

# 2019 冠状病毒病暴发初期时空特征及污染物评估\*

何森<sup>1</sup>, 石昌浩<sup>1</sup>, 余铨捷<sup>1</sup>, 程梓淇<sup>1</sup>, 董朔含<sup>1</sup>, 刘天昊<sup>1</sup>, 张志浩<sup>1</sup>, 刘菁<sup>2</sup>

1. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275  
2. 安阳市肿瘤医院医务科, 河南 安阳 455002

**摘要:** 为探究 2020 年中国内地 2019 冠状病毒病 (COVID-19, coronavirus disease 2019) 暴发初期的时空传播特征, 以及评估大气污染因素对疫情传播的风险, 本文从中国国家及各省市卫生健康委员会网站获取了 2020 年初各省份 2019 冠状病毒病的每日新增确诊病例数据; 采用自相关分析和趋势分析等方法研究中国内地疫情传播的时空特征, 采用斯皮尔曼等级相关系数和广义相加模型对影响湖北省疫情发展的大气污染因素进行了风险评估。自 2020 年 1 月 20 日~2 月 9 日, 中国内地 2019 冠状病毒病累计确诊病例 39 877 例。分析显示, 2020 年中国内地 2019 冠状病毒病暴发初期的前 3 周全局莫兰指数取值分别为 0.249、0.307 和 0.297 ( $P < 0.01$ ), 聚集现象十分显著。湖南省、广东省、江西省、浙江省、安徽省和江苏省属于高-高聚集区。疫情热点地区基本分布在东经  $108^{\circ}47' \sim 123^{\circ}10'$  和北纬  $25^{\circ}31' \sim 35^{\circ}20'$  区域范围以内。湖北省每日新增确诊病例与大气可吸入颗粒物 ( $PM_{10}$ )、 $NO_2$  和  $O_3$  日平均质量浓度呈现显著的正相关 ( $\rho = 0.515, 0.579, 0.536, P < 0.05$ )。  $PM_{10}$  和大气细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 的相对危险度 (RR, relative risk) 数值在滞后 0 d (Lag 0) 达到最大,  $NO_2$  的 RR 值在滞后 4 d 达到最大,  $O_3$  的 RR 值在滞后 0~1 d 达到最大。  $NO_2$  日平均质量浓度每增加  $10 \mu g/m^3$ , 每日新增确诊病例的超额危险度 (ER, excess risk) 为 32.745% (95% confidence interval (CI): 11.586%~57.916%)。对  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  分别引入  $NO_2$  后,  $NO_2$  日平均质量浓度每增加  $10 \mu g/m^3$ , 每日新增确诊病例的 ER 值分别为 23.929% (95% CI: 4.705%~46.682%) 和 24.672% (95% CI: 5.379%~47.496%)。研究表明, 2020 年中国内地 2019 冠状病毒病暴发初期的前 3 周, 东南方向是疫情传播的主要方向。降低疫情热点区域大气中的  $NO_2$  质量浓度对疫情防控具有积极作用。

**关键词:** 2019 冠状病毒病 (COVID-19, coronavirus disease 2019); 2020 年暴发初期; 时空特征; 风险评估

**中图分类号:** R181.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 04-0011-11

## Spatial-temporal characteristics and pollutant assessment in the early stage of COVID-19 outbreak in China

HE Miao<sup>1</sup>, SHI Changhao<sup>1</sup>, SHE Xuanjie<sup>1</sup>, CHENG Ziqi<sup>1</sup>,  
DONG Shuohan<sup>1</sup>, LIU Tianhao<sup>1</sup>, ZHANG Zhihao<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>2</sup>

1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Medical Department of Anyang Tumor Hospital, Anyang 455002, China

**Abstract:** To explore the early stage spatial-temporal characteristics and to assess the factors of atmospheric pollution that may affect the development of coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in the Chinese Mainland in 2020, we collected the daily new cases of COVID-19 in the Municipalities and Provinces from the websites of National and Provincial Health Commission of China. The spatio-temporal characteristics of COVID-19 epidemic were studied using autocorrelation analysis and trend analysis. The Spearman's correlation coefficient for ranked data and generalized additive model were

\* 收稿日期: 2021-01-15

录用日期: 2021-06-29

网络首发日期: 2021-07-23

基金项目: 国家自然科学基金 (31870348)

作者简介: 何森 (1963年生), 男; 研究方向: 生物统计学、生物信息学; E-mail: lsshem@mail.sysu.edu.cn

used for risk assessment of air pollutants affecting the COVID-19 epidemic of Hubei Province. Daily new cases of COVID-19 in the Chinese Mainland totaled 39 877 from January 20th to February 9th of 2020. The global Moran index values of these three weeks were 0.249, 0.307 and 0.297 ( $P < 0.01$ ), respectively. There was a significant clustering phenomenon. The high incidence regions included Hunan Province, Guangdong Province, Jiangxi Province, Zhejiang Province, Anhui Province and Jiangsu Province. The epidemic hot spots were basically distributed in the area from  $108^{\circ} 47' - 123^{\circ} 10' E$  to  $25^{\circ} 31' - 35^{\circ} 20' N$ . Daily new cases of COVID-19 in Hubei Province was positively correlated with daily average concentrations of  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  and  $O_3$  pollutants ( $\rho = 0.515, 0.579$  and  $0.536, P < 0.05$ ). The lag effects of air pollutions were existed. The relative risk (RR) values of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  reached to maximum with lag0, the RR value of  $NO_2$  reached to maximum with lag4, and the RR value of  $O_3$  reached to maximum with lag 0~1. We estimated that a  $10 \mu g/m^3$  increase in day-before  $NO_2$  daily average concentration was associated with a 32.745% (95% Confidence Interval (CI): 11.586%~57.916%) excess risk (ER) of daily new cases of COVID-19. And  $NO_2$  had a significant impact on daily new cases of COVID-19. When  $NO_2$  was introduced to  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  separately, for every  $10 \mu g/m^3$  rise in  $NO_2$  daily average concentration, the ER of daily new cases of COVID-19 was 23.929% (95% CI: 4.705%~46.682%) and 24.672% (95% CI: 5.379%~47.496%), respectively. The study showed that the southeast was the main spread direction in the early stage of COVID-19 outbreak in the Chinese Mainland in 2020. Reducing the atmospheric concentration of nitrogen dioxide in epidemic hot spots has a positive effect on epidemic prevention and control.

**Key words:** coronavirus disease 2019(COVID-19); early stage of outbreak in 2020; spatial-temporal characteristics; risk assessment

2019年底在中国内地发现了新型冠状病毒肺炎<sup>[1]</sup>, 其具有传染力强的特征, 迅速在多地蔓延<sup>[2]</sup>。2020年2月11日, 世界卫生组织将这种由严重急性呼吸综合征冠状病毒2 (SARS-CoV-2, severe acute respiratory syndrome coronavirus 2)引发的疾病重新命名为2019冠状病毒病 (COVID-19, coronavirus disease 2019)<sup>[3]</sup>。截至2021年5月17日16时12分, 中国内地累计有90 872例2019冠状病毒病确诊感染者, 累计导致4 636人死亡; 给中国社会和经济发展造成了特别巨大的损失。

流行病的发生与传播, 通常在时间和空间上均会呈现出特定的分布格局。在不同的地理环境中, 流行病的分布具有一定的时空特征差异。研究流行病传播的时空特征, 有助于理解疾病的传播机制及探究关联因素的影响。地理信息系统 (GIS, geographic information system) 技术已普遍应用于流行病发生与传播机制的研究; 包括发现疾病流行的空间格局和传播扩散模式、探测疾病流行聚集区、开展流行病空间自相关分析及运用空间回归模型预警等。空间自相关分析和趋势分析已被成功应用于伤寒传播的空间特征分析<sup>[4]</sup>。广义加性模型 (GAM, generalized additive model)

常用于流行病相关影响因素的风险评估。有学者采用GAM分析了山东省济南市流感样疾病传播的影响因素, 评估了空气污染物对疾病传播的相对风险<sup>[5]</sup>。

自2020年1月23日武汉市政府宣布“封城”开始, 至3月19日武汉市新增2019冠状病毒病确诊病例首次为零, 疫情持续了8周左右的时间; 我们将这8周时间划分为暴发初期、暴发中期和暴发后期等3个阶段。本文探究了2020年1月20日~2月9日期间, 2019冠状病毒病在中国内地暴发初期传播扩散的时空特征; 并以湖北省为例, 对可能影响疫情传播扩散的大气污染因素进行风险评估。当前, 2019冠状病毒病持续在全球范围快速传播<sup>[6-7]</sup>。2021年至今, 中国内地局部地区多次暴发疫情。鉴于未来疫情可能出现反复, 总结经验可为相关机构和部门科学合理制定疫情防控策略提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

从中国国家及各省市卫生健康委员会网站获取2020年1月20日~2月9日全国各省份和直辖市

的2019冠状病毒病每日新增确诊病例(简称“日增病例”)数据。

从湖北省气象局网站获取2020年1月20日~2月9日湖北省孝感市、黄冈市、荆州市、襄阳市、随州市、黄石市、宜昌市、荆门市、鄂州市、咸宁市、十堰市等11个地级市的日最高温度、日最低温度、日温差、日平均风速和日平均相对湿度等气象数据。对应时间段的空气污染数据来源于网站 [www.aqistudy.cn](http://www.aqistudy.cn); 从该网站获取并整理了大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO和O<sub>3</sub>等空气污染指标日平均质量浓度的数据,其中,O<sub>3</sub>数据取当日8h平均质量浓度。

从自然资源部“标准地图服务系统”(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/index.html)下载地图的底图。

## 1.2 全局空间自相关分析

空间自相关统计量常用于测度地理区域日增病例的基本属性,即特定区域与其他区域日增病例之间的相互依赖程度。具有相似的高发区域被定义为自相关。常用量化指标是莫兰指数(Moran's  $I$ );莫兰指数可用于描述区域日增病例的空间关系,计算公式为

$$I = \frac{n}{S_o} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

$$S_o = \sum_{i,j=1}^n W_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n,$$

$$Z = \frac{1 - E(I)}{\sqrt{V(I)}},$$

其中 $x_i$ 是变量 $x$ 在区域 $i$ 的观测值, $\bar{x}$ 是算术平均值, $n$ 是区域的数目, $W_{ij}$ 是空间权重矩阵 $W$ 中的元素, $W_{ij}$ 为区域 $i$ 和 $j$ 的空间权重, $W$ 空间权重矩阵根据邻接标准度量,将连接的空间单元定义为1,不连接的空间单元定义为0,如果区域 $i$ 和 $j$ 相邻,则 $W_{ij} = 1$ ,否则, $W_{ij} = 0$ ;  $S_o$ 是所有空间权重的总和。Moran's  $I$ 系数的取值区间为 $[-1, 1]$ 。 $Z$ 值为 $Z$ 检验值, $E(I)$ 为 $I$ 的平均值, $V(I)$ 为 $I$ 的方差,如果 $Z > 1.96$ , $P < 0.05$ ,且Moran's  $I > 0$ ,意味着该区域日增病例存在聚集现象。

## 1.3 局部空间自相关分析和局部热点分析

在地理空间上,鉴于疫情可能因感染源、传播方式、人口数量和族群行为特征等差异而存在不同的扩散模式,特定区域与邻近区域不一定具有相同的特征。鉴于全局空间自相关模式不能完

全阐释疫情的传播扩散规律。本文采用安瑟伦局部莫兰指数(Anselin local Moran's  $I$ )和局部热点分析方法重点鉴别具有诸如高-高聚集(或高值聚类)和高-低聚集(或高值被低值包围类)等特征的区域。

安瑟伦局部莫兰指数计算公式为

$$I_{\text{Local}} = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

本文使用ArcGIS10.7软件完成了局部空间自相关分析和热点分析。

## 1.4 趋势分析

趋势分析可用于描述流行病传播的时空特征<sup>[4]</sup>。通过对日增病例的地理空间分布进行拟合,以三维投影的形式展示拟合结果。基于经度和纬度应用多项式函数,包括观察到节点的日增病例,用以估计未知节点的日增病例。将地图中经度、纬度分别沿 $X$ 和 $Y$ 轴向标记; $Z$ 轴向表示投影网格矩阵的各省份日增病例。借助坐标指示方向生成方向趋势曲线。本文选择了两个视角, $0^\circ$ 视角曲线代表东西和南北方向的趋势; $45^\circ$ 视角曲线代表东北、西南、东南和西北方向的趋势。本文采用ArcGIS10.7软件完成了趋势分析。

## 1.5 斯皮尔曼等级相关系数

将原始数据转换为等级数据,可计算出变量间的斯皮尔曼等级相关系数 $\rho$ (Spearman's correlation coefficient for ranked data), $\rho$ 的取值区间为 $[-1, 1]$ ;如果 $\rho > 0$ ,为正相关, $\rho = 0$ ,为不相关, $\rho < 0$ ,为负相关。斯皮尔曼等级相关系数计算公式

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{m^3 - m},$$

其中 $m$ 为等级数目, $d$ 为2列成对变量的等级差值。

## 1.6 广义加性模型

日增病例近似服从于泊松分布,可采用基于准泊松回归的广义加性模型分析大气污染物、气象因素与日增病例的关系。将时间趋势、气象因素(例如,日平均相对湿度等)等非线性变量的自然三次样条函数引入GAM,用以排除长期和季节性趋势及天气条件与日增病例之间潜在的非线性关联。采用赤池信息量准则(AIC, Akaike's information criterion)确定光滑函数的自由度,最小AIC值对应于首选模型。以相对危险度(RR, relative risk)为指标,评估大气污染物对日增病例的影响。计算当大气污染物日平均质量浓度每增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

时,日增病例的超额危险度(ER, excess risk)及95%置信区间(CI, confidence interval)。同时,分别计算大气污染物的当日(Lag 0)及1~5 d(Lag 1~5)滞后效应。对单日滞后模型(Lag 0~5)和多日滞后模型(Lag 0~4)进行统计显著性检验。使用的模型如下

$$\log[E(DIC_t)] = \beta_1 AP_t + s_T + s_D + \beta_0,$$

其中 $DIC_t$ 表示第 $t$ 天的日增病例; $AP_t$ 表示大气污染物自变量; $\beta_1$ 为回归系数; $s_T$ 是自由度 $df=5$ ,时间为自变量的三次样条函数; $s_D$ 是自由度为 $df=2$ ,日气象指标为自变量的3次样条函数; $\beta_0$ 是截距。

上述统计分析过程使用了R3.6.2软件和mgcv软件包。所有统计检验均为双尾检验,当 $P < 0.05$ 时,计算结果具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期日增病例情况

参照中国内地的大区划分,我们逐日汇总了2020年1月20日至2月9日各大区的2019冠状病毒病日增病例的数据(见表1);其中,华北区包括北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区;华东区包括上海市、江苏省、浙江省、江西省、安徽省、福建省和山东省;东北区包括辽宁省、吉林省和黑龙江省;华中区包括河南省、湖北省和湖南省;华南区包括广东省、广西壮族自治区和海南省;西南区包括四川省、云南省、贵州省、西藏自治区和重庆市;西北区包括宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、青海省、陕西省和甘肃省。

中国内地2019冠状病毒病暴发初期3周的累计确诊病例39 877例;其中,第1周累计确诊病例2 496例,第2周累计确诊病例14 336例,第3周累计确诊病例23 045例;中国内地日增病例呈现先增后减的趋势。各大区日增病例有较大差异;其中,华中区日增病例最多,华东区和华南区日增病例紧随其后。

### 2.2 2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期日增病例时空分布特征

鉴于湖北省为疫情初发核心区域,本研究的目的是发现湖北省以外的疫情高发区域及传播的时空特征;因此,未将湖北省的数据纳入空间自相关分析。

#### 2.2.1 全局空间自相关分析

表1 2020年2019冠状病毒病暴发初期中国内地各大区日增病例统计

Table 1 Daily new cases of every big district in the early stage of COVID-19 outbreak in the Chinese Mainland in 2020

月/日	华北	华东	东北	华中	华南	西南	西北	全国
1/20	3	2	0	72	0	0	0	77
1/21	7	15	0	107	12	8	0	149
1/22	8	26	4	81	15	10	5	149
1/23	10	63	4	124	33	25	6	265
1/24	29	91	14	222	38	47	6	447
1/25	20	127	11	400	32	41	16	647
1/26	27	116	13	447	68	70	21	762
1/27	45	189	19	1 374	58	63	28	1 776
1/28	37	306	14	956	65	40	20	1 438
1/29	53	322	16	1 160	93	75	18	1 737
1/30	45	326	21	1 249	94	90	20	1 845
1/31	50	276	39	1 474	148	87	37	2 111
2/01	57	248	25	2 066	101	65	25	2 587
2/02	65	289	37	2 234	102	79	36	2 842
2/03	50	353	52	2 526	135	83	50	3 249
2/04	52	285	54	3 313	95	61	21	3 881
2/05	58	261	50	3 124	103	42	24	3 662
2/06	57	278	61	2 571	89	55	22	3 133
2/07	61	241	28	2 939	80	49	21	3 419
2/08	43	179	41	2 235	63	50	25	2 636
2/09	34	174	28	2 699	54	55	21	3 065
累计	811	4 167	531	31 373	1 478	1 095	422	39 877

日~2月9日中国内地各省份和直辖市的日增病例数据,以周为时间单位,计算中国内地2019冠状病毒病暴发初期前3周的全局莫兰指数,取值分别为0.249、0.307和0.297( $P < 0.01$ ),表明中国内地日增病例存在显著的聚集现象;并且,前3周的全局莫兰指数呈现“低-高-低”的特征(见表2)。

**2.2.2 局部空间自相关分析** 局部空间自相关分析表明,湖南省、广东省、江西省、浙江省、安徽省、江苏省、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区和西藏自治区等9个省份存在正相关,且计算结果具有统计学意义( $P < 0.05$ )。全国2019冠状病毒病暴发初期,总体上,湖南省、广东省、江西省、浙江省、安徽省和江苏省属于高-高聚集区;新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区和西藏自治区属于低-低聚集区;福建省和上海市属于相对低值区。

在第1周,湖南省、江西省、浙江省、安徽省、

表2 2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期全局莫兰指数

Table 2 Moran's *I* in the early stage of COVID-19 outbreak in the Chinese Mainland in 2020

周次	Moran's <i>I</i> 值	Z 值	P 值
第1周 (1.20~1.26)	0.249	3.039	0.002
第2周 (1.27~2.02)	0.307	3.718	0.000
第3周 (2.03~2.09)	0.297	3.560	0.000

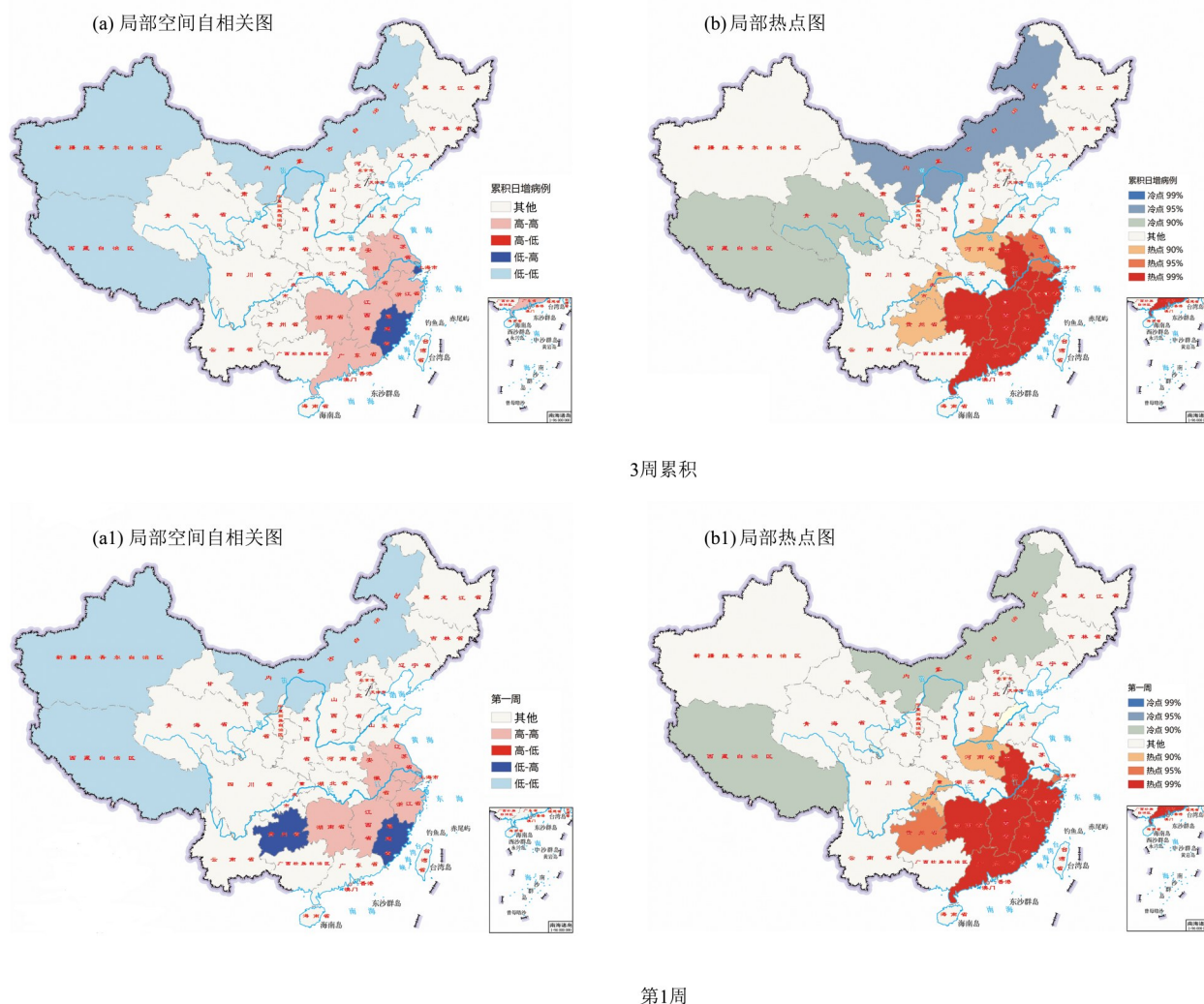
广东省、江苏省和上海市属于高-高聚集区；新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区和西藏自治区属于低-低聚集区，贵州省和福建省属于相对低值区。在第2周，上海市替换贵州省成为相对低值区。第3周与第2周相比没有发生明显的变化（见图1）。

基于连续3周的局部热点分析，可将各个地区划分为7个等级。总体上，湖南省、广东省、江西省、安徽省、浙江省、福建省、江苏省和上海市属于热点地区，计算结果具有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。

第1周，贵州省、湖南省、广东省、江西省、浙江省、福建省、安徽省和上海市属于热点地区；

第2周，江苏省替换贵州省成为热点地区；第3周，热点地区没有变化。热点地区主要分布在东经  $108^{\circ}47' \sim 123^{\circ}10'$  和北纬  $25^{\circ}31' \sim 35^{\circ}20'$  范围以内。

**2.2.3 传播方向及趋势分析** 以周为时间单位，分析中国内地2019冠状病毒病暴发初期前3周的传播方向及趋势（见图2）。结果表明，疫情总体上呈现由西北向东南指数增长、由北向南快速传播的趋势。暴发初期前3周的疫情由西向东方向呈现倒U形的发展趋势；从总体上看，东南方向是疫情传播的主要方向（见表3）。



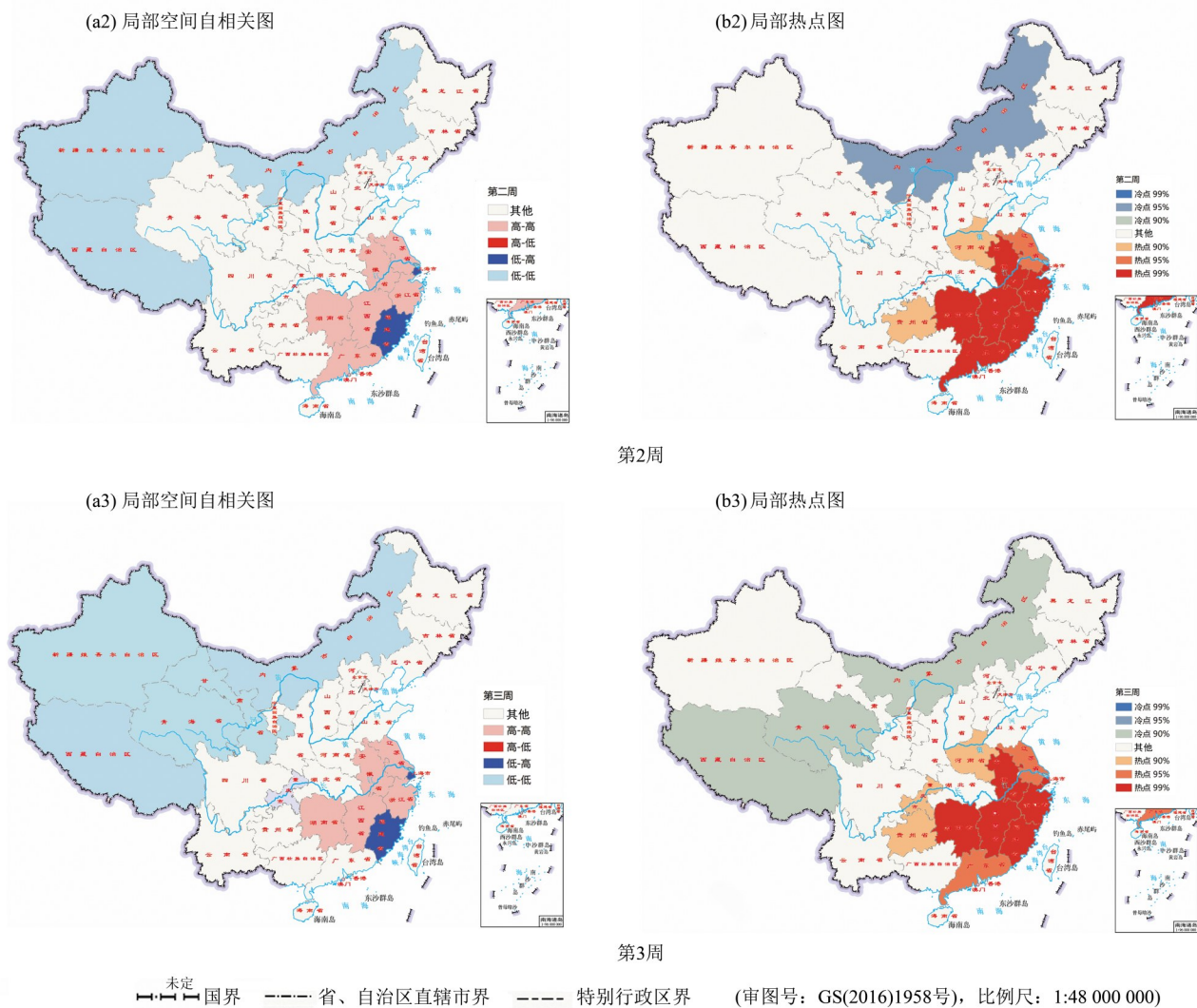


图1 2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期日增病例局部空间自相关及热点分析

Fig. 1 Local spatial autocorrelation and hotspot analysis of daily new cases in the early stage of COVID-19 outbreak in the Chinese Mainland in 2020

表3 2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期疫情传播方向及趋势分析

Table 3 Spread direction and trend in the early stage of COVID-19 outbreak in the Chinese Mainland in 2020

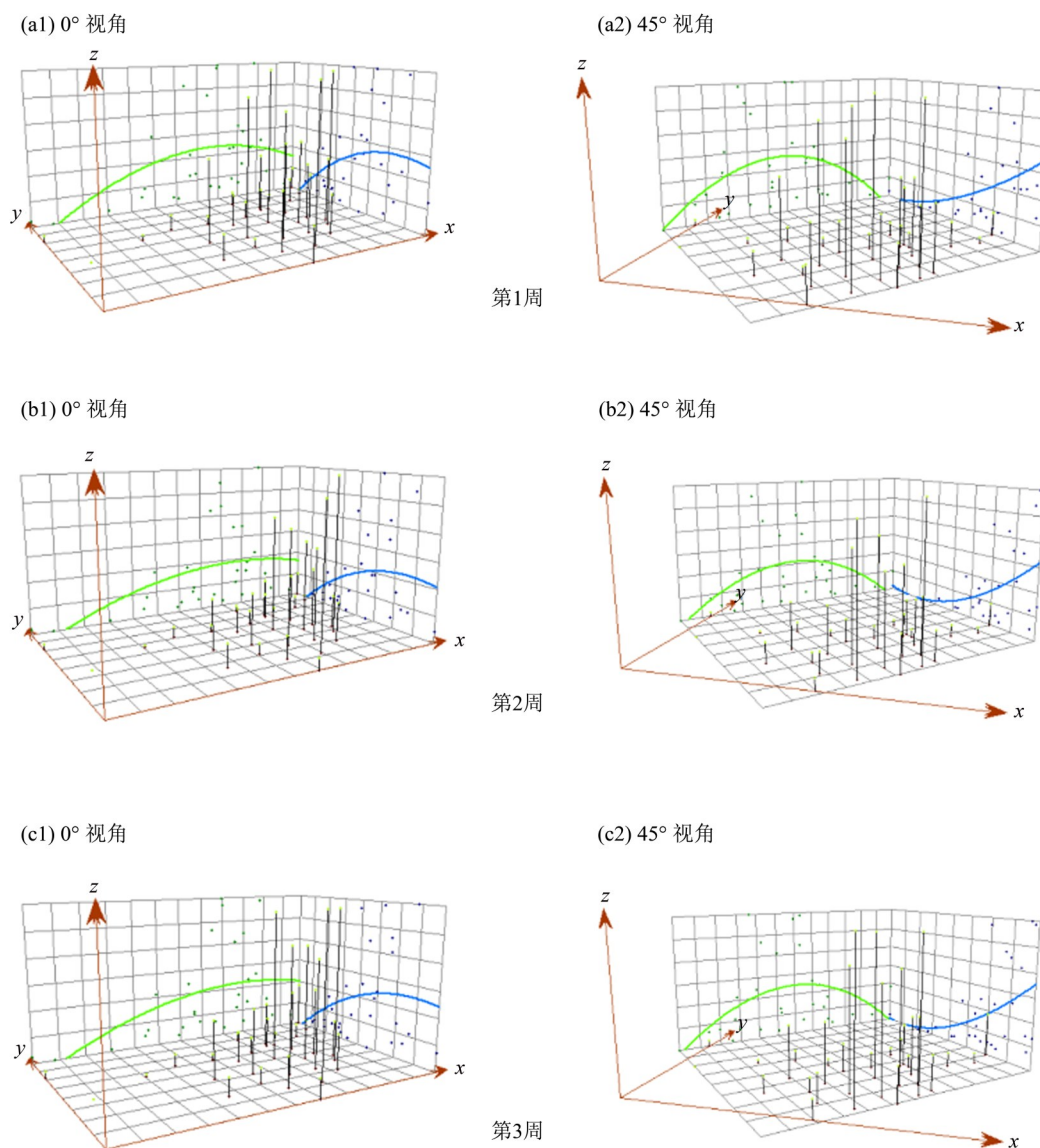
周次	传播方向及趋势			
	西向东	北向南	东北向西南	西北向东南
第1周 (1.20~1.26)	倒U形	倒U形	U形	指数增长
第2周 (1.27~2.02)	倒U形	倒U形	U形	指数增长
第3周 (2.03~2.09)	倒U形	倒U形	U形	指数增长

### 2.3 2020年湖北省2019冠状病毒病暴发初期大气环境因素对疫情传播的影响分析

考虑疫情并非在各省市普遍存在暴发现象。我们选择疫情暴发的典型地区湖北省为研究对象，探究大气环境因素对湖北省疫情传播的影响。由于武汉市是中国内地2019冠状病毒病的初发地，确诊人数显著多于邻近地区，并且，数月后政府

相关部门对数据进行了重大修订；武汉市的疫情可能存在不同的传播模式；因此，武汉市的相关数据未纳入本文计算分析。

**2.3.1 气象因素和大气污染物情况** 湖北省2019冠状病毒病暴发初期的气象因素和大气污染物情况见表4。湖北省11市日平均温度在0~15℃之间，日平均相对湿度大于64%以上。PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>日平



$x$ 轴正向为东,  $y$ 轴正向为北,  $z$ 轴正向表示各地区1周的累积确诊病例。

图2 2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期疫情传播趋势分析

Fig. 2 Spread trend analysis in the early stage of COVID-19 outbreak in the Chinese Mainland in 2020

均质量浓度符合国家二级标准;  $\text{SO}_2$ 日平均质量浓度均符合国家一级标准;  $\text{CO}$ 日平均质量浓度超过国家标准;  $\text{NO}_2$ 日平均质量浓度符合国家一级标准;  $\text{O}_3$  8h平均质量浓度符合国家一级标准。

**2.3.2 每日新增确诊病例与气象因素及大气污染物相关分析** 日增病例与气象因素及大气污染物之间的斯皮尔曼等级相关系数 ( $\rho$ ) 计算结果见表5。分析表明,  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 和日平均相对湿度与日增病例呈现显著相关 ( $P < 0.05$ ); 其中,  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 和 $\text{O}_3$ 与日增病例呈现显著正相关 ( $\rho = 0.515$ ,  $0.579$ 和 $0.536$ ,  $P < 0.05$ ), 日平均相对湿度与日增病例呈现极显著负相关 ( $\rho = -0.744$ ,  $P < 0.01$ )。故

将 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 和日平均相对湿度纳入后续分析。

#### 2.4 影响湖北省2019冠状病毒病疫情传播的大气污染物风险评估

鉴于 $\text{PM}_{2.5}$ 受到广泛的关注, 本文增加了对 $\text{PM}_{2.5}$ 的风险评估。影响湖北省2019冠状病毒病疫情传播的大气污染物风险评估结果见表6~表8。

单污染物模型计算结果显示,  $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 日平均质量浓度与当日(Lag 0)的日增病例相关, RR值分别为1.004 (95% CI: 1.002~1.005)和1.003 (95% CI: 1.002~1.004);  $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 日平均质量浓度各分别增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 日增病例的ER为3.548% (95% CI: 2.032%~5.087%)、3.175% (95%

表4 2020年湖北省2019冠状病毒病暴发初期气象因素及空气污染物日平均质量浓度情况

Table 4 Meteorological factors and average daily concentrations of air pollutants in the early stage of COVID-19 outbreak in Hubei Province in 2020

气象因素 及大气污染物	平均值±标准差	最小值	最大值
日最高温度 /°C	10.475±3.856	3.818	15.545
日最低温度 /°C	2.510±1.960	0.364	6.545
日温差 /°C	7.965±3.373	1.636	12.727
日平均相对湿度 /%	81.149±8.470	64.091	94.545
日平均风速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.657±0.709	1.000	3.273
PM <sub>2.5</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	55.909±18.157	30.000	93.091
PM <sub>10</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	62.864±20.088	33.364	105.182
SO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	8.338±2.007	5.364	12.182
CO /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.166±0.408	0.782	2.509
NO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	13.943±3.326	9.727	19.545
O <sub>3_8h</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	78.404±18.599	51.000	114.091

CI: 1.663%~4.708%)。NO<sub>2</sub>日平均质量浓度对日增病例的影响存在滞后效应,在滞后4 d时其RR值最大,为1.029(95% CI:1.011~1.047);NO<sub>2</sub>日平均质量浓度每增加10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,日增病例ER为32.745%(95% CI:11.586%~57.916%)。O<sub>3</sub>在滞后0~1 d时RR值达到最大,为1.003(95% CI:0.998~

表5 2020年湖北省日增病例与气象因素及空气污染物相关分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analysis of daily new cases, meteorological factors and air pollutants in Hubei Province in 2020

气象因素及大气污染物	斯皮尔曼等级相关系数	
	$\rho$ 值	P值
日最高温度 /°C	0.445	0.064
日最低温度 /°C	0.317	0.200
日温差 /°C	0.366	0.136
日平均相对湿度 /%	-0.744***	0.000
日平均风速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	-0.092	0.716
PM <sub>2.5</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.443	0.066
PM <sub>10</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.515**	0.029
SO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.205	0.414
CO /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.059	0.817
NO <sub>2</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.579**	0.012
O <sub>3_8h</sub> /( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.536**	0.022

1) \*\* $P<0.05$ , \*\*\* $P<0.01$ 。

1.007);O<sub>3</sub>日平均质量浓度每增加10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,日增病例ER为2.839%(95% CI:-1.762%~7.656%)(见图3)。分析表明,NO<sub>2</sub>日平均质量浓度对滞后4 d的日增病例影响最大。这些计算结果均具有统计学意义( $P<0.05$ )。

表6 单污染物模型相对危险度计算结果<sup>1)</sup>

Table 6 RR calculation results of single pollutant model

滞后日	单污染物相对危险度RR值(95% CI)			
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Lag 0	1.004 (1.002~1.005)***	1.003 (1.002~1.004)***	1.025 (1.010~1.040)***	1.002 (1.000~1.004)**
Lag 1	0.998 (0.996~1.000)**	0.998 (0.996~0.999)**	1.006 (0.986~1.025)	0.999 (0.998~1.001)
Lag 2	0.998 (0.996~1.001)	0.999 (0.996~1.001)	0.970 (0.951~0.989)***	0.994 (0.989~0.999)**
Lag 3	0.999 (0.997~1.001)	0.999 (0.997~1.001)	0.985 (0.969~1.002)*	0.998 (0.996~1.000)**
Lag 4	1.001 (0.999~1.004)	1.001 (0.999~1.004)	1.029 (1.011~1.047)***	1.001 (0.998~1.004)
Lag 5	0.997 (0.994~1.000)*	0.997 (0.994~1.000)**	0.964 (0.934~0.995)**	1.002 (0.999~1.004)
Lag 0~1	1.001 (0.997~1.005)	1.000 (0.996~1.003)*	1.022 (0.985~1.061)	1.003 (0.998~1.007)**
Lag 0~2	0.994 (0.983~1.005)	0.995 (0.985~1.005)	0.982 (0.910~1.060)	0.997 (0.986~1.007)*
Lag 0~3	1.010 (0.999~1.021)	1.010 (1.000~1.020)	0.722 (0.585~0.890)**	0.964 (0.942~0.986)*
Lag 0~4	1.013 (1.001~1.025)	1.013 (1.003~1.024)	1.084 (0.973~1.208)	0.918 (0.874~0.964)**

1) \* $P<0.10$ , \*\* $P<0.05$ , \*\*\* $P<0.01$ 。

根据单污染物模型滞后效应分析结果,选择各因素相对危险度数值最大的滞后时间拟合多污

染物模型。计算结果显示,在双污染物模型中,当PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>分别引入NO<sub>2</sub>后,对日增病例的影

表7 单污染物模型超额危险度计算结果<sup>1)</sup>  
Table 7 ER calculation results of single pollutant model

滞后日	单污染物超额危险度ER值 (95% CI)			
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Lag 0	3.548 (2.032~5.087)***	3.175 (1.818~4.550)***	28.241 (10.866~48.339)***	2.162 (0.069~4.299)**
Lag 1	-2.368 (-4.306~-0.390)**	-2.325 (-4.078~-0.539)**	6.653 (-13.026~28.343)	-0.786 (-2.338~0.791)
Lag 2	-1.638 (-4.019~-0.801)	-1.203 (-3.442~-1.089)	-26.266 (-39.686~9.859)***	-5.840 (-10.325~-1.130)**
Lag 3	-0.849 (-2.844~1.186)	-1.070 (-2.894~0.788)	13.958 (-27.321~1.861)*	-1.997 (-3.800~-0.159)**
Lag 4	1.102 (-1.368~3.634)	1.362 (-0.009~3.714)	32.745 (11.586~57.916)***	1.091 (-1.740~4.003)
Lag 5	-3.010 (-5.937~0.006)*	-2.774 (-5.441~0.032)**	-30.448 (-49.360~4.474)**	1.951 (-0.598~4.566)
Lag 0~1	0.970 (-2.892~4.986)	-0.136 (-3.549~3.397)*	24.792 (-13.975~81.029)	2.839 (-1.762~7.656)**
Lag 0~2	-5.755 (-15.451~5.052)	-5.168 (-14.277~4.909)	-16.188 (-60.812~79.249)	-3.154 (-12.920~7.707)*
Lag 0~3	10.707 (-0.449~23.112)	11.067 (0.626~22.591)	-96.148 (-99.527~-68.639)**	-30.965 (-45.125~-13.151)*
Lag 0~4	13.833 (1.394~27.798)	14.312 (2.810~27.100)	124.277 (-23.744~559.620)	-57.479 (-74.070~30.273)**

1) \*P<0.10, \*\*P<0.05, \*\*\*P<0.01, ER值为大气污染物每增加10 μg/m<sup>3</sup>的计算结果。

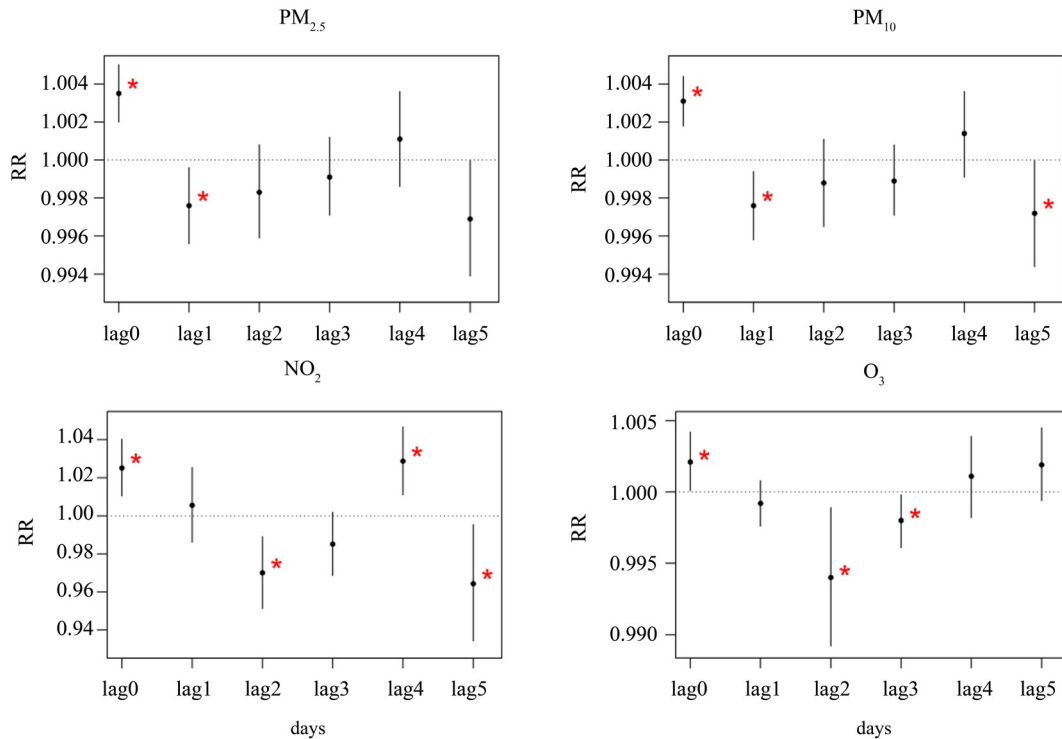
表8 双污染物及三污染物模型风险评估<sup>1)</sup>  
Table 8 Risk assessment of two-pollutant and three-pollutant models

污染物模型	相对危险度RR值 (95% CI)	超额危险度ER值 (95% CI)/%	P值	
双污染物模型	PM <sub>2.5</sub> + [O <sub>3</sub> ]	0.998 (0.995~1.001)	-1.945 (-4.677~0.866)	0.173
	PM <sub>2.5</sub> + [NO <sub>2</sub> ]	1.022 (1.005~1.040)**	23.929 (4.705~46.682)	0.010
	PM <sub>10</sub> + [O <sub>3</sub> ]	0.998 (0.995~1.007)	-2.204 (-5.016~0.690)	0.134
	PM <sub>10</sub> + [NO <sub>2</sub> ]	1.022 (1.005~1.039)**	24.672 (5.379~47.496)	0.013
	NO <sub>2</sub> + [O <sub>3</sub> ]	1.004 (1.002~1.008)**	4.664 (1.558~7.866)	0.003
三污染物模型	PM <sub>2.5</sub> + [NO <sub>2</sub> ]+O <sub>3</sub>	1.020 (1.000~1.040)*	21.587 (-0.315~48.302)	0.054
	PM <sub>10</sub> + [NO <sub>2</sub> ]+O <sub>3</sub>	1.020 (1.000~1.040)*	21.965 (-0.030~48.800)	0.050

1) \*P<0.10, \*\*P<0.05, \*\*\*P<0.01; ER值为标记的大气污染物每增加10 μg/m<sup>3</sup>的计算结果。

响均有所加强; NO<sub>2</sub>日平均质量浓度每增加10 μg/m<sup>3</sup>, 日增病例ER则分别取值为23.929%(95% CI: 4.705%~46.682%)和24.672%(95% CI: 5.379%~47.496%)。当NO<sub>2</sub>引入O<sub>3</sub>后, 对日增病例的影响也有所增强; O<sub>3</sub>日平均质量浓度每增加10 μg/m<sup>3</sup>, 日增病例ER为4.664%(95% CI: 1.558%~7.866%)。

在三污染物模型中, 当PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>分别同时引入NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>, 发现对日增病例的影响有所减小, 但是, 仍具有统计学意义(P<0.10); 分别控制PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>和O<sub>3</sub>, 当引入NO<sub>2</sub>日平均质量浓度增加10 μg/m<sup>3</sup>时, 日增病例的ER则分别取值为21.587%(95% CI: -0.315%~48.302%)和21.965%



红色\*表示计算结果具有统计学意义。

图3 单日滞后模型 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 相对危险度(RR)分布

Fig. 3 Relative risk (RR) distribution of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  and  $O_3$  in single-day lag model

(95% CI: -0.030%~48.800%)。表明控制  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  和  $O_3$  后,  $NO_2$  对日增病例的影响保持相对稳定。

计算方差膨胀因子(VIF, variance inflation factor)值,发现  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  具有共线性,故没有纳入同一个双污染物模型和三污染物模型分析。通过改变时间和日平均相对湿度的自由度对模型进行了敏感性分析,没有发现计算结果有显著改变。

### 3 结论

本文研究表明,自2020年1月20日~2月9日,中国内地日增病例呈现显著的聚集现象,并且表现出“低-高-低”的特征。分析显示,自2019冠状病毒病暴发初期的第3周开始,疫情传播开始得到了有效控制;政府部门部署和实施的防控措施是果断及得当的。

局部空间自相关分析表明,湖南省、广东省、江西省、浙江省、安徽省和江苏省属于高-高聚集区;新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区和西藏自治区属于低-低聚集区。福建省和上海市属于低-高聚集区。总体上,热点地区主要分布在东经  $108^{\circ}47' \sim 123^{\circ}10'$  和北纬  $25^{\circ}31' \sim 35^{\circ}20'$  范围以内。中国内

地2019冠状病毒病暴发初期疫情扩散总体上呈现由西北向东南指数增长、由北向南快速增长的趋势;东南方向是疫情的主要传播方向。

研究发现,湖北省大气污染物  $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$  和日平均相对湿度与日增病例存在显著的相关关系。对大气污染物相对危险度评估发现,  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的RR值在当日达到最大,  $NO_2$  的RR值在滞后4 d时达到最大,  $O_3$  的RR值在滞后0~1 d时达到最大。  $NO_2$  日平均质量浓度每增加  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 日增病例的ER值为32.745% (95% CI: 11.586%~57.916%)。  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  分别引入  $NO_2$  后, 均对日增病例的影响有所加强;  $NO_2$  日平均质量浓度每增加  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 日增病例的ER分别取值为23.929% (95% CI: 4.705%~46.682%) 和24.672% (95% CI: 5.379%~47.496%)。当  $NO_2$  引入  $O_3$  后, 对日增病例的影响也有所加强。

本文采用空间自相关分析和趋势分析研究了疫情传播扩散的时空特征及热点区域,有学者通过构建传染病模型同样可预测出潜在的热点区域<sup>[9]</sup>。研究表明,在2019冠状病毒病传播的早期,中国内地铁路运输和疫情传播之间呈现显著的相关关系<sup>[10]</sup>。多年研究表明,大气污染物  $PM_{2.5}$ 、

PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>等会导致人类的多种呼吸系统和心血管系统疾病<sup>[5]</sup>。德国一项研究发现,2019冠状病毒病有如此高的致死率,不仅与病毒及患者身体状况有关,还可能与大气污染程度有关。研究发现,死亡人数较多地区,相应区域NO<sub>2</sub>日平均质量浓度显著高于其他地区,垂直空气交换量显著低于其他地区。此外,大气污染水平、空气流动及日冕暴发的严重程度与2019冠状病毒病死亡率之间可能存在关联<sup>[11]</sup>。本文研究结果初步表明,NO<sub>2</sub>日平均质量浓度可能对2019冠状病毒病的每日新增确诊病例存在显著的正向影响。

2020年中国内地2019冠状病毒病暴发初期,湖北省空气质量总体较佳;但是,本文研究显示,大气污染物PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>日平均质量浓度与日增病例仍然存在显著的正相关,并且,NO<sub>2</sub>和PM<sub>10</sub>日平均质量浓度对日增病例可能存在重大的正向影响。虽然,本文发现NO<sub>2</sub>和PM<sub>10</sub>日平均质量浓度与日增病例存在显著的正相关,但是,并未证

明这两种大气污染物会促进人类感染2019冠状病毒病,要获得确切的结论则需要病理学的研究证实。当然,在疫情热点区域,降低大气环境中的NO<sub>2</sub>质量浓度可能对疫情防控具有积极的作用。

进入2021年,中国内地再度暴发2019冠状病毒病局部性疫情。依据国家卫生健康委员会网站公布数据([http://www.nhc.gov.cn/xcs/xxgzbd/gzbd\\_index.shtml](http://www.nhc.gov.cn/xcs/xxgzbd/gzbd_index.shtml)),2021年第1周,河北省新增123例确诊病例,其中,113例来自石家庄地区。而2020年1月5日同期,武汉市共计报告不明原因病毒肺炎病例59例。鉴于石家庄市与武汉市经度近乎一致,南北方向基本处于一条直线上;气候条件具有一定的相似性;因此,2019冠状病毒病疫情传播的时空特征可能具有一定的相似性。

目前,国外疫情依然十分严峻,国内局部地区零散出现不确定的突发疫情;本文研究结果对于相关部门科学合理地制定疫情防控措施具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] LU H, STRATTON C W, TANG Y. Outbreak of pneumonia of unknown etiology in Wuhan China: The mystery and the miracle [J]. *Journal of Medical Virology*, 2020, 92(4): 401-402.
- [2] WU Y C, CHEN C S, CHAN Y J. The outbreak of COVID-19: An overview [J]. *Wolters Kluwer Public Health Emergency Collection*, 2020, 83(3): 217-220.
- [3] HEYMANN D L, SHINDO N. COVID-19: What is next for public health? [J]. *The Lancet*, 2020, 395(10224): 542-545.
- [4] CHENG Y J, TANG F Y, BAO C J, et al. Spatial analyses of typhoid fever in Jiangsu province, People's Republic of China [J]. *Geospatial Health*, 2013, 7(2): 279-288.
- [5] SU W, WU X, GENG X, et al. The short-term effects of air pollutants on influenza-like illness in Jinan, China [J]. *BMC Public Health*, 2019, 19: 1319.
- [6] STOECKLIN S B, ROLLAND P, SILUE Y, et al. First cases of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in France: Surveillance, investigations and control measures, January 2020 [J]. *Euro Surveillance*, 2020, 25(6): 2000094.
- [7] ROTHE C, SCHUNK M, SOTHMANN P, et al. Transmission of 2019-nCoV Infection from an asymptomatic contact in Germany [J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(10): 970-971.
- [8] NHUNG N T T, SCHINDLER C, DIEN T M, et al. Acute effects of ambient air pollution on lower respiratory infections in Hanoi children: An eight-year time series study [J]. *Environment International*, 2018, 110: 139-148.
- [9] LIU Q H, LIU Z C, LI D Q, et al. Assessing the tendency of 2019-nCoV (COVID-19) outbreak in China [EB/OL]. [2020-04-16]. <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.02.09.20021444v5>.
- [10] ZHAO S, ZHUANG Z, RAN J J, et al. The association between domestic train transportation and novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak in China from 2019 to 2020: A data-driven correlational report [J]. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 2020, 33: 101568.
- [11] OGEN Y. Assessing nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138605.