

引用格式:张婷,程昌秀.顾及空间集聚程度的中国高温灾害危险性评价[J].地球信息科学学报,2019,21(6):865-874. [Zhang T, Cheng C X. Assessment of China's high-temperature hazards: Accounting for spatial agglomeration[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(6):865-874.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180580

顾及空间集聚程度的中国高温灾害危险性评价

张 婷^{1,2,3,4},程昌秀^{1,2,3,4*}

1. 北京师范大学地理数据与应用分析中心,北京 100875;2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875;3. 北京师范大学地理科学学部,北京 100875;4. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

Assessment of China's High-Temperature Hazards: Accounting for Spatial Agglomeration

ZHANG Ting^{1,2,3,4}, CHENG Changxiu^{1,2,3,4*}

1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Center for Geodata and Analysis, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Hazardness assessment is the basis of high temperature hazard (HTH) research. The spatial aggregation of multiple extreme high temperature events will magnify the impacts of extreme events, which not only strengthen high temperature risk, but also increase the vulnerability of disaster-bearing bodies. Previous studies mainly use high temperature days and high temperature intensity to depict HTH, yet seldom consider the the spatial agglomeration of high temperature events. To address this gap, the HTH assessment in this paper integrates the traditional HTH assessment and the spatial agglomeration of high temperature events. In so doing, the evaluation of HTH is more comprehensive by accounting for the synergy effect of high temperature hazard agglomeration. Based on high temperature days, high temperature intensity, and high temperature spatial agglomeration, HTH in China from 1979 to 2017 was evaluated integratively. The spatial distribution characteristics of these indices were illustrated and their inter-annual variations were analyzed. Finally, areas with the highest integrative high temperature intensity and regions with simultaneous enhancement of the three indices were identified separately. The results show that the strength of HTH in western and northeastern Inner Mongolia and northern Shanxi is underestimated due to the lack of consideration of high temperature spatial agglomeration, where the Grade 4 HTH is underestimated to be Grade 2 or 3. On the other hand, if HTH assessment considered only the number of high temperature days, the high temperature hazardness in most areas of Inner Mongolia, Heilongjiang, Shandong, and the northern part of western Shaxi would have been underestimated. This indicates that HTH assessment needs to account for the three indices simultaneously. From the results of integrative assessment, for now, the most dangerous areas due to high temperature are located in southern Tianshan Mountains and eastern Hunan, where high temperature days are 20-36 days, high temperature intensity ranges from 1.190 °C to 2.180 °C and high temperature spatial agglomeration ranges from 13.390 to 18.710. From the results of inter-annual variations, all of the three indices significantly increased in the junction of Inner Mongolia

收稿日期:2018-11-14;修回日期:2019-02-25.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41771537)。[**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41771537.]

作者简介:张 婷(1994-),女,内蒙古呼和浩特人,硕士生,主要从事灾害类数据分析。E-mail: zhangting_bnu@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者:程昌秀(1973-),女,重庆人,教授,博士生导师,主要从事灾害、地理大数据时空分析等研究。

E-mail: chengcx@bnu.edu.cn

and Gansu, Jiangsu, and the junction of Sichuan and Chongqing. These areas may become the most dangerous areas of high temperature hazards in the future, where from 1979 to 2017 the variability of high temperature days is 0.419-0.740 days/year, the variability of high temperature intensity is 0.30-0.42 °C/10 years and the variability of high temperature spatial agglomeration is 0.250-0.390 per year. The proposed HTH assessment method is helpful to improve the accuracy of risk assessment of high temperature hazards, and the results of our trend analysis of these indices can help predict the high-risk areas. In addition, the method can identify the high-risk areas of each hazard factor and also the dominant factor of each high-risk area. It provides a scientific basis for targeted high temperature prevention and mitigation, as well as resource allocation over the whole China.

Key words: high temperature hazards; hazard assessment; integrative high temperature hazardness index; spatial agglomeration degree; trend analysis; China

*Corresponding author: CHENG Changxiu, E-mail: chengcx@bnu.edu.cn

摘要: 高温危险性评估是高温灾害研究的基础性工作。本研究在传统高温灾害危险性评价的基础上增加了高温空间集聚程度指标,完善了高温危险性的评价角度,考虑了高温灾害群发对高温危险性的增强作用。基于高温日数、高温强度、高温空间集聚程度对1979-2017年中国高温危险性进行了综合评价,并分析了各项指标及其年际变化速率的空间分布特征,提取出高温综合高危区及各指标同时增强的区域。研究结果表明:① 不考虑高温空间集聚程度会造成内蒙古西部及东北部、山西北部等地的高温危险性被低估,存在4级高温危险性被低估为2级或3级;② 目前高温综合危险性最强的地区分布在新疆天山南部、湖南东部等地,表现为年平均高温日数2036 d,高温强度1.190~2.180 °C,平均集聚程度13.390~18.710个;③ 江苏、内蒙古甘肃交界处及四川重庆交界处等地的3项评价指标均逐年显著增强,具体表现为从1979-2017年,年平均高温日数变率0.419~0.740天/年,高温强度变率0.30~0.42 °C/10年,平均集聚程度变率0.250~0.390个/年。今后这些地区可能成为高温综合危险性最高的地区。该高温危险性评价方法有助于提升高温灾害风险评估的准确性,危险性变化趋势结果有助于预估未来高温灾害的高危区。

关键词: 高温灾害;危险性评价;综合高温危险性指标;空间集聚程度;变化趋势;中国

1 引言

全球气候变化已经对生态环境^[1]、人类健康^[2]、社会经济^[3]产生了一系列的影响。这些影响大多与近年来极端高温频发有关^[4],并且未来极端高温事件还会在发生频率、影响范围和温度强度上持续增强^[5-6]。这种灾害性天气会直接危害人类健康。当温度超过35 °C时,人体的生理活动,调节功能都会受到抑制,并且对老人和体弱多病等脆弱性人群的危害更加明显^[7]。同时,极端高温还会影响作物生长与粮食产量^[8-9],进而影响日常生产、生活。与此同时,致灾因子危险性评价是灾害脆弱性和灾害风险评估中必不可少的环节,在全国范围进行极端高温危险性评估,对高温高危区的灾害防治工作意义重大^[10-11]。在中国,由于复杂的地形与广阔的面积,使得气温的分布具有较大的空间异质性。因此,建立评价指标全面的高温危险性评价体系可以更好地刻画出高温灾害在不同区域的严重程度,为高温灾害防灾减灾决策与资源调配提供依据^[12-13]。

高温致灾因子需要时间分布、空间分布、强度3

个参数才能完整刻画^[14]。高温灾害危险性分析是高温灾害脆弱性与风险评价的基础^[15],而目前研究主要使用高温天数和高温强度去刻画高温危险性,忽略了高温灾害的空间集聚程度这一指标。例如,贺山峰等^[16]仅选取高温日数和热浪日数2个指标对中国未来高温致灾危险性时空格局进行了预估;雷杨娜等^[17]也仅以极端高温与高温日数为主要指标对中国21世纪夏季高温的变化进行了预估;谢盼等^[18]仅通过高温日数确定高温危险性,进行了中国高温灾害人群健康风险评价;Yin等^[19]使用最高温度以及持续高温日数计算高温危险性指标,对1951-2010年中国极端高温危险性进行了分析;苗爱梅等^[20]分析了山西省不同温度水平高温天数的空间分布特征及变化趋势,发现近年来高温日数增多,且高温持续时间、强度、范围都有增强趋势。上述研究表明,虽然当前学术界围绕极端高温危险性已经进行了较为深入的研究,但危险性评价很少考虑极端高温的空间集聚程度。

虽然高温日数和高温强度可以评价单一位置的高温严重程度,但无法刻画出单一位置发生极端高

温和临近区域同时出现极端高温的差异。然而,这种多个极端事件的组合会放大高温事件的影响,不仅会增强高温危险性,还会放大承灾体的脆弱性^[21]。现有研究表明,大范围的高温少雨天气会导致部分地区旱情发生发展,严重影响农作物产量^[22-23]。与此同时,唐恬等^[24]也认为极端高温天气的区域群发性是产生重大高温灾害的主要原因之一,对经济发展水平较高、人口密集的地区,群发性的极端高温易给当地交通、用水、用电等城市运行生命线以及社会经济生产造成更为严重的影响。

此外,高温危险性指标的年际变化趋势对高温灾害的预估与防治也有重要的意义。现有研究已详细说明了由统计学方法得到变化趋势在刻画气候变化时的适用性^[25-26],且气候变化趋势在短时间内也不会有很大的转折。危险性的变化趋势同样存在显著的地域差异,确定出不同地区的危险性变化速率,有助于各地政府提前部署高温资源调配工作、提高地区防灾减灾能力^[27-28]。当前研究集中分析高温日数、高温强度的变化趋势^[29-31],很少涉及高温灾害空间集聚程度的趋势分析。确定出空间集聚程度显著增强的地区,可以警示当地减灾部门提前做好应对大面积高温灾害的准备。

因此,本研究将主要以危害人类健康的高温灾害为研究对象,基于高温灾害的发生频次、空间集聚程度、高温强度3个指标,建立高温灾害综合危险性评价方法,较为全面地评价中国1979-2017年不同地区的高温综合危险性。同时,计算各项指标1979-2017年的年际变化速率,给出不同地区危险性的综合变化趋势。在综合危险性评价以及综合变化趋势分析的基础上开展高温灾害的风险评估可以使风险评估模型更为完备,并且有助于预估未来可能的高温高危险性区域。

2 数据源与研究方法

2.1 数据源

本研究数据主要包括:中国省级行政区划,用来界定研究区域(18.16°N-53.56°N、73.45°E-135.09°E);1979-2017年研究区气温格网数据,气温数据使用从欧洲中期天气预报中心网站^①获取的ECMWF Re-Analysis Interim (ERA-Interim)全球2 m气温数据产品,空间分辨率为0.75°×0.75°,时间分辨率为6 h。

① <http://apps.ecmwf.int/datasets>。

目前,ERA-Interim再分析数据集被广泛用于以中国为研究区的研究中^[32]。尽管有些研究指出,该数据集可能存在对极端高温的低估,但整体而言ERA-Interim再分析数据集可以较好地反映中国区域极端高温的空间分布规律,具有较高的可信度^[33]。此外,高路等^[34]借助中国756个观测站点的逐月平均气温数据,验证了ERA-Interim再分析资料在中国区域气温年际尺度研究中的适用性。

本研究旨在研究高温灾害的空间分布,高温日数的相对大小及空间分布情况是研究重点。考虑到站点资料的空间不连续,加之部分气象观测站由于设备损坏、迁站等外在原因导致的时间不连续问题,本研究在接下来高温危险性强度及变化率的年尺度分析中选用上述再分析数据集。

2.2 研究方法

本研究的整体思路见图1。

首先,进行高温灾害危险性分析。分析高温灾害首先需要明确高温日的定义,本文主要研究以人体健康为主要承灾体的高温灾害。参考目前针对人体健康的高温灾害研究的温度阈值设定,将35℃作为判断高温日的温度阈值^[11,18,35]。当某日最高气温超过35℃时将该日记为一个高温日。

然后,接下来通过年高温日数、平均高温强度、平均高温空间集聚程度来综合评价不同空间位置的高温危险性。

(1)年高温日数(*Avg_HD*):表征高温灾害发生频次的多年平均水平。统计1979-2017年逐年的高温日数,取各年高温日数的多年平均值为年高温日数。

$$Avg_HD_{loc} = \frac{\sum_{y=1979}^{2017} HD_{loc,y}}{39} \quad (1)$$

式中:*loc*表示空间位置(指对应统计单元的经纬度坐标,每个[经度,纬度]均简化为相应的*loc*编号);*y*表示年份;*HD_{loc,y}*表示某空间位置某年的全年高温日数;*Avg_HD_{loc,y}*表示某空间位置年高温日数的多年平均值。

(2)平均高温强度(*Avg_HTI*):表征高温灾害的温度水平。对某一空间位置,某年的高温强度为该年高温日最高温度超过温度阈值的平均值,取各年高温强度的平均值为该位置平均高温强度。

$$HTI_{loc,y} = \frac{\sum_{i=1}^{HD_{loc,y}} (t_{loc,i} - 35)}{HD_{loc,y}} \quad (2)$$

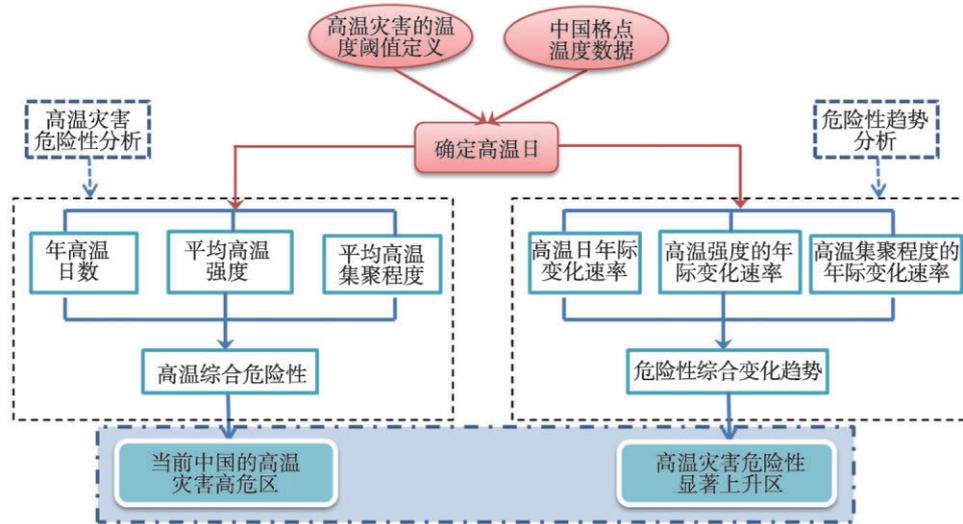


图1 高温灾害危险性评价与趋势分析流程

Fig. 1 Flowchart of the assessment and trend analysis of high-temperature hazards

式中： loc 表示空间位置； y 表示年份； $t_{loc,i}$ 表示某空间位置某一高温日的日最高温度； $HD_{loc,y}$ 表示某空间位置某年的全年高温日数； $HTI_{loc,y}$ 表示某空间位置某年高温日最高温度超过温度阈值的平均值，即该位置某年的高温强度

$$Avg_HTI_{loc} = \frac{\sum_{y=1979}^{2017} HTI_{loc,y}}{39} \quad (3)$$

式中： loc 表示空间位置； y 表示年份； $Avg_HTI_{loc,y}$ 表示某空间位置高温日最高温度超过温度阈值的多年平均值，即该位置的平均高温强度。

(3)平均高温空间集聚程度(Avg_HTSA)：表征高温灾害空间分布的集中区域范围。通过反距离权重法确定各空间邻接位置的权重，统计各高温点临近的 $3^\circ \times 3^\circ$ 范围内的加权高温事件数，加权事件数越多则高温空间集聚程度越大。

$$HTSA_{loc,y} = \frac{\sum_{i=1}^{HD_{loc,y}} \sum_{loci=1}^n \frac{1}{d_{loc,loci}^2} \times Case_{loc,loci,i}}{HD_{loc,y}} \quad (4)$$

式中： $d_{loc,loci}$ 表示 loc 和 $loci$ 之间的度距离； $Case_{loc,loci,i}$ 表示在位置 loc 高温日的同一天位置 $loci$ 是否为高温日(是为1，否为0)； $HTSA_{loc,y}$ 表示某空间位置某年的平均高温空间集聚程度。

$$Avg_HTSA_{loc} = \frac{\sum_{y=1979}^{2017} HTSA_{loc,y}}{39} \quad (5)$$

式中： loc 表示空间位置； y 表示年份； $Avg_HTSA_{loc,y}$ 表示某空间位置高温空间集聚程度的多年平均值。

(4)上述3项指标的归一化结果叠加，即为高温综合危险性：

$$HTCI_{loc} = N_Avg_HD_{loc} + N_Avg_HTI_{loc} + N_Avg_HTSA_{loc} \quad (6)$$

式中： loc 表示空间位置； $HTCI_{loc}$ 为某空间位置的高温综合危险性。

最后，采用一阶线性回归结合显著性检验，计算上述3项指标的变率，综合评价不同空间位置的高温危险性变化趋势。

(1)3项指标的年际变化速率由一元线性回归方程 $y_i = a_i + b_i t$ 求得。其中， t 为年份($t=1, 2, \dots, 39$ ，记1979年为 $t=1$)， a_i 为回归常数， b_i 为指标 i 的变化速率，最后通过假设检验提取出线性变化趋势的置信度超过95%($p < 0.05$)的区域。

(2)将3项指标变化速率的归一化结果叠加，提取出3项指标均随时间显著变化的区域。

3 结果及分析

在ArcGIS中对各空间位置的3项指标及其年际变化速率按自然断点法由低到高分1-4级。3项指标及其年际变化速率的空间分布均表现出明显的空间异质性。1979-2017年除新疆天山山脉、青藏高原、青海、云南、甘肃南部、四川西部以及贵州西部等地区外，其余地区均出现过高温灾害。上述地区属于高温灾害的无影响区域。

3.1 年高温日数及其变化速率的空间分布

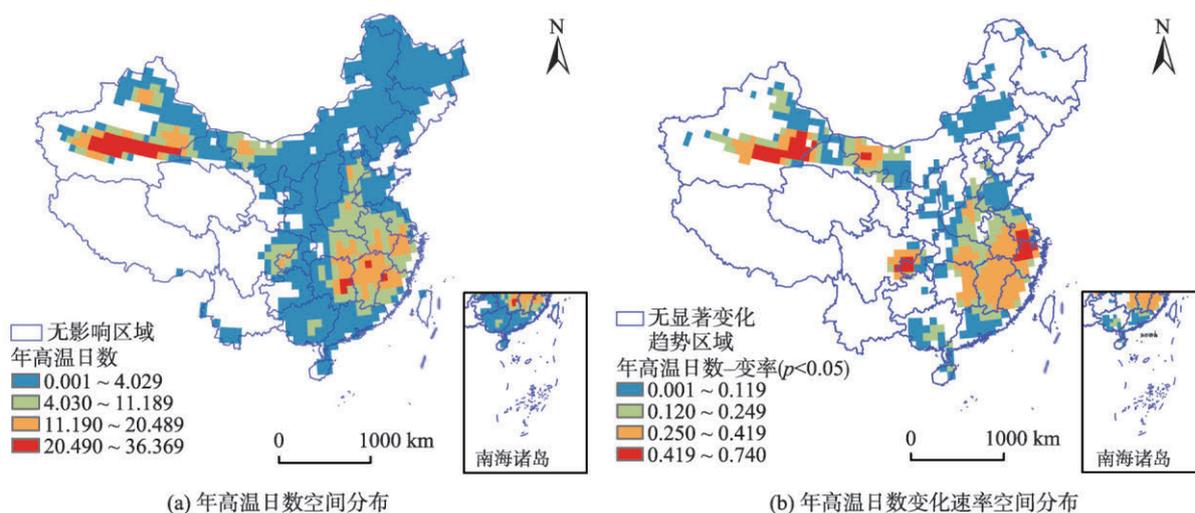
高温日数最高等级区域分布于新疆天山南部以及湖南、福建、江西等地(图2(a)),年平均高温日数在20~36 d,出现致灾性高温天气的频率较高。3级区域位于新疆西部和北部的部分地区、华东的大部分地区以及湖南、湖北,年平均高温日数在11~20 d。2级区域主要分布在四川东部以及中国东部各省,年平均高温日数在4~11 d。

除高温灾害的无影响区域外,高温日数在东北、华北的大部分地区均无显著的变化趋势(图2(b))。速率最高等级区分布在新疆西部、重庆西部及江浙

的交界处,其高温日数从1979~2017年随时间显著增加,年变化速率0.419~0.740天/年。若以该速率增长,这些地区未来的高温日可能从3级升高到4级。3级区域位于新疆中部、内蒙古西部、湖南西部、湖北南部及华东的大部分地区,年变化速率0.250~0.419天/年。

3.2 高温强度及其变化速率的空间分布

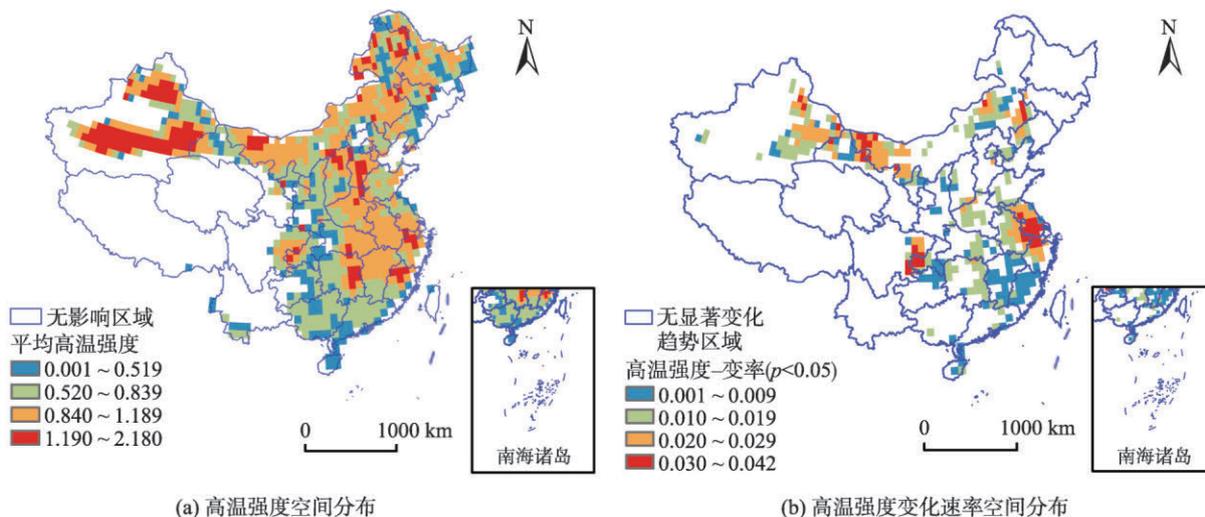
高温强度4级区域集中分布于新疆天山南部及北部,零星分布于内蒙古西部、东北部及河北、湖南、浙江、福建等地(图3(a)),超过温度阈值1.190~2.180℃,温度水平较高。3级区域集中分布于内蒙



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893号的标准地图制作,底图无修改。

图2 1979~2017年中国年高温日数及其变化速率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual high temperature days and change rate of the index from 1979 to 2017 in China



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893号的标准地图制作,底图无修改。

图3 1979~2017年中国高温强度及其变化速率的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of high temperature intensity and change rate of the index from 1979 to 2017 in China

古、河南、湖北、安徽、江西及四川重庆的交界处,年平均高温强度在 $0.840\sim 1.189\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。2级区域分布于内蒙古南部、山西陕西交界处、湖南西部、广西及广东等地,平均高温强度在 $0.520\sim 0.839\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

高温强度随时间显著变化的区域主要在新疆东部、内蒙古西部和中部以及东南部各省(图3(b))。速率最高等级区主要分布在内蒙古甘肃交界处、四川重庆交界处以及江苏浙江交界处,年变化速率 $0.30\sim 0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 。若以该速率增长,这些地区未来的高温强度可能从3级升高到4级。3级区域位于新疆东部、内蒙古西部、安徽东部及江苏北部等,年变化速率 $0.20\sim 0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 。

3.3 高温空间集聚程度及其变化速率的空间分布

高温空间集聚程度4级区域主要分布于内蒙古南部及东北部、山西北部、湖北安徽交界处等(图4(a))。这些地区出现致灾性高温时,临近地区同时达到高温的范围较大,年平均集聚程度在 $13.390\sim 18.710$ 个。3级区域集中分布于黑龙江内蒙古的交界处、新疆天山南部、安徽、江西、湖南湖北交界处及河南山东交界处等,年平均集聚程度在 $10.400\sim 13.389$ 个。2级区域分布于新疆、内蒙古中部、吉林辽宁交界处、湖南南部、广西及广东等,年平均集聚程度在 $7.560\sim 10.399$ 个。

高温空间集聚程度随时间显著变化的区域主要在新疆东部、内蒙古西部和中部以及东南部各省(图4(b))。速率最高等级区主要分布在内蒙古甘肃交界处、江苏山东交界处,年变化速率 $0.250\sim$

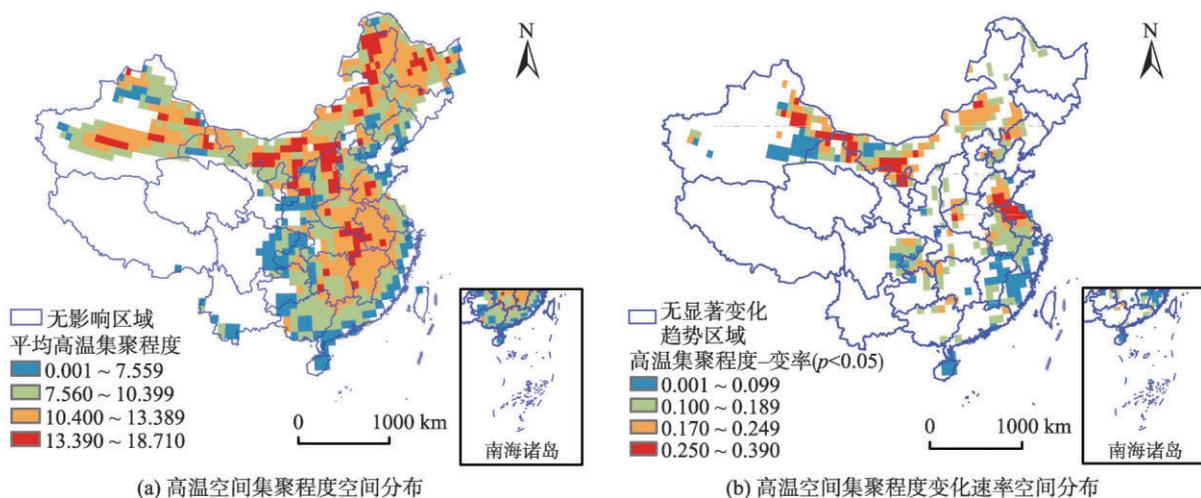
0.390 个/年。若以该速率增长,这些地区未来的高温空间集聚程度可能升高到4级。3级的区域位于内蒙古中部、内蒙古辽宁交界处及山东等,年变化速率 $0.170\sim 0.249$ 个/年。

3.4 高温综合危险性及各指标的综合变化趋势

基于高温日数、高温强度与高温空间集聚程度3项指标,由式(4)得到中国高温综合危险性(取值 $0\sim 3$),按自然断点法分1-4级(图5(a))。高温综合危险性最强(4级)的地区主要分布在新疆天山南部、湖南东部等地。3级区域集中分布于内蒙古西部、山西北部、华中各省的东部地区、安徽以及江西等地。2级区域分布于新疆北部、内蒙古大部、黑龙江、吉林西部、山西南部、山东等地。

将各指标变化速率的归一化结果叠加,提取出3项指标均随时间显著变化的区域为新疆东部、内蒙古甘肃交界处、内蒙古中部地区、四川重庆交界处以及华东的大部分地区(图5(b))。江苏、内蒙古甘肃交界处、四川重庆交界处为高温危险性升高趋势最强的地区。自1979-2017年以来,这些地区的高温日、温度、空间集聚程度均逐年显著增强。在未来这些地区可能成为高温综合危险性最高的地区。

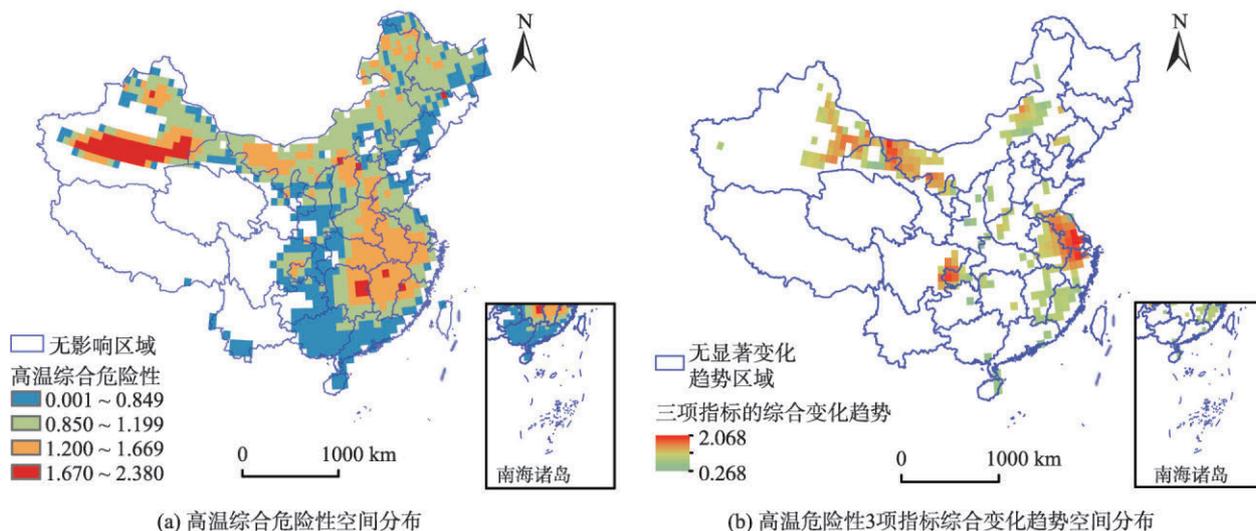
以往大多数研究多高温日数一个指标确定高温危险性^[15,17]。对比高温综合危险性结果(图5(a))与高温日数结果(图2(a)),可以发现只采用高温日数一个指标确定高温危险性会造成大范围的高温危险性被低估。被低估的地区主要出现在高温强度高、高温空间集聚程度高但是高温日数较少的地



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893号的标准地图制作,底图无修改。

图4 1979-2017年中国高温空间集聚程度及其变化速率的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of high temperature spatial aggregation degree and change rate of the index from 1979 to 2017 in China



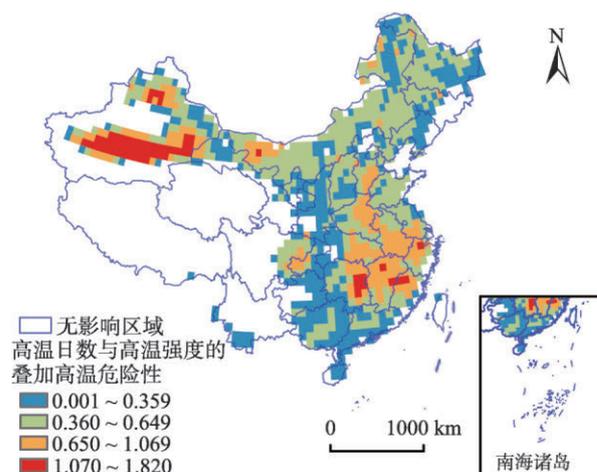
注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893号的标准地图制作，底图无修改。

图5 1979–2017年中国高温综合危险性及各指标的综合变化趋势的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of integrative high temperature hazardness and integrative change trend of the indices from 1979 to 2017 in China

区。例如，内蒙古大部分地区的高温危险性被低估，该区域大部分高温日数1级的地区，其综合危险性为2–3级。被低估的地区其高温强度基本在2–3级，高温空间集聚程度基本在3–4级。黑龙江、山东等地的高温日数1级区域，其综合危险性为2级。被低估的地区其高温强度基本在2–3级，高温空间集聚程度基本在3–4级。安徽大部分地区的高温日数为2级，但其综合危险性为3级。被低估的地区其高温强度与空间集聚程度基本在3级。山西省北部的高温日数为1级，而其综合危险性为3级。被低估的地区其高温强度基本在3级，高温空间集聚程度基本在4级。

目前也有研究同时使用高温日数与高温强度来确定高温危险性^[18,36]。对比高温综合危险性结果(图5(a))与高温日数、强度叠加的危险性结果(图6)，可以发现加入高温强度指标可以修正部分危险性被低估的地区，包括内蒙古的中部地区、黑龙江与山东的大部分地区。由于没有考虑到高温的空间集聚程度，其他地区的高温危险性依旧存在低估现象。例如，内蒙古西部大部分地区的综合危险性基本为3级，叠加高温日数和高温强度后，西部依旧只有很少的地区为3级，大部分地区为2级，依旧被低估的地区其空间集聚程度为4级(图4(a))。内蒙古东北部地区的综合危险性为2–3级，叠加高温日数和高温强度后，该区域的危险性基本为1级，依旧被低估的地区其空间集聚程度为3–4级。山西



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2893号的标准地图制作，底图无修改。

图6 1979–2017年中国高温日数与高温强度的叠加高温危险性

Fig. 6 Integrated hazardness of high temperature days and high temperature intensity degree from 1979 to 2017 in China

北部地区的综合危险性为3级，叠加高温日数和高温强度后，该区域的危险性基本为2级，依旧被低估的地区其空间集聚程度为4级。

4 结论与展望

4.1 结论

本文在传统高温灾害危险性评价的基础上增

加了高温空间集聚程度指标,完善了高温危险性的评价角度,考虑到了高温灾害群发对高温危险性的增强作用。本研究基于高温日数、高温强度、高温空间集聚程度对1979-2017年我国高温危险性进行综合评价,分析了各项指标及其年际变化速率的空间分布特征,提取出高温综合危险性强的区域以及各指标同时增强的区域。主要结论如下:

(1) 目前高温综合危险性最强的地区分布在新疆天山南部、湖南东部等地。江苏、内蒙古甘肃交界处及四川重庆交界处等地的高温日、温度、空间集聚程度均逐年显著增强。在未来这些地区可能成为高温综合危险性最高的地区。

(2) 只考虑高温日数确定高温危险性会造成内蒙古大部分地区、黑龙江、山东及西省北部等地区的高温危险等级被低估。同时,使用高温日数与高温强度确定高温危险性,而不考虑空间集聚程度会造成内蒙古西部及东北部、山西北部等地的高温危险等级被低估。

(3) 目前高温灾害出现频率最高的地区分布于新疆天山南部、湖南、福建以及江西等地;高温灾害温度水平最高的地区集中在新疆天山南部及北部,零星分布于内蒙古西部、东北、河北、湖南、浙江及福建等地;高温空间集聚程度最强的地区主要分布于内蒙古南部及东北部、山西北部、湖北安徽交界处等地。

(4) 若保持1979-2017年的变化趋势,新疆西部、重庆西部及江浙交界处等地未来发生高温灾害的频率可能升高至4级;内蒙古甘肃交界处、四川重庆交界处及江浙交界处等地未来高温灾害的温度水平可能升高至4级;内蒙古甘肃交界处及江苏山东交界处等地未来高温灾害的空间集聚程度可能升高至4级。

该危险性综合评价方法的建立在高温灾害研究中有非常重要的科学意义。该危险性评价方法基于更加全面的评价指标确定出高温灾害的综合高危区,可以减少危险被低估的区域,在综合危险性评价的基础上开展高温灾害的风险评估可以使风险评估结果更加准确。

4.2 展望

本研究中,高温综合危险性通过3项指标归一化结果等权重叠加得到,这样处理是为将综合评价结果和传统指标评价结果(高温日数与高温强度的叠加结果)进行对比,分析高温集聚程度对危险性

评价的影响。但是在未来高温危险性评价中,由于高温日数、高温强度和高温集聚程度对高温灾害危险性的影响程度不同,故等权重计算综合强度存在问题。确定各项指标的权重是该危险性综合评价方法在未来实际推广中不可避免的问题,值得研究者后续深入研究。

此外,该方法还可以确定出单一因素的高危区、识别不同地区高温危险性的主导因素,未来可用于高温危险性的主导因素分区,为全国范围内进行有针对性地高温防治、资源调配等措施提供科学依据。同时,在未来的高温灾害风险评估中也应该考虑到高温危险性的变化趋势,并对危险性显著增强的区域应更加关注。

参考文献(References):

- [1] Jeppesen E, Kronvang B, Meerhoff M, et al. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009,38(5):1930-1941.
- [2] Dhara V R, Schramm P J, Lubner G. Climate change & infectious diseases in India: Implications for health care providers[J]. *Indian Journal of Medical Research*, 2013, 138(6):847-852.
- [3] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [4] Sheridan S C, Allen M J. Changes in the frequency and intensity of extreme temperature events and human health concerns[J]. *Current Climate Change Reports*, 2015,1(3): 155-162.
- [5] IPCC. Climate Change 2007. Working group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[C]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [6] Perkins S E, Alexander L V, Nairn J R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(20):20714.
- [7] 刘娅,杜宗豪,王越,等. 2010年北京热浪对医院急诊量的影响[J]. *华南预防医学*,2014(4):322-326. [Ya L , Du Z H, Yue W , et al. Impacts of heat waves on emergency department visits in Beijing, 2010[J]. *South China Journal of Preventive Medicine*, 2014(4):322-326.]
- [8] 李懿珈,叶涛,王尧,等.湖南省水稻气象灾害多致灾因子时空特征研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017,53(1):99-104. [Li Y J, Ye T , Wang Y, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of paddy rice meteo-

- rological multi-hazard in Hunan Province[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017,53(1): 99-104.]
- [9] 杨绚,汤绪,陈葆德,等. 气候变暖背景下高温胁迫对中国小麦产量的影响[J]. 地理科学进展,2013,32(12):1771-1779. [Yang X, Tang X, Chen B D, et al. Impacts of heat stress on wheat yield due to climatic warming in China [J]. Progress in Geography, 2013,32(12):1771-1779.]
- [10] 陈香. 福建省台风灾害风险评估与区划[J]. 生态学杂志, 2007,26(6):961-66. [Chen X. Risk assessment and zonation of typhoon disasters in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(6):961-966.]
- [11] 陈倩,丁明军,杨续超,等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价[J]. 地球信息科学学报,2017,19(11):1475-1484. [Chen Q, Ding M J, Yang C X, et al. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta Region, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(11):1475-1484.]
- [12] 宋晨阳,王锋,张韧,等. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估[J]. 灾害学,2016,31(4):201-206. [Song C Y, Wang F, Zhang R, et al. Risk analysis and assessment of high-temperature and heat-wave disaster in chinese cities under the background of climate change[J]. Journal of Catastrophology, 2016,31(4):201-206.]
- [13] 陈楠,黄玉芳,冯雪. 基于GIS的菏泽市高温灾害风险评估与区划[J]. 中国农学通报,2016,32(35):184-187. [Chen N, Huang Y F, Feng X. High temperature disaster: risk assessment and zoning based on GIS in Heze[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016,32(35):184-187.]
- [14] 王静爱,史培军,朱骊. 中国主要自然致灾因子的区域分异[J]. 地理学报,1994,49(1):18-26. [Wang J A, Shi P J, Zhu L. A research on regional distribution of major natural hazards in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1994,49(1):18-26.]
- [15] 谢盼,王仰麟,彭建,等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价-研究进展与框架[J]. 地理科学进展,2015, 34(2):165-174. [Xie P, Wang Y L, Peng J, et al. Health related urban heat wave vulnerability assessment: research progress and framework[J]. Progress In Geography, 2015, 34(2):165-174.]
- [16] 贺山峰,戴尔阜,葛全胜,等. 中国高温致灾危险性时空格局预估[J]. 自然灾害学报,2010,19(2):91-97. [He S F, Dai E F, Ge Q S, et al. Pre-estimation of spatiotemporal pattern of extreme heat hazard in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2010,19(2):91-97.]
- [17] 雷杨娜,龚道溢,孙娴,等. 基于全球模式对中国21世纪夏季高温的变化预估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010,46(1):85-91. [Lei Y N, Gong D Y, Sun X, et al. Evaluating the simulation by GCMS of summer high-temperatures in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010,46(1):85-91.]
- [18] 谢盼,王仰麟,刘焱序,等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价[J]. 地理学报,2015,70(7):1041-1051. [Xie P, Wang Y L, Liu Y X, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015,70(7):1041-1051.]
- [19] Yin Z E, Yin J, Zhang X. Multi-scenario-based hazard analysis of high temperature extremes experienced in China during 1951-2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013,23(3):436-446.
- [20] 苗爱梅,贾利冬,李苗,等. 近50年山西高温日的时空分布及环流特征[J]. 地理科学进展,2011,30(7):837-845. [Miao A M, Jia L D, Li M, et al. The temporal and spatial distributions and circulation features of high temperature days during last 50 years in Shanxi[J]. Progress in Geography, 2011,30(7):837-845.]
- [21] 史培军,吕丽莉,汪明,等. 灾害系统:灾害群、灾害链、灾害遭遇[J]. 自然灾害学报,2014,23(6):1-12. [Shi P J, Lv L L, Wang M, et al. Disaster system: Disaster cluster, disaster chain and disaster compound[J]. Journal of Natural Disasters, 2014,23(6):1-12.]
- [22] 钱永兰,吕厚荃,韩丽娟,等. 2011年夏季气候对农业生产的影响[J]. 中国农业气象,2011,32(4):638-639. [Qian Y L, Lv H Q, Han L J, et al. 2011年夏季气候对农业生产的影响[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011,32(4):638-639.]
- [23] 刘维,韩丽娟. 2016年夏季气候对农业生产的影响[J]. 中国农业气象,2016,37(5):611-613. [Liu W, Han L J. 2011年夏季气候对农业生产的影响[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011,37(5):611-613.]
- [24] 唐恬,金荣花,彭相瑜,等. 2013年夏季我国南方区域性高温天气的极端性分析[J]. 气象,2014,40(10):1207-1215. [Tang T, Jin R H, Peng X Y, et al. Analysis on extremely high temperature over southern China in summer 2013 [J]. Meteorological Monthly, 2014,40(10):1207-1215.]
- [25] Zwiers F W, Von Storch H. On the role of statistics in climate research[J]. International Journal of Climatology, 2004,24(24):665-680.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:36-69. [Wei F Y. Modern Technology of Statistics Diagnosis and Forecast for Climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007:36-69.]
- [27] 高荣,王凌,高歌. 1956-2006年中国高温日数的变化趋势[J]. 气候变化研究进展,2008,4(3):177-181. [Gao R,

- Wang L, Gao G. The Trend of Variation in High Temperature Days During 1956-2006 in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008,4(3):177-181.]
- [28] 叶殿秀,尹继福,陈正洪,等. 1961-2010年我国夏季高温热浪的时空变化特征[J]. *气候变化研究进展*,2013,9(1):15-20. [Ye D X, Yin J F, Chen Z H, et al. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961-2010[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013,9(1):15-20.]
- [29] 任景全,郭春明,刘玉汐,等. 1961-2015年吉林省极端气温指数时空变化特征[J]. *生态学杂志*,2017,36(11):3224-3234. [Ren J Q, Guo C M, Liu Y X, et al. Spatiotemporal change characteristics of extreme temperature indices in Jilin Province during 1961-2015[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017,36(11):3224-3234.]
- [30] 陈正洪,向华,高荣. 武汉市10个主要极端天气气候指数变化趋势分析[J]. *气候变化研究进展*,2010,6(1):22-28. [Chen Z H, Xiang H, Gao R. Trends of ten main extreme weather indices in Wuhan[J]. *Climate Change Research*, 2010,6(1):22-28.]
- [31] 周洋,祝善友,华俊玮,等. 南京市高温热浪时空分布研究[J]. *地球信息科学学报*,2018,20(11):1613-1621. [Zhou Y, Zhu S Y, Hua J W, et al. Spatio-temporal distribution of high temperature heat wave in Nanjing[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(11):1613-1621.]
- [32] Chen Y, Hu Q, Yang Y M, et al. Anomaly based analysis of extreme heat waves in Eastern China during 1981-2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2017,37(1):509-523.
- [33] 高路, Karsten Schulz, 陈兴伟,等. 基于ERA-Interim再分析资料的中国极端气温分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014,12(2):75-78. [Gao L, Schulz K, Chen X W, et al. Analysis of extreme temperatures in China based on ERA-Interim reanalysis data[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014,12(2):75-78.]
- [34] 高路,郝璐. ERA-Interim气温数据在中国区域的适用性评估[J]. *亚热带资源与环境学报*,2014,9(2):75-81. [Gao L, Hao L. Verification of ERA-Interim reanalysis data over China[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014,9(2):75-81.]
- [35] 赵颜创,赵小锋,刘乐乐. 厦门市高温热浪人群健康风险格局分析[J]. *地球信息科学学报*,2016,18(8):1094-1102. [Zhao Y C, Zhao X F, Liu L L. Spatial pattern analysis on human health risk of heatwave in Xiamen city[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016,18(8):1094-1102.]
- [36] 黄慧琳,缪启龙,潘文卓,等. 杭州市高温致灾因子危险性风险区划[J]. *气象与减灾研究*,2012,35(2):51-56. [Hang H L, Miu Q L, Pan W Z, et al. Risk zoning of high-temperature disaster-inducing factors in Hangzhou [J]. *Meteorology & Disaster Reduction Research*, 2012, 35(2):51-56.]