·调查报告与分析·

2018—2022 年南昌市极端气温对居民脑卒中死亡风险影响

胡茂红，熊文艳，戚京城，刘宇虹，罗彧，廖辉

南昌市疾病预防控制中心，南昌 330038
通信作者：廖辉，E-mail：liaohui527@126.com

【摘　要】目的 了解江西省南昌市 2018—2022 年极端气温对居民脑卒中死亡风险的影响，为制定相应的预防措施和健康政策提供数据支持。**方法** 收集中国疾病预防控制中心人口死亡登记信息系统中 2018 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日南昌市居民脑卒中死因数据以及南昌市同期大气污染物和气象数据资料，通过广义相加模型（GAM）结合分布滞后非线性模型（DLNM）分析极端气温对居民脑卒中死亡风险的累积滞后效应，并对不同性别、年龄和脑卒中亚型居民进行亚组分析以确定敏感人群。**结果** 南昌市 2018—2022 年累计报告脑卒中死亡 23 630 例，其中出血性脑卒中 12 269 例，缺血性脑卒中 11 361 例。南昌市日均气温与居民脑卒中死亡之间分布关系呈近似“J”形曲线，最低死亡风险气温（MMT）为 8.5 ℃。DLNM 分析结果显示，极端高温对居民脑卒中死亡风险效应在当日（lag0 d）达最大，滞后累积相对危险度（*cumRR*）值为 1.328（95%*CI*=1.136 ~ 1.553），且持续到 lag2 d 后其差异无统计学意义（*P*>0.05）；极端低温对居民脑卒中死亡风险效应具有滞后性，在 lag6 d 达到最大，*cumRR* 值为 1.031（95%*CI*=1.013 ~ 1.049）。亚组分析结果显示，极端高温对各亚组居民脑卒中死亡风险效应分布趋势相似且均以 lag0 d 的效应为最大，其中男性居民 *cumRR* 值 [1.389（95%*CI*=1.149 ~ 1.679）] 高于女性居民 *cumRR* 值 [1.263（95%*CI*=1.027 ~ 1.553）]，<60 岁居民 *cumRR* 值 [1.166（95%*CI*=0.844 ~ 1.611）] 低于≥ 60 岁居民 *cumRR* 值 [1.373（95%*CI*=1.158 ~ 1.630）]，出血性脑卒中患者 *cumRR* 值 [1.316（95%*CI*=1.090 ~ 1.589）] 高于缺血性脑卒中患者 *cumRR* 值 [1.305（95%*CI*=1.059 ~ 1.601）]；极端低温时男性居民 lag5 d 的 *cumRR* 值 [1.033（95%*CI*=1.013 ~ 1.054）] 高于女性居民 lag7d 的 *cumRR* 值 [1.032（95%*CI*=1.004 ~ 1.060）]，<60 岁居民 lag5 d 的 *cumRR* 值 [1.042（95%*CI*=1.005 ~ 1.079）] 高于≥60 岁居民 lag6 d 的 *cumRR* 值 [1.028（95%*CI*=1.010 ~ 1.046）]，出血性脑卒中患者 lag6 d 的 *cumRR* 值 [1.045（95%*CI*=1.015 ~ 1.076）] 高于缺血性脑卒中患者 lag6 d 的 *cumRR* 值 [1.026（95%*CI*= 1.003 ~ 1.049）]。**结论** 极端气温可导致南昌市居民脑卒中死亡风险上升，极端高温效应急性且短暂，极端低温效应有一定滞后性；男性和出血性脑卒中患者在极端高温和极端低温时的脑卒中死亡风险均较高，<60 岁和≥60 岁居民分别在极端低温和极端高温时脑卒中的死亡风险较高。

【关键词】 脑卒中；死亡风险；极端气温；影响；分布式滞后非线性模型（DLNM）；南昌市

Influence of extreme temperatures on stroke mortality risk among residents of Nanchang city between 2018 and 2022

HU Maohong, XIONG Wenyan, QI Jingcheng, LIU Yuhong, LUO Yu, LIAO Hui (*Nanchang Center for Disease Control and Prevention*, *Nanchang*, 330038, *China*)
Corresponding author: LIAO Hui, E-mail: liaohui527@126.com

【Abstract】 Objective To understand the impact of extreme temperatures on the risk of stroke mortality among residents in Nanchang city, Jiangxi province, from 2018 to 2022, and to provide data support for the formulation of corresponding preventive measures and health policies. **Methods** Data on stroke mortality among Nanchang residents from January 1, 2018, to December 31, 2022, as well as data on air pollutants and meteorology in Nanchang during the same period, were collected from the Chinese Center for Disease Control and Prevention's Population Mortality Registration Information System. A generalized additive model (GAM) combined with a distributed lag non-linear model (DLNM) was used to analyze the cumulative lag effect of extreme temperatures on the risk of stroke mortality among residents. Subgroup analyses were conducted for different genders, ages, and stroke subtypes to identify sensitive populations. **Results** A total of 23 630 stroke deaths were reported in Nanchang city from 2018 to 2022, including 12 269 hemorrhagic strokes and 11 361 ischemic strokes. The distribution relationship between daily average temperature and stroke mortality in Nanchang city showed an approximate "J" shaped curve, with the minimum mortality temperature (MMT) being 8.5 °C. DLNM analysis showed that the effect of extreme high temperature on the risk of stroke mortality reached its peak on the same day (lag0 d), with a cumulative relative risk (cum*RR*) of 1.328 (95%*CI*: 1.136–1.553), and the difference was not statistically significant after lag2 d (*P*>0.05). The effect of extreme low temperature on the risk of stroke mortality had a lag effect, reaching its peak at lag6 d, with a cumRR of 1.031 (95%*CI*: 1.013–1.049). Subgroup

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1145333
基金项目：江西省卫生健康委科技计划项目（202510741）
第一作者：胡茂红（1983—），副主任医师，硕士，研究方向：传染病预防与控制。
收稿日期：2024-07-01　修回日期：2024-09-20　录用日期：2024-11-19
利益冲突：不存在　伦理审查：已获取　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

analysis showed that the distribution trends of the effects of extreme high temperature on the risk of stroke mortality in each subgroup were similar, and all reached their peak at lag0 d. The cumRR for males [1.389 (95%*CI*: 1.149–1.679)] was higher than that for females [1.263 (95%*CI*: 1.027–1.553)], the cum*RR* for residents <60 years old [1.166 (95%*CI*: 0.844–1.611)] was lower than that for residents ⩾60 years old [1.373 (95%*CI*: 1.158–1.630)], and the cum*RR* for hemorrhagic stroke [1.316 (95%*CI*: 1.090–1.589)] was higher than that for ischemic stroke [1.305 (95%*CI*: 1.059–1.601)]. Under extreme low temperature, the cum*RR* at lag5 d for males [1.033 (95%*CI*: 1.013–1.054)] was higher than that at lag7d for females [1.032 (95%*CI*: 1.004–1.060)], the cum*RR* at lag5 d for residents <60 years old [1.042 (95%*CI*: 1.005–1.079)] was higher than that at lag6 d for residents ⩾60 years old [1.028 (95%*CI*: 1.010–1.046)], and the cum*RR* at lag6 d for hemorrhagic stroke [1.045 (95%*CI*: 1.015–1.076)] was higher than that at lag6 d for ischemic stroke [1.026 (95%*CI*: 1.003–1.049)]. **Conclusions** Extreme temperatures can increase the risk of stroke mortality in Nanchang city residents. The effect of extreme high temperature is acute and short-lived, while the effect of extreme low temperature has a certain lag. Males and residents with hemorrhagic stroke have a higher risk of stroke mortality under both extreme high and low temperatures. Residents <60 years old and ⩾60 years old have a higher risk of stroke mortality under extreme low and high temperatures, respectively.

【Keywords】 stroke; mortality risk; extreme temperature; impact; distributed lag non-linear model (DLNM); Nanchang city

脑卒中是一种急性脑血管疾病，其发病机制主要涉及脑部血管的突然阻塞或破裂，进而导致脑组织功能受损[1]。脑卒中主要分为出血性脑卒中和缺血性脑卒中两类，不同脑卒中亚型具有不同的发病机制、死亡率、危险因素和结局[2]。截至2019 年，脑卒中已成为全球范围内仅次于缺血性心脏病的第二大致死原因[3]。近年来随着全球气候变化的加剧，极端气候事件的频繁发生已经严重影响了人群生命健康，全球疾病负担研究结果表明，环境条件已成为了全球脑卒中疾病负担的主要因素之一，约占总疾病负担的 29.2%[4]。南昌市坐落于江西省中部偏北地区，具有典型的亚热带季风气候特征，极端气温的出现较为频繁[5]，而极端气温，无论是高温还是低温，均会对人体的体温调节系统造成影响。为了解南昌市 2018—2022 年极端气温对居民脑卒中死亡风险的影响，为制定相应的预防措施和健康政策提供数据支持，本研究收集中国疾病预防控制中心人口死亡登记信息系统中 2018 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日南昌市居民脑卒中死因数据以及南昌市同期大气污染物和气象数据资料，通过广义相加模型（generalized additive model，GAM）结合分布滞后非线性模型（distributed lag non-linear model，DLNM）分析极端气温对居民脑卒中死亡风险的累积滞后效应，并对不同性别、年龄和脑卒中亚型居民进行亚组分析以确定敏感人群。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源　南昌市居民 2018 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日脑卒中死亡数据来源于中国疾病预防控制中心人口死亡登记信息系统，脑卒中根据国际疾病分类第 10 版（international classification of diseases，ICD-10）进行编码，出血性脑卒中和缺血性脑卒中的编码分别为 I60～I62 和 I63[6]。同期气象数据和大气污染物数据分别来源于中国气象局和中国环境监测中心，其中气象指标包括日均最高温度（℃）、日均最低温度（℃）、日均温度（℃）和日均相对湿度（%），大气污染物指标包括细颗粒物（fine particulate matter，$PM_{2.5}$）、可吸入颗粒物（inhalable particulate matter，PM_{10}）、二氧化硫（sulfur dioxide，SO_2）、二氧化氮（nitrogen dioxide，NO_2）和 8 h 臭氧（ozone-8 hour，O_3-8 h）。

1.2 统计分析　采用 R 4.2.0 软件进行统计分析。DLNM 模型是一种用于分析时间序列数据中非线性和动态效应的统计模型，该模型能够考虑到滞后效应，即变量在过去时间点的值对当前值的影响，这有助于捕捉变量之间的时滞关系[7]。既往研究发现环境温度与人群死亡呈非线性趋势且存在滞后效应[8]，考虑到南昌市脑卒中日均死亡人数模式近似准泊松分布，因此本模型在控制了潜在的协变量后，采用准泊松分布的 GAM 结合 DLNM 模型分析极端气温对居民脑卒中死亡的非线性和滞后影响。参考相关研究[9] 结合赤池信息准则（akaike information criterion，AIC）的筛选，最终设定本模型的最长滞后时间为 14 d，时间趋势变量的自由度为 7，湿度和大气污染物的自由度为 3。为避免潜在的多重共线性，模型中加入了与日均温度相关系数<0.7 的大气污染物，最终公式为：

$$\mathrm{Log}(Y_t) = \alpha + \beta \mathrm{DMT}_{t,l} + \mathrm{ns}(\mathrm{Time}_t, 7\times 5) + \mathrm{ns}(\mathrm{RH}_t, 3) + \mathrm{ns}(\mathrm{Pollutants}_t, 3) + \mathrm{DOW}_t + \mathrm{Holiday}_t$$

式中，t 和 l 分别为观测时间（d）和滞后日；Y_t 为 t 天的每日死亡人数；α和β分别为截距和 DMT 矩阵系数；DMT为温度与滞后时间的“交叉基”函数矩阵；ns为自然样条函数；$\mathrm{Pollutants}_t$、RH_t 和 Time_t 分别为大气污染物、日相对湿度和时间趋势变量；DOW_t为星期几效应；$\mathrm{Holiday}_t$为假期效应；其中，$\mathrm{Pollutants}_t$包括 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2 和 O_3-8 h 等大气污染物变量。将日均温度 $P_{2.5}$ 和 $P_{97.5}$ 设为

极高温度和极低温度，以最低死亡风险气温（minimum mortality temperature，MMT）8.5 ℃作为参考温度，分别计算极端气温下的最长达 14 d 的滞后累积 *RR* 值（cumulative relative risk，*cumRR*）。此外，本研究还按性别（男性和女性）、年龄（<60 岁和≥60 岁）和脑卒中亚型（出血性脑卒中和缺血性脑卒中）进行了亚组分析以确定敏感人群。检验水准为双侧检验 α=0.05。

2 结　果

2.1　基本情况（表 1）　南昌市 2018—2022 年累计报告脑卒中死亡 23 630 例，日均脑卒中死亡人数为（10.99±6.04）例。其中，男性 12 861 例（54.42%），女性 10 769 例（45.58%）；年龄<60 岁 3 913 例（16.56%），≥60 岁 19 717 例（83.44%）；出血性脑卒中 12 269 例（51.92%），缺血性脑卒中 11 361 例（48.08%）。

表 1　南昌市 2018—2022 年气象因素和大气污染物基本特征
Table 1　Basic characteristics of meteorological factors and air pollutants in Nanchang city from 2018 to 2022

项目	项目	$\bar{x}\pm s$	Min	P_{25}	M	P_{75}	Max
气象因素	日均最高气温/℃	22.74±9.53	–0.20	14.70	23.75	31.10	39.30
	日均最低气温/℃	16.48±8.60	–4.10	9.00	16.65	24.30	31.40
	日均气温/℃	19.38±8.95	–1.40	11.60	19.90	27.10	35.20
	日均相对湿度/%	72.26±14.53	29.00	62.00	73.00	84.00	100.00
大气污染物/μg/m³	$PM_{2.5}$	31.88±20.60	4.00	17.00	27.00	41.00	134.00
	PM_{10}	62.06±36.18	7.00	36.00	54.00	81.00	364.00
	SO_2	8.94±4.68	2.00	6.00	8.00	11.00	38.00
	NO_2	29.79±15.23	6.00	19.00	26.00	38.00	98.00
	O_3-8 h	91.43±40.51	5.00	62.00	90.00	120.00	204.00

2.2　南昌市 2018—2022 年气象因素与大气污染物相关性分析（表 2）　相关性分析结果显示，日均气温与日均最高气温、日均最低气温、SO_2 和 O_3-8 h 均呈正相关，与日均相对湿度、$PM_{2.5}$、PM_{10} 和 NO_2 均呈负相关（均 P<0.01）；日均最高气温与日均最低气温、SO_2 和 O_3-8 h 均呈正相关，与日均相对湿度、$PM_{2.5}$、PM_{10} 和 NO_2 均呈负相关（均 P<0.01）；最低气温与 O_3-8 h 呈正相关，与 $PM_{2.5}$、PM_{10} 和 NO_2 均呈负相关（均 P<0.01）；日均相对湿度与 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2 和 O_3-8 h 均呈负相关（均 P<0.01）。

表 2　南昌市 2018—2022 年气象因素和大气污染物相关性分析
Table 2　Correlation analysis of meteorological factors and air pollutants in Nanchang city from 2018 to 2022

项目	日均气温	日均最高气温	日均最低气温	日均相对湿度	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	O_3-8 h
日均气温	1.000								
日均最高气温	0.986 [a]	1.000							
日均最低气温	0.986 [a]	0.951 [a]	1.000						
日均相对湿度	–0.198 [a]	–0.209 [a]	–0.029	1.000					
$PM_{2.5}$	–0.491 [a]	–0.376 [a]	–0.466 [a]	–0.237 [a]	1.000				
PM_{10}	–0.261 [a]	–0.131 [a]	–0.257 [a]	–0.512 [a]	0.881 [a]	1.000			
SO_2	0.174 [a]	0.114 [a]	0.027	–0.576 [a]	0.374 [a]	0.602 [a]	1.000		
NO_2	–0.391 [a]	–0.326 [a]	–0.426 [a]	–0.208 [a]	0.677 [a]	0.729 [a]	0.530 [a]	1.000	
O_3-8 h	0.624 [a]	0.670 [a]	0.555 [a]	–0.573 [a]	–0.033	0.191 [a]	0.344 [a]	–0.099 [a]	1.000

注：a P<0.01。

2.3　气温对南昌市居民脑卒中死亡风险的影响（图 1）　图 1a 结果显示，南昌市日均气温与居民脑卒中死亡风险之间分布关系近似“J”形曲线，当温度为 8.5 ℃时，脑卒中死亡风险最低，极高气温为 33 ℃，极低气温为 3 ℃。图 1b 结果显示，MMT 为 8.5 ℃时，高温对脑卒中死亡的 *RR* 值在当日（lag0 d）达最大值，且在随后的几天内逐渐降低；而低温对脑卒中死亡的影响在当日（lag0 d）无统计学意义，在 lag6 d 时达最大值。

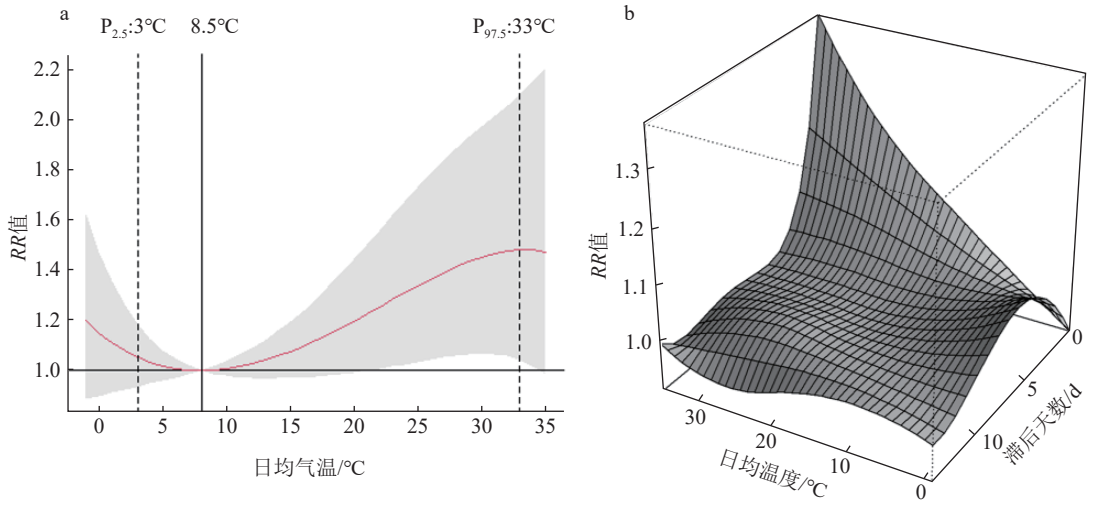


图 1　温度阈值及日均温度对南昌市居民脑卒中死亡风险的三维图

Fig. 1　Three-dimensional diagram of the temperature threshold and the effect of daily average temperature on the risk of stroke mortality in residents of Nanchang city

2.4　极端气温对南昌市居民脑卒中死亡风险的累积滞后效应（表 3）　南昌市居民极端高温在 lag0 d 时对脑卒中死亡风险的效应最大，*cumRR* 值为 1.328（95%*CI*=1.136～1.553），且持续到 lag2 d 后其差异无统计学意义（*P*>0.05）；极端低温对居民脑卒中死亡风险效应具有滞后性，在 lag6 d 达到最大，*cumRR* 值为 1.031（95%*CI*=1.013～1.049）。

表 3　极端气温对南昌市居民脑卒中死亡风险的累积滞后效应

Table 3　Cumulative lag effects of extreme temperatures on stroke mortality risk in Nanchang city

滞后天数/d	极端高温		极端低温	
	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*
0	1.328	1.136～1.553	0.945	0.887～1.003
1	1.162	1.102～1.244	0.972	0.952～0.985
2	1.061	1.006～1.146	0.986	0.973～1.017
3	1.009	0.962～1.082	1.014	0.981～1.031
4	0.994	0.952～1.032	1.019	1.006～1.038
5	0.991	0.953～1.019	1.026	1.013～1.043
6	0.993	0.951～1.024	1.031	1.013～1.049
7	0.995	0.954～1.029	1.025	1.008～1.043
8	0.998	0.965～1.031	1.024	1.010～1.038
9	1.001	0.972～1.033	1.018	0.996～1.029
10	0.999	0.969～1.031	1.009	0.984～1.022
11	0.995	0.950～1.040	0.992	0.978～1.018
12	0.992	0.947～1.036	0.986	0.973～1.015
13	0.989	0.946～1.023	0.978	0.974～1.011
14	0.990	0.884～1.106	0.982	0.941～1.039

2.5　亚组分析（表 4、5）　亚组分析结果显示，极端高温对各亚组居民脑卒中死亡风险效应分布趋势相似且均以 lag0 d 的效应为最大，其中男性居民 *cumRR* 值高于女性居民，<60 岁居民 *cumRR* 值低于≥60 岁居民，出血性脑卒中患者 *cumRR* 值高于缺血性脑卒中患者；极端低温时男性居民 lag5 d 的 *cumRR* 值高于女性居民 lag7 d 的 *cumRR* 值，<60 岁居民 lag5 d 的 *cumRR* 值高于≥60 岁居民 lag6 d 的 *cumRR* 值，出血性脑卒中患者 lag6 d 的 *cumRR* 值 1.045 高于缺血性脑卒中患者 lag6 d 的 *cumRR* 值。

表 4 极端高温对南昌市不同亚组居民脑卒中死亡风险的累积滞后效应

Table 4 Cumulative lag effects of extreme high temperature on stroke mortality risk in different subgroups in Nanchang city

滞后天数/d	性别				年龄				脑卒中亚型			
	男性		女性		<60岁		≥60岁		出血性脑卒中		缺血性脑卒中	
	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*
0	1.389	1.149～1.679	1.263	1.027～1.553	1.166	0.844～1.611	1.373	1.158～1.630	1.316	1.090～1.589	1.305	1.059～1.601
1	1.182	1.110～1.281	1.148	1.051～1.245	1.089	0.961～1.231	1.192	1.118～1.272	1.175	1.091～1.271	1.176	1.058～1.232
2	1.076	0.982～1.172	1.083	0.996～1.181	1.025	0.932～1.165	1.183	1.008～1.152	1.083	1.006～1.171	1.053	0.973～1.168
3	0.997	0.923～1.082	1.047	0.987～1.143	0.998	0.876～1.149	1.045	0.975～1.115	1.023	0.968～1.112	1.003	0.923～1.088
4	0.971	0.921～1.012	1.028	0.989～1.091	0.976	0.878～1.082	0.998	0.969～1.053	1.005	0.959～1.086	0.996	0.924～1.057
5	0.968	0.924～1.003	1.019	0.991～1.082	0.962	0.885～1.072	0.990	0.971～1.024	0.997	0.958～1.044	0.994	0.937～1.031
6	0.973	0.926～1.007	1.012	0.984～1.080	0.953	0.862～1.073	0.992	0.972～1.028	0.992	0.952～1.048	0.998	0.938～1.049
7	0.980	0.931～1.018	1.009	0.974～1.075	0.958	0.875 ～1.077	0.999	0.975～1.034	0.996	0.955～1.053	1.001	0.941～1.048
8	0.998	0.949～1.035	0.997	0.969～1.068	0.968	0.880 ～1.076	1.002	0.976～1.037	0.998	0.959～1.052	1.002	0.945～1.042
9	1.009	0.966～1.047	0.989	0.957～1.047	0.973	0.892～1.077	1.003	0.982～1.029	0.999	0.962～1.049	1.002	0.955～1.035
10	1.012	0.971～1.061	0.979	0.926～1.041	0.983	0.895～1.083	0.998	0.980 ～1.032	0.999	0.959～1.051	0.999	0.941～1.039
11	1.010	0.958～1.078	0.963	0.887～1.039	0.995	0.882～1.104	0.993	0.967～1.042	0.994	0.946～1.079	0.997	0.926～1.051
12	1.005	0.954～1.067	0.955	0.882～1.034	0.998	0.883～1.108	0.989	0.964～1.033	0.990	0.939～1.059	0.991	0.915～1.041
13	0.998	0.943～1.036	0.971	0.899～1.035	0.996	0.887～1.009	0.985	0.963～1.026	0.987	0.937～1.045	0.989	0.918～1.032
14	0.976	0.831～1.141	0.992	0.874～1.185	0.979	0.776～1.272	0.987	0.831～1.141	0.981	0.827～1.142	0.990	0.822～1.156

表 5 极端低温对南昌市不同亚组居民脑卒中死亡风险的累积滞后效应

Table 5 Cumulative lag effect of extreme low temperature on stroke mortality risk in different subgroups in Nanchang city

滞后天数/d	性别				年龄				脑卒中亚型			
	男性		女性		<60岁		≥60岁		出血性脑卒中		缺血性脑卒中	
	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*	*cumRR*值	95%*CI*
0	0.923	0.857～0.986	0.976	0.901～1.058	0.923	0.824～1.042	0.959	0.905～1.017	0.912	0.831～0.998	0.971	0.901～1.035
1	0.968	0.942～0.993	0.977	0.942～1.006	0.976	0.931～1.024	0.976	0.958～0.994	0.963	0.927～0.996	0.976	0.951～1.004
2	1.002	0.972～1.027	0.982	0.953～1.016	1.008	0.971～1.061	0.991	0.976～1.019	0.998	0.964～1.031	0.982	0.963～1.021
3	1.019	0.991～1.043	0.999	0.961～1.028	1.035	0.980～1.082	1.008	0.980～1.029	1.027	0.982～1.061	1.008	0.976～1.031
4	1.028	1.009～1.056	1.013	0.989～1.041	1.041	0.999～1.081	1.021	0.998～1.041	1.035	1.007～1.067	1.014	0.984～1.042
5	1.033	1.013～1.054	1.024	1.001～1.047	1.042	1.005～1.079	1.025	1.009～1.042	1.042	1.014～1.074	1.021	1.002～1.045
6	1.029	1.011～1.053	1.030	1.006～1.058	1.038	0.999～1.077	1.028	1.010～1.046	1.045	1.015～1.076	1.026	1.003～1.049
7	1.024	1.008～1.048	1.032	1.004～1.060	1.033	0.996～1.072	1.026	1.007～1.041	1.040	1.012～1.075	1.020	0.998～1.047
8	1.021	1.001～1.039	1.025	1.001～1.048	1.029	0.995～1.069	1.023	1.003～1.037	1.037	1.011～1.064	1.015	0.992～1.039
9	1.019	0.997～1.031	1.014	0.991～1.035	1.024	0.994～1.056	1.019	0.998～1.033	1.028	1.008～1.052	1.010	0.982～1.024
10	1.014	0.988～1.029	1.003	0.978～1.029	1.010	0.984～1.054	1.006	0.986～1.026	1.021	0.991～1.046	0.994	0.974～1.019
11	1.007	0.981～1.028	0.987	0.962～1.021	1.007	0.971～1.058	0.992	0.977～1.021	1.012	0.976～1.044	0.987	0.963～1.018
12	0.998	0.975～1.024	0.981	0.958～1.017	0.999	0.953～1.047	0.896	0.974～1.017	0.994	0.962～1.026	0.991	0.965～1.018
13	0.989	0.971～1.019	0.984	0.967～1.017	0.981	0.946～1.026	0.899	0.975～1.012	0.971	0.944～1.004	1.009	0.978～1.029
14	0.978	0.920～1.032	1.010	0.929～1.082	0.963	0.865～1.071	0.997	0.947～1.048	0.941	0.869～1.024	1.038	0.974～1.110

3 讨 论

本研究基于 2018—2022 年南昌市脑卒中死亡病例、气象数据和大气污染物数据，通过 GAM 结合 DLNM 分析极端气温对居民脑卒中死亡风险的影响。结果显示，南昌市居民的 MMT 为 8.5 ℃，极端高温对脑卒中死亡具有急性效应，其影响随滞后时间的延长而逐渐减弱；相比之下，极端低温则显示出累积滞后效应。日均气温与脑卒中死亡之间的关系呈非线性的“J”形曲线，这一发现与既往研究[10–11]结果一致。此外，不同性别、年龄和

脑卒中亚型亚组居民的脑卒中死亡风险有差异。

南昌市位于中国东南部，具有亚热带湿润气候特征，夏季高温多湿而冬季相对温和，这种独特的气候类型可能通过多种机制直接或间接影响人群脑卒中的发生[12]。本研究结果显示，南昌市居民的脑卒中死亡风险与极端高温和极端低温均有关联，其中极端高温对脑卒中死亡的效应表现为急性且短暂，而极端低温效应则具有一定的滞后性，这与既往研究结果一致[13-15]。一般来说，人体对高温的生理反应通常迅速，血液黏稠度增加和体温迅速上升，从而直接或间接地增加了脑卒中的死亡风险。Chen R J 等[16] 一项涵盖了北京和上海等国内 8 个大中型城市的研究发现，极端低温对人体的潜在影响可能持续≥2 周，提示低温对人体的生理影响更为隐蔽，身体可能需要更长时间来适应持续的低温环境。有研究表明，低温可能激活身体的免疫系统，引发炎症反应，长期的低度炎症状态可能损伤血管，增加动脉粥样硬化的风险，从而延长脑卒中的发生时间[17]。房启迪等[18] 在山东省的一项研究表明，当低温持续数日时，出血性脑卒中的发病风险明显增加，但未发现高温与出血性脑卒中发病风险有统计学关联，这可能是因为山东省属于暖温带半湿润大陆性气候，冬季温度较南昌市更低，因此会因低温导致血压升高，增加出血性脑卒中的发病风险。

本研究亚组分析结果显示，男性是极端温度的敏感人群，与 Zhu X L 等[19] 研究结果一致，这可能与男性居民更多地参与户外体力劳动和较高的脑卒中基线患病率有关。南昌市男性居民中吸烟、饮酒和高脂饮食等不良生活方式的比例较高，这些因素可能会加剧冷热环境变化对该地区居民脑卒中死亡的影响[20]。本研究中，南昌市≥60 岁居民脑卒中死亡风险更易受到极端高温的影响，与山东省济南市[21] 和上海市浦东区[22] 的研究结果基本一致。这可能与老年人体温调节系统的能力随年龄的增长而减弱，因此在面对极端气温时可能无法迅速或有效地调节体温以适应环境变化有关。值得注意的是，本研究发现<60 岁居民更易受极端低温的影响，与安吉等[17] 研究中<65 岁人群在低温条件下脑卒中入院率明显上升的结果相似，这可能与该年龄段人群更频繁地在室内外温差较大的环境中活动，而温差的急剧变化可能导致血管的快速收缩或扩张，从而增加了脑卒中发生的风险有关。

此外，环境温度对不同脑卒中亚型居民死亡风险的影响亦具有特异性。相对于缺血性脑卒中，出血性脑卒中更易受到极端气温的影响，这一发现与 Ikefuti P V 等[23] 在巴西圣保罗的研究结果相似，这可能与极端气温可诱发血压升高，造成脑内血管破裂，最终导致出血性脑卒中有关。白梅等[24] 研究亦表明，辽宁省丹东市元宝区居民在日均气温较低时出血性脑卒中的发病风险在 lag2 d 达最大值，而陈亦晨等[22] 研究则发现上海浦东区居民缺血性脑卒中对低温更为敏感，这可能与不同地区的气候特征以及居民的生活方式等多种因素不同有关。Çevik Y 等[25] 研究亦表明，温度变化可引发心率加快、动脉压升高和电解质失衡等症状，这些症状均可增加出血性脑卒中的发病风险，但对缺血性脑卒中的影响却不显著。

综上所述，极端气温会导致南昌市居民脑卒中死亡风险上升，极端高温效应急性且短暂，极端低温效应有一定滞后性；男性和出血性脑卒中居民在极端高温和极端低温时的脑卒中死亡风险均较高，<60 岁和≥60 岁居民分别在极端低温和极端高温时脑卒中的死亡风险较高。因此建议相关部门加强对极端气候的监测，并及时向公众发布预警信息，以提高对极端高温急性效应和极端低温滞后性的认识；在制定公共卫生防治策略时特别关注对敏感人群的保护，并加强健康教育以减轻极端温度对人群健康造成的潜在影响。本次研究的南昌市为亚热带内陆城市，居民在面对极端气温时的敏感性和反应可能与沿海或温带城市有所不同；此外，在探索极端气温的直接影响时，本研究考虑了大气污染物的交互影响，增强了研究的整体全面性。但仍存在一定的局限性：首先，本研究本质上是一项生态学分析，且由于死因数据的限制未能在个体水平上调整诸如吸烟、饮酒和疾病既往病史等潜在混杂因素，这可能影响了结果的精确性；其次，本研究依赖于室外监测点的空气污染物和温度数据，这可能无法完全反映个体的实际暴露情况；最后，本研究的结果仅能代表南昌市的情况，将结论外推至其他地区尚需进一步验证。因此，在今后的研究中可采用个体监测方法结合时间活动模式和室内温度状况等因素构建更精确的个体暴露模型，并扩大研究地区及开展长期纵向队列研究对本研究结果进一步加以验证。

参考文献

[1] 北京高血压防治协会, 中国卒中学会高血压预防与管理分会, 中国老年保健协会养老与健康专业委员会, 等. 基层冠心病与缺血性脑卒中共患管理专家共识 2022[J]. 中国心血管病研究, 2022, 20(9): 772-793.

[2] 张鸥, 刘洋, 蒙航娟, 等. 血浆同型半胱氨酸水平与脑卒中关系研究

进展 [J]. 中国公共卫生, 2021, 37(12): 1840-1844.

[3] Roth G A, Mensah G A, Johnson C O, et al. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: UPDATE from the GBD 2019 study[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2020, 76(25): 2982-3021.

[4] Feigin V L, Roth G A, 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]. The Lancet Neurology, 2016, 15(9): 913-924.

[5] 吴滨, 刘卫林, 张景嵘, 等. 南昌市气温变化及其与气候指数相关性研究 [J]. 南昌工程学院学报, 2021, 40(6): 9-15.

[6] 梁雪平. 脑卒中的疾病与介入治疗操作分类 [J]. 中国病案, 2012, 13(1): 26, 80.

[7] 杨军, 欧春泉, 丁研, 等. 分布滞后非线性模型 [C]//2011 年中国卫生统计学年会会议论文集. 西安: 中国卫生信息学会统计理论与方法专业委员会, 中华预防医学会卫生统计专业委员会, 2011: 292-296.

[8] Wan K, Feng Z Q, Hajat S, et al. Temperature-related mortality and associated vulnerabilities: evidence from Scotland using extended time-series datasets[J]. Environmental Health, 2022, 21(1): 99.

[9] Zhou L, Chen K, Chen X D, et al. Heat and mortality for ischemic and hemorrhagic stroke in 12 cities of Jiangsu Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 271-277.

[10] 董意麟, 何芬芬, 吕恒, 等. 基于分布滞后非线性模型评估气温对缺血性脑卒中发病的影响 [J]. 蚌埠医学院学报, 2024, 49(1): 110-114,118.

[11] Zhou L, He C, Kim H, et al. The burden of heat-related stroke mortality under climate change scenarios in 22 East Asian cities[J]. Environment International, 2022, 170: 107602.

[12] 黄仁发. 南昌市气象因素与脑卒中发病关系的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.

[13] 何晓定, 周迎春. 气象因素对上海市长宁区脑卒中死亡的影响 [J]. 实用预防医学, 2020, 27(3): 274-277.

[14] 鹿文涵, 谷少华, 孙仕强, 等. 沿海城市极端气温对脑卒中死亡的滞后定量影响 [J]. 气象学报, 2022, 80(3): 449-459.

[15] 闫宇, 王晓雯, 谷雨萌, 等. 高血压合并急性缺血性脑卒中患者血压变异性与气温变化的关系研究 [J]. 天津医药, 2022, 50(6): 627-632.

[16] 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(12): 1064-1070.

[17] 安吉, 郭默宁, 谭鹏, 等. 基于分布滞后非线性模型评估气温对北京市居民缺血性脑卒中入院人数的影响 [J]. 环境与职业医学, 2020, 37(5): 486-491.

[18] 房启迪, 刘盈, 程传龙, 等. 热浪和寒潮对出血性脑卒中发病的影响研究 [J]. 预防医学, 2023, 35(1): 6-10.

[19] Zhu X L, Chen R J, Yuan J, et al. Hourly heat exposure and acute ischemic stroke[J]. JAMA Network Open, 2024, 7(2): e240627.

[20] 宋旭丽, 蔡先旭, 陈飞. 南昌市青云谱区≥40 岁常住居民脑卒中流行病学特征及其影响因素 [J]. 中国卫生工程学, 2022, 21(6): 924-927.

[21] Han J, Liu S Q, Zhang J, et al. The impact of temperature extremes on mortality: a time-series study in Jinan, China[J]. BMJ Open, 2017, 7(4): e014741.

[22] 陈亦晨, 陈华, 曲晓滨, 等. 日均气温对社区居民脑卒中死亡影响的时间序列研究 [J]. 中国全科医学, 2022, 25(15): 1838-1844.

[23] Ikefuti P V, Barrozo L V, Braga A L F. Mean air temperature as a risk factor for stroke mortality in São Paulo, Brazil[J]. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(8): 1535-1542.

[24] 白梅, 阎涵, 姜海强, 等. 2017—2021 年丹东市元宝区居民心脑血管疾病与气温的关联性研究 [J]. 环境与健康杂志, 2024, 41(4): 317-321.

[25] Çevik Y, Doğan N Ö, Daş M, et al. The association between weather conditions and stroke admissions in Turkey[J]. International Journal of Biometeorology, 2015, 59(7): 899-905.