

引用格式:王琛智,张朝,周脉耕,等.低温对中国居民健康影响的空间差异性分析[J].地球信息科学学报,2017,19(3):336-345. [Wang C Z, Zhang C, Zhou M G, et al. 2017. Analyzing the spatial differences of the relationships between low temperature and health risk in China. Journal of Geo-information Science, 19(3):336-345.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00336

低温对中国居民健康影响的空间差异性分析

王琛智^{1,2},张朝^{1,2,3*},周脉耕⁴,殷鹏⁴,陶福祿⁵,金月雄⁶

1. 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; 2. 北京师范大学减灾与应急管理研究院,北京 100875; 3. 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; 4. 中国疾病预防控制中心慢性非传染性疾病预防控制中心,北京 100050; 5. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101; 6. 中国人民财产保险股份有限公司湖州分公司,湖州 313000

Analyzing the Spatial Differences of the Relationships Between Low Temperature and Health Risk in China

WANG Chenzhi^{1,2}, ZHANG Zhao^{1,2,3*}, ZHOU Maigeng⁴, YIN Peng⁴, TAO Fulu⁵ and JIN Yuexiong⁶

1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, MOE & MCA, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Surveillance Branch, National Center for Chronic and Non-communicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 10050, China; 5. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 6. Peoples Insurance Company of China Huzhou branch, Huzhou 313000, China

Abstract: Global warming has increased the frequency of meteorological disasters, especially extreme temperature events. Many previous studies have reported that human health risk is very sensitive to temperature and climate change was considered to be the most severe global health threat in the 21st century. Nowadays, the research on the impact of extreme temperature on public health has been a hotspot. Compared to those in developed countries, the related studies have started late in China. Moreover, there are three limitations in these studies. (1) Most of such studies focused only on one city or a few cities and the studies on the whole country are few. (2) The previous studies have not quantitatively identified the influence of temperature on health because the spatial scales were based on administrative regions, not on temperature zones. (3) Comparing with many studies on hot wave, relatively fewer are concerned with the influence of extreme low temperature. To overcome aforementioned problems, we collected the mortality dataset and meteorological variables of 127 communities in China during 2007 to 2012 from China Center for Disease Control and Prevention and pooled the community-specific cold risk in various latitude-effected temperature zones with the meta-analysis method. Then, we utilized the Distributed lag non-linear model (DLNM) at community level to investigate temperature-mortality relationship in different temperature zones and calculated the relative risk (RR) of extreme low temperature on mortality. The results showed that although temperature-mortality curves at the community level appeared huge differences, the

收稿日期:2016-06-01;修回日期:2016-07-11.

基金项目:国家自然科学基金项目(41571493,41571088);教育部-国家外国专家局高等学校创新引智计划(B08008)。

作者简介:王琛智(1992-),男,江苏徐州人,硕士生,主要从事公共健康风险分析,灾害风险分析等方面的研究。

E-mail: chenzhiwang@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者:张朝(1971-),女,湖南湘潭人,副教授,研究方向为自然灾害风险评估,地理化学与人类健康。

E-mail: zhangzhao@bnu.edu.cn

pooled curves were generally U- or J- shaped in these five zones. Temperature-mortality curves in three zones (the sub-temperate region, warm temperate region and north subtropical region) were all U-shaped, indicating both low and high temperatures could increase significantly mortality risk. Moreover, the curves appeared J-shaped in other two zones (the middle subtropical region and south subtropical region). The most significant cold effect was observed in middle subtropical, with a RR of 1.93 (95% CI: 1.08-3.60); while the cold effect in north subtropical was not so obvious, with a RR of 1.27 (95% CI: 0.94-1.72). Based on this, an M-shaped curve of the cold risk was found across Chinese mainland. This means the risks of cold-related mortality are high in warm temperature and middle subtropical zone, moderate in sub-temperate and south subtropical zone, and low in north subtropical zone. Low temperature does show significant impact on temperature-mortality risk, but considering the M-shaped risk curve, we believe social-economic factors should also be taken into consideration. To explain this phenomenon, we collected the social-economic data including population and GDP and found that the highest per capita GDP matched with the lowest cold-related risk, while the related lower per capita GDP matched with the highest cold-related risk. Based on these findings, different characteristics of mortality of cold stress highlighted that not only ambient temperature but also social-economic condition can be a main factor controlling health risk. Our findings also suggest that more adaptive and effective measures especially increasing investment on public health are necessary, especially for the middle subtropical zone, to reduce health risks in China.

Key words: temperature and public health; low temperature; DLNM model; climate change; spatial difference

*Corresponding author: ZHANG Zhao, E-mail: zhangzhao@bnu.edu.cn

摘要: 全球变暖导致气象灾害频发,尤其是极端天气事件。极端温度对公共健康的影响已成为当今研究的热点问题之一。相比于发达国家,中国在该领域研究起步较晚。虽然已有出色的成果,但在以下3个方面还略显不足:①大多数研究基于一个城市或几个城市,缺乏基于大量数据的区域尺度的研究;②已有研究往往按地理因素或行政单位来划分区域,而忽视区域内温度的异质性;③相比高温热浪,鲜少有研究关注低温冷害的影响。针对上述问题,本文收集了中国疾病预防控制中心2007-2012年全国127个站点的数据,利用分布式滞后非线性模型,探究了中国5个温度带温度与居民非意外死亡之间的暴露-反应曲线。在此基础上,定义当地温度分布1%处的温度为极端低温,根据温度-死亡风险曲线,计算了冷害造成的死亡风险。结果表明,不同温度带的温度-死亡关系曲线呈现U型或J型。极端低温对北亚热带影响最小,其相对风险为1.27(95% CI: 0.94-1.72);对中亚热带影响最大,其相对风险为1.93(95% CI: 1.08-3.60)。随着温度带温度的升高,低温冷效应的影响呈现“M”型,这一特征与不同温度带经济发展有关。因此,不同地区的政府除了应着力提高地区经济发展外,还应根据地区特征,采取更积极有效的措施来应对低温冷害可能给当地公共健康造成的威胁。

关键词: 温度与公共健康;低温;DLNM模型;气候变化;空间分异

1 引言

现有大量研究表明,地球正经历一次以全球变暖为主要特征的气候变化。气候变化和人类的生产生活息息相关。世界卫生组织(WHO)认为,全球气候变化是21世纪人类健康面临的最大挑战^[1]。据WHO估计,自20世纪70年代以来,气候变化直接或间接造成的居民死亡已达150 000人^[2]。因此,理解环境温度与人类健康的关系,评估极端事件(热浪或寒潮)对居民健康的影响是应对气候变化对公共健康影响的重要举措。

在全球气候变化的大背景下,越来越多的研究

人员开始关注气温-死亡关系及其特征。欧洲、美国等发达国家就环境温度对居民死亡的影响做了大量的研究,特别是对高温热浪影响的评估。在欧洲地区,西班牙地区的温度与非意外死亡响应曲线整体呈现“V”型,但各地存在着差异^[3];而基于欧洲地区15个城市的研究表明社会经济因素对温度-死亡风险的关系有修饰作用^[4];由于欧洲地区高温热浪影响较为显著,有大量的研究分别探索了德国、法国^[5-6]等国家高温热浪和居民健康的关系。北美地区,Anderson等利用美国107个城市的人口死亡数据和温度数据,发现气温-死亡风险曲线存在明显的空间差异性,同时高温热浪对死亡的影响时间

短且剧烈^[7];Curriero等基于美国东部11个城市的研究表面,不同地区的最适环境温度有差异,跟当地环境温度的上四分位数相近^[8];近年来,中国学者也开始关注气候变化背景下环境温度与居民健康关系的问题。相关研究的不仅讨论了不同空间尺度的温度-死亡风险关系^[9],还涉及气温与不同疾病死亡关系的讨论^[10]。此外,还有一些研究关注高温热浪对中国居民的影响^[11]。

大量研究表明,温度-死亡关系是一个复杂的地理现象,不仅受环境的影响,还受经济发展水平、基础医疗条件等因素的制约^[4,7,12]。中国幅员辽阔,地区之间自然因素和社会发展水平有明显差异。然而,目前中国关于环境温度与居民健康方面的研究多为基于单个城市或几个城市的研究,并且这些城市大多为上海、天津、南京、武汉、兰州等大城市^[13-17]。IPCC指出气候变暖对中国影响尤为突出^[18-19]。因此,关注气候变化对中国公共健康的影响十分必要。但现有研究仍存在3个方面问题:①缺乏区域尺度的研究。已有研究大多还是集中在沿海沿江大城市,但仅靠一个或几个城市的结果难以表征区域尺度温度对公共健康的影响;②已有研究区域的常常按行政区域划分,这种方式忽略了一个区域可能包含两个或多个温度带的情况,使结果不能充分体现区域内温度与死亡的关系;③较多的研究着眼于高温热浪对健康影响的评估,对于冷效应造成的健康风险鲜少有关注。气候变化会使寒潮加剧,而已有研究表明极端低温会导致居民死亡风险的增加^[20-21]。

针对上述问题,本文基于大量站点级数据,利用分布式滞后非线性模型,定量描述不同地区居民的气温-死亡关系,评估不同区域低温冷害的风险,分析空间差异性,进而比较不同区域低温效应对居民健康的影响。研究结果可以作为相关部门应对气候变化对公共卫生所造成影响进行评估时的理论依据与支撑。

2 研究区地理背景和数据

为进一步探究低温与中国居民死亡风险的关系,本研究以温度带来划分研究区域。依据郑景云等^[22-23]对中国气候的区划,将中国从北到南依次划分为寒温带、中温带、暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带以及高原气候区。根据站点范围,研究

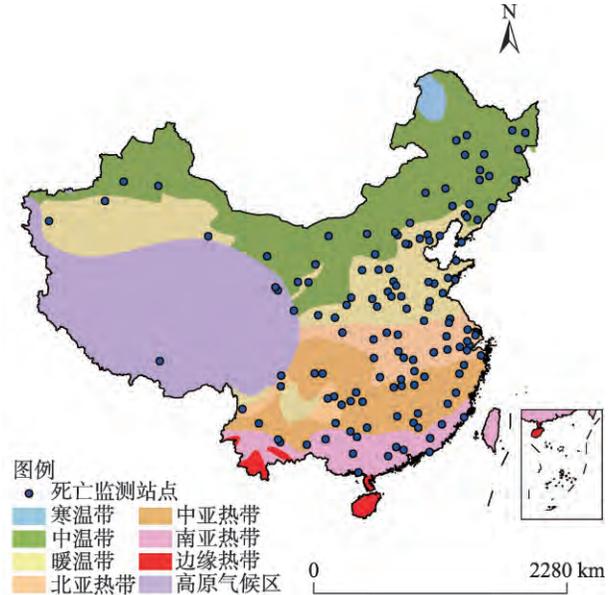


图1 本研究所用死亡监测站点空间分布示意图

Fig. 1 The distribution map of 127 DSPs covered in this study

区选取中温带、暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带,共计5个温度带。研究区站点分布如图1所示。

研究所用数据主要包括人口死亡数据、气象数据和经济数据。死亡数据是从中国疾病预防控制中心(Chinese Center for Disease Control and Prevention, CDC)的死因监测点系统(Death Surveillance Points System, DSP)收集获取的。所使用的数据集包含2007-2012年127个监测站点逐日的居民死亡数据。死因监测系统所包含的站点是利用分层聚类随机抽样法所选取的具有代表性的区县,监测结果准确全面^[24-25]。死亡数据资料包括死者个人信息、国际疾病伤害及死因分类标准(ICD-10)的编码以及死亡日期等信息。为探究低温对中国居民健康的影响,选取数据不应针对一种或几种死因,因此,本研究选取了非意外死亡数据。研究所用的气象数据集是基于中国气象科学数据共享服务网的600个站点的所制作气象变量插值数据。该数据集的精度和适用性较好^[26],得到广泛认可。所选气象指标包括日均气温、日最高气温、日最低气温、日相对湿度共4项。其中,利用日均气温和日相对湿度构造模型,日最高最低气温用来描述各站点在不同温度带的气象状况。此外,为进一步探究极端低温对居民健康的影响与社会经济因素的关系,本研究根据统计年鉴资料收集整理了各站点2007-2012年人均GDP和人口数据,最终选择各个站点6年人均GDP均值作为衡量社会经济发展水平的指标。

3 温度对中国居民健康的影响分析

3.1 模型构建

高温对人体影响较快,高温日后3天内就会增大人体死亡风险;而低温影响较为缓慢持续时间较长,一般滞后时间可达2-3周^[27-28]。因此,为充分地表征滞后效应对居民死亡风险增加的影响,本文选取了分布式滞后非线性模型(DLNM)来描述气温-死亡风险关系^[29]。

模型构建分为2个阶段:①利用死亡数据、气象数据逐站点构建气温-死亡风险关系模型;②为探究不同温度带的气温-死亡人口差异性,利用多元Meta分析,将同一温度带内不同站点的气温-死亡风险进行综合,获得不同温度带的气温-死亡风险关系,最终分析其差异性^[30]。

在第①阶段,首先利用DLNM模型来建立各个监测站点的气温-死亡风险模型。以日非意外死亡人数为因变量,利用日平均气温和滞后时间建立交叉基函数为自变量,同时控制星期几和节假日等混杂因素的干扰,分析温度、湿度与人口死亡数量间的关系。具体模型公式如式(1)所示。

$$\text{LogE}(Y_t) = \alpha + cb(T_{mean}, lag) + ns(Rh_t, df = 3) + ns(Time_t, df = 9) + \beta Dow_t + \gamma Hoilday_t \quad (1)$$

式中: Y_t 为 t 日的死亡人数; cb 是日均温度和最大滞后天数建立的交叉矩阵; ns 是自然立方样条函数; Rh_t 是相对湿度; $Time_t$ 为时间序列变量; Dow_t 是哑变量,用来描述时间 t 为星期几; $Hoilday_t$ 是描述 t 是否为节假日的二元变量,用以判断医院的影响;研究中参考历年政府放假安排进行编码, γ 为其系数; Dow 和 $Hoilday_t$ 都是依照模型原理并结合已有研究进行选取^[31-32]; df 为自由度,本文自由度选取依据相关文献^[9,11,29]并结合赤池信息准则实现的; α 为模型截距。根据已有相关研究结合对最大滞后天数敏

感性的分析,本研究的最大滞后天数 lag 设置为21。利用R语言(R 3.1.2)及DLNM函数包构建模型,计算各站点不同温度的相对风险(RR)。

在第②阶段,根据各个站点的气温-死亡风险关系,利用多元Meta分析的方法来综合同一温度带内站点尺度结果,获得二者在区域尺度上的关系。多元Meta分析专门用来综合小尺度的,受多变量影响的非线性关系,从而获得区域尺度的2个变量之间的关系及特征。有大量的研究采用该方法来计算大尺度的^[30,33]。研究中采用了Gasparrini等开发的适用于R语言的多元Meta分析的函数包("mvmeta")。

为探究低温对中国居民健康的影响,根据已有大量的研究,将每个地区1%处温度的死亡风险作为表征该地区低温冷效应影响的指标^[9]。基于上述两个阶段构建的模型和所选指标,结合不同温度带气温特征,进而分析低温对中国居民死亡风险的空间差异性。此外,由于模型对滞后天数较为敏感,需分析不同滞后天数对结果的影响。

为进一步验证分析结果的有效性,选择了基于空间分异理论的地理探测器模型^[34-35]来对比Meta分析结果。该模型最早就应用于健康风险评估领域,包括:风险探测器、因子探测器、生态探测器和交互探测器。在环境健康、区域发展、考古等^[36-38]研究领域广泛应用。本文利用该模型来确定不同温度带的低温风险是否和Meta分析结果一致。

3.2 结果分析

表1汇总了研究区的基本情况。具体包括了2007到2012年间5个温度带共计127个死亡监测站点的人口死亡信息,气象因素,人均GDP和区域人口信息。本研究共包含了约180万个死亡案例。从表1可进一步看出,每日平均非意外死亡人数的范围为3-9。日均气温随着温度带纬度降低而逐渐升高,大致从6°到21°。研究区相对湿度的范围为

表1 各区域2007-2012年气象因素、居民死亡情况和经济因素基本情况

Tab. 1 Summary statistics for five temperature zones from 2007 to 2012

	中温带	暖温带	北亚热带	中亚热带	南亚热带
死亡监测站数目(城市,农村)	26 (12, 14)	35 (14,21)	28 (12, 16)	19 (6, 13)	14 (5, 9)
日均非意外死亡数目	6(0, 65)	9(0,78)	8(0, 142)	7(0, 67)	9(0, 58)
气温均值/°C(最小值,最大值)	6.22 (-0.50, 33.08)	12.38 (-8.36, 32.80)	16.96 (-5.76, 33.89)	18.18 (-5.41, 34.15)	21.29 (0.21, 32.25)
相对湿度均值/%	58.69	62.47	72.92	74.73	74.87
人均GDP/元	24235.61	45266.47	56338.99	26131.88	45960.38
人口/万人	1521.48	1995.26	1488.86	996.54	875.07

57.64%到74.87%。大量环境健康方面的研究表明,社会经济因素对于气温-死亡关系具有修饰作用。因此,除环境要素外,本文还考虑了不同地区人口状况和社会经济状况。

3.2.1 模型参数敏感性分析

利用DLNM模型分析气温-死亡关系,滞后时间的选取会直接影响死亡相对风险的结果。因此,本文尝试给出能够充分表征冷效应影响结果的最大滞后天数。选取的最大滞后时间分别为3、7、15、21 d,结果如图2所示。由图2可看出,低温冷效应的风险随着最大滞后时间的增加而增强,不同最大滞后天数计算的低温冷效应的影响差异较为显著的。换言之,低温冷效应造成的相对风险对最大滞后天数较为敏感。通过对模型敏感性的分析,结合已有研究,最终选取21 d为最大滞后天数。

3.2.2 站点尺度低温与居民非意外死亡的暴露-反应关系分析

本文利用DLNM模型绘制了127个站点的气温与居民非意外死亡的暴露-反应曲线,进而计算了低温冷效应对居民的影响。由于数据量较大,文中仅列出不同温度带部分站点的暴露-反应曲线,如表2所示。相对风险超过1说明存在风险,相对风险越大表明温度对死亡造成的影响越显著。相

对风险值最低点的横坐标我们称之为MMT(Min-Mortality Temperature),也可理解为最适环境温度。从表2可看出,不同区域的气温-死亡关系曲线大致呈现U型、V型和J型,这与大量已有的结论一致,即低温和高温都会造成死亡风险的增加。此外,本文还计算了127个站点高温和低温的相对风险的均值。其中,高温热效应造成的相对风险为1.17,低温冷效应的相对风险为1.63(高温定义为该站点日均温度分布的99%处的温度,低温定义为1%处的温度)。

3.2.3 不同温度带低温与居民死亡关系分析

图3是利用多元Meta分析函数包对站点结果进行综合后,分离出低温效应致死风险得到的结果。从图3(a)可看出,不同温度带低温冷效应影响有明显区别。在北亚热带冷效应致死风险最低,为1.27(CI 95%:0.94, 1.72);在中亚热带冷效应影响最为显著为1.93(CI 95%: 1.08, 3.60)。图3(b)可看出,随着温度带温度的升高,冷效应的风险并不是单纯的递增或递减,而是呈现“M”型。

3.2.4 低温致死风险的空间差异性分析

为验证Meta分析得到不同温度带低温影响死亡风险的可靠性,利用地理探测器中的风险探测器来搜索风险较高和较低区域,同时比较不同区域之

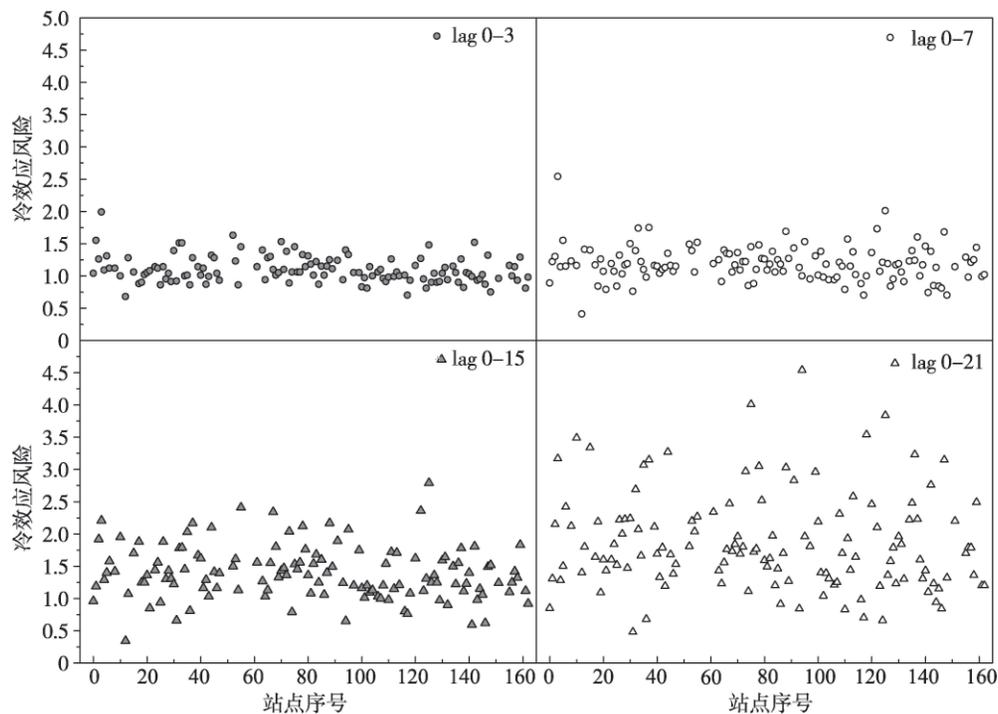
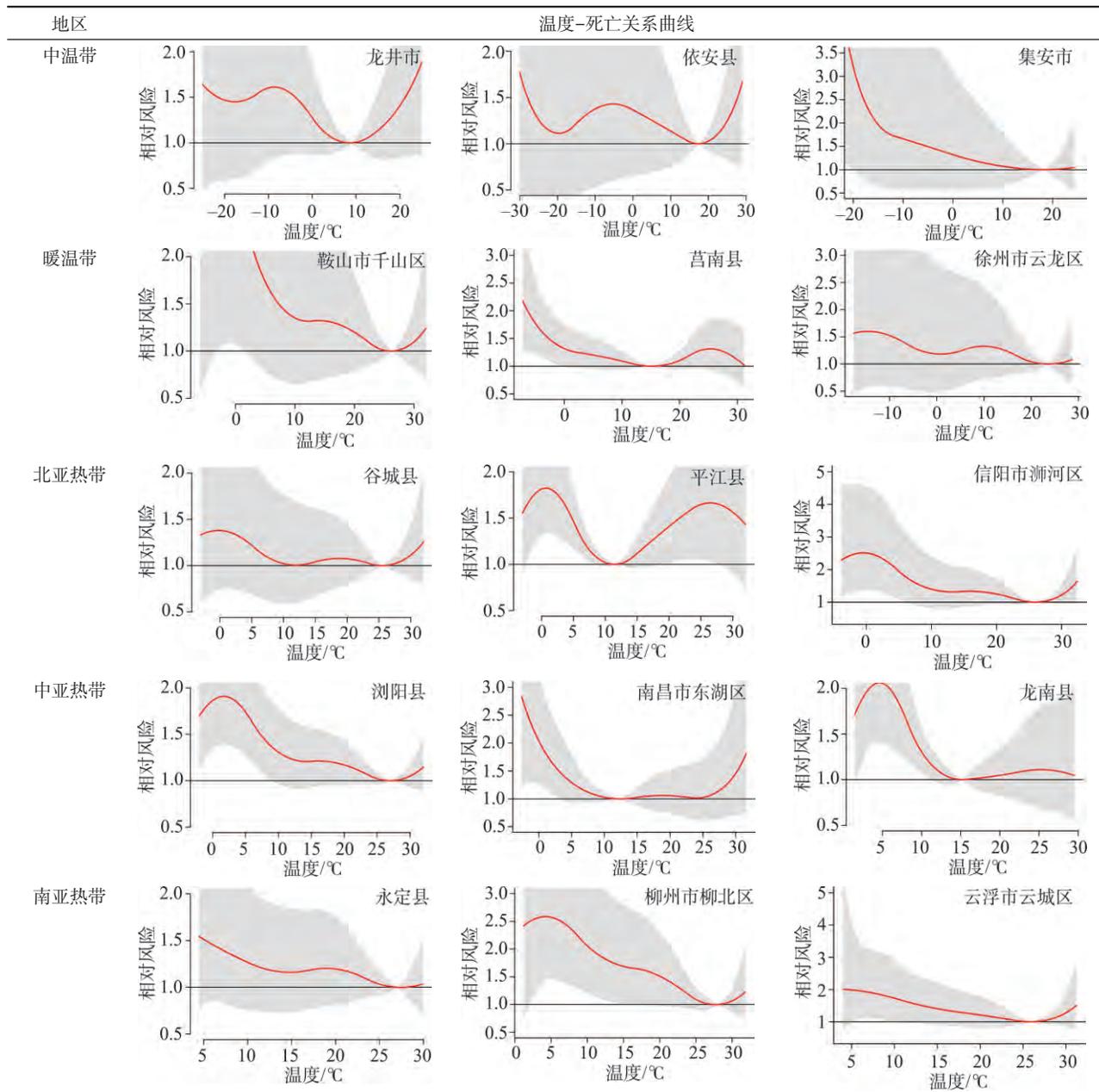


图2 不同滞后时间与模型结果的关系

Fig. 2 Relationship between different lag days and model results

表2 不同温度带站点尺度温度-死亡曲线列举

Tab. 2 List of temperature-mortality curves at community level in different temperature zones



间风险是否有显著性差异。

表3是利用地理探测器得到的不同温度带低温风险的平均结果与Meta分析结果的对比。由表3可以看出,与Meta分析结果基本一致,说明Meta分析得到的低温风险的空间分布特征是可靠的。表4反映了风险探测器表征的不同温度带低温风险是否存在显著性差异。表4中的“Y”代表2个结果在95%的置信度上被认为存在着显著性差异,而“N”代表不存在着差异。由表4可以看出,北亚热带和其余4个带存在着显著性差异,这与中国大

陆不同温度带低温风险呈现“M”形的特点相一致。

为进一步探究低温冷效应呈现“M”型的原因,判断非环境因素是否对其有修饰作用,本文引入了区域人均GDP这一指标来反映社会经济因素。根据已有各个站点6年平均人均GDP,计算不同温度带人均GDP均值作为区域社会经济因素指标。从图4可看出,北亚热带整体人均GDP最高,而中亚热带整体人均GDP最低。这说明社会经济因素对于低温致死风险具有一定的影响,对低温-死亡风险有修饰作用。

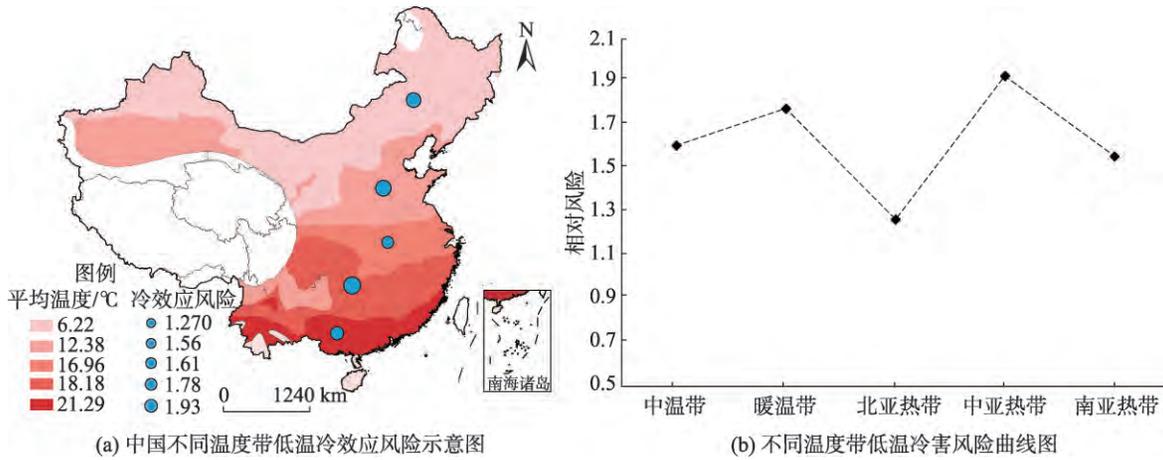


图3 中国不同温度带低温与死亡风险关系

Fig. 3 Relationships between low temperature and mortality risk across different temperature zones of China

表3 地理探测器计算低温风险与Meta分析结果对比

Tab. 3 A comparison of the risk calculated by Geodetector and Meta analysis

分层变量	中温带	暖温带	北亚热带	中亚热带	南亚热带
地理探测器分析结果	1.69	1.81	1.20	1.92	1.64
Meta分析风险结果	1.61	1.78	1.27	1.93	1.56

表4 不同温度带冷效应风险显著性差异

Tab. 4 Significant difference of cold effect among different temperature zones

Sig. t test:0.05	中温带	暖温带	北亚热带	中亚热带	南亚热带
中温带					
暖温带	N				
北亚热带	Y	Y			
中亚热带	N	N	Y		
南亚热带	N	N	Y	N	

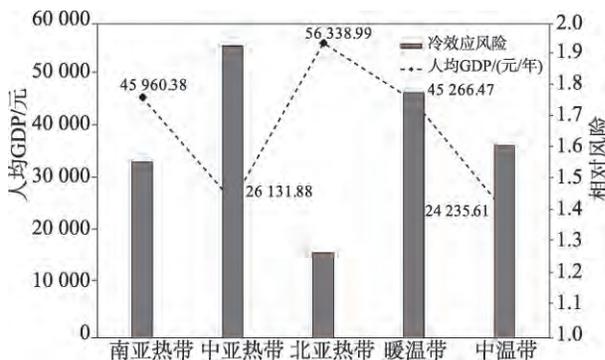


图4 不同温度带冷效应风险和人均GDP情况

Fig. 4 Cold-effect risk in different temperature zones and their situation of GDP per capita

4 讨论

本文利用分布式非线性滞后模型对127个死亡监测站的气温-死亡关系进行了建模,基于各站点结果的基础上,利用多元Meta分析得到不同温度带内居民的气温与死亡风险之间的关系,进而得到低温冷效应对居民健康的影响。就已有研究来看,本文是目前使用死亡监测站数据最多,涵盖中国范围最广的研究,能够充分说明低温冷效应对中国居民健康的影响情况。

结合上述分析结果,需要进一步对2个方面进行阐述:①分析低温冷害的空间特征;②分析和讨论影响气温-死亡关系的因素。

已有关于中国大尺度的研究都是从行政区域的角度来综合站点尺度的气温-死亡风险关系^[9]。虽然气温-死亡关系受到多种因素的影响,但大量国内外研究表明,温度是影响居民死亡风险最为重要的因素^[39]。以行政区域来综合站点尺度结果的局限性在于没有充分考虑区域温度内在的差异性。因此,本文尝试以温度带作为分区指标,尝试更直观地反应不同温度条件下居民的致死风险。结合表2和图3可发现,在中亚热带和南亚热带区域,冷效应对死亡的影响远大于热效应。这说明人体对于环境温度具有适应性,处于较低纬度温度带的人群,由于长期处于温度较高的环境中,生理和行为对低温适应性较差。因此,对于长期居住于中亚热带和南亚热带的居民,政府部门应积极采取措施,降低低温冷害对这些地区公共健康的不利影响。

气温-死亡风险受到包括社会经济水平、医疗

卫生状况、区域内的人口结构特征在内的多种因素的影响。目前,考虑社会经济因素对气温-死亡关系修饰作用的研究较为多样:Healy等发现冬季严寒对较为爱尔兰等地居民死亡风险的影响较为显著,而对温度差异不大的斯堪的纳维亚地区和丹麦的影响并不显著,他认为是经济差异导致的结果^[40]。对于高温热效应,Zanobetti和Schwartz发现中央空调有利于削弱热浪的影响^[41]。所以,针对图4中不同温度带的低温冷效应致死风险呈现出M型,社会经济因素可能对其有修饰作用。为量化这种差异,对5个温度带内的冷效应致死风险和人均GDP进行相关性分析,二者在显著性为95%的水平上相关性为-0.62,说明人均GDP和冷效应致死风险呈现出一种负相关关系。因此,对“M”型给出以下解释:中温带平均温度较低,人们对环境具有适应性;在南亚热带常年温度较高,低温冷害发生频率低。所以这2个温度带低温冷害的风险水平不高。而暖温带、北亚热带和中亚热带,这3个温度带四季分明,社会经济因素对低温的影响较为显著。①低温冷害致死风险在北亚热带最低是因为该区域经济最为发达,包括了长江三角洲地区以及武汉、合肥等长江中游大城市,基础设施较好,医疗完善;②低温致死风险在中亚热带最高的原因,一方面是该气温带整体温度高、对低温的适应性差,另一方面是因为该温度带范围内主要是四川、湖南、贵州等西南经济落后地区,医疗设施不够完善使得低温冷害致死风险最大;③对于暖温带冷效应致死风险较高的是由于在这个区域死亡监测点在农村较多人口多集中于农村。虽然经济水平整体较好,但是该区域包括了北京、天津、西安等大城市,城乡之间医疗条件与基础设施仍有差异,因而区域的低温冷害的影响略高于中温带。基于上述讨论可以认为,提高区域经济发展,完善农村地区医疗设施对于中国大部分地区提高低温冷害对公共健康的抵抗性有积极作用。

本研究还存在一些局限性:①利用插值数据获取的县级尺度的气温存在一定的不确定性,进一步的研究中应尽可能多的收集县级尺度的气象数据;②已有研究表明^[42-44],空气污染对气温-死亡关系有修饰作用,但本研究由于缺乏空气污染指标的而未考虑这种影响,进一步的研究尝试将空气中污染物加入到DLNM模型中,从而完善研究结果;③研究主要关注的是低温冷效应的空间分布特征,对于死亡人口的年龄结构没有详细考虑,而不同年

龄阶层死亡风险必然不同,进一步的研究将在小尺度上研究不同年龄阶层死亡风险和环境温度的关系。

5 结论

基于大量死亡数据,本文利用DLNM模型分析了低温冷害对中国居民健康的影响,得到如下结论:

(1)在站点尺度上,温度-死亡风险曲线虽然存在明显的差异,但大致仍呈现U型、V型和J型,表明极端低温会对居民健康产生不利影响,且存在空间差异。

(2)为削弱其余环境因素对温度-死亡关系的修饰作用,尽可能突出低温对死亡风险的影响,本研究将站点按温度带进行综合,发现不同温度带的低温对居民的影响有明显空间差异性。随着温度带气温的增高,冷效应对非意外死亡风险的影响呈现出“M”型,即在中温带和南亚热带冷效应影响较低,在暖温带和中亚热带冷效应影响较高,在北亚热带影响最低。

(3)社会经济因素对低温冷害的致死风险有修饰作用。结合不同温度带的人均GDP数据进行比较,发现低温冷效应与人均GDP水平呈现明显负相关,即社会经济因素会对气温-死亡关系起到修饰作用。

参考文献 (References):

- [1] WHO. The World Health Report 2008 - primary Health Care(Now More Than Ever)[Z]. 2010.
- [2] Lopez A D. Global burden of disease and risk factors[M]. Oxford University Press, 2006.
- [3] Díaz J, Carmona R, Mirón I J, et al. Geographical variation in relative risks associated with heat: Update of Spain's Heat Wave Prevention Plan[J]. Environment International, 2015,85:273-283.
- [4] Analitis A, Katsouyanni K, Biggeri A, et al. Effects of cold weather on mortality: Results from 15 european cities within the PHEWE project[J]. American Journal Of Epidemiology, 2008,168:1397-1408.
- [5] Schuster C, Burkart K, Lakes T. Heat mortality in Berlin - Spatial variability at the neighborhood scale[J]. Urban Climate. 2014,10(Part 1):134-147.
- [6] Laaidi M, Laaidi K, Besancenot J P. Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming

- [J]. *International Journal Of Biometeorology*, 2006,51: 145-153.
- [7] Anderson B G, Bell M L. Weather-related mortality how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States[J]. *Epidemiology*, 2009,20:205-213.
- [8] Curriero F C, Heiner K S, Samet J M, et al. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States[J]. *American Journal Of Epidemiology*, 2002,155:80-87.
- [9] Ma W J, Wang L J, Lin H L, et al. The temperature-mortality relationship in China: An analysis from 66 Chinese communities[J]. *Environmental Research*, 2015,137:72-77.
- [10] Chen R J, Wang C C, Meng X, et al. Both low and high temperature may increase the risk of stroke mortality[J]. *Neurology*, 2013,81:1064-1070.
- [11] Ma W J, Zeng W L, Zhou M G, et al. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities[J]. *Environment International*, 2015,75:103-109.
- [12] Son J Y, Lee J T, Anderson G B, et al. Vulnerability to temperature-related mortality in Seoul, Korea[J]. *Environmental Research Letters*. 2011,6:034027.
- [13] Kan H D, London S J, Chen H L, et al. Diurnal temperature range and daily mortality in Shanghai, China[J]. *Environmental Research*, 2007,103:424-431.
- [14] Guo Y M, Barnett A G, Pan X C, et al. The impact of temperature on mortality in Tianjin, China: A case-crossover design with a distributed lag nonlinear model[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011,119:1719-1725.
- [15] 陈美池,牛静萍,阮焜,等.兰州市日均气温与心血管疾病日入院人次的时间序列研究[J].*环境与健康杂志*,2014,31(5):391-394. [Chen M C, Niu J P, Ruan Y, et al. Relationship between daily mean temperature and number of daily hospitalization of cardiovascular diseases in Lanzhou: a time-series study[J]. *Journal of Environ Health*, 2014,31(5):391-394.]
- [16] 吴凡.南京市高温热浪对天气敏感性疾病的影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2013. [Wu F. Research of the effect of high temperature and heat wave on weather sensitive diseases in Nanjing Area[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.]
- [17] 刘学恩,李群娜,赵宗群.气温及冷空气对武汉市心脑血管疾病死亡率的影响[J].*中国公共卫生*,2002,8(8):56-58. [Liu X E, Li N Q, Zhao Z Q. Influence of temperature and cold air on mortality of cardio -and cerebral vascular diseases[J]. *China Public Health*, 2002,8(8):56-58.]
- [18] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].*气候变化研究进展*, 2006,2(1):3-8. [Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006,2(1):3-8.]
- [19] 秦大河,罗勇,陈振林,等.气候变化科学的最新进展:IPCC第四次评估综合报告解析[J].*气候变化研究进展*,2007,3(6):311-314. [Qin D H, Luo Y, Chen Z L, et al. Latest advances in climate change sciences: Interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006,3(6):311-314.]
- [20] Gómez-Acebo I, Llorca J, Dierssen T. Cold-related mortality due to cardiovascular diseases, respiratory diseases and cancer: a case- crossover study[J]. *Public Health*. 2013,127(3):252-258.
- [21] 钟堃,刘玲,张金良.北京市寒潮天气对居民心脑血管疾病死亡影响的病例交叉研究[J].*环境与健康杂志*,2010,27(2):100-105. [Zhong K, Liu L, Zhang J L. Impact of cold wave on mortality of cerebra-cardiovascular diseases in Beijing: A case-crossover study[J]. *Journal of Environ Health*, 2010,27(2):100-105.]
- [22] 郑景云,卞娟娟,葛全胜,等.1981-2010年中国气候区划[J].*科学通报*,2013(30):3088-3099. [Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981- 2010[J]. *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2013,30:3088-3099.]
- [23] 郑景云,尹云鹤,李炳元.中国气候区划新方案[J].*地理学报*,2010,65(1):3-12. [Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y. A new scheme for climate regionalization in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010,65(1):3-12.]
- [24] Yang G, Hu J, Rao K Q, et al. Mortality registration and surveillance in China: History, current situation and challenges[J]. *Population Health Metrics*,2005,3(1):1-9.
- [25] 周脉耕,姜勇,黄正京,等.全国疾病监测点系统的调整与代表性评价[J].*疾病监测*,2010,25(3):239-244. [Zhou M G, Jiang Y, Huang Z J, et al. Adjustment and representativeness evaluation of national disease surveillance points system[J]. *Disease Surveillance*, 2010,25(3):239-244.]
- [26] Yuan W, Xu B, Chen Z, et al. Validation of China-wide interpolated daily climate variables from 1960 to 2011[J]. *Theoretical and Applied Climatology*. 2015,119(3-4):689-700.
- [27] Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models[J]. *Statistics In Medicine*, 2014,33:881-899.
- [28] Wu W, Xiao Y Z, Li G C, et al. Temperature-mortality relationship in four subtropical Chinese cities: A time-series study using a distributed lag non-linear model[J]. *Science of the Total Environment*, 2013,449:355-362.

- [29] Gasparrini A, Armstrong B, Kenward M. Distributed lag non-linear models[J]. *Stat Med*, 2010,29:2224-2234.
- [30] Gasparrini A, Armstrong B. Multivariate meta-analysis: A method to summarize non-linear associations[J]. *Statistics In Medicine*. 2011,30:2504-2506.
- [31] Gasparrini A. Modeling exposure-lag-response associations with distributed lag non-linear models[J]. *Stat Med*. 2014,33(5) 881-899.
- [32] Dominici F, Peng R D, Bell M L, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases[J]. *JAMA*, 2006,295(10):1127-1134.
- [33] Riley R D, Price M J, Jackson D, et al. Multivariate meta-analysis using individual participant data[J]. *RESEARCH SYNTHESIS METHODS*. 2015,6(2):157-174.
- [34] Wang J, Zhang T, Fu B. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*. 2016,67:250-256.
- [35] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-127.
- [36] 杨忍,刘彦随,龙花楼,等.中国村庄空间分布特征及空间优化重组解析[J].*地理科学*, 2016,36(2):170-179. [Yang R, Liu Y S, Long H L, et al. Spatial distribution characteristics and optimized reconstructing analysis of rural settlement in China.[J] *Scientia Geographica Sinica*, 2016,36(2):170-179.]
- [37] 通拉嘎,徐新良,付颖,等.地理环境因子对螺情影响的探测分析[J].*地理科学进展*,2014,33(5):625-635. [Tong L G, Xu X L, Fu Y, et al. Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model [J] *Progress in Geography*, 2014,33(5):625-635.]
- [38] 毕硕本,计哈,陈昌春,等.地理探测器在史前聚落人地关系研究中的应用与分析[J].*地理科学进展*,2015,34(1): 118-127. [Bi S B, Ji H, Chen C C, et al. Application of geographical detector in human-environment relationship study of prehistoric settlements[J]. *Progress in Geography*, 2015,34(1):118-127.]
- [39] Basu R. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008[J]. *Environmental Health*. 2009, 8.
- [40] Healy J D. Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors[J]. *Journal of Epidemiology and Community Health*. 2003,57:784-789.
- [41] O'Neill M S, Zanobetti A, Schwartz J. Modifiers of the temperature and mortality association in seven US cities [J]. *American Journal Of Epidemiology*. 2003,157:1074-1082.
- [42] Katsouyanni K, Pantazopoulou A, Touloumi G, et al. Evidence for interaction between air-pollution and high-temperature in the causation of excess mortality[J]. *Archives Of Environmental Health*. 1993,48:235-242.
- [43] Qian Z M, He Q C, Lin H M, et al. High temperatures enhanced acute mortality effects of ambient particle pollution in the "Oven" city of Wuhan, China[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008,116:1172-1178.
- [44] Ren C, Williams G, Morawska L, et al. Ozone modifies associations between temperature and cardiovascular mortality - The analysis using the NMMAPS data[J]. *Epidemiology*. 2007,18:S69-S70.