

热浪与广东省居民脑卒中寿命损失年的关系：基于贝叶斯时空模型

袁丽霞^{1a,2}, 孟瑞琳^{1b}, 李佳莉^{1a,3}, 林立丰¹, 许晓君^{1b}, 肖建鹏^{1a}, 何冠豪^{1a}, 胡建雄^{1a}, 容祖华^{1a}, 马文军^{1a,4}, 刘涛^{1a,4}

1. 广东省疾病预防控制中心 a. 广东省公共卫生研究院 b. 慢性非传染性疾病预防控制所, 广东 广州 511430

2. 中山大学公共卫生学院, 广东 广州 510080

3. 桂林电子科技大学数学与计算科学学院, 广西 桂林 541004

4. 暨南大学基础医学与公共卫生学院, 广东 广州 510632

摘要：

[背景] 脑卒中已成为我国居民的主要死亡原因。随着全球气候变暖, 气温与脑卒中关系的研究备受关注。

[目的] 采用贝叶斯时空模型控制时间和空间效应, 分析热浪与不同亚型脑卒中寿命损失年(YLL)的关系, 并探讨热浪效应的修饰因子。

[方法] 收集 2014—2017 年暖季(5—10 月)广东省 40 个区县的每日脑卒中死亡个案信息、气象数据及大气污染物数据; 根据期望寿命匹配年龄和性别计算出个体 YLL, 汇总每日 YLL 后以各区县人口进行校正得到每日 YLL 率(人年/10 万人)。采用贝叶斯时空模型拟合热浪与不同亚型脑卒中 YLL 率的暴露-反应关系, 并按照年龄(<65 岁、≥65 岁)、性别(男性、女性)和地区(珠三角地区、非珠三角地区)进行分层分析, 确定热浪与脑卒中死亡关系的主要修饰因子。

[结果] 2014—2017 年暖季, 广东省 40 个区县共发生 23 次热浪事件, 累计持续 145 d。脑卒中患者 30 852 例, 居民总脑卒中日均 YLL 率为(2.39±3.63)人年/10 万人, 其中出血性脑卒中和缺血性脑卒中分别为(1.54±2.99)人年/10 万人和(0.84±1.85)人年/10 万人。热浪可增加居民脑卒中的 YLL 率, 对缺血性脑卒中的影响更大且存在滞后效应: 热浪在滞后 1 d 的累积效应最大, 可分别使总脑卒中和缺血性脑卒中的 YLL 率增加 0.17(95%CI: 0.03~0.29)人年/10 万人和 0.13(95%CI: 0.06~0.20)人年/10 万人。分层分析的结果表明: 热浪对≥65 岁人群、男性及非珠三角地区缺血性脑卒中的影响更大, 可使其 YLL 率分别增加 1.11(95%CI: 0.58~1.55)、0.13(95%CI: 0.03~0.23)和 0.20(95%CI: 0.07~0.32)人年/10 万人; 对出血性脑卒中的影响仅发生在≥65 岁人群中, 可使其 YLL 率增加 0.79(95%CI: 0.26~1.31)人年/10 万人。

[结论] 热浪可能会增加广东省居民脑卒中的 YLL 率, 对老年人、男性及非珠三角地区缺血性脑卒中的影响更大且存在滞后效应, 对出血性脑卒中的影响主要发生在老年人群中。

关键词： 脑卒中; 热浪; 贝叶斯时空模型; 暴露-反应关系; 修饰因子

Relationship between heatwave and years of life lost associated with stroke in Guangdong Province: Based on Bayesian spatio-temporal model YUAN Lixia^{1a,2}, MENG Ruilin^{1b}, LI Jiali^{1a,3}, LIN Lifeng¹, XU Xiaojun^{1b}, XIAO Jianpeng^{1a}, HE Guanhao^{1a}, HU Jianxiong^{1a}, RONG Zuhua^{1a}, MA Wenjun^{1a,4}, LIU Tao^{1a,4} (1.a. Guangdong Provincial Institute of Public Health b. Institute for the Prevention and Control of Chronic Non-communicable Diseases, Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, Guangdong 511430, China; 2. School of Public Health, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510080, China; 3. School of Mathematics and Computing Science, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. School of Medicine, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

Abstract:

[Background] Stroke has become a main cause of death in China. With global warming, the



DOI 10.11836/JEOM21458

组稿专家

马文军(暨南大学基础医学与公共卫生学院), E-mail: mawj@gdiph.org.cn

基金项目

国家重点研发计划项目(2018YFA0606200); 国家自然科学基金项目(81874276); 广东省自然科学基金项目(2019A1515011264); 广州市科技计划项目(202102080565)

作者简介

并列第一作者。
袁丽霞(1994—), 女, 硕士, 医师;
E-mail: yuanlixia0315@163.com
孟瑞琳(1972—), 女, 硕士, 主任医师;
E-mail: rlmeng@126.com

通信作者

刘涛, E-mail: gzt_2002@163.com

伦理审批

已获取
利益冲突 无申报
收稿日期 2021-09-26
录用日期 2022-01-12

文章编号 2095-9982(2022)03-0268-08

中图分类号 R12

文献标志码 A

补充材料

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21458

►引用

袁丽霞, 孟瑞琳, 李佳莉, 等. 热浪与广东省居民脑卒中寿命损失年的关系: 基于贝叶斯时空模型[J]. 环境与职业医学, 2022, 39(3): 268-274, 280.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21458

Funding

This study was funded.

Correspondence to

LIU Tao, E-mail: gzt_2002@163.com

Ethics approval

Obtained
Competing interests None declared
Received 2021-09-26
Accepted 2022-01-12

Supplemental material

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21458

► To cite

YUAN Lixia, MENG Ruilin, LI Jiali, et al. Relationship between heatwave and years of life lost associated with stroke in Guangdong Province: Based on Bayesian spatio-temporal model[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(3): 268-274, 280.

► Link to this article

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21458

studies on temperature and stroke have attracted much attention.

[Objective] To analyze the relationships between heatwave and the years of life lost (YLL) by different subtypes of stroke by controlling temporal and spatial effects with Bayesian spatio-temporal model, and to study the modifiers of the health effect of heatwave.

[Methods] The daily information of stroke deaths, meteorological data, and air pollutant data in 40 districts and counties of Guangdong Province were collected during the warm seasons (from May to October) in the years from 2014 to 2017. The individual YLL was first calculated by matching age and gender according to the life table, and then the daily YLL rate (person-years/100 000 people) was obtained by summarizing the daily YLL and correcting it with the population of each district or county. Bayesian spatio-temporal model was used to fit a proposed exposure-response relationship between heatwave and the YLL rates of different subtypes of stroke. Finally, stratified analyses were conducted by age (< 65 years, ≥65 years), gender (male, female), and region (Pearl River Delta and non-Pearl River Delta regions) to identify the major modifiers for the association between heatwave and stroke mortality.

[Results] During the warm seasons from 2014 to 2017, a total of 23 heatwave events occurred in the 40 districts or counties of Guangdong Province, cumulatively lasting for 145 d. A total of 30 852 stroke deaths were recorded in the same time periods. The average daily YLL rate of total stroke was (2.39±3.63) person-years/100 000 people, and those for hemorrhagic stroke and ischemic stroke were (1.54±2.99) person-years/100 000 people and (0.84±1.85) person-years/100 000 people, respectively. Heatwave was associated with increased YLL rate of stroke in residents, and it had a greater impact on ischemic stroke with a lag effect. The largest cumulative effect of heatwave was at lag 0-1 day, which was associated with an increased YLL rate of total stroke and ischemic stroke by 0.17 (95%CI: 0.03-0.29) person-years/100 000 people and 0.13 (95%CI: 0.06-0.20) person-years/100 000 people, respectively. The results of stratified analyses showed that heatwave had a larger effect on ischemic stroke in residents of aged 65 years or older, male, and non-Pearl River Delta regions, and the rates of YLL increased by 1.11 (95%CI: 0.58-1.55), 0.13 (95%CI: 0.03-0.23), and 0.20 (95%CI: 0.07-0.32) person-years/100 000 people, respectively; Heatwave only had an effect on hemorrhagic stroke in residents aged 65 years or older with an increased YLL rate of 0.79 (95%CI: 0.26-1.31) person-years/100 000 people.

[Conclusion] Heatwave could elevate the level of years of life lost associated with stroke in Guangdong residents, with greater impacts on ischemic stroke of the aged, men, and residents in non-Pearl River Delta regions, and on hemorrhagic stroke in the elderly.

Keywords: stroke; heatwave; Bayesian spatio-temporal model; exposure-response relationship; modifier

脑卒中, 又称脑血管意外, 是仅次于缺血性心脏病的全球第二大死因和成人致残的第三大原因^[1], 具有高发病率、高致残率、高死亡率的特点。目前全球脑卒中死亡的数量仍在不断增加, 其中约 75% 的死亡和 80% 以上的伤残调整寿命年发生在中低收入国家^[2-3]。中国是最大的发展中国家, 2017 年中国一项全球疾病负担系统综述研究显示, 脑卒中已成为我国居民的主要死亡原因^[4]。近年来研究表明, 气象因素和季节变异与脑卒中的死亡风险有关^[5]。随着全球气候变暖, 气温对脑卒中的影响备受关注。国内外的研究主要集中在高温和低温对脑卒中死亡的影响, 并发现气温与脑卒中死亡呈非线性的“U”型、“V”型或“J”型关系^[6-7]。目前国内关于高温与脑卒中的研究多以死亡率作为结局, 未考虑不同年龄死亡权重的差异; 且研究多基于时间序列分析的方法^[8-9], 未同时考虑时间因素和空间因素的影响, 这些可能在一定程度上造成研究结果的偏倚。近年来, 贝叶斯时空模型的应用越来越广泛, 该模型可以同时考虑时间效应和空间效应, 还可修正小样本极端值的影响^[10]。为更准确地评估热浪与脑卒中死亡风险的暴露-反应关系, 本研究利用贝叶斯时空模

型, 分析广东省 40 个区县中热浪对不同亚型脑卒中人群寿命损失年 (years of life lost, YLL) 的主效应, 并探讨其主要修饰因子, 为制定脑卒中的卫生政策和防控措施提供科学依据。

1 对象与方法

1.1 数据收集

1.1.1 脑卒中死亡数据 为保证足够的统计学功效, 从 2014—2017 年暖季广东省死亡监测点所在区县中选择符合如下条件之一的区县作为研究点: (1) 人口数 > 20 万; (2) 年均死亡率 > 4%^[11]。截至 2017 年, 广东省共 121 个区县^[12], 按上述标准最终纳入 40 个区县分布情况 (见补充材料图 S1) 进行研究。获取每例死亡个案的信息, 包括: 年龄、性别、地区、死亡时间、根本死因、根本死因国际疾病分类 (International Classification of Disease, ICD) 编码等。根据 ICD 第 10 版对脑卒中疾病进行编码, 分别为脑卒中 (I60—I63)、出血性脑卒中 (I60—I62, HS)、缺血性脑卒中 (I63, IS)。本研究经广东省疾病预防控制中心医学科伦理委员会审查通过 (编号: 2019025)。

本研究以每日 YLL 率作为健康结局。首先利用广东省的人口和死亡数信息计算出广东省期望寿命表,根据性别和年龄匹配每个个体的期望寿命,将期望寿命减去死亡年龄获得个体 YLL,然后分别汇总每日总 YLL 以及不同年龄、性别、地区的 YLL 值,最后以各区县的人口数进行标准化,即可获得每 10 万人口的 YLL 率。每日总 YLL 率计算公式如下:

$$V_{YLLR_t} = \frac{\sum_i E_{it}}{N_{pop_t}} = \frac{N_{YLLS_t}}{N_{pop_t}} \times 100\,000 \quad (1)$$

(1)式中: V_{YLLR_t} 为第 t 天总 YLL 率; $\sum_i E_{it}$ 为 i 个体第 t 天的期望寿命的合计; N_{pop_t} 为该区第 t 天的人口数; N_{YLLS_t} 为第 t 天该研究区县的每日总 YLLs。

1.1.2 气象数据及热浪定义 从国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)获取 2014—2017 年暖季全国 698 个气象站点的每日平均气温、最高气温和相对湿度数据。为获取每个研究区县更为精确的气象数据,本研究采用 Anusplin 空间插值法对气象数据进行插值,分别形成分辨率为 1 km×1 km 的全国每日平均气温、最高气温和相对湿度栅格数据。采用十折交叉验证的方法^[13]对插值结果的准确性进行验证,对应 R^2 分别为 0.96、0.94、0.81^[14],最后从上述得到的全国每日栅格数据中提取广东省 40 个研究区县的气象数据。

热浪采用中国气象局的定义:日最高气温 35 °C 并持续 3 d 以上的高温天气过程^[15]。本研究中热浪事件为二分类变量,若第 t 天为热浪期,则定义为 1,否则为 0。由于热浪发生的时间主要在夏季,因此本研究选取了 2014—2017 年每年的暖季时间段(5—10 月)进行分析。

1.1.3 大气污染物数据 本研究依据参考文献^[16],选取 PM₁₀ 与 O₃ 质量浓度(后称“浓度”)作为分析热浪与脑卒中 YLL 率关系的污染物控制变量,每日 PM₁₀ 与 O₃ 浓度数据从全国城市空气质量实时发布平台获得。由于大气污染物站点未覆盖所有研究区县,因此本研究通过构建广东省范围内的随机森林模型预测每个研究区县的 PM₁₀ 与 O₃ 浓度数据,同样采用交叉验证的方法进行验证, R^2 分别为 0.79、0.69。随机森林模型的预测变量主要包括:日均气温、相对湿度、风速、降雨、气压、日照时间、国内生产总值(gross domestic product, GDP)、人口密度、土地利用类型、道路长度、海拔高度、经度和纬度等。从广东统计年鉴获取 2014—2017 年广东省 40 个区县的人口数据,从南安普顿大学获取 2015 年全国人口密度栅格数据(<https://www.worldpop.org/>),从资源环境科学与数据

中心(<http://www.resdc.cn>)获取全国道路长度、土地利用、GDP 栅格数据及县级矢量地图,再从上述的全国栅格数据中提取广东省所需数据。

1.2 统计分析

采用均数±标准差描述气象因素和大气污染物的一般分布特征,采用 Spearman 相关分析气象因素、大气污染物与热浪事件的相关性。建立贝叶斯时空模型分析热浪对不同亚型脑卒中死亡的主效应。该模型需先进行先验信息的描述,随后利用先验信息和样本信息进行后验分布的计算,通过求解总体参数的后验分布特征如均数、中位数等,对未知参数做出统计学推断。本研究采用高斯分布作为连接函数,将 PM₁₀ 浓度和 O₃ 浓度、相对湿度、长期时间趋势和星期几效应纳入模型进行控制,最终形成的模型表达式如下:

$$V_{YLLR_{it}} = \alpha_0 + \mu_i + v_i + \varphi_{it1} + \varphi_{it2} + \sum \beta x \quad (2)$$

(2)式中: $V_{YLLR_{it}}$ 表示第 i 个区县第 t 天的 YLL 率, α_0 为截距项, μ_i 表示第 i 个区县 YLL 率的空间结构效应,即相邻空间单元的相似性; v_i 表示空间非结构效应,即空间单元的异质性; φ_{it1} 表示第 i 个区县第 t 天 YLL 率的时间结构效应; φ_{it2} 表示时间非结构效应; x 为协变量,包括热浪事件、相对湿度、PM₁₀ 浓度、O₃ 浓度、长期时间趋势(暖季)和星期几效应等变量; β 是其对应的回归系数。参考以往研究,将相对湿度和长期时间趋势(暖季)的自由度分别确定为 3·年⁻¹和 4·年⁻¹^[17]。

由于热浪的死亡效应急促且短暂^[18],因此本研究选择 3 d 作为滞后期,分别计算不同滞后期对脑卒中 YLL 率的影响。采用马尔科夫链蒙特卡罗法对模型进行求解,利用偏差信息准则(deviance information criterion, DIC)确定最优模型^[19]。按年龄(< 65 岁、≥ 65 岁),性别(男性、女性)和地区(珠三角地区、非珠三角地区)进行分层,确定热浪与脑卒中死亡关系的主要修饰因子。其中珠三角地区指的是广东省的广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山、江门 9 个城市^[20],非珠三角地区指的是广东省内除珠三角以外的其他区域。为了测试贝叶斯时空模型的稳健性,可通过改变模型中长期趋势的自由度和方差先验分布的参数进行敏感性分析^[10]。由于本研究仅控制大气颗粒物 PM₁₀,为验证 PM_{2.5} 对模型结果的影响,敏感性分析中同时纳入 PM_{2.5} 变量。

利用 R 4.0.2 中进行数据整理,统计描述和统计分析,采用 CARBayesST3.2 软件包构建贝叶斯时空模型,

估计热浪与脑卒中 YLL 率的暴露-反应关系。本研究的统计学检验均为双侧检验, 检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 热浪发生情况

2014—2017 年暖季广东省 40 个区县共发生 23 次热浪事件, 主要发生在 6—9 月, 最早开始于 6 月 14 日, 最晚结束于 9 月 28 日。热浪日数为 145 d, 非热浪日数为 591 d。一次热浪最长持续时间为 12 d, 最短为 3 d; 其中 2015 和 2016 年热浪发生频率最高(分别为 5、6 次), 持续时间最长(分别为 6、11 d)的区县均在广州市的海珠区、荔湾区和越秀区。

2.2 居民脑卒中 YLL 率、气象因素与大气污染物的基本情况

本研究累计纳入 30 852 例脑卒中患者, 其中热浪期发生 1 786 例, 非热浪期发生 29 066 例。每日平均发生脑卒中死亡(41.92±12.80)例, 包括出血性脑卒中死亡(24.26±9.14)例(57.87%), 缺血性脑卒中死亡(17.66±7.46)例(42.13%)。居民脑卒中的日均 YLL 率为(2.39±3.63)人年/10 万人, 热浪期为(2.18±3.32)人年/10 万人, 非热浪期为(2.40±3.64)人年/10 万人; 出血性脑卒中的日均 YLL 率为(1.54±2.99)人年/10 万人, 热浪期为(1.34±2.56)人年/10 万人, 非热浪期为(1.56±3.01)人年/10 万人; 缺血性脑卒中的日均 YLL 率为(0.84±1.85)人年/10 万人, 热浪期和非热浪期分别为(0.84±1.94)、(0.84±1.84)人年/10 万人。每日气象因素与大气污染物浓度的基本情况见表 1。

表 1 2014—2017 年暖季广东省 40 个研究区县每日脑卒中 YLL 率、气象因素与大气污染物基本情况 ($\bar{x} \pm s$)

Table 1 The basic description of daily YLL rate of stroke, meteorological factors, and air pollutants in 40 districts or counties of Guangdong Province during the warm seasons from 2014 to 2017 ($\bar{x} \pm s$)

项目 Item	热浪期 Heatwave period	非热浪期 Non-heatwave period	合计 Total
总脑卒中YLL率/(人年/10万人) YLL rate of stroke/(person-years/100 000 people)			
总人群(Total)	2.18±3.32	2.40±3.64	2.39±3.63
年龄/岁(Age/years)			
<65	1.00±2.79	1.15±3.21	1.14±3.19
≥65	13.79±21.59	14.02±20.57	14.01±20.63
性别(Gender)			
男性(Male)	2.38±4.72	2.72±5.30	2.70±5.27
女性(Female)	1.97±4.16	2.07±4.47	2.06±4.46
地区(Region)			
珠三角地区(Pearl River Delta)	1.92±2.72	2.06±2.79	2.05±2.79
非珠三角地区(Non-Pearl River Delta)	2.57±4.05	2.67±4.18	2.67±4.17

续表 1

项目 Item	热浪期 Heatwave period	非热浪期 Non-heatwave period	合计 Total
出血性脑卒中YLL率/(人年/10万人) YLL rate of hemorrhagic stroke/(person- years/100 000 people)			
总人群(Total)	1.34±2.56	1.56±3.01	1.54±2.99
年龄/岁(Age/years)			
<65	0.73±2.37	0.90±2.87	0.89±2.84
≥65	7.27±14.85	7.72±14.97	7.69±1.50
性别(Gender)			
男性(Male)	1.50±3.76	1.82±4.48	1.80±4.44
女性(Female)	1.16±3.23	1.27±3.69	1.27±3.66
地区(Region)			
珠三角地区(Pearl River Delta)	1.21±2.24	1.35±2.34	1.34±2.33
非珠三角地区(Non-Pearl River Delta)	1.53±2.97	1.72±3.44	1.71±3.42
缺血性脑卒中YLL率/(人年/10万人) YLL rate of ischemic stroke/(person- years/100 000 people)			
总人群(Total)	0.84±1.94	0.84±1.84	0.84±1.85
年龄/岁(Age/years)			
<65	0.27±1.47	0.26±1.40	0.26±1.41
≥65	6.52±13.95	6.30±13.17	6.32±1.32
性别(Gender)			
男性(Male)	0.87±2.72	0.90±2.65	0.90±2.66
女性(Female)	0.82±2.37	0.79±2.42	0.79±2.42
地区(Region)			
珠三角地区(Pearl River Delta)	0.72±1.38	0.71±1.42	0.71±1.42
非珠三角地区(Non-Pearl River Delta)	1.04±2.55	0.96±2.11	0.96±2.13
气象因素与大气污染物 Meteorological factors and air pollutants			
相对湿度/% Relative humidity/%	74.50±3.74	81.10±8.04	80.72±8.00
PM ₁₀ 浓度/(μg·m ⁻³) PM ₁₀ concentration/(μg·m ⁻³)	54.77±16.69	46.48±18.10	46.96±18.12
O ₃ 浓度/(μg·m ⁻³) O ₃ concentration/(μg·m ⁻³)	75.87±22.45	56.45±23.22	57.60±23.62

2.3 气象因素、大气污染物及热浪事件的相关性

气象因素、大气污染物及热浪事件间的相关性分析结果见表 2。相对湿度与 PM₁₀ 浓度、O₃ 浓度、热浪事件均呈负相关关系(均 $P<0.01$); PM₁₀ 浓度与 O₃ 浓度、热浪事件, O₃ 浓度与热浪事件均呈正相关关系(均 $P<0.01$)。

2.4 热浪对脑卒中 YLL 率的影响

由图 1 可知, 热浪可增加居民脑卒中的 YLL 率, 对缺血性脑卒中的影响更大。单天效应中, 热浪当天和滞后 1 d 均会增加居民缺血性脑卒中的 YLL 率。其中热浪当天的效应最大, 可使缺血性脑卒中的 YLL 率增加 0.12(95%CI: 0.04~0.21)人年/10 万人, 滞后 1 d 时使其增加 0.11(95%CI: 0.01~0.23)人年/10 万人; 热浪对总脑卒中和出血性脑卒中的单天 YLL 率影响尚无统计学意义。累积效应中, 热浪在滞后 1 d 的累积效应最

大,可分别使总脑卒中和缺血性脑卒中的 YLL 率增加 0.17(95%CI: 0.03~0.29)人年/10 万人和 0.13(95%CI: 0.06~0.20)人年/10 万人;随着滞后天数的推移,累积效应逐渐减弱,滞后 3 d 的累积效应最小,可分别使总脑卒中和缺血性脑卒中的 YLL 率增加 0.11(95%CI: 0.01~0.20)人年/10 万人和 0.10(95%CI: 0.05~0.15)人年/10 万人;尚未发现热浪对总人群中出血性脑卒中的累积效应有统计学意义。

表 2 2014—2017 年暖季广东省 40 个研究区县气象因素、大气污染物及热浪事件的 Spearman 相关系数

Table 2 The Spearman correlation coefficients between meteorological factors, air pollutants, and heatwave events in 40 districts or counties of Guangdong Province during the warm seasons from 2014 to 2017

变量(Variable)	相对湿度 Relative humidity	热浪事件 Heatwave event	PM ₁₀ 浓度 PM ₁₀ concentration	O ₃ 浓度 O ₃ concentration
相对湿度(Relative humidity)	1.000**			
热浪事件(Heatwave event)	-0.203**	1.000**		
PM ₁₀ 浓度 PM ₁₀ concentration	-0.444**	0.131**	1.000**	
O ₃ 浓度(O ₃ concentration)	-0.614**	0.195**	0.557**	1.000**

[注]**: $P < 0.01$ 。
[Note]**: $P < 0.01$ 。

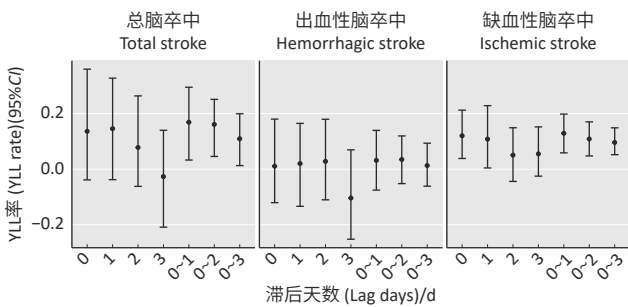


图 1 2014—2017 年暖季广东省 40 个研究区县热浪在不同滞后日对脑卒中 YLL 率的单天效应和累积效应

Figure 1 The single-day and cumulative effects of heatwave on the YLL rate of stroke by different lag days in 40 districts or counties of Guangdong Province during the warm seasons from 2014 to 2017

2.5 年龄、性别、地区对热浪与脑卒中 YLL 率关系的修饰作用

年龄分层分析结果发现,热浪对≥65 岁人群的脑卒中 YLL 率影响更大,可分别使总脑卒中、出血性脑卒中和缺血性脑卒中的 YLL 率增加 1.99(95%CI: 0.68~3.11)、0.79(95%CI: 0.26~1.31)和 1.11(95%CI: 0.58~1.55)人年/10 万人;性别分层分析的结果表明,热浪对男性缺血性脑卒中的影响稍高于女性,可使男性 YLL 率增加 0.13(95%CI: 0.03~0.23)人年/10 万人,

尚未发现热浪对不同性别总脑卒中和出血性脑卒中人群的 YLL 率有影响;地区分层分析的结果显示,热浪对非珠三角地区缺血性脑卒中的 YLL 率影响更大,可使其增加 0.20(95%CI: 0.07~0.32)人年/10 万人,不同地区分层分析中尚未发现热浪对总脑卒中和出血性脑卒中的 YLL 率有影响。结果见表 3。

表 3 2014—2017 年暖季广东省 40 个研究区县居民年龄、性别、地区对热浪与脑卒中 YLL 率关系的修饰作用

Table 3 The modification of age, sex, region of residents on the relationship between heatwave and the YLL rate of stroke in 40 districts or counties of Guangdong Province during the warm seasons from 2014 to 2017

单位(Unit): 人年/10 万人 (person-years/100 000 people)

亚组(Subgroup)	不同类型脑卒中YLL率(95%CI) YLL rate by different types of stroke (95%CI)		
	总脑卒中 Total stroke	出血性脑卒中 Hemorrhagic stroke	缺血性脑卒中 Ischemic stroke
年龄(Age/years)			
<65	-0.01(-0.18~0.16)	-0.05(-0.16~0.05)	0.05(-0.01~0.09)
≥65	1.99(0.68~3.11)	0.79(0.26~1.31)	1.11(0.58~1.55)
P	<0.001	0.002	<0.001
性别(Gender)			
男性(Male)	0.07(-0.19~0.34)	-0.04(-0.19~0.16)	0.13(0.03~0.23)
女性(Female)	0.21(-0.03~0.46)	0.08(-0.06~0.24)	0.12(0.04~0.23)
P	0.465	0.347	0.045
地区(Region)			
珠三角地区 Pearl River Delta	0.18(-0.03~0.34)	0.03(-0.10~0.13)	0.11(0.03~0.18)
非珠三角地 Non-Pearl River Delta	0.19(-0.08~0.50)	0.05(-0.17~0.22)	0.20(0.07~0.32)
P	0.952	0.850	0.020

2.6 敏感性分析

改变模型中长期趋势的自由度和方差先验分布的参数,控制大气颗粒物 PM_{2.5} 后,对应的总脑卒中、出血性脑卒中和缺血性脑卒中的 YLL 率和 DIC 值变化很小或基本不变,说明模型的结果较为稳定,结果见补充材料表 S1。

3 讨论

本研究采用贝叶斯时空模型分析广东省热浪对不同亚型脑卒中 YLL 率的影响。结果发现,热浪可增加广东省居民脑卒中的 YLL 率,对缺血性脑卒中的影响更大,对出血性脑卒中的影响主要发生在老年人群中。提示在全球气候变暖和人口老龄化加剧的背景下,政府和卫生部门有必要进一步加强脑卒中人群的综合防治工作。

以往研究发现,过冷或过热的气温均会增加人群脑卒中的死亡风险^[21-22]。本研究分析了热浪对居民总脑卒中和缺血性脑卒中的影响,结论与国内外研究基本一致。如 Yang 等^[23] 在中国 16 个城市开展的研究发现 14.5%(95%CI: 11.5%~17.0%)的脑卒中死亡归因于非最适温度,2.0%(95%CI: 1.6%~2.2%)的脑卒中死亡归因于极端温度;Zhou 等^[24] 一项基于江苏省 12 个城市的研究发现热暴露对缺血性脑卒中死亡效应的相对危险度为 1.63(95%CI: 1.48~1.80)。从生物学机制角度看,当人体暴露在高温环境中时,机体会通过提高心率、血管扩张、出汗等体温调节方式增加热扩散,从而导致大脑血供减少,现有的缺血加重。炎热天气下的脱水也会导致电解质失衡,血液黏度增加,胆固醇水平升高,血管收缩反应减弱等,从而增加微血管血栓形成^[25]。有的研究还发现高温与内皮功能障碍有关,这些都可能脑卒中死亡率的增加^[26]。

本研究并未发现热浪对总人群中出血性脑卒中的 YLL 率存在影响。既往研究中关于高温和热浪与出血性脑卒中的关系尚存在争议:Shin 等^[27]2005—2014 年在韩国首尔开展的关于最高温和最低温与脑卒中亚型及患者数量的研究发现,高温是出血性脑卒中的危险因素;然而 Lian 等^[28] 一项截至 2014 年的系统综述通过分析温度的短期效应发现,高温是出血性脑卒中的保护因素。这些研究结果不一致的原因可能与研究区域的气候、人口特征、脑卒中亚型比例、社会经济水平、住房类型、人口脆弱性等有关^[28-29]。大多数研究的区域位于不同的气候带,生活在赤道附近的热带和亚热带地区的人群可能已在生理和心理上对高温产生了适应;且生活在低纬度地区的人更有可能采取措施应对炎热天气,如使用空调,通风和大量饮水等^[30]。

本研究对热浪效应的滞后性结果表明,热浪对缺血性脑卒中死亡人群的影响在热浪当天达到最大,而陈亦晨等^[31] 在上海浦东新区开展的关于热浪与居民死亡及疾病负担影响的研究发现,热浪对居民心脑血管死亡的效应在滞后 1 d 时最大。广东省和上海均为亚热带季风气候,但两者的经济和医疗条件存在一定差异。本研究共纳入 40 个区县,其中 22 个属于非珠三角地区,非珠三角地区的空调拥有率较低^[12],导致人群对高温的暴露增加,可能加速某些疾病的发生和发展^[11]。目前不同地区热浪效应的滞后天数存在一定差异,有待进一步研究。

本研究年龄分层分析的结果显示热浪对≥65 岁人群脑卒中的 YLL 率影响更大,与国内外研究结果基本

一致^[28-29]。这一现象可以解释为随着年龄的增长,老人的体温调节、生理功能、对气温变化的适应能力有所下降,加上慢性疾病和脑血管动脉硬化,血液黏度增加等都导致他们对热的敏感性相应增加^[30]。性别分层分析的结果表明,热浪对男性缺血性脑卒中的 YLL 率影响稍高于女性,该发现与以往研究基本一致^[28]。但 Zhou 等^[24]2009—2013 年在江苏省 12 个城市开展的研究发现女性和老年人在热效应中的缺血性脑卒中死亡风险更高。上述发现不一致的原因可能是不同性别人群在职业暴露、体温调节、生理反应及行为习惯方面存在差异,导致他们对热应激有不同的生理和病理反应^[23]。男性更容易暴露于吸烟、饮酒、肥胖、高胆固醇等脑卒中的危险因素中^[32],而高血压和房颤(脑卒中的主要危险因素)在女性中更为常见^[33],这可能是导致其脑卒中风险存在差异的原因。地区分层分析的结果显示热浪对非珠三角地区缺血性脑卒中的 YLL 率影响更大,这可能与非珠三角地区的经济发展水平和医疗卫生条件较低有关。目前,空调已被证明是减少热浪健康影响的最有效的措施之一^[34],而非珠三角地区平均每百户空调拥有量远低于珠三角地区^[12],这可能导致高温天气下患有心脑血管疾病的人群无法及时采取降温措施而使原有疾病加重甚至死亡。

本研究有如下优点:首先,本研究采用了 Anusplin 空间插值法对气温进行了小尺度的预测,同时利用随机森林模型对大气污染物进行预测,最大限度地降低了错分偏倚;其次,本研究以 YLL 率作为健康结局,排除了人口数量的影响,可对比分析不同地区之间的差异;另外,本研究采用贝叶斯时空模型进行分析,同时控制了时间和空间因素的影响,使得热浪与 YLL 率的暴露-反应关系评估更加准确。本研究也存在一定的局限性:首先,本研究为生态学研究,因此可能存在生态学谬误。例如,表 1 中的初步结果显示脑卒中的 YLL 率在热浪期低于非热浪期,这可能是由于热浪期和非热浪期的环境湿度、大气污染物、季节变化等因素不同造成的,以往研究也提示心脑血管疾病的死亡率在冬季较高^[35],而大气污染物浓度一般在冬季也较高^[36],可增加死亡的风险。控制这些因素后,我们发现脑卒中的 YLL 率在热浪期高于非热浪期。其次,由于数据获取受限,本研究年龄分组较为粗略,未能细致探讨脑卒中高发年龄段的暴露-反应关系。最后,本研究未考虑大气污染物与热浪间的交互作用,未控制个体的吸烟、饮酒、高血压、肥胖等脑卒中的危险因素,均可能在一定程度上造成结果的偏倚。

综上,本研究显示热浪会增加广东省居民脑卒中的 YLL 率,对老年人、男性及非珠三角地区缺血性脑卒中的影响更大且存在滞后效应,对出血性脑卒中的影响主要发生在老年人群中。这提示政府和卫生部门有必要在高温天气下针对敏感人群和地区采取有效的干预措施,以降低我国脑卒中的死亡负担和经济负担。有效实施烟草控制、充分营养、定期体育活动、步行及减少食盐摄入量等干预措施可以大大降低发生脑卒中的风险^[37]。

参考文献

- [1] GBD 2015 Neurological Disorders Collaborator Group. Global, regional, and national burden of neurological disorders during 1990-2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015[J]. *Lancet Neurol*, 2017, 16(11): 877-897.
- [2] FEIGIN VL, ROTH GA, NAGHAVI M, et al. Global burden of stroke and risk factors in 188 countries, during 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013[J]. *Lancet Neurol*, 2016, 15(9): 913-924.
- [3] HATA J, KIYOHARA Y. Epidemiology of stroke and coronary artery disease in Asia[J]. *Circ J*, 2013, 77(8): 1923-1932.
- [4] ZHOU M, WANG H, ZENG X, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. *Lancet*, 2019, 394(10204): 1145-1158.
- [5] JIMENEZ-CONDE J, OIS A, GOMIS M, et al. Weather as a trigger of stroke. Daily meteorological factors and incidence of stroke subtypes[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2008, 26(4): 348-534.
- [6] GUO YM, BARNETT AG, PAN XC, et al. The impact of temperature on mortality in Tianjin, China: a case-crossover design with a distributed lag nonlinear model[J]. *Environ Health Perspect*, 2011, 119(12): 1719-1725.
- [7] ARMSTRONG BG, CHALABI Z, FENN B, et al. Association of mortality with high temperatures in a temperate climate: England and Wales[J]. *J Epidemiol Community Health*, 2011, 65(4): 340-345.
- [8] ZANOBETTI A, SCHWARTZ J. Temperature and mortality in nine US cities[J]. *Epidemiology*, 2008, 19(4): 563-570.
- [9] 吴凯, 张云权, 朱慈华, 等. 高温热浪与武汉市江岸区居民卒中死亡关系的时间序列分析[J]. *中华心血管病杂志*, 2015, 43(12): 1092-1096.
WU K, ZHANG YQ, ZHU CH, et al. Association between heat wave and stroke mortality in Jiang'an District of Wuhan, China during 2003 to 2010: a time-series analysis[J]. *Chin J Cardiol*, 2015, 43(12): 1092-1096.
- [10] 李世元, 王学梅. 贝叶斯时空模型在空间流行病学中的研究进展[J]. *世界最新医学信息文摘*, 2017, 17(34): 55-57.
LI SY, WANG XM. Research progress of Bayesian spatio-temporal model in spatial epidemiology[J]. *World Latest Med Inf*, 2017, 17(34): 55-57.
- [11] MA WJ, ZENG WL, ZHOU MG, et al. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: an analysis from 66 communities[J]. *Environ Int*, 2015, 75: 103-109.
- [12] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
Guangdong Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Guangdong. Guangdong statistical yearbook-2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [13] 梁子超, 李智炜, 赖铿, 等. 10折交叉验证用于预测模型泛化能力评价及其R软件实现[J]. *中国医院统计*, 2020, 27(4): 289-292.
LIANG ZC, LI ZW, LAI K, et al. Application of 10-fold cross-validation in the evaluation of generalization ability of prediction models and the realization in R[J]. *Chin J Hosp Stat*, 2020, 27(4): 289-292.
- [14] LIU T, ZHOU CL, ZHANG HM, et al. Ambient temperature and years of life lost: a national study in China[J]. *Innovation (N Y)*, 2020, 2(1): 100072.
- [15] 气象灾害预警信号图标: GB/T 27962—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Graphical symbols for meteorological disaster warning signal icon: GB/T 27962—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [16] SHAH AS, LEE KK, MCALLISTER DA, et al. Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis[J]. *BMJ*, 2015, 350: h1295.
- [17] FILLEUL L, CASSADOUS S, MÉDINA S, et al. The relation between temperature, ozone, and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003[J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114(9): 1344-1347.
- [18] 陈平, 李旭东, 么鸿雁, 等. 热浪对老年人健康的影响[J]. *中华预防医学杂志*, 2013, 47(12): 1168-1170.
CHEN P, LI XD, ME HY, et al. The health effects of heatwave on the elder[J]. *Chin J Prev Med*, 2013, 47(12): 1168-1170.
- [19] 张伟文. 贝叶斯时空建模在新疆鄯阳肺结核发病风险中的应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2019.
ZHANG W W. The applicational study of Bayesian spatiotemporal modeling in the risk of smear positive pulmonary tuberculosis in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2019.
- [20] CHEN L, XU LY, YANG ZF. Accounting carbon emission changes under regional industrial transfer in an urban agglomeration in China's Pearl River Delta[J]. *J Clean Prod*, 2017, 167: 110-119.
- [21] CHENG J, XU ZW, BAMBRICK H, et al. Impacts of exposure to ambient temperature on burden of disease: a systematic review of epidemiological evidence[J]. *Int J Biometeorol*, 2019, 63(8): 1099-1115.
- [22] CHEN RJ, WANG CC, MENG X, et al. Both low and high temperature may increase the risk of stroke mortality[J]. *Neurology*, 2013, 81(12): 1064-1070.
- [23] YANG J, YIN P, ZHOU MG, et al. The burden of stroke mortality attributable to cold and hot ambient temperatures: epidemiological evidence from China[J]. *Environ Int*, 2016, 92-93: 232-238.
- [24] ZHOU L, CHEN K, CHEN XD, et al. Heat and mortality for ischemic and hemorrhagic stroke in 12 cities of Jiangsu Province, China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 601-602: 271-277.
- [25] MCARTHUR K, DAWSON J, WALTERS M. What is it with the weather and stroke?[J]. *Expert Rev Neurother*, 2010, 10(2): 243-249.
- [26] NAWROT TS, STAESSEN JA, FAGARD RH, et al. Endothelial function and outdoor temperature[J]. *Eur J Epidemiol*, 2005, 20(5): 407-410.
- [27] SHIN DW, YOON JE, HWANG HW, et al. Numbers of stroke patients and stroke subtypes according to highest and lowest daily temperatures in Seoul[J]. *J Clin Neurol*, 2016, 12(4): 476-481.
- [28] LIAN H, RUAN YP, LIANG RJ, et al. Short-term effect of ambient temperature and the risk of stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12(8): 9068-9088.
- [29] YANG J, ZHOU MG, LI MM, et al. Diurnal temperature range in relation to death from stroke in China[J]. *Environ Res*, 2018, 164: 669-675.
- [30] GASPARRINI A, ARMSTRONG B, KOVATS S, et al. The effect of high temperatures on cause-specific mortality in England and Wales[J]. *Occup Environ Med*, 2012, 69(1): 56-61.
- [31] 陈亦晨, 彭丽, 周弋, 等. 热浪对上海市浦东新区居民每日死亡与疾病负担影响的病例交叉研究[J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(7): 657-663.
CHEN YC, PENG L, ZHOU Y, et al. A case-crossover study on impacts of heat wave on daily mortality and disease burden among residents in Pudong New Area, Shanghai[J]. *J Environ Occup Med*, 2020, 37(7): 657-663.

(下转第 280 页)