doi:10.11676/qxxb2017.029 气象学报

全球升温1.5℃与2.0℃情景下中国极端低温事件变化与耕地暴露度研究*

王安乾[1,4] 苏布达[1,2,3] 王艳君[2] 黄金龙[1,4] 温姗姗[1,4] 姜 彤[2,3]
WANG Anqian[1,4] SU Buda[1,2,3] WANG Yanjun[2] HUANG Jinlong[1,4] WEN Shanshan[1,4] JIANG Tong[2,3]

1. 中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,乌鲁木齐,830011
2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同中心/地理与遥感学院,南京,210044
3. 中国气象局国家气候中心,北京,100081
4. 中国科学院大学,北京,100049
1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*
2. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
3. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081, *China*
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2016-12-26 收稿,2017-03-01 改回.

王安乾,苏布达,王艳君,黄金龙,温姗姗,姜彤. 2017. 全球升温1.5℃与2.0℃情景下中国极端低温事件变化与耕地暴露度研究. 气象学报, 75(3):415-428

Wang Anqian, Su Buda, Wang Yanjun, Huang Jinlong, Wen Shanshan, Jiang Tong. 2017. Variation of the extreme low-temperature events and farmland exposure under global warming of 1.5℃ and 2.0℃. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(3):415-428

Abstract Based on daily minimum temperatures simulated by the COSMO-CLM (CCLM) for 1960 – 2100 and the landuse data in 2000 in China, the Intensity-Area-Duration (IAD) method was applied to characterize the extreme low-temperature events, the relationship between the intensity and spatial coverage of extreme low-temperature events, the spatial distribution of the most severe low-temperature events, and the exposure of farmlands to extreme low-temperature events under the global warming of 1.5℃ (RCP 2.6 scenario) and 2.0℃ (RCP 4.5 scenario). The results are as follows. (1) During the period of 1.5℃ warming, the frequency of extreme low-temperature events that can last for one to nine days will decrease by 30% – 54%, the intensity will change by –1% – 8.8%, and the area influenced by the extreme low-temperature events will decrease by 7% – 21% compared to that during the reference period (1986 – 2005). For the 2.0℃ warming period, the frequency of the extreme low-temperature events will decrease by 48% – 80%, the intensity will increase by 6% – 11.5%, and the area affected by extreme low-temperature events will change by –14% – 19%. (2) There are possibilities that both the intensity of and the area affected by the extreme low-temperature events in the future will exceed that of the most severe event in the reference period. Intensity of the most severe event in the context of 1.5℃ warming will be stronger than that in the context of 2.0℃ warming over the same area, but the center of the most severe event might move from Northwest and Southwest China to Central and South China. (3) Farmland exposure to the extreme low-temperature events will decrease in the warming periods than in the reference period, and the higher the temperature increase, the greater the decrease. However, farmland exposure to the most

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41671211、41401056)、国家自然科学基金会和巴基斯坦科学基金会合作研究项目(41661144027)、新疆维吾尔自治区高层次引进人才项目(Y642091、Y644131)。

作者简介:王安乾,从事极端气候事件变化和风险管理研究。E-mail:wangaq1990@163.com
通讯作者:姜彤,从事气象灾害风险管理研究。E-mail: jiangtong@cma.gov.cn

severe events will increase to a certain extent in East, North and Central China in the context of 1.5℃ warming, and such increases are even more obvious in East and North China in the context of 2.0℃ warming. Aforementioned findings indicate that frequency and coverage of the extreme low-temperature events will decrease, but their intensity might increase with the rising of temperature. With the increasing occurrence probability of the most severe event with higher intensity over larger area than that in the past, improvement of early warning is still imperative for mitigation of the societal and economic impact of extreme events.

Key words Global warming of 1.5℃ and 2.0℃, Extreme low-temperature events, Exposure of farmland, Intensity-area-duration, CCLM

摘 要 基于区域气候模式 COSMO-CLM (CCLM)模拟的 1960—2100 年逐日最低气温数据及 2000 年中国土地利用数据,采用强度-面积-持续时间(Intensity-Area-Duration, IAD)方法,以全球升温 1.5℃(RCP 2.6 情景)和 2.0℃(RCP 4.5 情景)为目标,研究不同持续时间中国极端低温事件变化特征、最强极端低温事件强度与面积关系和最强中心空间分布,分析极端低温事件下耕地面积暴露度的变化规律。研究发现:(1)全球升温 1.5℃情景下,持续 1 至 9 d 的极端低温事件频次相对于基准期(1986—2005 年)下降 30%—54%,强度变化 -1%—8.8%,影响面积下降 7%—21%;升温 2.0℃,频次下降 48%—80%,强度上升 6%—11.5%,影响面积则在 -14%—19%变化。(2)全球不同升温情景有可能发生强度和面积超过基准期最强事件的极端低温。全球升温 1.5—2.0℃时,同等面积上的最强极端低温事件强度明显下降,但最强极端低温事件中心由西北和西南转移到华中和华南等地。(3)不同升温情景下,暴露于极端低温事件的中国耕地面积明显少于基准期,且升温幅度越高下降程度越大。最强极端低温事件的耕地暴露度则随温度的升高而增大。升温 1.5℃时,华东、华北与华中等地暴露在最强极端低温事件的耕地面积相对于基准期有所增大,升温 2.0℃时,华东与华北等地有大幅度上升。全球不同升温情景下,极端低温事件频次与影响面积持续下降,但强度上升;随着升温幅度的增大,这种差异变化特征越来越明显;特别应注意的是,随着温度上升,发生强度和面积超过当前记录到的最强极端低温事件的可能性增大;应加强极端事件的预警、预报和监测,减缓经济社会的损失。

关键词 全球升温 1.5℃和 2.0℃,极端低温事件,耕地暴露度,强度-面积-持续时间,CCLM 模式

中图法分类号 P426.6

1 引 言

近百年来全球气温呈不断上升的趋势,1986—2005 年平均气温相对于工业革命之前(1850—1900 年)已经上升了 0.61℃(IPCC, 2013)。极端天气气候事件在频率、强度、空间范围、持续时间和发生时间呈现新特征(Field, et al, 2012)。为减少气候变化带来的不利影响,2015 年 12 月 12 日,《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约方一致同意通过《巴黎协定》,明确规定"把全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于 2.0℃之内,并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5℃之内"。《巴黎协定》的签署为 2020 年后全球合作应对气候变化指明了方向,具有历史性意义。在全球变暖背景下,地表平均气温、最低气温与最高气温呈明显上升趋势,而极端低温的变化幅度则更为剧烈,对全球气候变化的敏感性高于极端高温(Su, et al, 2006; Yang, et al, 2008;Pal, et al, 2010)。极端低温事件频次总体呈减少趋势,但破坏力强的极端低温事件时有发生。自 2008 年中国南方发生罕见低温雨雪冰冻灾害以来,发生了多次持续时间长、综合影响范围广的极端低温事件,已引起广泛关注(陶诗言等,2008;丁一汇等,2008;Zhou, et al, 2009)。

全球尺度低温频次与霜冻期持续时间在过去几十年出现了下降趋势,日夜气温的变化具有明显的不对称性(Karl, et al, 1991; Cooter, et al, 1995);全球不同地区最低气温在 20 世纪后半段以来有明显的升高趋势(Manton, et al,2001; Frich, et al, 2002; Peterson, et al, 2002),极端最低气温日数也呈不断减少的趋势(Plummer, et al, 1999; Rusticucci, 2012),全球 74%陆地冷夜呈明显减少趋势(Alexander, et al, 2006; Caesar, et al, 2006)。中国大部分地区极端最低气温上升趋势显著(翟盘茂等,1997;任福民等,1998),霜冻日数和结冰日数减少,北方地区减少更为显著(周雅清等,2010)。目前针对于极端低温事件的研究多集中在采用单一站点的极端指数分析事件的特征与成因(陈海山等,2012;黄小燕等,2016),这些研究忽视了极端低温事

件在空间上的连续性。极端气候事件的研究已由单一站点的极值分析向区域事件的空间和时间并重的方向发展,将极端气候事件的强度、面积以及持续时间 3 个要素联立,形成强度-面积-持续时间(Intensity-Area-Duration, IAD)分析方法,并已应用于干旱(Zhai, et al, 2017; 陈静等,2016)和极端降水(景丞等,2016a)的研究中。

全球变暖背景下,极端天气、气候事件变化及其造成的影响已成为研究热点。全球气候模式作为研究未来气候的基本工具,得到广泛的应用。世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)的耦合模式国际比较计划第 5 阶段(Coupled Model Intercomparisson Project Phase 5, CMIP5)提供近 30 个全球气候模式对当前模拟和未来预估的数据,并在世界各地得到广泛应用(Xu, et al, 2012; Su, et al, 2016a; 景丞等,2016b)。2010 年启动的跨行业影响模式国际比较计划(The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISI-MIP),目前已经进入第 3 阶段。该计划选用 CMIP5 中的 5 个全球气候模式(GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM-CHEM、NorESM1-M),在全球和流域尺度上开展水资源、农业、生态和基础设施等影响模型的比较和不确定性综合评估等研究(Warszawski, et al, 2013; Schleussner, et al, 2016;Su, et al, 2016b)。全球气候模式(GCMs)分辨率较低,预估结果存在较大不确定性,而区域气候受地形、下垫面植被等因素影响较大,特别对中小尺度极端天气、气候事件的研究,需要采用高分辨率模式模拟(高学杰,2007;李新周等,2012)。COSMO-CLM (CCLM)是由德国气象局的局地模型(Local Model, LM)发展而来的区域气候模式,对中国区域(塔里木河流域、长江流域、淮河流域、珠江流域等)气温与降水有可靠的模拟结果(陶辉等,2013;孟玉婧等,2013;Fischer, et al, 2013;高超等,2014;黄金龙等,2016;朱娴韵等,2015)。

目前对于区域性极端低温事件及其对社会经济影响的研究尚少,特别是如何定量评估未来极端低温事件对耕地的影响亟待解决。本研究采用高分辨率区域气候模式 CCLM 输出的 1960—2100 年逐日最低气温数据和 2000 年中国土地利用数据,首先评估气候模式对中国区域的模拟能力;其次利用极端低温事件具有的强度、影响面积和持续时间的三维特征,采用低温强度-影响面积-持续时间分析方法,研究全球气温比工业革命前升高 1.5℃和 2.0℃时,中国极端低温事件和耕地暴露度变化特征。研究成果将为气候变暖背景下,极端低温事件的早期预警和农业应对低温事件的不利影响提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 数据基础

采用中国气象局国家气象信息中心整编的 1960—2014 年中国 756 个基准站逐日最低气温资料,筛选出缺测率小于 0.25% 的 543 个台站(图 1a)。

气候模式数据采用德国波茨坦气候影响研究所(Potsdam Institute for Climate Impact Research)的区域气候模式 CCLM 最低气温数据。该模式是全球气候模式 MPI-ESM-LR 驱动的动力降尺度模式,由德国气象局局地模型(LM)发展而来,中国区域包含 4397 个格点。

文中采用 2006—2100 年 6 个全球气候模式平均气温数据集,用于确定全球气温比工业革命前升高 1.5℃和 2.0℃的时间。其中包括 ISI-MIP 中的 5 个全球气候模式逐日平均气温数据和驱动 CCLM 的 MPI-ESM-LR 模式逐月平均气温数据。

土地利用数据为中国科学院地理科学与资源研究所发布的 2000 年中国 1∶10 万土地利用数据。该数据以 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,包括耕地、林地、草地、水域、居住地和未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二级类型(图 1b)。

2.2 研究方法

2.2.1 极端低温阈值

将 1960—2005 年 CCLM 输出的逐日最低气温,按照同期升序排列,取其第 10 百分位数作为该格点该日的极端低温阈值。为增加样本稳定性,以某日为中心,选其前后各 2 d 数据共计 5 d 的最低气温数据作为该日的样本计算极端低温阈值。文中主要分析持续 1、3、6 与 9 d 的极端低温事件。

2.2.2 极端低温事件识别

当某格点某日最低气温低于对应的阈值,则认为该点于该日发生极端低温;而空间上连续发生极端低温的格点组成的区域则为 1 次极端低温事件。极端低温事件面积即为此次极端低温事件所覆盖的

最大面积。持续时间为此区域内连续低于极端低温阈值的时段。强度为该区域内所有格点在该日极端低温阈值与最低气温差值的平均值,持续数日的强度则为逐日强度的平均值。

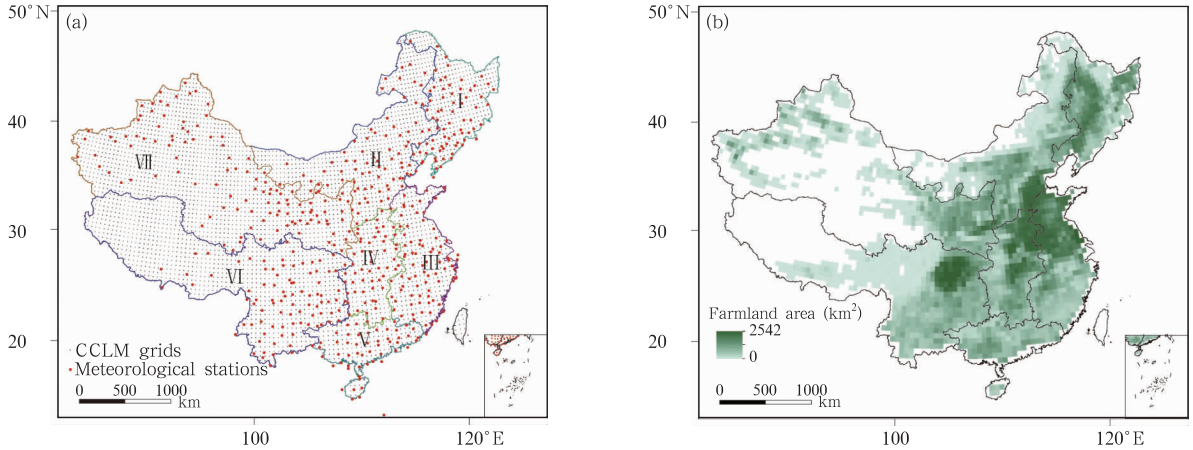

图 1 气象站、模式格点空间分布(a)及 2000 年中国耕地空间分布(b)

(Ⅰ为东北,Ⅱ为华北,Ⅲ为华东,Ⅳ为华中,Ⅴ为华南,Ⅵ为西南,Ⅶ为西北)

Fig. 1 Location of meteorological stations and the CCLM grids (a) and spatial distribution of farmland in 2000 over China (b)

(Ⅰ. Northeast China, Ⅱ. North China, Ⅲ. East China, Ⅳ. Central China, Ⅴ. South China, Ⅵ. Southwest China, Ⅶ. Northwest China)

2.2.3 强度-面积-持续时间方法

强度-面积-持续时间(IAD)方法从区域的角度分析特定持续时间下,极端低温事件强度及其影响面积的联系。IAD 法是一种聚类方法,在特定的持续时间下,将发生极端低温的相邻格点聚类,形成 1 次极端低温事件。IAD 方法原理如图 2 所示,首先找到当前范围内强度最大的格点,将其作为第 1 个“低温中心”,并记录该格点的面积及强度;接着在此“低温中心”周围 3×3 格网增加强度次高的网格,取两个格点平均强度形成“第 2 低温中心”,面积与强度为此 2 个连续格点对应的面积及强度的平均值;持续此过程直至低温事件所有网格均被覆盖。对此

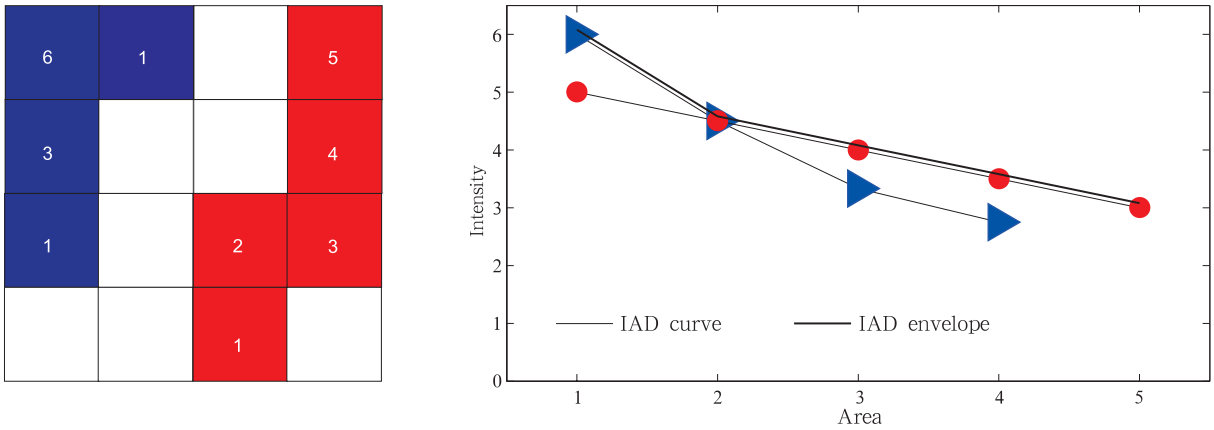

图 2 强度-面积-持续时间(IAD)曲线绘制

(左图中数字表示低温强度)

Fig. 2 Construction of the IAD curve

(numbers in the left panel denote the intensity of low temperature)

持续时间下所有“低温事件”重复上述步骤,绘制所有事件 IAD 曲线,并选取 IAD 曲线最外侧的包络线,包络线上的事件为该时段内最强极端低温事件,表示不同连续面积上极端低温事件所能达到的最大强度。

3 研究结果

3.1 CCLM 模拟能力评估

将 1960—2005 年 CCLM 输出逐日最低气温数据插值到中国 543 个气象站,从空间和时间两个角度开展 CCLM 模拟能力评估。

图 3a、b 给出 1960—2005 年观测与 CCLM 模拟的日最低气温多年平均值空间分布,二者空间相关系数为 0.93,具有较高的一致性。在海南及两广南部局部地区最低气温平均值在 20℃以上,黄淮以南大部分地区为 10—20℃,华北、东北南部、内蒙古西部以及新疆大部分地区等为 0—10℃,在东北中北部以及内蒙古东部、青藏高原大部分地区则在 0℃以下。CCLM 模拟最低气温数据与观测最低气温数据具有高度相似的空间分布,能较为准确地反映中国区域内的最低气温空间分布格局。

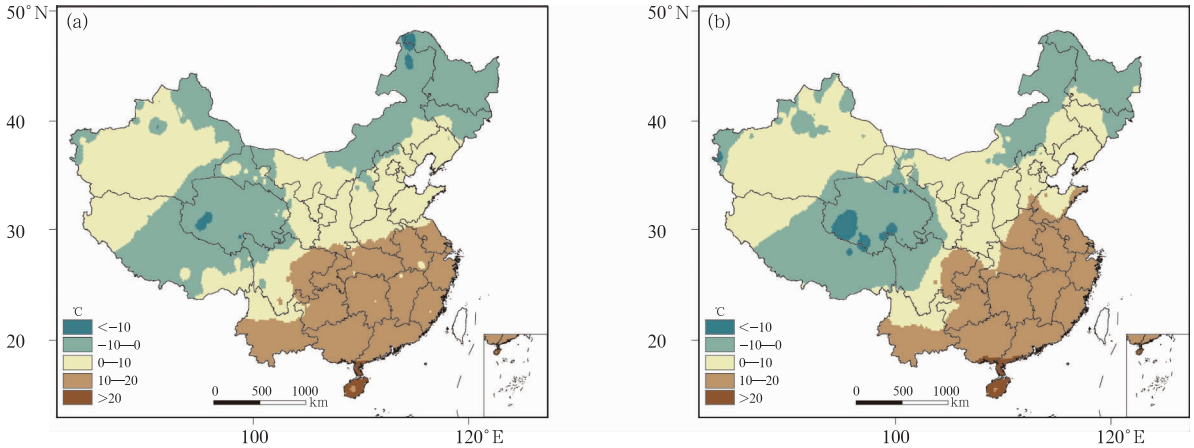

图 3 1960—2005 年观测最低气温(a)与 CCLM 最低气温(b)空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of observed (a) and simulated (b) daily minimum air temperature in China for 1960 – 2005

图 4 为 1960—2005 年 CCLM 模拟最低气温与中国 543 个气象站最低气温的区域平均值对比。模拟与观测的年最低气温均呈显著升高趋势(通过 0.05 的显著性检验),但 CCLM 模拟最低气温趋势(0.16℃/(10 a))弱于观测趋势(0.39℃/(10 a))。两个序列相关系数为 0.60,通过 0.01 的显著性检验。CCLM 对中国最低气温有较强的模拟能力,能够提供研究中国区域极端低温事件的基础数据。

3.2 全球升温 1.5℃和 2.0℃极端低温事件特征

3.2.1 全球升温 1.5℃和 2.0℃出现的时间确定

1986—2005 年全球气温比工业革命之前(1850—1900 年)上升 0.61℃(IPCC, 2013),若在 1986—2005 年平均气温基础上继续上升 0.89℃和 1.39℃,全球升温幅度将达到 1.5℃和 2.0℃。为确定全球气温相对工业革命前上升1.5℃与2.0℃的

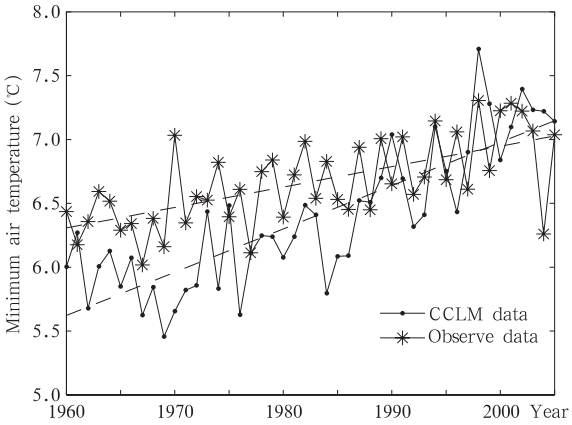

图 4 1960—2005 年中国观测与 CCLM 模拟最低气温比较

Fig. 4 Comparison of time series of CCLM simulated and observed daily minimum air temperature in China for 1960 – 2005

时间,选用 ISI-MIP 中的 5 个全球气候模式,以及驱动区域气候模式 CCLM 的 MPI-ESM-LR 模式,绘制出全球模式 2006—2100 年全球气温变化。鉴于各个模式预估的全球气温变化不尽相同,研究中应采用多个气候模式集合结果确定全球升温变化过程(图 5)。RCP 2.6 情景全球平均气温将会在 2029 年前后达到全球升温 1.5℃水平。而 RCP 4.5 情景,全球升温将在 2049 年前后达到 2.0℃,之后将持续升高,约在 2100 年达到近 2.5℃。驱动区域气候模式 CCLM 的 MPI-ESM-LR 模式与 6 个全球气候模式的集合确定全球升温阈值出现的时间一致。

分别采用以出现升温 1.5℃的 2029 年和升温 2.0℃的 2049 年为中心,向前后各推 10 年,即以 2020—2039 年和 2040—2059 年作为计算全球升温 1.5℃和 2.0℃的极端低温事件的时间段。

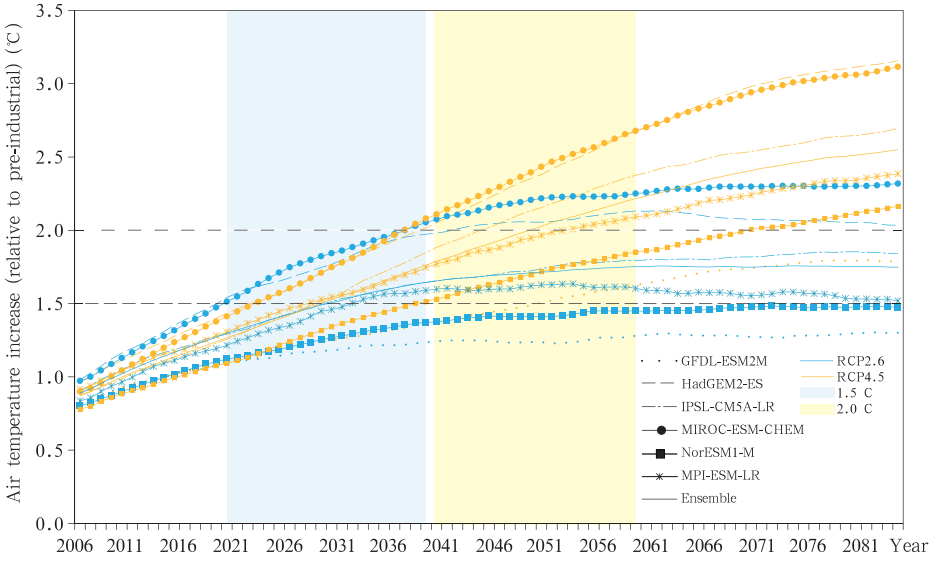

图 5 2006—2100 年全球平均气温相对于工业革命前升温幅度

Fig. 5 Changes in global mean air temperature during 2006－2100 compared to that in the pre-industrial time

3.2.2 极端低温事件频次

全球升温 1.5℃与 2.0℃时,各持续时间极端低温事件频次如图 6 所示。1986—2005 年持续 1 d 极端低温事件总频次约 3400 次,全球升温 1.5℃时极端低温事件频次预计下降约 30%,继续再升温 0.5℃时频次进一步减少约 17%。持续 3 d 极端低温事件在 1986—2005 年总频次约为 1500 次,全球升温 1.5℃和 2.0℃时,相对于基准期分别减少约 40%和 62%。持续 6 d 极端低温事件频次在当前气候约为 400 次,全球升温 1.5℃和 2.0℃时,分别减少约 48%和 73%。1986—2005 年持续 9 d 极端低温事件的频次约 125 次,当全球升温 1.5℃,相对于基准期减少约 54%,全球升温 2.0℃时,极端低温事件频次约仅为基准期的 20%。

3.2.3 极端低温事件强度

图 7 为全球升温 1.5℃与 2.0℃时各持续时间极端低温事件平均强度。持续 1 d 极端低温事件在 1986—2005 年比其阈值强 0.6℃,升温 1.5℃时,强度上升约 8.8%,升温 2.0℃时继续上升约 2%。当前气候下,持续 3 d 极端低温事件比其阈值强 1.3℃,升温 1.5℃和 2.0℃时,事件强度分别上升约 7%和 11%。持续 6 d 极端低温事件基准期强度比其阈值强 1.8℃,升温 1.5℃和 2.0℃时,分别上升约 6%和 10%。1986—2005 年持续 9 d 极端低温事件强度比其阈值强 2.23℃,升温 1.5℃时,极端低温事件平均强度下降约 1%,升温 2.0℃上升约 6%。

3.2.4 极端低温事件影响面积

全球升温 1.5℃与 2.0℃时,中国极端低温事件影响面积如图 8 所示。持续 1 d 极端低温事件在基准期平均影响面积约9×10^4 km^2/a,升温1.5℃时,

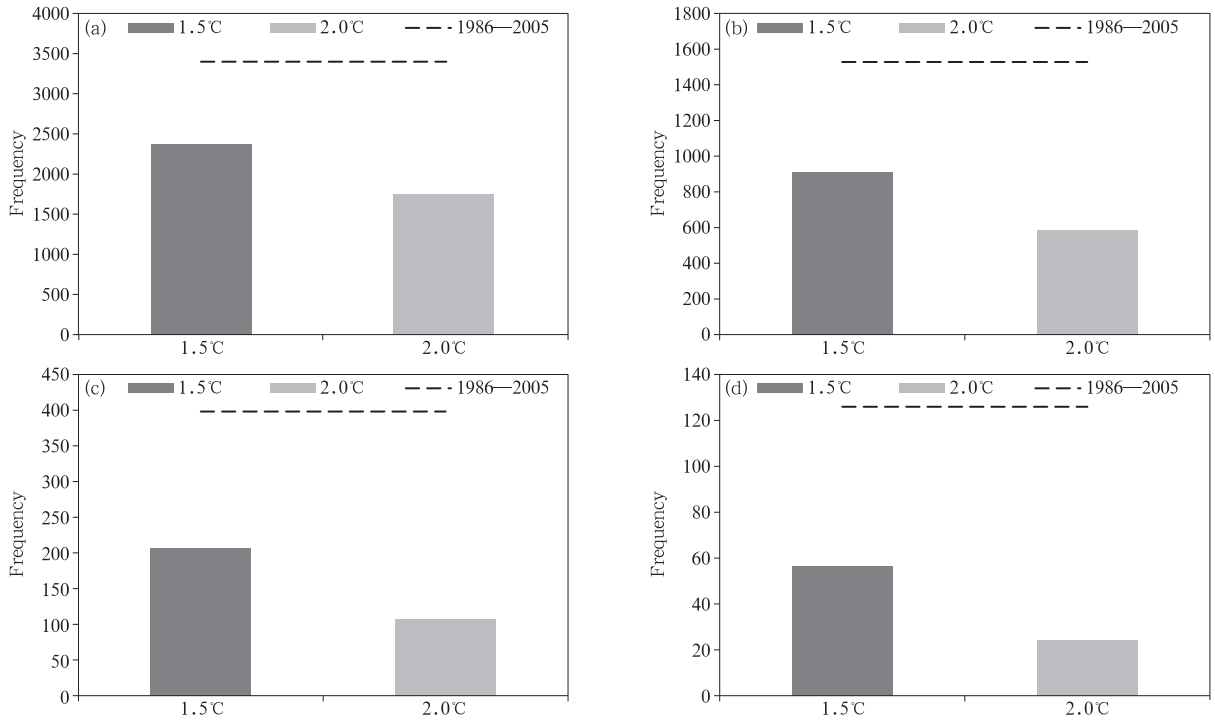

图 6 全球升温 1.5℃和 2.0℃情景中国极端低温事件频次

(a. 持续 1 d, b. 持续 3 d, c. 持续 6 d, d. 持续 9 d)

Fig. 6 Frequency of extreme low-temperature events in China under global warming of 1.5℃ and 2.0℃

(a. 1 d event, b. 3 d event, c. 6 d event, d. 9 d event)

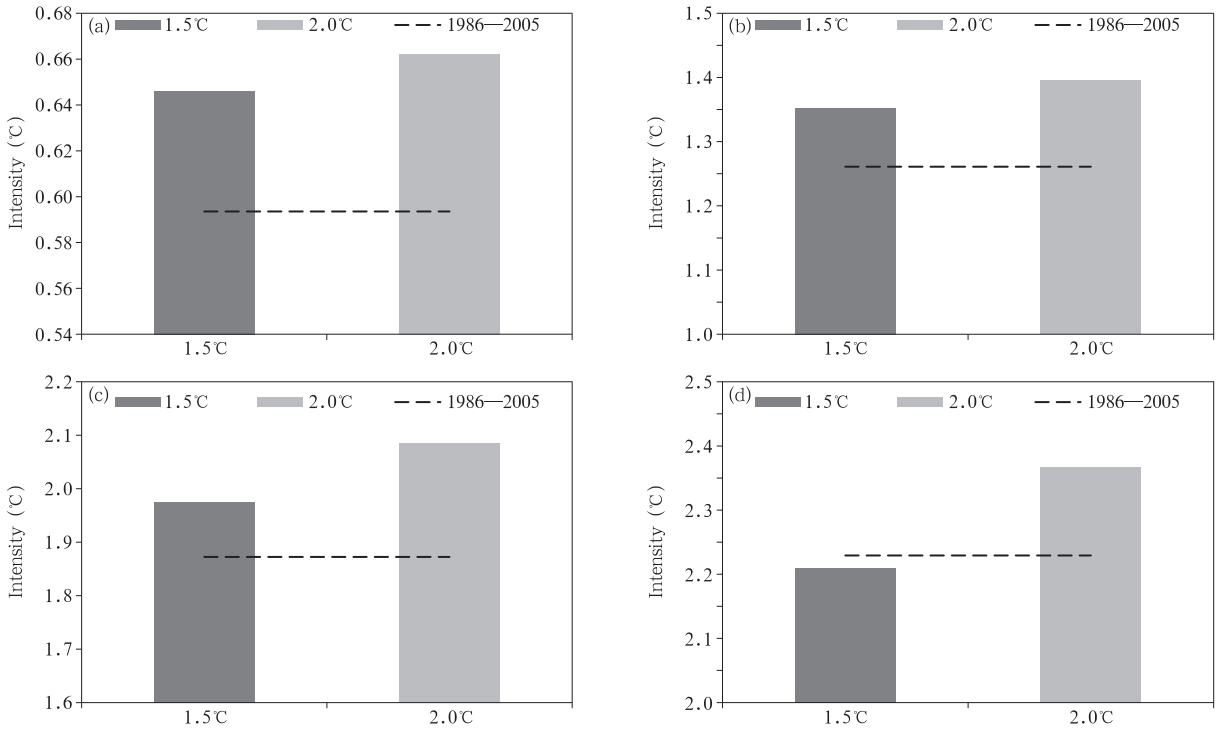

图 7 全球升温 1.5℃和 2.0℃情景中国极端低温事件强度

(a. 持续 1 d, b. 持续 3 d, c. 持续 6 d, d. 持续 9 d)

Fig. 7 Intensity of extreme low-temperature events in China under global warming of 1.5℃ and 2.0℃

(a. 1 d event, b. 3 d event, c. 6 d event, d. 9 d event)

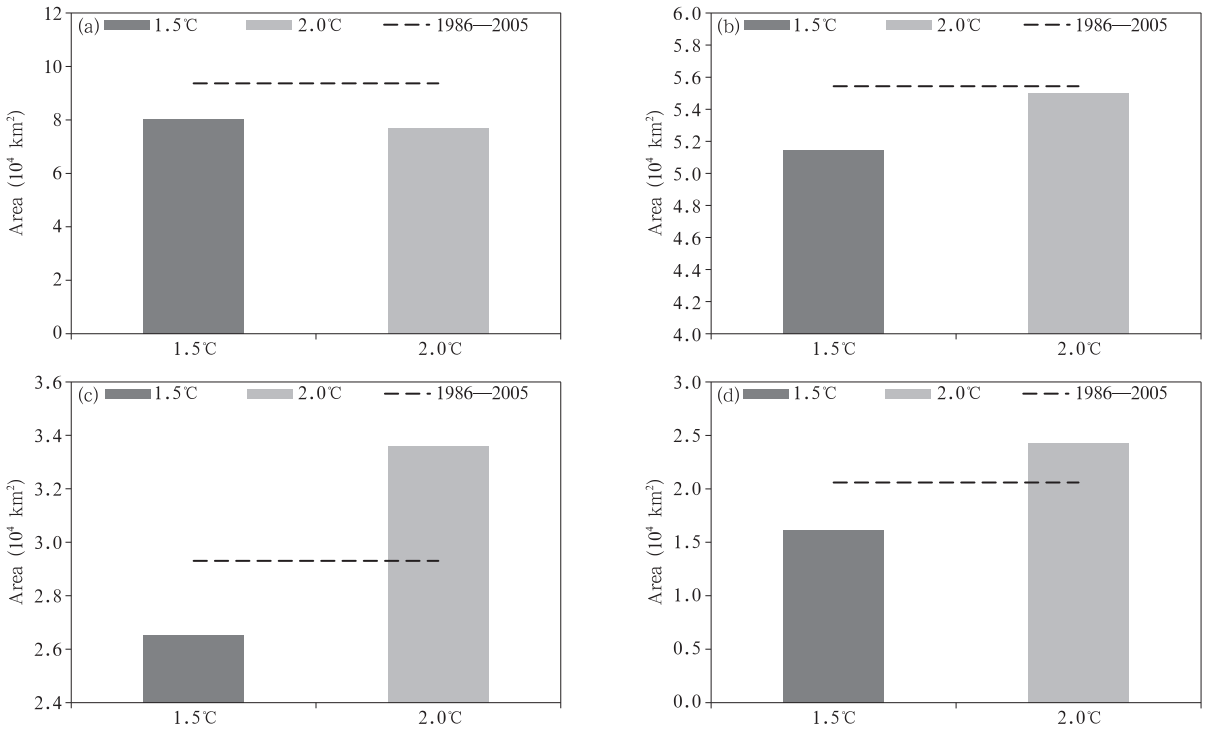

图 8 全球升温 1.5℃和 2.0℃情景中国极端低温事件影响的面积

(a. 持续 1 d, b. 持续 3 d, c. 持续 6 d, d. 持续 9 d)

Fig. 8 Coverage of extreme low-temperature events in China under global warming of 1.5℃ and 2.0℃

(a. 1 d event, b. 3 d event, c. 6 d event, d. 9 d event)

影响面积下降约 14%,升温 2.0℃时,影响面积与升温 1.5℃时无明显变化。持续 3 d 的极端低温事件,基准期影响面积约 5.5×10^4 km^2/a,升温 1.5℃时,影响面积下降约 7%,升温 2.0℃时,则相比升温 1.5℃ 的状况上升 6%。基准期持续 6 d 极端低温事件影响面积约 3×10^4 km^2/a,升温 1.5℃时,影响面积下降约 10%,升温 2.0℃时比升温 1.5℃的状况上升约 24%。持续 9 d 极端低温事件在当前气候的影响面积约 2×10^4 km^2/a,升温 1.5℃时,影响面积下降约 21%,升温 2.0℃时,影响面积则比升温 1.5℃时上升约 40%。

3.3 最强极端低温事件变化

全球升温 1.5℃与 2.0℃情景下,不同持续时间的极端低温事件影响面积及其强度与基准期相同持续时间 IAD 包络线的对比,反映未来极端低温事件是否会超过 1986—2005 年最强极端低温事件(图 9)。

全球升温 1.5℃时,持续 1 d 极端低温事件约有 3 次超过 IAD 包络线,发生范围大于 640×10^4 km^2,强于阈值 4℃以上;升温 2.0℃时未预估出超过基准期最强的极端低温事件。持续 3 d 的极端低温事件,升温 1.5℃时约有 3 次超过历史相同面积上的最强极端低温事件,升温 2.0℃时约有 2 次事件超过最强极端低温事件。持续 6 d 的极端低温事件,升温 1.5℃时有 2 次事件超过相同面积下最强极端低温事件,升温 2.0℃时则有 2 次事件超过最强极端低温事件的影响范围。未预估出超过历史持续 9 d 的极端低温事件。

升温 1.5℃与 2.0℃背景下,不同持续时间和影响面积的最强极端低温事件如图 10a_1、b_1 所示。升温 2.0℃时,持续 1、3 与 6 d 最强极端低温事件的面积均小于升温 1.5℃状况,但持续 9 d 极端低温事件影响的最大面积则偏高。升温 1.5℃时各持续时间的极端低温事件在相同面积上的强度均高于升温 2.0℃状况。图 10a_2、b_2 为 1986—2005 年以及升温 1.5℃与 2.0℃时最强极端低温事件中心的空间分布。1986—2005 年,最强极端低温事件中心主要分布在中国的西北、西南以及中部部分地区。升温 1.5℃时,最强极端低温事件中心相对于基准期向中国西北与西南地区集中;升温2.0℃时,极端低温事

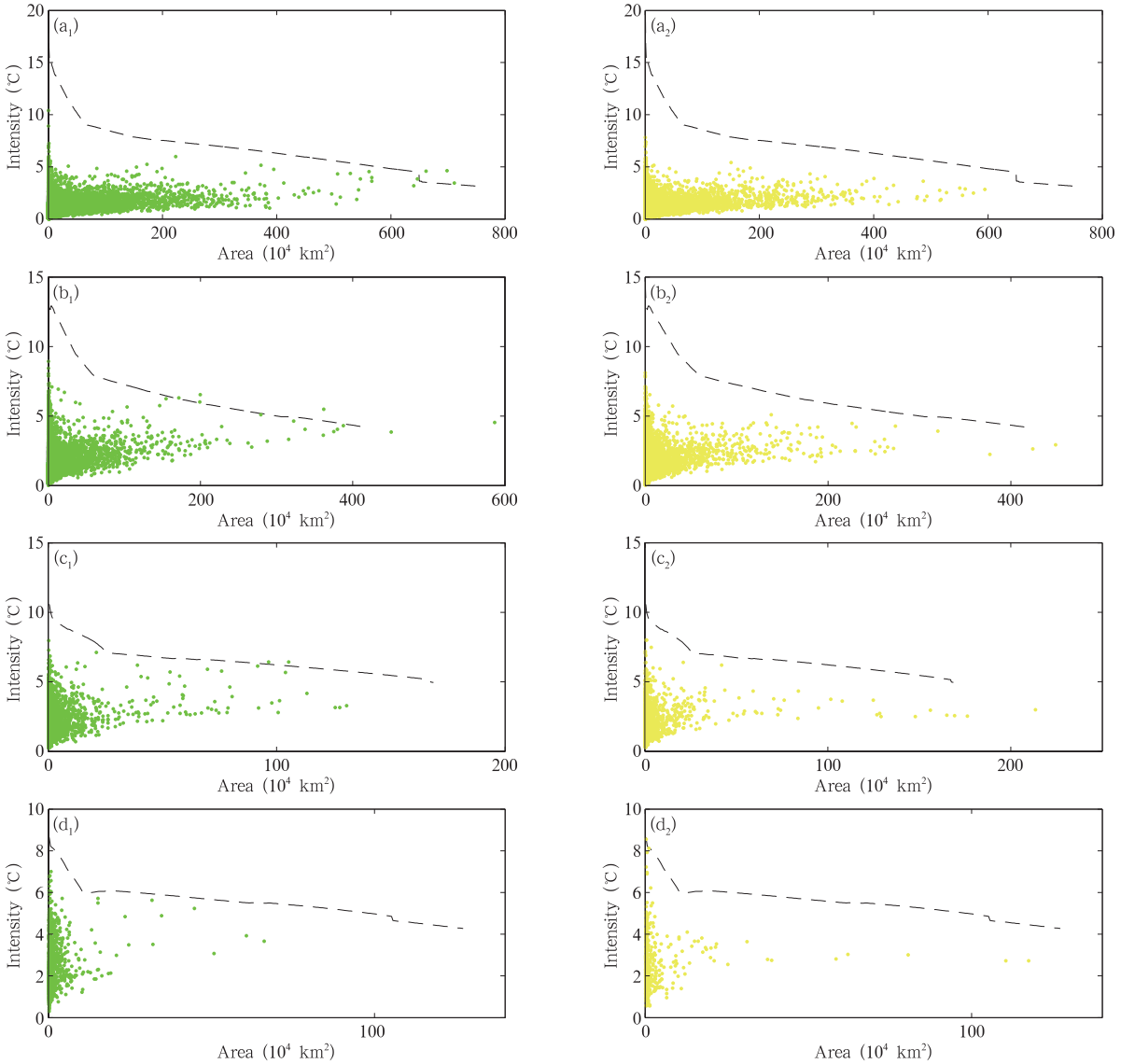

图 9 全球升温 1.5℃(a_1—d_1)和 2.0℃(a_2—d_2)时中国极端低温事件强度(散点)与基准期最强极端低温事件(虚线)

(a_1、a_2. 持续 1 d 极端低温事件,b_1、b_2. 持续 3 d 极端低温事件,c_1、c_2. 持续 6 d 极端低温事件,d_1、d_2. 持续 9 d 极端低温事件)

Fig. 9 Comparison of intensity of extreme low-temperature events under global warming of 1.5℃ (a_1 – d_1) and 2.0℃ (a_2 – d_2) scenarios (scatter points) and in the baseline period IAD (dash line)

(a_1, a_2. extreme low-temperature events with 1 d duration; b_1, b_2. extreme low-temperature events with 3 d duration; c_1, c_2. extreme low-temperature events with 6 d duration; d_1, d_2. extreme low-temperature events with 9 d duration)

件最强中心的空间分布有明显变化,除了西南地区,主要集中在华中和华南。

3.4 暴露于极端低温事件的耕地变化

以 2000 年中国土地利用情况为基础,研究不同升温背景下中国各区域暴露在极端低温事件下的耕地面积。暴露于极端低温事件下的中国东北、华北、华东、华南、华中、西北以及西南等 7 个区域的耕地面积如图 11 所示。可见,华东地区耕地暴露度最大,华北、西南与东北次之,华中与西北暴露度相差不大,华南地区最小。1986—2005年,暴露于低温

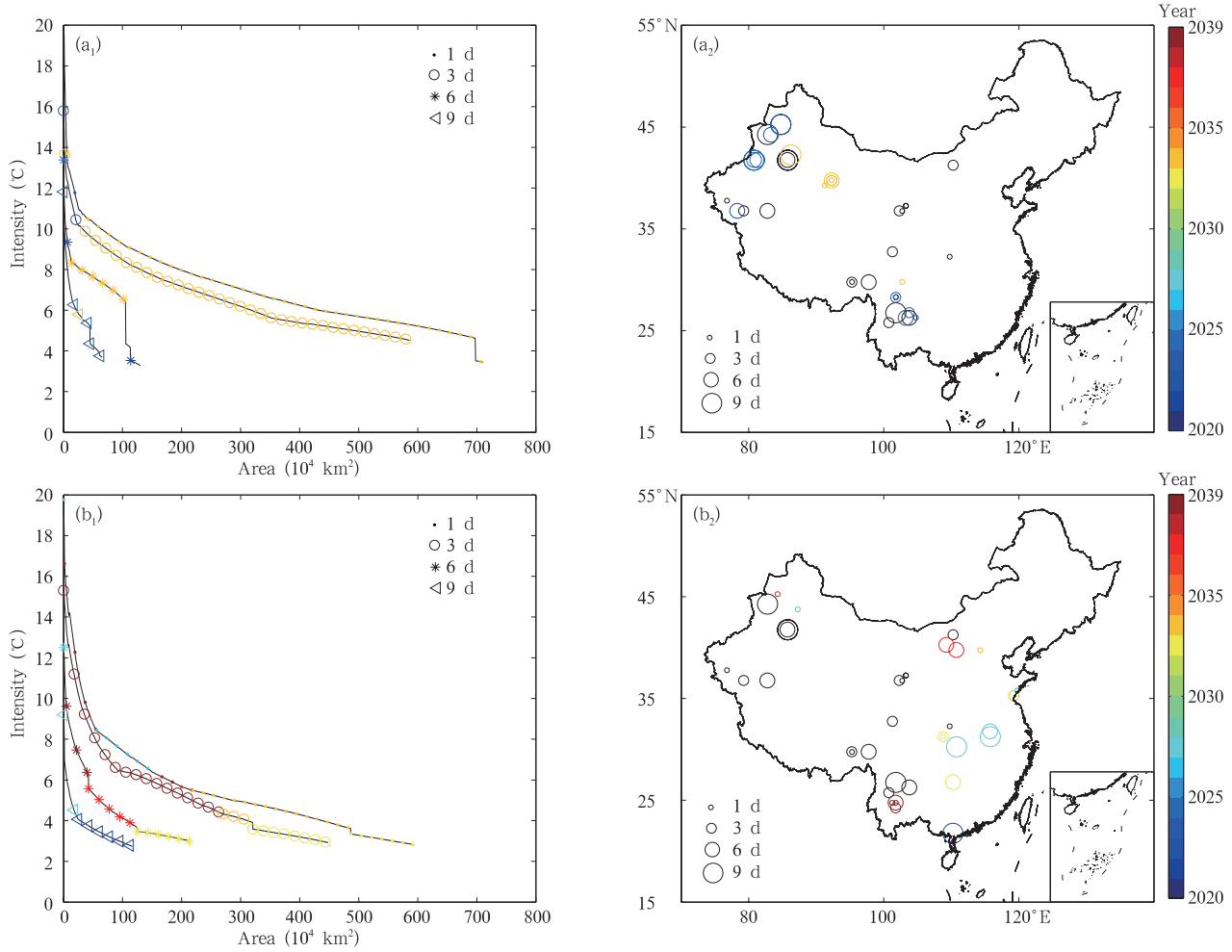

图 10 全球升温 1.5℃(a_1、a_2)与 2.0℃(b_1、b_2)时中国极端低温事件 IAD 包络线(a_1、b_1)与最强极端低温事件中心(a_2、b_2,图中黑色圆圈表示基准期最强中心,彩色圆圈表示升温期最强中心)

Fig. 10 IAD envelope and the center of the extreme low-temperature events with different durations in China under the 1.5℃ (a_1, a_2) and 2.0℃ (b_1, b_2) warming scenarios

(a_1 – a_2, envelope of the extreme low-temperature events and location of the event center in the 1.5℃; b_1 – b_2, envelope of the extreme low-temperature events and location of the event center in the 2.0℃. Black circles indicate the event centers in the reference period, colored circles denote centers in the warming world)

下的中国耕地面积约 16.2×10^4 km²,其中华东与华南均约 2.8×10^4 km²,西南与东北则均约2.6×10^4 km²,华中与西北约 2.2×10^4 km²,华南则仅约 7000 km²。全球升温 1.5℃时,暴露于低温下的中国耕地面积约 10.3×10^4 km²,各区域相对于基准期均有不同程度的下降。东北地区下降程度最大,下降约 45%,西南地区下降约 28.3%,其他地区下降幅度均在 30%以上。当气温进一步上升 0.5℃时,暴露于低温下的中国耕地面积约 8.1×10^4 km²,各区域暴露面积均小于升温 1.5℃时,其中,西南、西北、华东与东北下降幅度均在 50%以上,华北、华中与华南的降幅也接近 50%。总的来说,升温 1.5℃与升温 2.0℃时暴露于极端低温事件下的耕地面积均小于基准期,且升温幅度越高,暴露的耕地面积越小。

全球升温 1.5℃与 2.0℃时暴露于最强极端低温事件的耕地相对于基准期变化如图 12 所示。1986—2005 年中国暴露于最强极端低温事件的耕地面积约 73.2×10^4 km²,其中西南地区暴露耕地最大,约 17.0×10^4 km²,西北约 13.2×10^4 km²,华

东与华北均约 11.5×10⁴ km²,华中约有 9.7×10⁴ km²,东北约有 7.3×10⁴ km²,华南最少,约有 2.9×10⁴ km²。升温 1.5℃时,暴露于最强极端低温事件的耕地面积则要高于基准期,约 79.2×10⁴ km²。与基准期相比,暴露于最强极端低温事件的耕地在西北与东北地区呈下降的趋势,而在西南、华北、华中、华东与华南等地则呈上升趋势,且在西南地区的上升幅度较大。当升温幅度达到 2.0℃时,暴露于最强极端低温事件的面积约 81×10⁴ km²,其中华东地区暴露耕地约 17.3×10⁴ km²,比 1986—2005 上升 50%,华南约 4.3×10⁴ km²,上升 18.1%,华中约 12.5×10⁴ km²,上升约 41.3%,华北地区约 12.5×10⁴ km²,上升 8%,东北地区下降约 18.3%,西南地区下降约 8%,西北则下降5.7%。

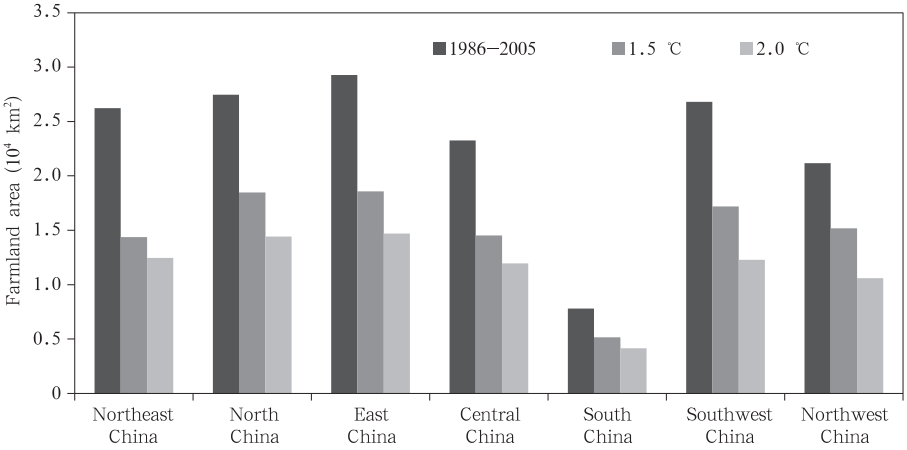

图 11 全球升温 1.5℃与 2.0℃时中国不同区域暴露于极端低温事件的耕地相对于基准期(1986—2005 年)的变化

Fig. 11 Farmland exposure to the extreme low-temperature events over different regions of China in the 1.5℃ and 2.0℃ global warming periods relative to the reference period (1986 - 2005)

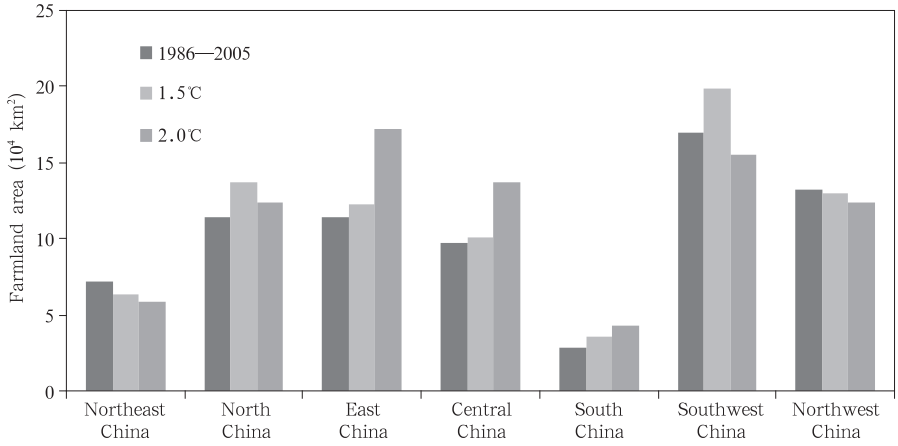

图 12 全球升温 1.5℃与 2.0℃时中国不同区域暴露在最强极端低温事件的耕地面积相对于基准期(1986—2005 年)的变化

Fig. 12 Farmland exposure to the most severe extreme low-temperature events over different regions of China in the 1.5℃ and 2.0℃ global warming periods relative to the reference period (1986 - 2005)

4 结论与讨论

当前全球气温呈上升的趋势,极端气候事件的频率、强度、空间范围以及持续时间等因素呈新的变化,为减少气候变化带来的不利影响,《巴黎协定》明确规定"把全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于2.0℃之内,并努力将气温升幅限制在工业化前水平以上1.5℃之内"。在全球变暖的背景下,极端低温事件的频次虽呈减少的趋势,但仍具有偶发性和破坏力强的特点。为研究全球升温1.5℃与2.0℃中国极端低温事件的特征,以及极端低温事件对耕地的影响,基于区域气候模式CCLM的最低气温数据,采用强度-面积-持续时间方法,根据极端低温事件在时间上的发展和空间上的连续特点,识别并预估了全球升温1.5℃与2.0℃时中国极端低温事件,建立极端低温事件库。评估全球升温1.5℃ 与2.0℃时,中国极端低温事件的频次、强度和面积特点,将其与基准期最强极端低温事件进行对比。研究升温1.5℃与2.0℃时中国最强极端低温事件的影响面积及中心的空间分布,并对暴露在极端低温事件的耕地面积进行评估,得到以下结论:

(1)全球升温1.5℃时,持续1 d的极端低温事件频次相对于基准期下降30%,强度上升8.8%,面积则下降14%;持续3 d的事件频次相对于基准期下降40%,强度上升7%,面积则下降7%;持续6 d事件频次相对于基准期下降48%,强度上升6%,面积下降10%;持续9 d事件的频次相对于基准期下降54%,强度下降1%,面积下降21%。全球升温2.0℃时,持续1 d极端低温事件的频次相对于基准期下降47%,强度上升10%,面积下降14%;持续3 d事件频次相对于基准期下降62%,强度上升11%,面积上升6%;持续6 d事件频次相对于基准期下降73%,强度上升10%,面积上升24%;持续9 d事件频次相对于基准期下降80%,强度上升6%,面积上升19%。

(2)全球升温1.5℃与2.0℃时,在各个持续时间上均有可能发生强度或面积均超过基准期最强极端低温事件的极端低温事件。全球升温1.5℃到2.0℃时,同等面积上的最强极端低温事件的强度有明显下降,最强极端低温事件的中心将会由西北与西南地区转移至华中与华南等地。

(3)全球升温1.5℃与2.0℃,暴露于极端低温的耕地面积均小于基准期,升温幅度越大,耕地暴露面积下降越明显。暴露于最强极端低温事件的耕地面积则高于基准期,且升温幅度越高,增加越明显。升温1.5℃时暴露于最强极端低温事件的耕地主要集中在西南地区,华东、华北、华中与华南等地相对于基准期有不同程度的上升,西北与东北等地略有下降。升温2.0℃时,暴露于最强极端低温事件的耕地主要由西南地区转移至华东、华中地区。

文中研究达到全球升温1.5℃与2.0℃目标时中国极端低温事件和耕地暴露度的变化,选用RCP 2.6情景下的出现1.5℃与RCP 4.5情景下出现2.0℃ 的时间进行差异比较的。这是因为RCP 4.5比RCP 2.6情景下的全球升温1.5℃出现的时间要早一些。此外,也比较了RCP 4.5情景下全球升温1.5℃与2.0℃目标下极端低温事件的变化差异性,在全球升温1.5℃目标中,持续1—9 d的极端低温事件的频次相对于基准期下降31%—54%,强度上升2%—9%,面积变化则在-14%—4%,全球升温2.0℃时,极端低温事件的频次相对于基准期下降48%—81%,强度则上升6%—12%,影响面积则在-18%—18%变化。

区域性的极端低温事件影响范围大、持续时间长,对农业及社会经济带来严重影响。尽管全球气温升高,极端低温事件频次呈减少趋势,但伴随升温,其强度却有一定程度上升,研究结论同时显示,全球升温1.5℃与2.0℃情景下,均有超过基准期最强极端低温事件的极端低温事件发生的可能性,最强极端低温事件的中心也由西北地区转移至华北、华中等地。虽然升温1.5℃与升温2.0℃,但暴露于最强极端低温事件的耕地面积却呈增加趋势,在华东、华中等地上升最明显。华中、华东以及华北地区是中国人口密集、经济发达地区,同时也是重要粮食生产基地。极端低温事件的发生,将对中国的社会经济造成严重的影响。在现今气候变暖的大背景下,对于极端低温事件的预防仍有着一定的必要性。

参考文献

陈静,刘洪滨,王艳君等. 2016. 华北平原干旱事件特征及农业用地暴露度演变分析. 中国农业气象,37(5):587-598. Chen J, Liu H B, Wang Y J, et al. 2016. Variation of drought characteristics and its agricultural exposure in North China Plain. Chinese J Agrometeorol, 37(5): 587-598 (in Chinese)

陈海山,刘蕾,朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度

瞬变波的可能联系. 中国科学:地球科学,42(12):1951-1965. Chen H S, Liu L, Zhu Y J. 2013. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity. Sci China Earth Sci, 56(7): 1226-1280

丁一汇,王遵娅,宋亚芳等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. 气象学报,66(5):808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming. Acta Meteor Sinica, 66(5): 808-825 (in Chinese)

高超,张正涛,陈实等. 2014. RCP4.5 情景下淮河流域气候变化的高分辨率模拟. 地理研究,33(3):467-477. Gao C, Zhang Z T, Chen S, et al. 2014. The high-resolution simulation of climate change model under RCP4.5 scenarios in the Huaihe River Basin. Geogr Res, 33(3): 467-477 (in Chinese)

高学杰. 2007. 中国地区极端事件预估研究. 气候变化研究进展,3(3):162-166. Gao X J. 2007. Researches in projection of extreme events in China. Adv Climate Change Res, 3(3): 162-166 (in Chinese)

黄金龙,王艳君,苏布达等. 2016. RCP4.5 情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响. 气象,42(5):614-620. Huang J L, Wang Y J, Su B D, et al. 2016. Future climate change and its impact on runoff in the upper reaches of the Yangtze River under RCP4.5 scenario. Meteor Mon, 42(5): 614-620 (in Chinese)

黄小燕,王小平,王劲松等. 2016. 1960—2013 年中国沿海极端气温事件变化特征. 地理科学,36(4):612-620. Huang X Y, Wang X P, Wang J S, et al. 2016. Variation of extreme temperature events in coastal region of China in 1960 - 2013. Scientia Geogr Sinica, 36(4): 612-620 (in Chinese)

景丞,姜彤,王艳君等. 2016a. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究. 气象学报,74(4):572-582. Jing C, Jiang T, Wang Y J, et al. 2016a. A study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China. Acta Meteor Sinica, 74(4): 572-582 (in Chinese)

景丞,王艳君,姜彤等. 2016b. CMIP5 多模式对朝鲜干旱模拟与预估. 干旱区资源与环境,30(12):95-102. Jing C, Wang Y J, Jiang T, et al. 2016b. Simulation and estimation of droughts in North Korea by CMIP5 multi-model ensembles. J Arid Land Resour Environ, 30(12): 95-102 (in Chinese)

李新周,刘晓东. 2012. 未来全球气候变暖情景下华东地区极端降水变化的数值模拟研究. 热带气象学报,28(3):379-391. Li X Z, Liu X D. 2012. Numerical simulations of extreme precipitation in eastern China under A1B scenario. J Trop Meteor, 28(3): 379-391 (in Chinese)

孟玉婧,姜彤,苏布达等. 2013. 高分辨率区域气候模式 CCLM 对鄱阳湖流域气温的模拟评估. 中国农业气象,34(2):123-129. Meng Y J, Jiang T, Su B D, et al. 2013. Temperature simulation assessment by high resolution regional climate model (CCLM) in Poyang Lake Basin. Chinese J Agrometeorol, 34(2): 123-129 (in Chinese)

任福民,翟盘茂. 1998. 1951—1990 年中国极端气温变化分析. 大气科学,22(2):217-227. Ren F M, Zhai P M. 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951 - 1990. Scientia Atmos Sinica, 22(2): 217-227 (in Chinese)

陶辉,黄金龙,翟建青等. 2013. 长江流域气候变化高分辨率模拟与 RCP4.5 情景下的预估. 气候变化研究进展,9(4):246-251. Tao H, Huang J L, Zhai J Q, et al. 2013. Simulation and projection of climate changes under the RCP4.5 scenario in the Yangtze River Basin based on CCLM. Progr Inquisit Mutat Climat, 9(4): 246-251 (in Chinese)

陶诗言,卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析. 气候与环境研究,13(4):337-350. Tao S Y, Wei J. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China. Climatic Environ Res, 13(4): 337-350 (in Chinese)

翟盘茂,任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化. 气象学报,55(4):418-429. Zhai P M, Ren F M. 1997. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years. Acta Meteor Sinica, 55(4): 418-429 (in Chinese)

朱娴韵,苏布达,黄金龙等. 2015. 云南气候变化高分辨率模拟与 RCP4.5 情景预估. 长江流域资源与环境,24(3):476-481. Zhu X Y, Su B D, Huang J L, et al. 2015. Simulation of climatic change in Yunnan province and RCP4.5 scenario projected trend by CCLM. Resour Environ Yangtze Basin, 24(3): 476-481 (in Chinese)

周雅清,任国玉. 2010. 中国大陆 1956—2008 年极端气温事件变化特征分析. 气候与环境研究,15(4):406-417. Zhou Y Q, Ren G Y. 2010. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956 - 2008. Climatic Environ Res, 15(4): 406-417 (in Chinese)

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. J Geophys Res, 111(D5): D05109

Caesar J, Alexander L, Vose R. 2006. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set. J Geophys Res, 111(D5): D05101

Cooter E J, Leduc S K. 1995. Recent frost date trends in the northeastern USA. Int J Climatol, 15(1): 65-75

Field C B, Barros V, Stocker T F, et al. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 592 pp

Fischer T, Menz C, Su B D, et al. 2013. Simulated and projected climate extremes in the Zhujiang River Basin, South China, using the regional climate model COSMO-CLM. Int J Climatol, 33(14): 2988-3001

Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed co-

herent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Res, 19(3): 193-212

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group Ⅰ Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press

Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. 1991. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change. Geophys Res Lett, 18(12): 2253-2256

Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998. Int J Climatol, 21(3): 269-284

Pal I, Al-Tabbaa A. 2010. Long-term changes and variability of monthly extreme temperatures in India. Theor Appl Climatol, 100(1-2): 45-56

Peterson T C, Taylor M A, Demeritte R, et al. 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. J Geophys Res, 107(D21): ACL 16-1-ACL 16-9

Plummer N, Salinger M J, Nicholls N, et al. 1999. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century. Climatic Change, 42(1): 183-202

Rusticucci M. 2012. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. Atmos Res, 106: 1-17

Schleussner C F, Lissner T K, Fischer E M, et al. 2016. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5℃ and 2℃. Earth Syst Dyn, 2016, 7(2): 327-351

Su B D, Jiang T, Jin W B. 2006. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China. Theor Appl Climatol, 83(1-4): 139-151

Su B D, Huang J L, Gemmer M, et al. 2016a. Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. Atmos Res, 178-179: 138-149

Su B D, Huang J L, Zeng X F, et al. 2016b. Impacts of climate change on streamflow in the upper Yangtze River Basin. Climatic Change, doi: 10.1007/s10584-016-1852-5 (in Press)

Warszawski L, Frieler K, Huber V, et al. 2013. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): Project framework. Proc Natl Acad Sci USA, 111(9): 3228-3232

Xu Y, Xu C H. 2012. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models. Atmos Oceanic Sci Lett, 5(6): 489-494

Yang J H, Ren C Y, Jiang Z H. 2008. Characteristics of extreme temperature event and its response to regional warming in northwest China in Past 45 Years. Chinese Geogr Sci, 18(1): 70-76

Zhai J Q, Huang J L, Su B D, et al. 2017. Intensity-area-duration analysis of droughts in China 1960－2013. Climate Dyn, 48(1-2): 151-168

Zhou W, Chan J C L, Chen W, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008. Mon Wea Rev, 137(11): 3978-3991