

引用格式: 王安乾, 苏布达, 王艳君, 等. 中国极端低温事件特征及其耕地暴露度研究[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 954–963.
[Wang A Q, Su B D, Wang Y J, et al. The characteristics of extreme minimum temperature events and exposure of farmland in China [J]. Resources Science, 2017, 39(5): 954–963.] DOI: 10.18402/resci.2017.05.15

中国极端低温事件特征及其耕地暴露度研究

王安乾^{1,4}, 苏布达^{1,2,3}, 王艳君², 王国杰², 黄金龙^{1,4}, 赵成义¹

(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)

摘要: 基于中国 543 个气象站 1960–2014 年逐日最低气温数据, 采用强度-面积-持续时间 (Intensity-Area-Duration, IAD) 方法, 根据极端低温事件在时间上的发展和空间上的连续性特点, 分析中国不同持续时间的区域性极端低温事件的强度和影响面积特点, 评估极端低温事件对耕地面积的影响。结果表明: ①气象站极端低温事件发生次数较多的地区主要位于华北及东北地区, 以短期 (持续时间 1~2 日) 事件为主, 西北及东南等地的极端低温事件次数较少, 但多为中期 (持续时间 3~5 日)、长期 (持续时间 6 日以上) 事件; ②21 世纪之前, 区域性极端低温事件持续时间相对较短、但强度和影响面积较大; 进入 21 世纪, 极端低温事件的影响面积和强度有所减小, 但持续时间增加; ③极端低温事件影响的耕地面积在 1969 年之前为上升趋势, 随后下降, 进入 21 世纪, 极端低温事件影响的耕地面积无明显变化。

关键词: 极端低温事件; 强度-面积-持续时间; 耕地暴露度; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.05.15

1 引言

极端气候事件是气候的状态严重偏离其平均态, 在统计意义上属于不易发生的小概率事件。对某种天气气候现象, 当其指标满足统计上的极端性标准, 高于 (或低于) 其分布的上限 (或下限) 时称之为极端气候事件^[1], 分为单站极端事件和区域性极端事件^[2]。在全球变暖的大背景下, 极端气候事件的强度和频率不断增强^[3,4], 更具有突发性、不可预估性等, 对人类社会经济的发展和生态环境造成更为深远的影响^[5]。

极端温度事件作为极端气候事件重要组成部分, 受气候变化的影响最为明显, 直接影响着社会经济、生态环境和人类健康^[6,7], 已经成为国内外气候变化和灾害领域关注的热点问题之一。随着全球气温的上升, 不同地区最低气温升高趋势非常明

显^[8-10], 全球 70% 以上的陆地上, 冷夜日数呈明显的减少趋势^[11,12], 全球极端最低温度发生的频率和霜冻期长度出现了下降趋势, 并表现出明显的日夜温度变化不对称性^[13,14]; 尽管气温呈上升趋势, 但大量研究证明极端低温的变化要比极端高温的变化更剧烈, 对全球气候变化的敏感性要高于极端高温^[15-17]。在国内研究上, 平均最低气温在中国普遍呈上升趋势^[18-20], 中国大陆地区霜冻日数和结冰日数明显减少, 减少显著的区域集中在北方, 大部分地区的极端最低气温上升趋势显著^[21,22]。虽然极端低温事件频次呈减少趋势, 但仍具有偶发性, 破坏力极强的特点, 如 2008 年中国南方大部分地区遭遇了历史罕见的大范围冰冻雨雪灾害, 使农作物受灾 143.2 万 km², 其中成灾面积达到 73.8 万 km², 绝收面积 9.7 万 km²^[23]。针对极端低温事件, 部分学者主要

收稿日期: 2016–11–10; 修订日期: 2017–01–09

基金项目: 国家自然科学基金 (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)。

作者简介: 王安乾, 男, 山东泰安人, 博士生, 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: 苏布达, E-mail: subd@cma.gov.cn

2017年5月

采用多个相邻站点同时低于其极端阈值确定极端低温发生范围,建立持续性低温事件库^[24]。任福民等在客观天气图分析法的基础上,提出了持续性极端事件客观识别方法,用以识别极端事件的空间范围和时间持续特征^[25],龚志强等在此基础上改进并形成了极端低温事件客观识别技术,建立相应的极端低温事件库^[26]。上述的研究主要采用的是计算单一站点的极端气候指数分析极端低温事件特征,对于极端低温事件的空间特征则描述不足,且集中在极端事件的特征分析上面^[27-29],无法对极端低温事件对社会经济造成的影响进行评估。

目前逐步从单一的极值分析向事件的时间持续性和空间连续性的角度转变,研究区域性的极端气候事件。区域性的极端气候事件主要包括事件强度、发生范围以及事件持续时间3个重要因素,其对社会经济所造成的影响也与这3个要素有密切联系。针对极端气候事件对社会经济造成的影响评估目前有学者采用强度-面积-持续时间(Intensity-Area-Duration, IAD)的方法进行分析,该方法已经应用于干旱^[30,31]与极端降水事件^[32]的研究当中。本研究基于中国543个气象站1960-2014年逐日最低气温数据,采用强度-面积-持续时间(IAD)方法,分析发生在连续面积上,不同持续时间的区域性极端低温事件的演变特征,初步探讨了极端低温事件影响的耕地面积。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究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数据^[33],筛选出缺测率小于0.25%的543个台站资料,采用反距离加权方法,将逐日低温数据插值到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的格点。

土地利用数据选用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^[34]。该套数据采用Landsat TM/ETM遥感影像解译生成,主要包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型以及25个二级类型。

2.2 研究方法

2.2.1 极端低温事件的阈值确定

对某站1960-2014年逐日同期最低气温资料按

升序排列,取其第10百分位值作为该站该日极端低温的阈值。由于该方法可供使用的样本数量有限,为增加概率分布参数估计的稳定性,Folland等提出以增加额外的数据扩充样本量的思想,要求增加的数据相对独立,并能够准确代表该日的概率分布特征^[35],Jones等采用某日及前后间隔5d的5个数据作为样本,并以此计算极端温度的阈值^[36]。以此为参考,本文以某日为中心,选取该日前后各2d共计5d的资料作为该日的样本,将样本数量扩充5倍,进而计算该日极端低温阈值。

2.2.2 强度-面积-持续时间方法

极端低温事件是区域性的现象,是发生在连续面积上具有一定持续时间的低于极端低温阈值的过程,主要包括3个组成要素,即低温强度、低温面积与持续时间。低温强度为区域内各点最低气温与对应极端低温阈值差值绝对值的平均值,持续数日的极端低温事件强度则为逐日强度的平均值;持续时间为该区域内最低气温连续低于相应极端低温阈值的时段;低温面积指的是此次极端低温事件所覆盖的最大连续面积。

本文将极端低温事件的强度、面积与持续时间这3个重要特征联系起来,使用强度-面积-持续时间(Intensity-Area-Duration, IAD)方法,用来分析特定持续时间下极端低温事件的强度及其影响面积的联系,并通过IAD包络线的形式对最强的区域性极端低温事件进行判断分析。建立IAD曲线及其包络线步骤如图1所示:图1a中共有2次极端低温事件,以不同颜色表示,首先寻找研究区内低温强度最大的格点,将其作为第一个“低温中心”(图1b1),记录此格点的强度与面积,然后寻找“低温中心”周围连续格点中强度次强的格点加入,取两格点强度的平均值作为“次强中心”,记录此时的强度和面积(图1b2),重复此过程直至此次低温事件的网格均被搜索加入(图1b3)。针对其他“低温中心”重复上述步骤(图1c1-图1c3)。

将低温事件提取过程中所记录反映强度与面积关系的点连接,绘制能够反映低温事件随面积发展的与强度关系的IAD曲线;选取所有IAD曲线相同面积上强度最大的点相连,形成一条所有IAD曲线的最上方的包络线,即IAD包络线(图1d),能够

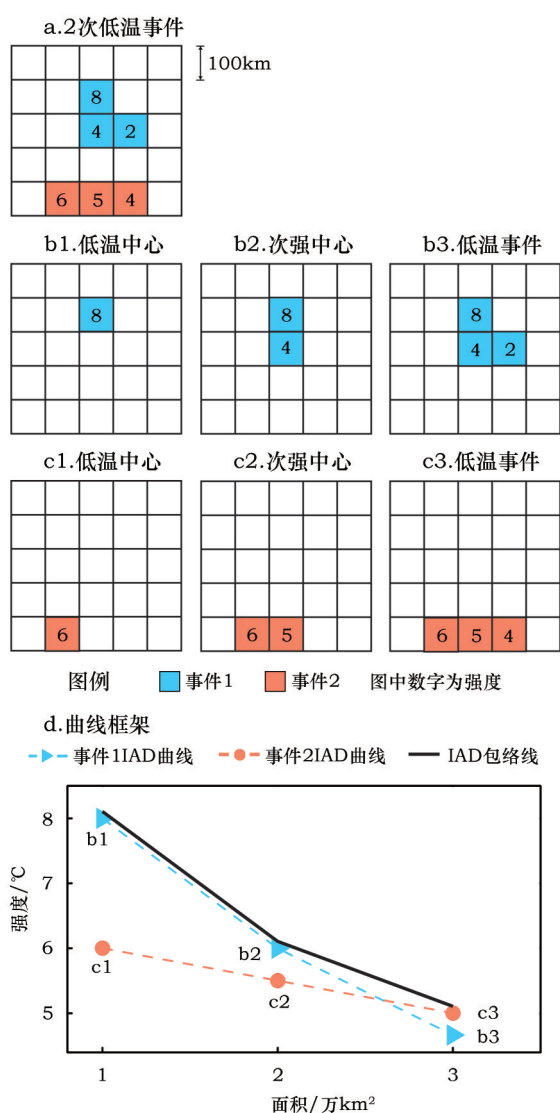


图1 强度-面积-持续时间(IAD)曲线框架

Figure 1 Construction of the Intensity-Area-Duration (IAD) curve

反映出区域内在经历特定持续时间可能遇到的最严重的低温程度。

2.2.3 反距离加权法

本文为分析中国区域性的极端低温事件,采用反距离加权插值法(Inverse Distance Weighted, IDW)将气象站点最低气温数据插值到中国 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点上。反距离加权方法以插值点与样本点的距离为权重进行加权平均,距离插值点越近的样本点赋予的权重越大,其插值公式如下:

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^2} T_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^2}} \quad (1)$$

式中 T' 为待插值点的最低气温估计值; T_i 为第 i 个样本点的实测最低气温值; d_i 为第 i 个样本点与待插值点之间的距离; n 为样本总数,本文取 $n=12$ 。

3 结果分析

3.1 极端低温事件空间分布

1960-2014年,中国极端低温事件在新疆大部以及东南沿海和西南内陆区域发生次数较少,在(11~15)次/年左右,而在中国中部、华北北部及东北大部区域发生次数较多,在(15~23)次/年左右(图2a)。

图2b-图2d分别为短期(持续时间1-2日)、中期(持续时间3-5日)和长期(持续时间6日以上)极端低温事件频次的空间分布。各气象站短期极端低温事件次数约占到总体事件总数的80%左右。短期极端低温事件的分布与总体的空间分布类似,高值区主要位于华北及东北地区,为(14~20)次/年,新疆及东南沿海为低值区,为(11~15)次/年(图2b);中期极端低温事件的空间分布与短期极端低温事件相反,高频事件主要位于北疆及南方部分省份(湖南、广东、广西、江西等省),次数在2次/年以上;低值地区主要位于东北、内蒙古及青海部分地区,极端低温事件多在(1~2)次/年;中国各个站点发生长期极端低温事件的次数在(0~1)次/年,其空间分布与中期极端低温事件的空间分布类似,高值主要位于新疆西部地区及江南、华南部分地区,中国其他地区无明显差别。

3.2 极端低温事件IAD分析

将1960-2014年划分为5个时段,分别是1960s(1960-1969年)、1970s(1970-1979年)、1980s(1980-1989年)、1990s(1990-1999年)以及2000s(2000-2014年),分别绘制不同持续时间(持续1日、持续3日、持续6日和持续9日)尺度上,各个时段的极端低温事件的IAD包络线(图3,见第958页)。图中横坐标为极端低温事件所发生的连续面积,纵坐标为在此连续面积上极端低温的最大强度。

1960s,持续1日的极端低温事件最大影响范围为676万 km^2 ,最强中心出现在新疆北部,超过对应阈值 17.1°C 。进入1970s,极端低温事件最大影响范围为650万 km^2 ,最强中心比对应阈值低 15.6°C ,位于内蒙古东部。1980s,最大影响范围650万 km^2 ,最

2017年5月

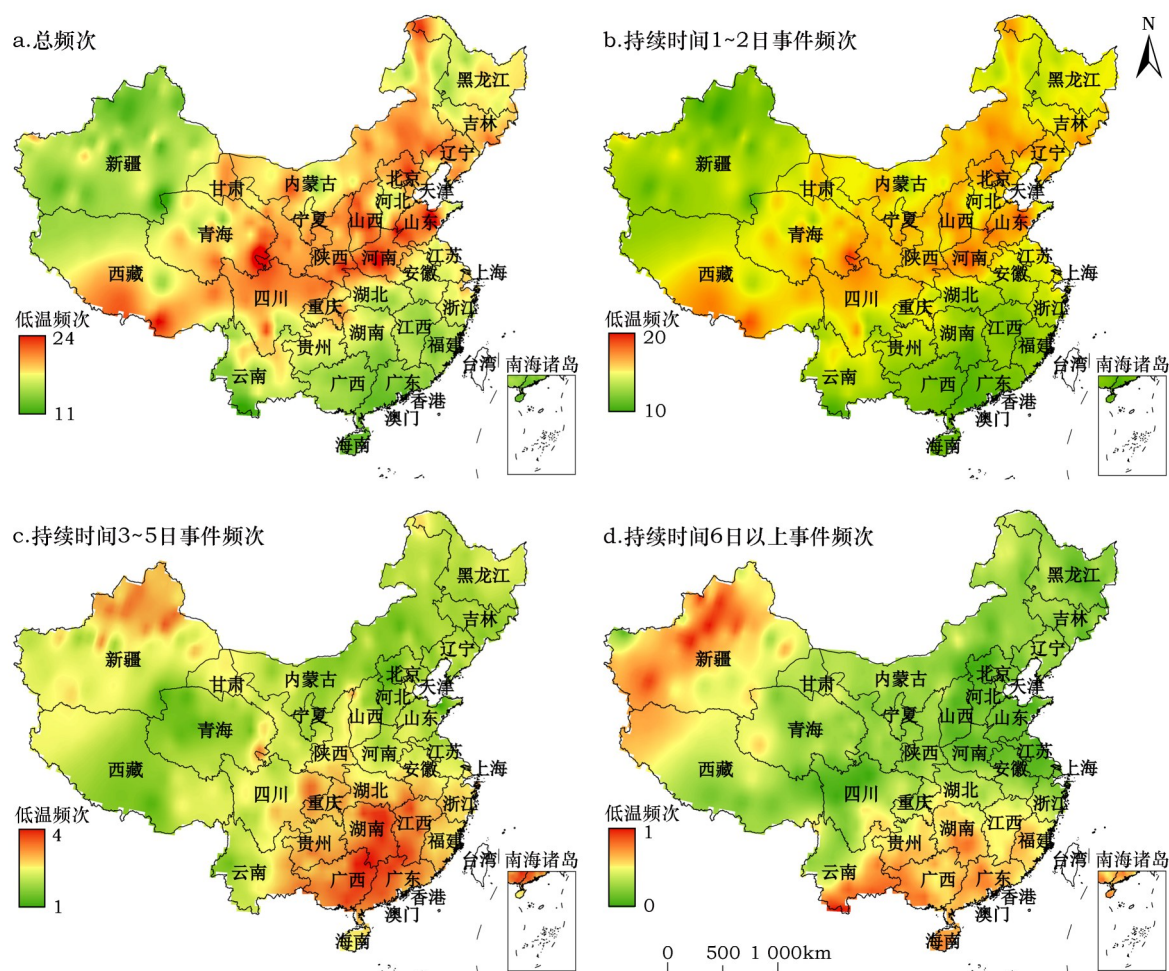


图2 1960–2014年气象站极端低温事件年均频次空间分布

Figure 2 Spatial distribution of the frequency of single-site extreme minimum temperature events over China for the period from 1960 to 2014

强中心位于西藏东北部,比对应阈值低 19.2°C 。1990s,持续1日的极端低温事件的最大影响范围 562 km^2 ,最强中心位于新疆南部。进入21世纪,极端低温事件最大范围 660 万 km^2 ,最强中心位于云南地区,超过阈值 18.3°C (图3a)。

1960s,持续3日的极端低温事件最强中心位于新疆北部,超过阈值 15.4°C ,影响的最大范围为 305 万 km^2 。1970s 极端低温事件的影响范围最大,为 513 万 km^2 ,最强中心位于辽宁北部,比阈值低 12.3°C 。1980s 的最大影响范围为 307 万 km^2 ,最强中心低于阈值 17.1°C ,位于西藏北部。持续3日的极端低温事件在1990s的影响范围显著减少,仅有 244 万 km^2 ,最强中心低于阈值为 10.9°C ,位于甘肃南部地区。21世纪之后,持续3日的极端低温事件最大影响范围为 386 万 km^2 ,最强中心低于阈值

14.3°C ,位于新疆北部地区(图3b)。

持续6日的极端低温事件与持续3日类似,最大影响范围在1970s最大,为 396 万 km^2 ,在1960s、1980s、1990s以及21世纪之后,最大影响范围分别为 224 万 km^2 、 172 万 km^2 、 105 万 km^2 和 176 万 km^2 。1960s 最强中心位于新疆北部,超过阈值 11.9°C ,1970s,最强中心超过阈值 9.8°C ,位于辽宁北部,1980s,最强中心位于西藏北部,超过阈值 17.0°C ,在1990s,最强中心位于新疆南部,超过阈值 9.5°C ,21世纪之后,最强中心位于新疆北部,超过阈值 11.5°C (图3c)。

1960s 持续9日的极端低温事件的最大影响范围 140 万 km^2 ,最强中心出现在新疆西北部,超过阈值 9.2°C 。进入1970s,持续9日的极端低温事件的影响范围有所减少,为 99 万 km^2 ,最强中心超过阈

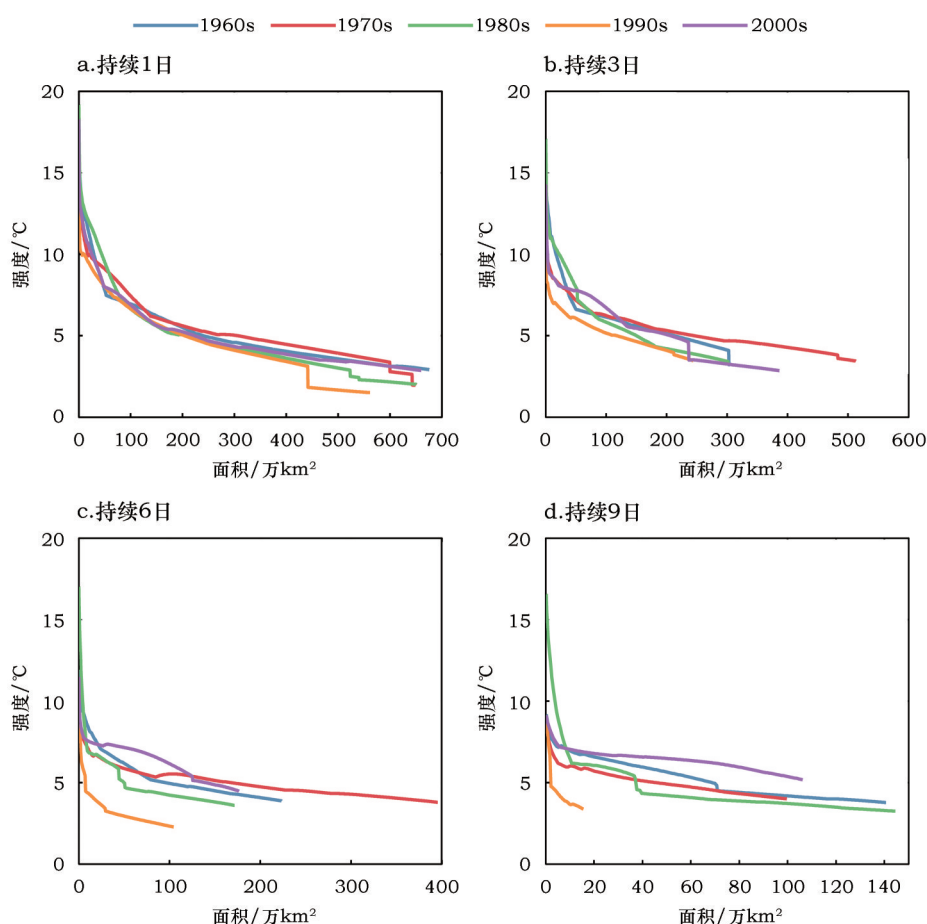


图3 各时间段内不同持续时间(1日、3日、6日、9日)极端低温事件IAD包络线

Figure 3 IAD envelope of the different durations (1d, 3d, 6d, 9d) extreme minimum temperature events in different period from 1960 to 2014

值9.1°C,位于西藏东北部。1980s,极端低温事件的影响范围又增加到144万 km²,其低温事件的强度更大,超过阈值16.6°C,位于西藏东部。1990s,极端低温事件的影响范围在各年代中最小,仅有15.6万 km²,最强中心位于新疆西南部,超过阈值8.7°C。进入21世纪之后,极端低温事件的最大影响范围为106万 km²,最强中心位于新疆南部,超过阈值9.1°C(图3d)。

1960-2014年不同持续时间的极端低温事件IAD包络线(图4)显示,持续1日极端低温事件的IAD包络线共由10个事件组成,其中在(0~50)万 km²连续面积的最强事件发生在1985及1987年,(50~150)万 km²内的最强事件发生在1966年,在(150~200)万 km²的最强极端低温事件发生在1987年,在(200~600)万 km²的最强极端低温事件主要发生在1975年,在600万 km²以上的最强极端低温事件主要发生在1969年;持续3日极端低温事件IAD

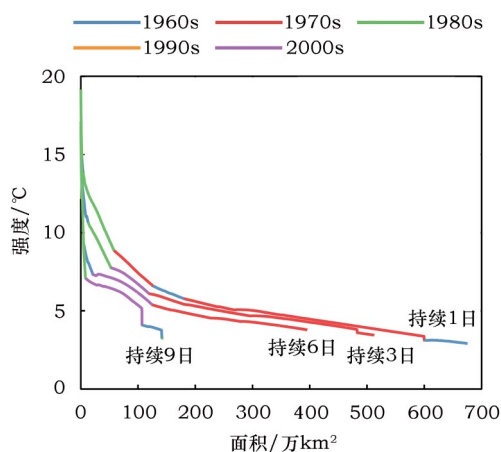


图4 1960-2014年不同持续时间(持续1日、3日、6日及9日)极端低温事件IAD包络线

Figure 4 IAD envelope of the different durations(1d, 3d, 6d, 9d) extreme minimum temperature events from 1960 to 2014 in China

包络线共由7个事件组成,(0~50)万 km²最强事件发生在1985年,在(50~150)万 km²里最强事件发生

2017年5月

在2008年,在(150~500)万 km^2 的最强极端低温事件发生在1975年;持续6日极端低温事件IAD包络线由4起事件组成,连续面积在(0~30)万 km^2 发生在1985年及1960年,在(50~150)万 km^2 最强事件发生在2008年,在(150~400)万 km^2 的最强极端低温事件发生在1975年;持续9日的极端低温事件IAD包络线由7起事件组成,连续面积在(10~130)万 km^2 主要发生在2008年,在(130~180)万 km^2 最强事件发生在1966年。

在各个连续面积上最强的极端低温事件主要发生在4个时期(1984-1986年、2008-2010年1978-1982年和1962-1965年),大范围的极端低温事件的持续时间较短,而持续时间较长的极端低温事件所影响的范围相对较小。21世纪之前,持续1日的极端低温事件强度最大,进入21世纪之后,尽管全球气温不断升高,中国最低气温也呈显著的上升趋

势,但是极端低温事件持续时间反而增加,在持续3日、6日和9日的尺度上(50~150)万 km^2 范围上遇到的最严重的极端低温事件主要发生在2006-2008年。

3.3 极端低温事件对耕地的影响

以2000年土地利用状况为基础,采用IAD法,统计全国逐年持续1日的极端低温事件次数及其影响的耕地面积,影响的耕地面积为暴露在该极端低温事件范围内耕地的总面积。1960-2014年中,极端低温事件的总次数呈显著的下降趋势,极端低温事件次数最多的年份为1969年,最少的年份为2007年(图5a)。极端低温事件所影响的耕地面积年均值在1969年之前为上升趋势,之后则变为下降趋势(图5b)。1987年和1969年极端低温事件影响耕地面积较大,2007年极端低温事件影响的耕地面积最小。

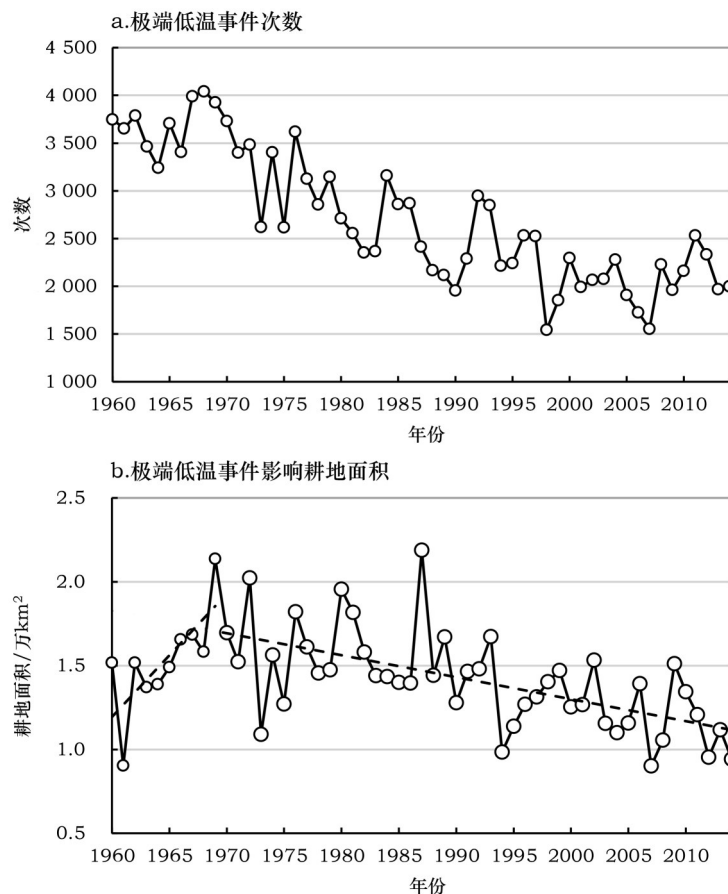


图5 1960-2014年极端低温事件的次数及极端低温事件影响的耕地面积(以2000年土地利用为基准)

Figure 5 Frequency of extreme minimum temperature events from 1960 to 2014 and farmland area affected by the extreme minimum temperature events (based on the 2000 land use data)

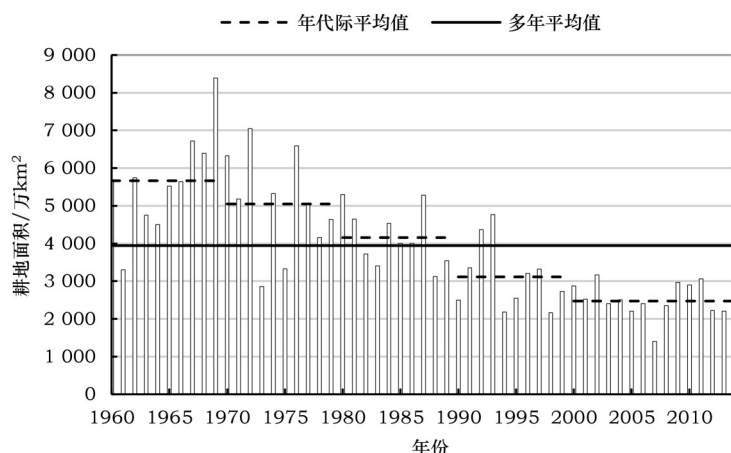


图6 1960–2014年极端低温事件累积影响的耕地面积(以2000年土地利用为基准,虚线为平均值)

Figure 6 Annual cumulative farmland impacted by the extreme minimum temperature events from 1960 to 2014
(based on the 2000 land use data; dotted line denotes the multi-year average)

年极端低温次数(图5a)与年均极端低温事件所影响的耕地面积(5b)之乘积,即为年极端低温事件累积影响的耕地面积(图6)。由于对同一地区发生的多次事件所影响的耕地面积进行了重复统计,极端低温事件影响的耕地面积每年累积达3944万 km^2 ,相当于全国耕地总面积的6.5%暴露于极端事件。与受影响耕地年均值的变化一致,极端低温事件所影响的耕地累积面积在1960–2014年呈统计意义上显著的下降趋势(通过95%信度检验),也在1969年左右发生转变,1969年之前呈上升趋势,之后转为下降趋势。1969年极端低温事件累积影响的耕地面积约8400万 km^2 ,相当于耕地总面积的13.8%;2007年累积影响耕地面积约为1400万 km^2 ,相当于耕地总面积的2.3%。进入21世纪之后,极端低温事件对耕地的影响较为稳定。

年代际尺度上,极端低温事件累积影响的耕地面积逐步递减。1960s,极端低温事件影响的耕地为5665万 km^2 ,相当于耕地总面积的9.3%;1970s,为5048万 km^2 ,相当于耕地总面积的8.3%;1980s,为4157万 km^2 ,相当于耕地总面积的6.9%;1990s,为3114万 km^2 ,相当于耕地总面积的5.1%;2000年之后,为2473万 km^2 ,相当于耕地总面积的4.1%。

4 结论与讨论

本文基于中国543个气象站1960–2014年逐日最低气温数据,采用强度-面积-持续时间(IAD)方法,以低温强度、影响面积和持续时间3个要素,根

据极端低温事件在时间上的发展和空间上的连续性特点,分析了不同持续时间下的极端低温事件的连续面积与强度的关系,并对1960–2014年极端低温事件对耕地的影响进行初步评估。得到以下结论:

(1)1960–2014年中国极端低温事件发生次数较多的地区主要位于华北及东北,80%左右的极端低温事件均为短期(持续时间1~2天)极端低温事件。新疆大部以及东南沿海和西南内陆区域的极端低温事件总次数较少,但多为中期(持续时间3~5天)和长期(持续时间6天以上)的极端低温事件。

(2)1960–2014年,极端低温事件在1960s–1990s的影响面积呈下降趋势。在不同持续时间上,1990s的影响范围均为最小,进入21世纪之后,极端低温事件的影响范围又有所上升。21世纪之前,中国极端低温事件主要为短期大范围事件,进入21世纪之后,在全球变暖的大背景下,极端低温事件有了新变化,其强度和影响范围均有所减少,但持续时间在增长。

(3)极端低温事件在1960–2014年影响的耕地面积在1960–1969年为上升趋势,随后为下降趋势,影响的耕地面积最大值与最小值的年份分别出现在1969年与2007年。其进入21世纪,区域性极端低温事件所影响的耕地面积变化相对稳定。

本研究所采用的IAD方法将组成极端低温事件的3个重要组成要素联立起来,从时间的发展和

2017年5月

空间的连续角度上重新定义和判别区域性的极端低温事件,将过去仅在单一台站的极端指数的分析中解放出来,从区域上更为全面地认识极端低温事件。此外,本方法采用格点形式资料,能够更为便利地与社会经济资料相结合,有利于评估极端低温事件对社会经济的影响。

极端低温事件对社会经济造成的影响不仅与其自身的强度、影响面积与持续事件都能自身特征有关,同时也与研究区内的社会经济等发展状况有关。本文所计算的暴露在极端低温事件下的耕地面积的变化,前提条件是土地利用状况维持在2000年状况不变的情况,因此本文的结论并未考虑到人类活动的影响,只考虑了极端低温事件自身变化的因素,将人类活动要素加入到研究当中也是今后研究的重点之一。

参考文献(References):

- [1] WMO. 2010: Report of the Meeting of the Management Group of the Commission for Climatology[EB/OL]. (2010-03-18) [2016-11-10]. <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/mg/documents/MeetingReportFinal.pdf>.
- [2] 任福民,高辉,刘绿柳,等.极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J].气象,2014,40(7):860-874. [Ren F M, Gao H, Liu L L, et al. Research progresses on extreme weather and climate events and their operational applications in climate monitoring and prediction[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(7):860-874.]
- [3] Kunkel K E, Andsager K, Easterling D R. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(8):2515-2527.
- [4] Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(3):279-304.
- [5] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.1965-2013年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J].地理研究,2016,35(4):639-652. [Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4):639-652.]
- [6] Koch H, Vögele S. Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7):2031-2039.
- [7] Hay J, Mimura N. The changing nature of extreme weather and climate events: Risks to sustainable development[J]. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2010, 1(1):3-18.
- [8] Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961-1998[J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(3):269-284.
- [9] Frich P L, Lv A, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during 2nd half of the 20th century[J]. *Climate Research*, 2002, 19(3):193-212.
- [10] Peterson T C, Taylor M A, Demeritte R, et al. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(21):ACL 16-1-ACL 16-9.
- [11] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 111(D5):1042-1063.
- [12] Caesar J, Alexander L, Vose R. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(D5):854-871.
- [13] Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. Global warming: Evidence for asymmetric diurnal temperature change[J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(12):2253-2256.
- [14] Cooter E J, Leduc S K. Recent frost date trends in the northern United States[J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(1):65-75.
- [15] Yang J, Ren C, Jiang Z. Characteristics of extreme temperature event and its response to regional warming in Northwest China, in past 45 years[J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(1):70-76.
- [16] Pal I, Al-Tabbaa A. Long-term changes and variability of monthly extreme temperatures in India[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 100(1):45-56.
- [17] Su B, Jiang T, Jin W. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 83(1):139-151.
- [18] 翟盘茂,任福民.中国近四十年最高最低温度变化[J].气象学报,1997,55(4):418-529. [Zhai P M, Ren F M. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(4):418-529.]
- [19] 任福民,翟盘茂.1951-1990年中国极端气温变化分析[J].大气科学,1998,22(2):217-227. [Ren F M, Zhai P M. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951-1990[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(2):217-227.]
- [20] 刘雅星,范广洲,董一平,等.近46年中国冬季日均气温及极端

- 温度的变化[J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(3): 286-292. [Liu Y X, Fan G Z, Dong Y P, *et al.* Variations of winter daily average temperature and extreme temperature in the recently 46 years in China[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2010, 25(3): 286-292.]
- [21] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 267-272. [Yan Z W, Yang C, Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951-1997 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(3): 267-272.]
- [22] 周雅清, 任国玉. 中国大陆 1956-2008 年极端气温事件变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 405-417. [Zhou Y Q, Ren G Y. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956-2008[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 405-417.]
- [23] 刘布春, 李茂松, 霍治国, 等. 2008 年低温雨雪冰冻灾害对种植业的影响[J]. 中国农业气象, 2008, 29(2): 242-246. [Liu B C, Li M S, Huo Z G, *et al.* The impact of freezing disaster on planting industry in 2008[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(2): 242-246.]
- [24] Zhang Z J, Qian W H. Databases on regional extreme low temperature events in China[J]. *Advance in Atmosphere Science*, 2011, 28(2): 338-351.
- [25] 任福民, Gleason B, Easterling D. 一种识别热带气旋降水的数值方法[J]. 热带气象学报, 2001, 17(3): 308-313. [Ren F M, Gleason B, Easterling D. A numerical technique for partitioning cyclone tropical precipitation[J]. *Journal of Tropical Meteorological*, 2001, 17(3): 308-313.]
- [26] 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 区域性极端低温事件的识别及其变化特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(2): 195-204. [Gong Z Q, Wang X J, Cui D L, *et al.* The identification and changing characteristic of regional low temperature extreme events[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2012, 23(2): 195-204.]
- [27] 杨萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29-36. [Yang P, Liu W D, Wang Q G, *et al.* The climatic change trend and seasonal characteristic of daily temperature extremes in China for the latest 40 years[J]. *Journal of Tropical Meteorological*, 2010, 21(1): 29-36.]
- [28] 万仕全, 顾承华, 康建鹏, 等. 中国月极端高温对大气涛动的响应[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 676-682. [Wan S Q, Gu C H, Kang J P, *et al.* Monthly extreme high-temperature response to atmospheric oscillation in China[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 676-682.]
- [29] 章大全, 杨杰, 王启光, 等. 中国近 50 年气候破纪录温度事件发生概率分析[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 4354-4361. [Zhang D Q, Yang J, Wang Q G, *et al.* Analysis of climate record breaking temperature events in China during past 50 years[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 4354-4361.]
- [30] Zhai J, Huang J, Su B, *et al.* Intensity-area-duration analysis of droughts in China 1960-2013[J]. *Climate Dynamic*, 2017, 48(1-2): 151-168.
- [31] 陈静, 刘洪滨, 王艳君, 等. 华北平原干旱事件特征及农业用地暴露度演变分析[J]. 中国农业气象, 2016, 37(5): 587-599. [Chen J, Liu H B, Wang Y J, *et al.* Variation of drought characteristics and its agricultural exposure in north China plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 37(5): 587-599.]
- [32] 景丞, 姜彤, 王艳君, 等. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究[J]. 气象学报, 2016, 74(4): 572-582. [Jing C, Jiang T, Wang Y J, *et al.* A study on regional extreme precipitation events and the exposure of population and economy in China[J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2016, 74(4): 572-582.]
- [33] 国家气象信息中心. 中国地面气候资料日值数据集(V3.0) [EB/OL]. (2012-11-22) [2015-09-15]. http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_CES_V3.0.html. [National Meteorological Information Center. Daily Ground Climate Data Set in China, Version 3.0[EB/OL]. (2012-11-22) [2015-09-15]. http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_CES_V3.0.html.]
- [34] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, *et al.* Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [35] Folland C K, Miller C, Bader D, *et al.* Workshop on indices and indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997 breakout group C: Temperature indices for climate extremes[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 31-43.
- [36] Jones P D, Horton E B, Folland C K, *et al.* The use of indices to identify changes in climatic extremes[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 131-149.

The characteristics of extreme minimum temperature events and exposure of farmland in China

WANG Anqian^{1,4}, SU Buda^{1,2,3}, WANG Yanjun², WANG Guojie², HUANG Jinlong^{1,4}, ZHAO Chengyi¹

(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 & Technology, Nanjing 210044, China;

3. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on daily minimum temperature data from 543 meteorological stations from 1960 to 2014, characteristics of extreme minimum temperature events over China were analyzed. By taking the spatial and temporal continuity characteristics of extreme minimum temperature events into account, the Intensity- Area- Duration (IAD) method was applied to assess the relationship between intensity and coverage of extreme minimum temperature events at different durations and evaluate the area of farmland exposed to extreme minimum temperature events. We found that the areas where single-site extreme minimum temperature events occur more frequently are located in the northern and northeastern regions and that most events last 1~2 days. In northwestern and southeastern areas, where extreme minimum temperature events are comparatively lesser, most events last longer (last 3~5 days, or more than six days). Coverage of extreme minimum temperature events has decreased from the 1960s to 1990s, and increased in the 21st century. The coverage of extreme minimum temperature events was lowest in the 1990s for different durations. Before the 21st century, regional extreme minimum temperature events were of short duration but greater area and intensity. Since the beginning of the 21st century, both the coverage and intensity of extreme minimum temperature events has decreased, but the duration has increased. The area of farmland exposed to extreme minimum temperature events increased before 1969, but then decreased. The maximum and minimum farmland area exposed to extreme minimum temperature events was in 1969 and 2007 respectively. Farmland area exposed to extreme minimum temperature events has stabilized since the beginning of the 21st century.

Key words: extreme minimum temperature events; IAD method; exposure of farmland; China