升温,成为有现代海洋观

测记录以来最暖的一年。同时,地中海、北大西洋、南大洋、北太平洋海区温度均创历史新高(Cheng et al, 2022)。地球系统中超过 90% 的多余热量储存在海洋中,且相比常用的海面温度等指标,海洋热容量受自然波动的影响小,因而成为判断全球是否变暖的最佳指标之一。最新数据表明,2021 年全球海洋上层 2 000 m 热容量再创历史新高,其中北大西洋、北太平洋和地中海热容量均为历史新高(NOAA, 2022)。与 2020 年相比,2021 年全球海洋上层 2 000 m 增加的热容量相当于约 500 倍的 2020 年中国全年发电量(Cheng et al, 2022)。有研究表明,人类的影响已经使大气、海洋和陆地变暖,而且人类的影响极有可能是自 20 世纪 70 年代以来观测到的海洋热容量增加的主要驱动力(IPCC, 2021),此外工业和生物气溶胶、土地利用等对海洋变暖也有一定的影响(Cheng et al, 2022)。由于海洋热膨胀和陆地冰川融水等作用,全球海平面在 2013—2021 年期间平均每年上升 4.4 mm,是 1993—2002 年

海平面上升速率的两倍,2021 年全球平均海平面高度更是创历史新高。

2021 年 3 月 21 日,北极海冰面积达全年最大(1 480 万 km^2),2021 年 3 月北极海冰面积是 1979 年有记录以来的第九或第十低;7 月上半月北极海冰面积创历史新低;9 月 16 日北极海冰全年最小(472 万 km^2),大于近些年,但仍远低于常年值,其中东格陵兰海的海冰面积创下了历史新低。南极海冰面积略低于常年值,2 月 19 日出现了年度最小值(260 万 km^2),为有记录以来第十五低;最大值出现在 8 月 30 日(1 880 万 km^2),是除了 2016 年外第二次南极海冰面积最大值发生在 8 月。

2 全球重大天气气候事件概述

2.1 全球多地遭受严重暴雨洪涝灾害

GPCC 观测资料显示,欧洲东部、东亚、东南亚、澳洲东部、非洲东北部、南美洲北部、北美洲东南部和北部等地 2021 年年降水量较常年偏多;西亚、中亚、非洲西部、南美洲南部、中美洲、北美中部等地降水量偏少(图 3)。拉尼娜现象在某种程度上造成了一些地区降水模态的改变,比如年初的拉尼娜现象可能造成了海洋大陆的降水较常年偏多,以及巴塔哥尼亚的降水较常年偏少。非洲季风的爆发偏晚,季风降水接近常年;在以赞比亚为中心的南部非洲地区,雨季降水量持续低于常年值。在北美地区,阿拉斯加和加拿大北部、美国东南部和加勒比海部分地区的降雨量高于常年;北美中部地区则处于异常

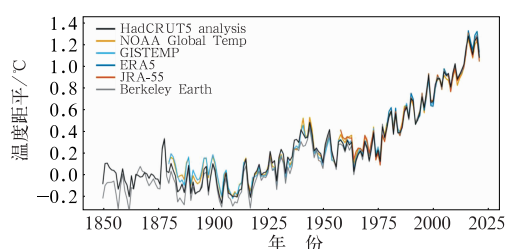


图1 全球平均温度距平(相对 1850—1900 年平均值)时间序列(WMO, 2022)

Fig. 1 Global average temperature anomalies (compared to the 1850—1900 average) (WMO, 2022)

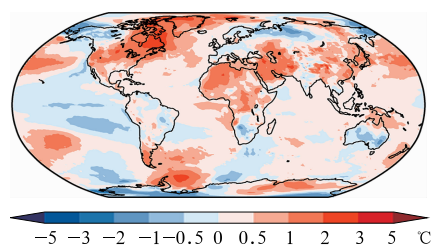


图2 2021 年全球平均温度距平(相对 1991—2020 年平均值)空间分布(C3S, 2022)

Fig. 2 Global distribution of temperature anomalies in 2021 (compared to the 1991—2020 average) (C3S, 2022)

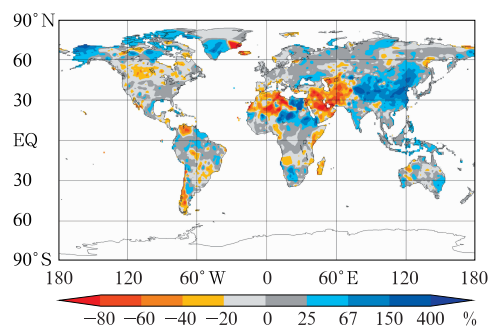


图3 2021 年全球降水量距平百分率(相对于 1951—2000 年平均值)

Fig. 3 Global distribution of precipitation anomalies in 2021 (compared to 1951—2000 average)

干燥的地带。澳大利亚西南部和东南部的降水量较常年异常偏高;新西兰北岛的降水量则异常少。另外,地中海地区降水量异常偏少,而黑海和东欧部分地区降水量则明显偏多。

在亚洲地区,7月17—24日,中国河南多地出现破纪录的极端强降水事件,台风烟花西北侧的偏南气流为这次极端强降水提供了充沛的水汽。河南有39个县(市)累计降水量达常年年降水量的一半,其中郑州、辉县、淇县等10个县(市)超过常年的年降水量。累计降水量超过250 mm的覆盖面积占河南的32.8%。小时最大降水量(郑州,201.9 mm)创下中国大陆小时气象观测降水量新纪录;郑州等19个县(市)日降水量突破历史极值;32个县(市)连续3 d降水量突破历史极值。据有关部门统计,此次灾害共造成河南省150个县(市、区)1478.6万人受灾,直接经济损失达1200.6亿元。

在欧洲地区,7月上中旬,欧洲中西部陆续发生暴雨洪涝灾害。7月12—13日英格兰南部部分地区发生极端强降水事件并引发洪水,其中英国伦敦部分地区90 min降水量接近80 mm,特别是基尤24 h降水量达47.8 mm,超过了当地常年7月总降水量,打破了1983年以来的历史纪录。强降水在伦敦和多塞特郡引发了洪水,造成部分地区大量车辆被淹没、交通瘫痪、公司企业停工、学校停课。7月14—15日德国发生极端强降水,部分地区日降水量达100~150 mm,超过当地常年7月总降水量,最大日降水量为维珀菲尔特的162.4 mm。比利时、卢森堡、荷兰、瑞士和法国东北部部分地区也受到了这次极端强降水的影响。在瑞士,比尔湖、图恩湖和卢塞恩湖的最高水位达到5级洪水警报;布里恩茨湖、巴塞尔附近的莱茵河和苏黎世湖的最高水位也达到了4级洪水警报。据德国慕尼黑再保险公司统计,此次欧洲强暴雨洪涝灾害共造成超过220人死亡以及540亿美元的经济损失,其中德国的损失最大(400亿美元)。8月10日,土耳其黑海沿岸发生暴雨洪涝灾害,其中卡斯塔莫努省的博兹库尔特24 h降水量为399.9 mm,几个城镇遭受严重破坏,据报道有77人死亡。10月4日,意大利西北部利古里亚沿海地区出现了极端强降水,其中蒙特诺特6 h降水量为496.0 mm,罗西廖内12 h的降水量为740.6 mm。

在大洋洲地区,3月18—24日,澳大利亚东部沿海地带连降暴雨,新南威尔士州遭遇50年一遇的

洪灾,尤其是悉尼北部的黑斯廷斯河、卡鲁阿河和曼宁河,部分河流因2017—2019年干旱而严重枯竭的蓄水量被大幅恢复。此次洪灾造成近2万人被疏散,部分道路以及数以百计的房屋遭损毁,多条交通要道封闭,不少中小学校被迫停课,至少造成了21亿美元的经济损失。5月29—31日,新西兰南岛中部坎特伯雷地区遭受极端特大暴雨侵袭,并引发百年一遇洪灾,多个气象站的日降水量超过250 mm,部分地区停电、路桥被毁,数百人紧急撤离家园。

在美洲地区,2021年上半年,南美洲北部部分地区,特别是亚马孙河流域北部降水量持续异常偏多,导致该地区发生了持续性的强暴雨洪涝灾害,6月20日巴西马瑙斯的里奥内格罗河观测到了有记录以来的最高水位(30.02 m)。据报道,巴西北部洪水泛滥最为严重,圭亚那、哥伦比亚和委内瑞拉也受到了影响。

在非洲地区,尽管萨赫勒雨季的降水量接近常年同期且较近几年偏少,但仍有一些地区发生了洪水灾害,特别是在尼日尔、苏丹、南苏丹以及马里。另外,非洲中部的坦噶尼喀湖5月水位比常年同期偏高3 m多,这造成了湖岸的部分布隆迪居民流离失所。

2.2 美洲和亚洲等地发生严重干旱

2020—2021年,北美洲西部大部分地区经历了较重的干旱,从2020年1月至2021年8月的20个月是美国西南部有记录以来最干燥的20个月。受干旱影响,2021年加拿大的小麦和油菜产量预计比2020年减产30%~40%;美国科罗拉多河米德湖的水位在7月下降到47 m,这是水库完全投入使用有记录以来的最低水位。严重干旱连续第二年影响了南美洲大部分亚热带地区,其中巴西中部和南部、巴拉圭、乌拉圭和阿根廷北部大部分地区的降水量都远低于常年。9—10月,南美洲中东部拉普拉塔流域(包含巴拉那河、巴拉圭河及乌拉圭河三大河流)极端干旱达到顶峰,低水位降低了水力发电量,扰乱了河流运输。10月阿根廷的潘帕斯草原也饱受干旱困扰,巴拉圭河因严重干旱水位下降甚至见底。受干旱影响,作为“世界粮仓”的巴西玉米产量下降近10%,大豆和咖啡等作物减产致价格持续上涨,波及全球多国农产品进口贸易。

2021年严重干旱影响了西南亚的大部分地区。在2020—2021年的冷季,包括伊朗、阿富汗、巴基斯

坦、土耳其东南部和土库曼斯坦在内的大部分地区的降水量都远低于常年值。巴基斯坦经历了有记录以来第三个最干燥的2月。在1月和2月的大部分时间里,伊朗的高山积雪面积还不到常年的一半,这导致依赖融雪的河流流量减少,灌溉用水减少。

在非洲地区,马达加斯加南部经历了一场持续了至少两年的严重干旱。从2020年7月至2021年6月的12个月里,该地区降水量较常年偏少50%左右,持续干旱给当地约114万人带来了严重的粮食安全问题。

2.3 北大西洋和北印度洋热带气旋异常活跃

2021年全球热带气旋数量接近历史平均水平。北大西洋热带气旋较为活跃,截至10月11日,有20个命名的风暴,大约是历史同期的两倍。北印度洋热带气旋也非常活跃,但北太平洋西部和北太平洋东部的热带气旋数量接近或低于历史平均水平。另外,南半球太平洋和印度洋的热带气旋个数也略低于平均水平。

在北大西洋,四级飓风艾达于8月29日在美国路易斯安那州富尔雄港附近登陆,登陆时中心附近最大风力达 $67\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (相当于17级以上的超强台风),这是有记录以来登陆该州的最强飓风。“艾达”登陆后一路北上影响多州,造成纽约最大小时降水量达到创纪录的80 mm,部分地区24 h的降水量超过200 mm。“艾达”在其发展成热带气旋之前,已给委内瑞拉带来了大洪水。“艾达”致墨西哥湾附近几乎所有的石油生产设施关闭;美国路易斯安那州近百万户家庭和企业断电,新奥尔良市全城断电,全美至少80人死亡,经济损失约为638亿美元。年内,另一个影响较大的是飓风格蕾丝。“格蕾丝”先是于8月16日给海地、多米尼加、牙买加、特立尼达和多巴哥带来了洪水,之后其发展成三级飓风并于8月21日登陆墨西哥东部海岸,其带来的强暴雨侵袭了墨西哥韦拉克鲁斯州,造成至少8人死亡。

5月中下旬,阿拉伯海气旋风暴陶克塔伊和印度洋孟加拉湾气旋风暴亚斯相继登陆印度。“陶克塔伊”最大风力为14级($45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相当于强台风级),“亚斯”最大风力为12级($33\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相当于台风级)。“陶克塔伊”造成孟买圣克鲁斯西气象站5月18日降水量达230 mm,这是孟买5月最大日降水量;印度西部城镇帕尔加尔的日降水量高达298 mm。两个风暴累计造成印度至少87人死亡、数百人失踪,百万人撤离家园,超30万所房屋被摧

毁,大量基础设施受损。9月下旬,热带气旋古拉布从孟加拉湾穿越印度东海岸;残余体系在阿拉伯海加强,之后横穿印度,并更名为“沙欣”。10月3日,热带气旋沙欣在阿曼北部海岸马斯喀特西北部登陆,这是自1890年以来首次在该地区登陆的热带气旋。受“古拉布”和“沙欣”影响,印度、巴基斯坦、阿曼和伊朗共有39人死亡。

在南半球,影响最大的热带气旋是塞洛亚。“塞洛亚”形成于印度尼西亚南部,之后向东南方向移动至西澳大利亚。“塞洛亚”在4月2—5日给东帝汶以及印度尼西亚东南部带来强降水并引发洪水和泥石流,之后于11日在澳大利亚西部海岸的卡尔巴里附近登陆,是自1956年以来在西澳大利亚南部登陆的最强热带气旋,共造成印度尼西亚、东帝汶和澳大利亚272人死亡。另外,1月下旬热带气旋埃洛伊丝侵袭了非洲东南部,给莫桑比克、南非、津巴布韦、埃斯瓦蒂尼和马达加斯加带来了较大损失和人员伤亡。在南太平洋,热带气旋安娜和尼兰侵袭斐济和新喀里多尼亚,引发多地洪涝灾害。

在北太平洋地区,2021年热带气旋的直接影响较近年偏小。7月台风灿都和烟花给中国上海及周边地区带来了强降水,并引起了近海航运的中断。台风烟花西北侧气旋性暖湿气流西进北上,携带大量水汽西北方向输送至中国内陆,在一定程度上助力了中国河南省极端强降水的发生。9月台风电母在越南登陆,之后西移至泰国,在泰国引发洪水,致7人死亡。

2.4 欧洲和北美等地遭受高温热浪和山火

2021年夏季,欧洲的平均温度比1991—2020年期间要高出 1°C ,以 0.1°C 的微弱优势超过2010年和2018年,成为欧洲史上最热的夏天。欧洲各地高温纪录也在2021年夏季屡屡被打破,7月20日,吉兹雷(49.1°C)创下土耳其全国纪录,第比利斯(40.6°C)创下格鲁吉亚有记录以来高温纪录。意大利西西里岛8月11日观测到了 48.8°C 高温,而突尼斯的凯鲁万观测到了更高的 50.3°C ,这一温度成为了欧洲的最新高温纪录。8月14日,蒙托罗(47.4°C)创下了西班牙的全国纪录,马德里的 42.7°C 也是有记录以来最热的一天。高温热浪导致欧洲多地山林大火蔓延,损失惨重,尤其是在地中海东部和中部,土耳其是受影响最严重的国家之一,此外还有希腊、意大利、西班牙、葡萄牙、阿尔巴尼亚、北马其顿、阿尔及利亚和突尼斯。

6—7月期间,异常的高温热浪多次影响北美西部。6月20日至7月29日,仅不列颠哥伦比亚省就报告了569例与热相关的死亡病例,加拿大多个长期观测站的最高气温都比原高温纪录高出4~6℃,其中不列颠哥伦比亚省中南部的利顿6月29日最高气温达49.6℃,打破了加拿大全国的高温纪录。美国西南部也多次出现了高温热浪,其中加利福尼亚州死亡谷在7月9日最高气温达到54.4℃,追平了2020年观测到的20世纪30年代以来世界最高温度纪录,是美国大陆有记录以来最热的夏天。持续的高温热浪造成北美西部多地发生山火,其中加利福尼亚州北部的迪克西大火始于7月13日,截至10月7日已燃烧了约39万hm²,这是加利福尼亚州有记录以来最大的一次火灾。

2.5 欧美和亚洲等地遭受寒流和暴风雪侵袭

2月12—17日,冬季风暴乌里袭击了北美大部,加拿大南部、美国大部以及墨西哥北部遭遇强寒流和极端暴风雪,多地最低气温突破历史极值,美国得克萨斯州最低气温下降至-22℃,为1895年以来罕见(中国气象局,2022)。2月16日,俄克拉何马城和达拉斯-沃斯堡机场最低气温(分别为-24.4℃和-18.3℃)均打破了1903年的低温纪录(分别为-15.6℃和-11.1℃)。墨西哥北部最低气温低至-18℃,至少十余人因低温死亡。冬季风暴引起的降雪叠加前期积雪,使得美国有73%的土地被白雪覆盖。加拿大的温莎市降雪量达200mm,皮尔逊国际机场降雪量为120mm,渥太华降雪量为180mm。此次灾害影响重大,美国共有172人丧生,超过550万家庭断电停电,为美国近代史上最大的停电事件之一。据慕尼黑再保险公司统计,冬季风暴乌里给美国造成了301亿美元的经济损失。

1月,亚洲多地遭受寒流和暴雪侵袭,其中俄罗斯经历了2009年以来最寒冷的冬天。6—8日,中国北方遭受强寒潮侵袭,多地观测到的最低气温突破建站以来的历史极值,北京大部地区最低气温在-24~-18℃,南郊观象台最低气温达-19.6℃,为1966年以来的最低气温。7—11日,日本北部及西部连降大雪,多地日降雪量创下纪录,强降雪导致超过4.5万户停电,10人死亡,近300人受伤。

在欧洲地区,1月7—10日,一场严重的暴风雪袭击了西班牙的许多地区,多地发生极端低温和大雪天气,其中托莱多(-13.4℃)和特鲁埃尔(-21.0℃)等地观测到了有记录以来的最低温度,

西班牙多地的陆地和空中运输都受到了严重干扰。2月的第二周,荷兰经历了2010年以来最严重的暴风雪,受此次暴风雪的影响,德国、波兰和英国多地也经历了降温和大雪天气。12日,布雷马尔最低气温至-23.0℃,这是英国自1995年以来的最低气温。另外,欧洲东南部的雅典在15日遭遇了2009年以来最大的降雪。

7月下旬,正值冬季的南非受南极极端寒流的影响,19个地区出现了零下气温并伴有降雪,多地的最低气温陆续被刷新。23日,首都约翰内斯堡最低气温为-7℃,打破了1995年7月的最低气温纪录(-6.3℃);金伯利的最低气温则低至-9.9℃,大多数南非城市的气温都打破了近20年来的最低气温纪录。

2.6 强对流天气在世界各地频发

美国是世界上龙卷风最为频发的国家,2021年1—4月美国共发生了959次龙卷风,略低于常年同期。其中一次EF4级(最高风速达267~322km·h⁻¹)龙卷风于3月25日袭击了美国东南部,其中阿拉巴马州和佐治亚州西部的灾情最为严重,共造成6人死亡和16亿美元的经济损失。4月27—28日,得克萨斯州和俄克拉何马州发生了风雹灾害,共造成24亿美元的损失。12月10—11日,69次龙卷风侵袭了美国的10个州,共造成90人死亡、52亿美元的经济损失,是美国历史上最为严重的龙卷风灾害之一。

6月下半月,捷克、斯洛伐克、瑞士和德国多地发生强雷暴和龙卷。其中24日,一次F4级超强龙卷风袭击了捷克摩拉维亚南部的几个村庄,造成重大损失和6人死亡,这是捷克有记录以来最强的龙卷风。据报道,6月强雷暴和龙卷给捷克造成了约7亿美元的经济损失。

在亚洲地区,5月14日,中国江苏苏州与浙江嘉兴交界附近、湖北武汉市蔡甸区在2h内先后出现强龙卷天气,最大风力都达17级以上,并造成重大人员伤亡。6月1日傍晚,中国黑龙江省尚志市和阿城区出现龙卷(最大风力分别达17级以上和15级以上);6月25日下午内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗出现强龙卷;7月20日河南开封通许出现龙卷;21日河北保定清苑部分地区出现极端风雹天气,东间乡遭受龙卷风(中国气象局,2022)。

2021年全球重大天气气候事件如图4所示。

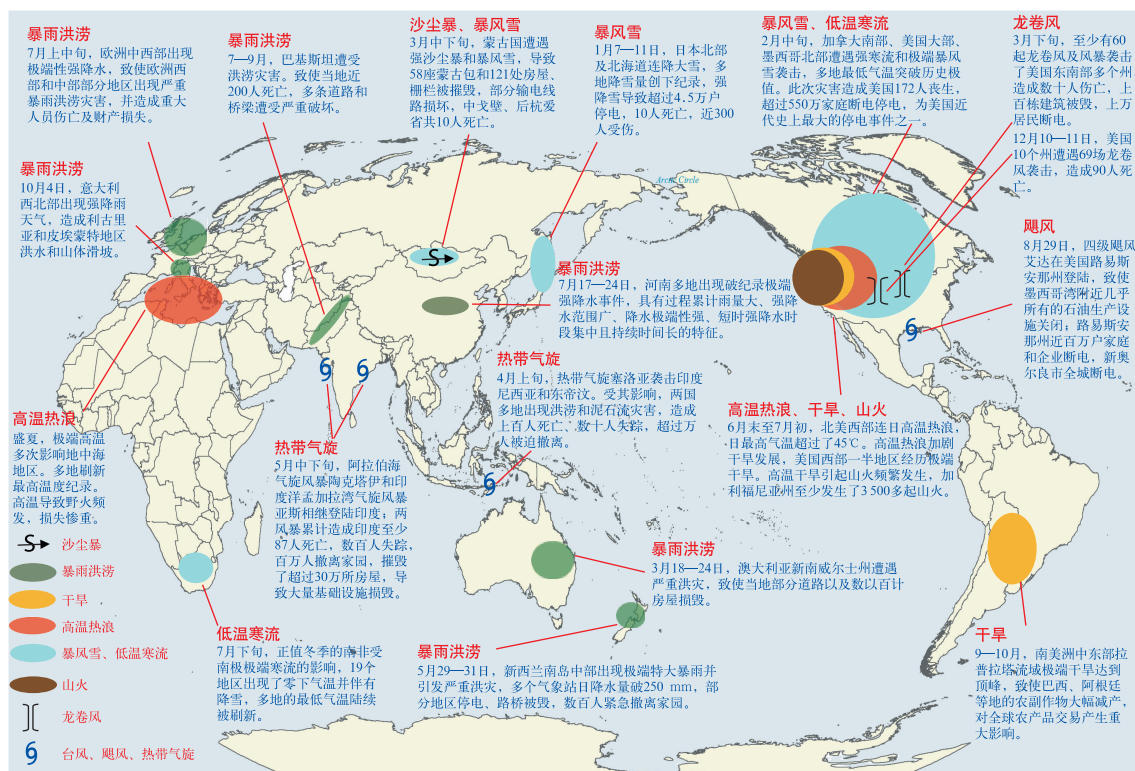


图4 2021年全球重大天气气候事件示意图

Fig. 4 Diagram of global major weather and climate events in 2021

3 典型重大气候事件成因分析

3.1 7月欧洲中西部出现严重暴雨洪涝灾害

欧洲中西部属于温带海洋气候,月降水量之间的差异较小,气候适宜,比如德国西部城市科隆全年最小月降水量在4月,约为50 mm;月降水量最多在7月,约为90 mm。7月14日,德国西部多地24 h累计降水量达到100 mm,部分地区超过了常年7月的月总降水量(图5),欧洲中西部上空持续几天的稳定的大气环流型造成了此次极端强降水。

7月12—15日,500 hPa中欧地区为强的切断低压系统或风暴中心贝恩德,其被困于东西两侧高压区之间,形成了“高-低-高”的阻塞大气环流型(图6)。图7显示切断低压贝恩德所在的中欧上空有很强水汽通量辐合,而其北部和西部的东大西洋和南部的地中海地区为水汽通量的辐散,这表明低压系统西侧大西洋东部的高压脊起到了“泵”的作用,使大西洋水汽穿过法国进入比利时、荷兰和德国,低压系统又通过气旋式环流从地中海获取充沛

的水汽和热量,并将深层水汽输送至中欧地区。7月20日之后,随着东大西洋上空高压进一步延伸到欧洲大陆,并将低压区向北和向东推进,中欧大部分地区的强降水也趋于结束。

某一国际气候科学家小组的快速归因研究显示,气候变化使得欧洲发生类似这次极端强降水事件的可能性增加了1.2~9倍,由于人类活动引起全球气候变暖将使这类暴雨事件增加3%~19%。这

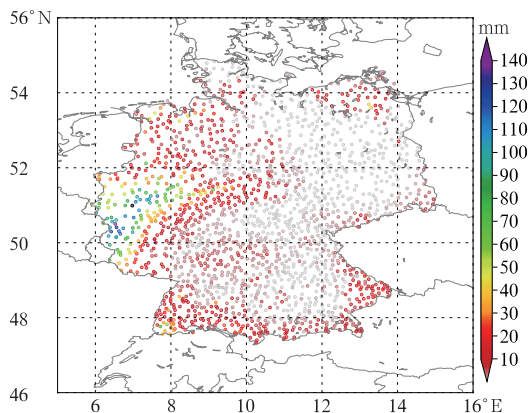


图5 2021年7月14日德国降水量分布

Fig. 5 Observed daily precipitation over Germany on 14 July 2021

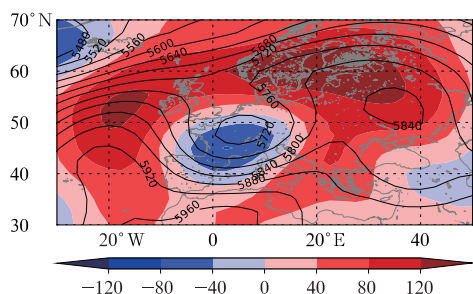


图6 2021年7月12—15日500 hPa位势高度及距平场
(填色:距平场,等值线:平均场,单位:gpm)

Fig. 6 500 hPa geopotential height and anomaly averaged over 12–15 July 2021

(colored: anomaly field, isolate: the mean field, unit: gpm)

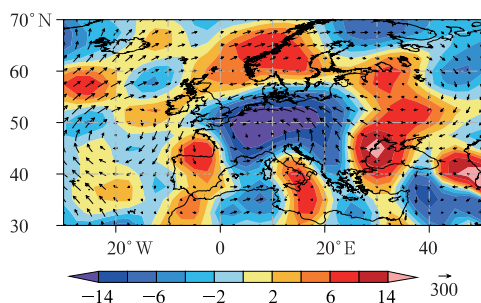


图7 2021年7月12—15日整层水汽通量
距平场及散度场

(矢量:水汽通量距平,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
填色:散度,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Integrated moisture flux anomalies and divergence averaged over 12–15 July 2021

(vector: flux anomaly, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
colored: divergence, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

些结果强化了政府间气候变化专门委员会新报告(IPCC, 2021)的结论,即现在有明确证据表明人类正在使地球气候变暖,人为气候变化是极端天气变化的主要驱动力,随着气温上升,西欧和中欧将面临越来越多的极端降雨和洪水。

3.2 2月中旬冬季风暴乌里袭击北美大部

2021年2月12—17日,强冬季风暴乌里侵袭了北美大部,尤其给美国西部到南部、中西部到东北内陆带来了强暴风雪和极端低温,美国中部和南部部分地区气温较常年偏低 12°C 以上(图8)。导致了这次冬季强风暴事件的直接原因是对流层高空极地涡旋从北极向南偏移,然后在加拿大中南部逗留长达一个多星期,这使得寒冷的北极空气逐渐向南扩

散到得克萨斯州。

2月12—17日,北极极区500 hPa位势高度主要为较强的正距平,表示极涡强度偏弱,而较低纬度的北美地区位势高度为强负距平,表示极地涡旋从北极偏移至较低纬度并在北美形成强的低压槽(图9a)。北美低压槽东西两侧为强高压脊,稳定的“高-低-高”大气环流型使得冷空气源源不断地沿着北美低压槽从北极地区向南输送至美国南部以及墨西哥北部。与此同时,200 hPa高空急流位于东北太平洋至北美西北部,表明不停有高空扰动沿着急流从东北太平洋向东进入北美大陆,为冬季降水提供抬升力和水分(图9b)。低层700 hPa北美大西洋沿岸有反气旋式环流,反气旋西侧的偏南气流有利于大西洋暖湿空气输送至北美内陆,加之位于高空槽前,槽前暖湿空气抬升为强降雪提供了有力的水汽条件(图9c)。值得注意的是,当2月中旬北美遭受暴雪低温时,东亚则气温较常年明显偏高,可以说温暖如春,形成了东西半球“冰火两重天”的格局。国家气候中心的专家认为受全球变暖的影响,北极放大效应带来的北极海冰减少和气温升高会使得对流层极涡变得不稳定,进而发生分裂和位移,导致2月中旬对流层极涡偏向北美,从而促使极寒天气的发生。

另外,一些已有研究表明北美这次强暴风雪和低温灾害是2020年12月底至2021年1月初逐步开始的北极地区平流层爆发性增温事件(sudden stratospheric warming, SSW)引发的北极-低纬度大

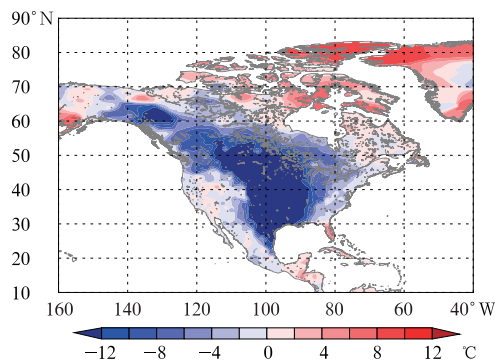


图8 2021年2月12—17日地表平均气温
距平分布(相对于1981—2010年平均值)

Fig. 8 Surface mean temperature anomaly averaged over 12–17 February 2021
(compared to 1981–2010 average)

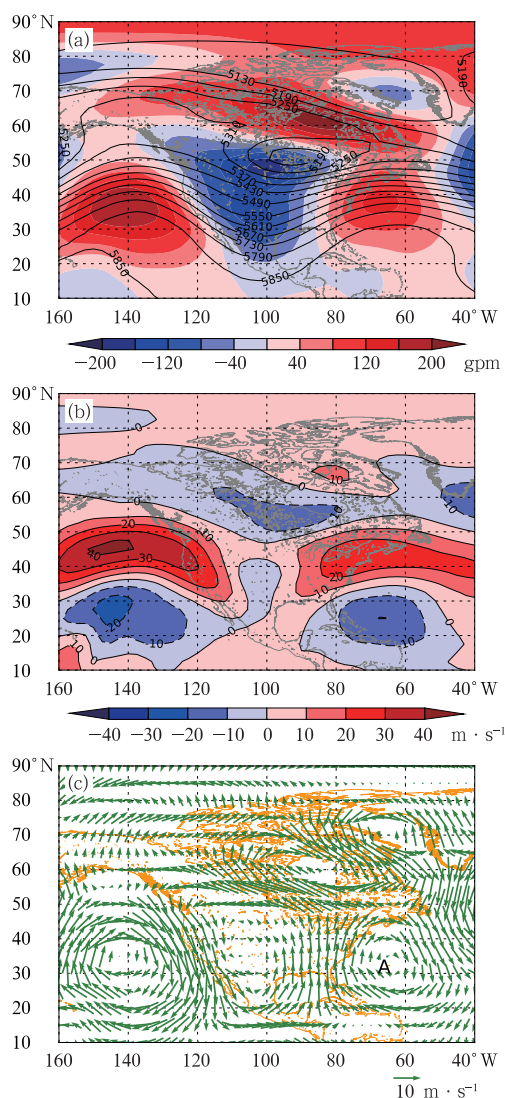


图9 2021年2月12—17日(a)500 hPa位势高度场(等值线)与距平(填色), (b)200 hPa纬向风场距平, 以及(c)700 hPa矢量风场距平(A:反气旋)

Fig. 9 (a) 500 hPa geopotential height (isoline) and anomaly (colored), (b) 200 hPa zonal wind anomaly, (c) 700 hPa vector wind anomaly averaged (A: anticyclone) over 12–17 February 2021

气环流过程相互作用的结果(Zhang et al, 2022a)。极地涡旋是环绕地球南北两极的低压冷空气区, 周围有旋转的西风急流。典型的情况是, 足够强的西风可以在冬天将最冷的空气禁锢在极地。SSW 导致极地涡旋减弱, 使得冷空气扩散到中纬度地区, 而温暖的空气进入北极。由于 SSW, 平流层 10 hPa 位势高度距平在 12 月底由负转正, 并在 1 月达到最强, 2 月中旬趋于结束, 并且 SSW 的影响从平流层

随时间下传至对流层低层(图 10a)。AO 指数可以衡量极地空气在北极受阻或南侵的程度, AO 正位相表示冷空气更多地围困在北极, 而负位向意味着冷空气由于西风急流减弱而南下。12 月底至 1 月极地涡旋的反复破坏导致了 AO 指数表现为强的负位相(图 10b), 这表示已形成“暖北极-冷大陆”的大气环流模态, 而北美的冬季风暴和极端低温就是在这种背景下发生的。值得注意的是, 2021 年 1 月初东亚也遭受了一次强寒潮的侵袭。前期的平流层爆发性增温以及北大西洋涛动负位相、西伯利亚高压增强、乌拉尔山阻塞高压增强和东亚槽加深相关的高中纬度大尺度大气环流异常被证实共同影响了强寒潮的发生(Zhang et al, 2022b; Zheng et al, 2022)。另外, Li et al(2022)指出东亚未来几年频繁经历极端寒冷事件的可能性很大, 并且预测直到 2025 年东亚冬季气温将呈现波动中下降的趋势。可见, 在全球变暖的背景下, 与极端寒冷事件的发生和演变相关的物理机制和可预报性仍然是未来的研

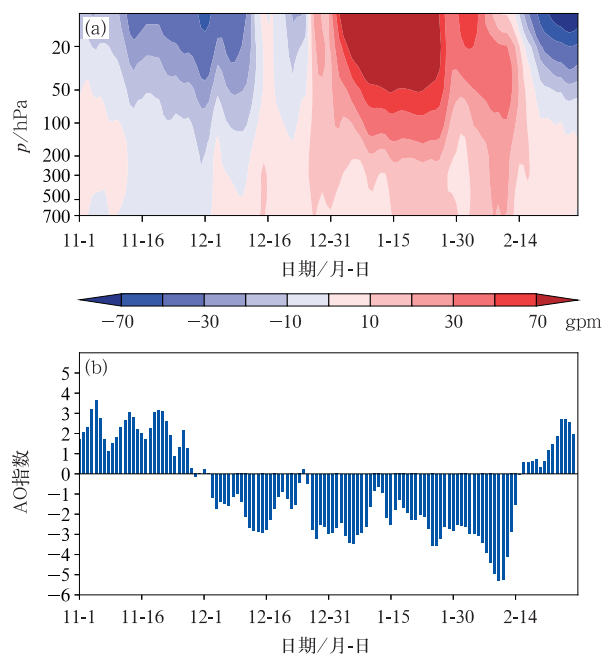


图10 2020年11月1日至2021年2月28日(a) 北极地区(65°~90°N)位势高度距平的时间-高度剖面 and (b) AO 指数变化

Fig. 10 (a) Time-height cross-section of the geopotential height anomaly over the polar cap (65°–90°N), and (b) Arctic Oscillation index from 1 November 2020 to 28 February 2021

究重点 (Mu et al, 2022)。

4 结 论

2021 年大气中的温室气体吸收热量达到创纪录的水平, 尽管全球气温因为 2020—2022 年的拉尼娜事件暂时冷却, 但 2021 年全球平均气温较工业化前 (1850—1900 年) 偏高 1.11°C ($\pm 0.13^{\circ}\text{C}$), 仍为有气象记录以来的第七暖年。全球海洋持续升温, 为有现代观测记录以来最暖的一年, 全球海洋上层 700 m 和 2000 m 的热容量同创历史新高。全球海平面上升速率增加, 并在 2021 年达到了新的历史最高水平。2021 年, 北极海冰面积远低于常年值, 其中 7 月上半月北极海冰面积创历史新低, 9 月东格陵兰海的海冰面积创历史新低。

在全球变暖的大背景下, 年内欧洲、美洲遭受高温热浪, 多地观测到突破历史极值的极端高温, 成为欧洲和美国有记录以来最热的夏天, 高温热浪导致欧洲南部地中海沿岸以及美国西部干燥少雨, 山火频发, 损失惨重; 全球多地遭受严重暴雨洪涝灾害, 尤其是中国河南出现破纪录极端强降水事件, 欧洲遭遇百年一遇极端强降水, 造成了严重人员伤亡和财产损失; 美洲和亚洲多地发生严重旱灾, 美国、加拿大、巴西、阿根廷等地农业损失最大。北大西洋和北印度洋热带气旋异常活跃, 四级飓风艾达登陆美国路易斯安那州, 是有记录以来登陆该州的最强飓风, 狂风、暴雨和风暴潮给美国东南沿岸各州造成大面积破坏, 造成数百亿美元经济损失; 年初, 欧美和亚洲多地遭受寒流和暴风雪侵袭, 冬季风暴乌里袭击北美大部, 多地最低气温突破历史极值, 暴风雪天气造成交通瘫痪, 数百万家庭停电, 数百人丧生; 强对流天气在世界各地频发发生, 仅 12 月就有 69 次龙卷风侵袭美国多州, 造成近百人死亡, 是美国历史上最为严重的龙卷风灾害之一。

进一步分析表明, 7 月 12—15 日, 500 hPa 中欧地区为强的切断低压系统, 其被困于东西两侧高压区之间, 稳定的“高-低-高”的阻塞大气环流模态使得大西洋水汽穿过法国进入比利时、荷兰和德国, 低压系统又通过气旋式环流从地中海获取充沛的水汽和热量, 从而造成了欧洲中西部的极端强降水并引发洪水。2 月中旬, 对流层极地涡旋从北极向南偏

移, 并在北美形成持续稳定的强低压槽, 使得冷空气源源不断地沿着北美低压槽从北极地区向南输送至美国南部以及墨西哥北部。在低压槽, 高空急流和有利的低层水汽输送的共同作用下, 北美大部发生了强暴风雪天气。另外, 2020 年 12 月底至 2021 年 1 月北极地区发生平流层爆发性增温事件, 其影响下传至对流层, 导致对流层极地涡旋的反复破坏以及强的 AO 负位相, 为此次北美冬季风暴和极端低温灾害的发生提供了背景条件。

参考文献

- 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等, 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社. Qin D H, Zhang J Y, Shan C C, et al, 2015. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 孙劭, 李多, 王遵娅, 等, 2019. 2018 年全球重大天气气候事件及其成因 [J]. 气象, 45 (4): 533-542. Sun S, Li D, Wang Z Y, et al, 2019. Global major weather and climate events in 2018 and the possible causes [J]. Meteor Mon, 45 (4): 533-542 (in Chinese).
- 尹宜舟, 李多, 孙劭, 等, 2020. 2019 年全球重大天气气候事件及其成因 [J]. 气象, 46 (4): 538-546. Yin Y Z, Li D, Sun S, et al, 2020. Global major weather and climate events in 2019 and the possible causes [J]. Meteor Mon, 46 (4): 538-546 (in Chinese).
- 翟建青, 代潭龙, 王国复, 2021. 2020 年全球气候特征及重大天气气候事件 [J]. 气象, 47 (4): 471-477. Zhai J Q, Dai T L, Wang G F, 2021. Global climate features and significant weather and climate events in 2020 [J]. Meteor Mon, 47 (4): 471-477 (in Chinese).
- 中国气象局, 2022. 中国气候公报 (2021) [R/OL]. [2022-03-01]. <http://www.weather.com.cn/climate/2022/03/3524628.shtml#p=7>. China Meteorological Administration, 2022. China climate bulletin (2021) [R/OL]. [2022-03-01]. <http://www.weather.com.cn/climate/2022/03/3524628.shtml#p=7> (in Chinese).
- C3S, 2022. Copernicus: globally, the seven hottest years on record were the last seven; carbon dioxide and methane concentrations continue to rise [EB/OL]. (2022-01-10) [2022-02-15]. <https://climate.copernicus.eu/copernicus-globally-seven-hottest-years-record-were-last-seven>.
- Cheng L J, Abraham J, Trenberth K E, et al, 2022. Another record: ocean warming continues through 2021 despite La Niña conditions [J]. Adv Atmos Sci, 39 (3): 373-385.
- Eckstein D, Künzel V, Schäfer L, 2021. Global climate risk index 2021 [EB/OL]. (2021-01-25) [2022-02-15]. <https://www.germanwatch.org/en/cr/>.
- EM-DAT, 2021. EM-DAT: the international disaster database [DB/

- OL]. <https://www.emdat.be/>.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers[M]//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li J P, Xie T J, Tang X X, et al, 2022. Influence of the NAO on wintertime surface air temperature over East Asia: multidecadal variability and decadal prediction[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 625-642.
- Mu M, Luo D H, Zheng F, 2022. Preface to the special issue on extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 543-545.
- Munich R E, 2022. Munich reinsurance group[EB/OL]. (2022-01-10) [2022-02-15]. <https://www.munichre.com/en/company/media-relations/media-information-and-corporate-news/media-information/2022/natural-disaster-losses-2021.html>.
- NOAA, 2022. Global climate report-annual 2021[EB/OL]. [2022-02-15]. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202113>.
- WMO, 2021. State of the global climate 2021: WMO provisional report[EB/OL]. [2022-02-15]. https://library.wmo.int/docnum.php?explnum_id=10859.
- WMO, 2022. 2021 one of the seven warmest years on record, WMO consolidated data shows[EB/OL]. (2022-01-19) [2022-02-15]. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2021-one-of-seven-warmest-years-record-wmo-consolidated-data-shows>.
- Zhang X D, Fu Y F, Han Z, et al, 2022a. Extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21: comparisons, causes, and future implications[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 553-565.
- Zhang Y X, Si D, Ding Y H, et al, 2022b. Influence of major stratospheric sudden warming on the unprecedented cold wave in East Asia in January 2021[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 576-590.
- Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, et al, 2022. The 2020/21 extremely cold winter in China influenced by the synergistic effect of La Niña and warm Arctic[J]. *Adv Atmos Sci*, 39(4): 546-552.

(本文责编:何晓欢)