

• 综述 •

大气污染物对血压影响的研究进展

吴亚飞^{1,2} 叶子容^{1,2} 方亚^{1,2,△}

高血压作为最常见的慢性病之一,是脑卒中、冠心病等心脑血管疾病发生和死亡的主要危险因素^[1]。高血压不仅造成了巨大的寿命损失,也给家庭和社会带来了沉重的经济负担^[2],已成为人类健康和生存质量的重要威胁。据 WHO 报道 2014 年全球 18 岁及以上人群高血压患病率约为 22%^[3];而我国 2016 年高血压患病率高达 32.5%^[4]。与全球相比,我国高血压人群的死亡水平和 DALY 均很高,疾病负担沉重^[5],因此,开展高血压相关研究进而采取有效的预防措施十分必要。

近年来,随着对高血压危险因素探索,研究者发现,高血压的发生不仅与人口学、健康状况、饮食习惯、社会心理因素有关^[6],还与大气污染物的存在密不可分。随着经济的快速发展,空气污染问题显得尤为突出,我国空气污染状况不容乐观,由此导致的健康危害已成为重要的公共卫生问题^[7]。因此,大气污染与血压的关系受到重视,大量流行病学研究表明大气污染物与血压之间关系密切^[8-9],如大气中 SO₂、NO_x 和 O₃ 等浓度增加都会不同程度地影响血压^[10-12]。但近年来,可吸入颗粒物污染严重,对健康的威胁日益增大,引起了社会和学界的广泛关注。因此,本文旨在梳理常见大气污染物(PM_{2.5},PM₁₀)对血压影响的研究进展,全面了解两者之间的关系,以及该领域常用的统计学分析方法,为后续研究提供借鉴。

大气污染物与血压关系的研究

关于大气污染物与血压关系的研究众多,但结论存在争议,根据暴露时间长短的差异,可以将大气污染物对血压的影响分为长期效应和短期效应。由于长期暴露在测量上存在一定难度,以及缺乏足够可进行长期暴露研究的队列,使得该方面的研究相对较少;相对而言,短期暴露在研究开展及暴露测量等方面,都相对容易实现,因此,短期暴露导致急性效应的研究较多。

1. 基于短期暴露的大气污染物与血压关系研究

虽然不同地区的研究在人口学特征、暴露时长、污

染物浓度、污染物和血压测量方法等方面存在差异,但目前在全球不同地区开展的短期暴露与血压关系的研究,基本都显示短期暴露与血压之间存在不同程度的正向关系。

多数关于 PM₁₀ 的研究显示暴露与该污染物与血压上升关系显著。有研究运用广义可加模型,对台湾高血压调查数据进行分析,发现 PM₁₀ 与血压之间存在显著相关关系,PM₁₀ 每上升 34 μg/m³,血压相应升高 0.47 mmHg^[13]。进一步地,为了探索特定职业人群的暴露危险,为高暴露人群提供有针对性的防控措施,Andrea Baccarelli 等人运用重复测量设计,对北京 60 名室内工作人员和卡车司机进行研究,结果显示 PM₁₀ 浓度每 8 日增加 10 μg/m³,收缩压、舒张压、平均血压值分别上升 0.98 mmHg (95% CI: 0.34 ~ 1.61)、0.71 mmHg (95% CI: 0.18 ~ 1.24)、0.81 mmHg (95% CI: 0.31 ~ 1.30),但两组人员之间血压差异不存在统计学意义。另外,研究还发现 PM₁₀ 对血压的影响存在滞后效应,大约需 5 ~ 8 天才能显效^[14]。同样地,Pau-lo Sérgio Chiarelli 等人选择圣安德烈市 19 名男性交通工作人员作为研究对象,以探究在交通管制人员中是否存在类似的关系,结果发现 PM₁₀ 浓度每增加 33 μg/m³,血压会上升 2.53 mmHg,同时该研究也指出 PM₁₀ 主要与早期效应相关,并对收缩压影响明显^[15]。进一步地,由于特殊人群往往对危险因素存在更高的敏感性,因而也有研究聚焦于特殊人群,如 Regina Hampel 等人于 2002 - 2006 年对 1500 名孕妇进行队列研究,结果显示在妊娠前三个月,血压与 PM_{2.5} 浓度呈正相关关系,但在妊娠后期,两者之间呈现负相关关系,该研究从孕妇角度进行探讨,对妊娠期高血压防控具有较大意义^[16]。此外,为解大气污染物对高血压入院率的影响程度,进而为高血压防控和医院资源合理化配置提供参考,有研究对 PM₁₀ 浓度与高血压入院率关系进行探究,结果显示 PM₁₀ 每上升 10 μg/m³,高血压入院风险 OR 值会增加 1.060 (95% CI: 1.02 ~ 1.10)^[17]。上述关于 PM₁₀ 的研究,从不同人群角度对污染物与血压关系进行探讨,大多认为短期暴露于 PM₁₀ 与血压升高关系密切,但由于样本大小、污染物浓度时空等方面的差异,因而在影响强度上存在一定

1. 厦门大学公共卫生学院(361102)

2. 福建省高校卫生技术评估重点实验室

△通信作者:方亚, E-mail: fangya@xmu.edu.cn

差异。

近年来,随着 $PM_{2.5}$ 关注度的提高,对 $PM_{2.5}$ 与血压关系的研究越来越多。Lotte Jacobs 等人对比利时 88 名非吸烟女性进行追踪研究,发现在 57 例服用抗高血压药物患者中,室外 $PM_{2.5}$ 浓度每上升 $20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 脉压会增加 4mmHg (95% CI: 1.8 ~ 6.2), 但在 31 名未服用药物的患者中, $PM_{2.5}$ 浓度与血压关系不具有统计学意义^[18]。同样地, Sabit Cakmak 等利用加拿大卫生措施调查部的数据,对 5604 名 6 ~ 79 岁人群进行研究,发现 $PM_{2.5}$ 浓度每上升 $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 血压约上升 0.5mmHg ^[19]。为了更准确获得个体实际 $PM_{2.5}$ 暴露浓度,研究逐渐聚焦在个体污染物监测方面。一项基于社区人群的研究显示,个体总的 $PM_{2.5}$ 暴露每上升 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 延迟一日的收缩压会上升 1.41mmHg ^[20]。同样地,一项关于中国农村成年女性的研究显示, $PM_{2.5}$ 浓度与血压之间关系具有统计学意义;同时该研究指出,在 50 岁以上的女性中,个人 $PM_{2.5}$ 暴露量每增加 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 收缩压相应增加 4.1mmHg (95% CI: 1.5 ~ 6.6), 舒张压增加 1.8mmHg (95% CI: 0.4 ~ 3.2)^[21]。另外,也有研究对 $PM_{2.5}$ 浓度与高血压入院率关系进行探究,发现 $PM_{2.5}$ 浓度每上升 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 高血压入院风险 OR 值会增加 1.084 (95% CI: 1.028 ~ 1.139), 该研究为防控高血压提供了新思路^[17]。以上研究进一步说明短期暴露对人体的严重危害,但不可回避的问题是,目前研究普遍存在对 $PM_{2.5}$ 暴露测量不准确的问题,所以随着研究人群的扩大以及污染物暴露测量方法的改进, $PM_{2.5}$ 对血压影响的研究会得到更快地发展。

与上述结果相反,台湾另一项研究指出,短期暴露于 PM_{10} 反而会使收缩压和脉压降低,且这种关系在男性、老年人、高血压患者、工业区居民中表现更加明显^[22]。可能的解释有:一方面,颗粒污染物是不同化学成分的复合体,其来源和成分在时间、空间上存在较大的变异^[23-24];另一方面,后者研究人群是非吸烟成年人(平均年龄: 57.9 岁),前者包含吸烟人群,但平均年龄相对更小(平均年龄: 43.1 岁),因而人群易感性差异可能也是一个重要原因。同时,二手烟暴露也可能是导致污染物与血压变化关系不一致的因素,如 Brook 等人的研究发现二手烟暴露会影响 PM 与血压之间的关系^[20]。

同时,也有研究发现 $PM_{2.5}$ 暴露与血压之间不存在相关关系。如 Baumgartner J 等人对中国云南省 180 名儿童进行研究,发现儿童室内 $PM_{2.5}$ 暴露与血压之间无关^[25], 出现这一结果的原因,可能是儿童在室内接触污染物的浓度较低造成。

上述关于短期暴露的研究仅能从整体上了解可吸

入颗粒物与血压之间的关系,但无法阐明影响血压的具体成分,为了解决这一问题,研究者开始聚焦于 $PM_{2.5}$ 特有化学成分对血压的影响。例如, Wu S 等人对北京学生进行研究,发现 $PM_{2.5}$ 中的含碳成分(有机碳、元素碳)、离子(氯离子、氟离子)和金属元素(镍、锌、镁、铅和砷)与血压之间存在显著正相关^[26]。Lotte Jacobs 等人通过一项老年人队列研究发现 $PM_{2.5}$ 中的钒、铁、镍与收缩压和脉压之间存在相关性^[18]。同样地,一项在底特律三地区开展的队列研究发现, $PM_{2.5}$ 上升会引起血压的明显变化,但不同地区血压变化程度不尽相同^[27],这也进一步说明 $PM_{2.5}$ 中特有的化学成分在随后的血压变化中起着重要作用。

2. 基于长期暴露的大气污染物与血压关系研究

在实际情况中,大气污染物对人体健康更多时候表现为长期影响,这就为研究提出了新的要求。为了更好地探索空气污染物对血压的影响,近年来,研究者开始转向长期暴露的研究。目前,已有流行病学研究发现长期暴露会增加心脑血管疾病的发病率和死亡率,并且研究表明长期暴露比短期暴露具有更大的发病风险^[28]。关于 PM_{10} 的多项研究显示长期暴露与血压升高关系密切^[29-31]。如 Dong GH 等的 PM_{10} 浓度上升 $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 高血压发病风险 OR 值将增加 1.12 (95% CI: 1.08 ~ 1.16)^[30]。同样地, Kai-Jen Chuang 等人对台湾老年人进行研究,发现 1 年内 PM_{10} 暴露浓度与血压升高关系显著^[29]。进一步地,有研究聚焦到高血压患病率方面,如有研究者以 24845 名中国受试者进行横断面研究,发现高血压患病率与 PM_{10} 之间具有显著相关性^[30]。

随着 $PM_{2.5}$ 关注度的提高,长期暴露的研究也越来越多,如 Patricia F. Coogan 等人对洛杉矶裔非洲女性进行研究,结果显示 $PM_{2.5}$ 浓度每上升 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 高血压发病风险 RR 达到 1.48 (95% CI: 0.95 ~ 2.31)^[32]。同样地, Kai-Jen Chuang 等关于台湾老年人的研究发现,1 年内 $PM_{2.5}$ 暴露浓度与血压升高关系显著^[29]。Chen 等基于澳大利亚成年人的队列研究显示,暴露于低水平 $PM_{2.5}$ 与高血压发病率之间存在密切的相关性^[33]。以上在不同地域开展的研究,均说明长期暴露于 $PM_{2.5}$ 对健康会产生严重危害。

然而,长期暴露与血压的关系尚有争议,有少数研究认为两者之间不存在相关性。如 Chuang Liu 等人对德国两个出生队列的儿童进行研究,结果发现血压与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 之间不存在相关性^[34]。同样地,在一项超过 3000 名黑人女性的研究中,研究者随访 10 年后发现,高血压与 $PM_{2.5}$ 之间不存在相关性^[32]。Babisch W 等选取德国两个城市 4166 人作为研究对象,探讨了噪声和 $PM_{2.5}$ 对高血压患病率的影响,在调整噪声

的影响后,发现高血压患病率与 $PM_{2.5}$ 之间不存在相关性^[35]。

值得注意的是,在上述长期暴露的研究中,大气污染物对血压影响强度在中外结果中存在一定差异,国内研究发现大气污染物对健康的负面效应普遍强于国外。可能原因是,相比于国外,中国的污染物水平较高,人口也较多,暴露时间较长等。同时,由于污染物的成分和来源存在时空差异,污染物对血压的影响也存在差异。

大气污染物与血压关系的统计学研究方法

关于大气污染物与血压关系的研究,已有较多的研究方法。但多数研究忽略了样本的空间属性,而越来越多的研究发现空间属性在空气污染对疾病的影响中具有重要作用。因此,根据研究是否考虑空间属性,我们将研究方法分为两大类:传统的统计学研究方法和基于空间统计研究方法。

1. 传统统计学研究方法

早期,研究者多采用多重线性回归探究血压变化的影响因素,如 Baumgartner 等采用该法探讨了 $PM_{2.5}$ 、碳黑(BC)与血压之间的关系,结果显示儿童室内 $PM_{2.5}$ 暴露于血压之间不存在相关关系^[25]。

然而,很多情况下污染物与血压之间的关系并非满足线性假设,这就为研究提出新的挑战。于是,在此基础上,研究者们开始采用基于概率型非线性思维的 logistic 回归开展研究,如 Van den Hooven EH 等人将多重线性回归与 logistic 回归结合起来探讨大气污染物与血压之间关系,结果显示妊娠期暴露 PM_{10} 与收缩压升高之间存在相关性,但与舒张压之间不存在相关性。研究还发现孕期 PM_{10} 暴露会导致高血压发病风险增高^[36]。同样地,Guang-Hui Dong 等人为了探讨大气污染物与高血压的相互关系,采用二分类 logistic 回归模型进行研究,对协变量进行控制后,发现长期暴露于 PM_{10} 与血压升高、高血压发病风险增高紧密相关^[30]。另外,Wolfgang Babisch 等人采用非条件 logistic 回归对交通噪声、大气污染物与高血压关系进行研究,对噪声进行校正后,发现 $PM_{2.5}$ 与高血压发病风险存在相关性^[35]。为了分析污染物暴露与自报高血压的关系,Hans Orru 等采用多重 logistic 回归进行分析,结果显示污染物暴露会使心血管疾病发病风险明显增高^[37]。

进一步地,为了探究多种大气污染物对高血压患者生存时间和生存结局的影响,研究者开始采用多因素生存分析方法。例如,Patricia F. Coogan 等人运用 Cox 比例风险回归模型对高血压发病风险进行研究,结果显示 $PM_{2.5}$ 暴露可能与患高血压相关^[32]。同样地,Hong Chen 等人采用分层 Cox 比例风险回归对加

拿大人群进行研究,发现 $PM_{2.5}$ 与高血压之间关系显著^[33]。

在许多研究中,往往会同时考虑多个污染物对血压的影响。此时如果纳入较多的解释变量,而样本含量又不是很大时,传统非参数回归模型的拟合效果也不尽如人意,甚至可能产生较大的偏差^[38],为了解决这一问题,广义可加回归模型开始得到运用,如 Guang-Hui Dong 等人发现暴露于高浓度的 PM_{10} 会使血压升高,患高血压的风险也会增加;但母乳喂养可能有助于降低上述风险^[39]。Kai-Jen Chuang 等人也采用广义可加模型开展研究,发现 PM_{10} 与血压升高之间存在显著相关关系^[13]。

2. 空间统计学研究方法

近年来,有研究表明高血压的发生存在空间聚集性,而传统的统计学研究方法往往缺乏对空间自相关性和空间异质性的考虑,对空间信息利用并不充分^[40]。为了解决研究中忽视样本分布空间属性的问题,基于空间统计的研究方法开始逐步运用在该领域。

最早的空间统计研究方法是基于频率估计的多水平模型(混合效应模型),该方法将传统回归中的误差分解到不同水平上,同时放松了对线性要求的假定,适用于具有层次结构的数据研究。例如 Lotte Jacobs 等人使用混合模型对污染物的暴露-效应进行分析,研究者在控制混杂因素基础上采用随机效应进行分析,发现 $PM_{2.5}$ 及其特有成分对血压升高具有显著的影响^[18]。Shaowei Wu 等人采用混合效应回归模型,发现 $PM_{2.5}$ 中特有化学成分能导致血压上升^[26]。

多水平模型在解决样本互不独立问题上起到了一定作用,但多数情况下不同区域之间相互影响,存在较强的空间自相关性。为了解决这一问题,空间自回归模型开始得到应用,如 Chunshan Zhou 等人采用空间误差模型(SEM)对中国大陆 190 个城市的 $PM_{2.5}$ 进行研究,发现 $PM_{2.5}$ 在整体上存在较强的空间自相关性^[41]。但目前未见将该方法用于大气污染物与血压关系的研究。空间自回归模型虽然较好地控制了邻近区域的影响,但其回归系数并不能随位置的变化而变化,实质上仍是一种全局回归模型^[42]。然而更多时候,影响因素在不同地理位置的作用存在差异的,为了解决这一问题,有人提出了地理加权回归模型(geographically weighted regression, GWR)^[43],该模型基于局部光滑思想,将模型参数设定为随地理位置的变化而变化,与传统的全局模型相比,能充分展现大气污染物对血压影响随空间变化的趋势。近年来,该方法开始应用于大气污染物及高血压等方面的研究,如 B. Kauh 等人运用 GWR 方法对德国东北部地区高血压分布进行探究,在较好地控制空间自相关性和空间异质性后,研究发现高血压在不同地区存在明显差异,

并且不同地区影响因素及其强度差异较大^[44]。由于基于贝叶斯估计的空间方法也能识别疾病与危险因素之间是否存在空间效应;并且该法能对研究结果进行较好地可视化展现,所以在疾病风险识别等方面开始得到应用。例如,Zirong Ye等人基于中国健康与营养调查(CHNS)数据,运用共同成分模型(SCM),在空间分析的基础上,引入时间维度和贝叶斯B样条,充分展现了高血压在不同年限、省份之间的变异,为高血压等慢性病的空间研究开展提供了新的思路^[45]。

小 结

大气污染物作为影响健康的重要环境因子,对血压影响显著,因而有必要对两者关系进行研究。目前,大多数关于短期暴露的研究发现两者之间存在不同程度的正向关系。相比而言,长期暴露的研究较少,且两者关系尚有争议。进一步地,我们将该领域的研究方法分为两大类:传统统计学方法和基于空间统计的方法。传统的研究方法忽略了样本的空间自相关性和空间异质性,未能充分利用空间信息,在健康研究中存在一定缺陷;为了解决这一问题,基于空间统计的方法正逐步得到应用,但目前将上述空间方法运用在大气污染物与血压关系方面的研究仍较少,为了进一步阐明高血压的时空分布特征和影响因素,从而因地制宜采取防控措施,在未来的研究中,应积极推进空间统计方法在该领域的应用,尤其是在长期暴露人群中的研究。

参 考 文 献

- [1] Lewington S, Clarke R, Qizilbash N, et al. Age-specific relevance of usual blood pressure to vascular mortality: a meta-analysis of individual data for one million adults in 61 prospective studies. *Lancet*, 2002, 360(9349): 1903-1913.
- [2] WHO. A global brief on hypertension: silent killer, global public health crisis: World Health Day 2013. 2013.
- [3] WHO. Global Status Report on noncommunicable diseases 2014.
- [4] Lewington S, Lacey B, Clarke R, et al. The Burden of Hypertension and Associated Risk for Cardiovascular Mortality in China. *JAMA Intern Med* 2016, 176(4): 524-532.
- [5] 刘明波,李锴冲,刘世炜,等. 2010年中国人群高血压疾病负担. *中华流行病学杂志* 2014, 35(6): 680-683.
- [6] 王丽娜,曹丽,张敬一. 高血压相关危险因素研究进展. *中国公共卫生* 2008, 24(5): 629-631.
- [7] Nielsen C. Clearing the Air: The Health and Economic Damages of Air Pollution in China. The MIT Press 2007, 82(3): 508-509.
- [8] Lin H, Guo Y, Zheng Y, et al. Long-Term Effects of Ambient PM_{2.5} on Hypertension and Blood Pressure and Attributable Risk Among Older Chinese Adults. *Hypertension* 2017, 69(5): 806-812.
- [9] Brook RD, Rajagopalan S. Particulate matter air pollution and blood pressure. *Journal of the American Society of Hypertension*, 2009, 3(5): 332-350.
- [10] Foraster M, Basagaña X, Aguilera I, et al. Association of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution with Blood Pressure and Hypertension in an Adult Population-Based Cohort in Spain (the REGICOR Study). *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(4): 404-411.
- [11] Olsson D, Mogren I, Forsberg B. Air pollution exposure in early pregnancy and adverse pregnancy outcomes: a register-based cohort study. *BMJ Open* 2013, 3(2): e1955.
- [12] Guo Y, Tong S, Li S, et al. Gaseous air pollution and emergency hospital visits for hypertension in Beijing, China: a time-stratified case-crossover study. *Environmental Health A Global Access Science Source* 2010, 9(1): 1-7.
- [13] Chuang K, Yan Y, Cheng T. Effect of air pollution on blood pressure, blood lipids, and blood sugar: a population-based approach. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 2010, 52(3): 258-262.
- [14] Baccarelli A, Barretta F, Chang D, et al. Effects of particulate air pollution on blood pressure in a highly exposed population in Beijing, China: a repeated-measure study. *Environmental Health*, 2011, 10(1): 108.
- [15] Sérgio Chiarelli P, Amador Pereira LA, Nascimento Saldiva PHD, et al. The association between air pollution and blood pressure in traffic controllers in Santo André, São Paulo, Brazil. *Environmental Research* 2011, 111(5): 650-655.
- [16] Hampel R, Lepeule J, Schneider A, et al. Short-term Impact of Ambient Air Pollution and Air Temperature on Blood Pressure Among Pregnant Women. *Epidemiology* 2011, 22(5): 671-679.
- [17] Guo Y, Tong S, Zhang Y, et al. The relationship between particulate air pollution and emergency hospital visits for hypertension in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 2010, 408(20): 4446-4450.
- [18] Jacobs L, Buczynska A, Walgraeve C, et al. Acute changes in pulse pressure in relation to constituents of particulate air pollution in elderly persons. *Environmental Research* 2012, 117(2): 60-67.
- [19] Cakmak S, Dales R, Leech J, et al. The influence of air pollution on cardiovascular and pulmonary function and exercise capacity: Canadian Health Measures Survey (CHMS). *Environmental Research*, 2011, 111(8): 1309-1312.
- [20] Brook RD, Bard RL, Burnett RT, et al. Differences in blood pressure and vascular responses associated with ambient fine particulate matter exposures measured at the personal versus community level. *Occupational and Environmental Medicine* 2011, 68(3): 224-230.
- [21] Baumgartner J, Schauer J, Ezzati M, et al. Indoor Air Pollution and Blood Pressure in Adult Women Living in Rural China. *Environmental Health Perspectives* 2011, 119(10): 1390.
- [22] Chen S, Su T, Lin Y, et al. Short-term Effects of Air Pollution on Pulse Pressure Among Nonsmoking Adults. *Epidemiology* 2012, 23(2): 341-348.
- [23] Kim S, Temiyasathit C, Chen V, et al. Characterization of Spatially Homogeneous Regions Based on Temporal Patterns of Fine Particulate Matter in the Continental United States. *J Air Waste Manag Assoc* 2008, 58(7): 965-975.
- [24] Kim E, Hopke P, Pinto J, et al. Spatial variability of fine particle mass, components, and source contributions during the regional air pollution study in St Louis. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 4172-4179.
- [25] Baumgartner J, Zhang Y, Schauer J, et al. Household Air Pollution and Children's Blood Pressure. *Epidemiology*, 2012, 23(4):

- 641-642.
- [26] Blood Pressure Changes and Chemical Constituents of Particulate Air Pollution: Results from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) Study. *Environ Health Perspect* 2013 ,121(1) :66-72.
- [27] Dvonch JT ,Kannan S ,Schulz AJ ,et al. Acute Effects of Ambient Particulate Matter on Blood Pressure: Differential Effects Across Urban Communities. *Hypertension* 2009 ,53(5) :853-859.
- [28] Brook R ,Rajagopalan S ,Pope C ,et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* ,2010 ,121(21) :2331-2378.
- [29] Chuang K ,Yan Y ,Chiu S ,et al. Long-term air pollution exposure and risk factors for cardiovascular diseases among the elderly in Taiwan. *Occupational & Environmental Medicine* 2011 ,68(1) :64-68.
- [30] Dong GH ,Qian Z ,Xaverius PK ,et al. Association Between Long-Term Air Pollution and Increased Blood Pressure and Hypertension in China. *Hypertension* 2013 ,61(3) :578-584.
- [31] Fuks K ,Moebus S ,Hertel S ,et al. Long-Term Urban Particulate Air Pollution ,Traffic Noise ,and Arterial Blood Pressure. *Environmental Health Perspectives* 2011 ,119(12) :1706.
- [32] Coogan PF ,White LF ,Jerrett M ,et al. Air Pollution and Incidence of Hypertension and Diabetes Mellitus in Black Women Living in Los Angeles. *Circulation* 2012 ,125(6) :767-772.
- [33] Chen H ,Burnett RT ,Kwong JC ,et al. Spatial Association Between Ambient Fine Particulate Matter and Incident Hypertension. *Circulation* 2014 ,129(5) :562-569.
- [34] Liu C ,Fuentes E ,Tiesler CMT ,et al. The associations between traffic-related air pollution and noise with blood pressure in children: Results from the GINIplus and LISAPLUS studies. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2014 ,217(4-5) :499-505.
- [35] Babisch W ,Wolf K ,Petz M ,et al. Associations between Traffic Noise ,Particulate Air Pollution ,Hypertension ,and Isolated Systolic Hypertension in Adults: The KORA Study. *Environmental Health Perspectives* 2014 ,122(5) :492-498.
- [36] van den Hooven EH ,de Kluienaar Y ,Pierik FH ,et al. Air Pollution ,Blood Pressure ,and the Risk of Hypertensive Complications During Pregnancy: The Generation R Study. *Hypertension* 2011 ,57(3) :406-412.
- [37] Orru H ,Jögi R ,Kaasik M ,et al. Chronic Traffic-Induced PM Exposure and Self-Reported Respiratory and Cardiovascular Health in the RHINE Tartu Cohort. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2009 ,6(11) :2740-2751.
- [38] 冯国双 陈景武. 广义可加模型及其 SAS 程序实现. *中国卫生统计* 2006 ,23(1) :72-74.
- [39] Dong G ,Qian ZM ,Trevathan E ,et al. Air pollution associated hypertension and increased blood pressure may be reduced by breastfeeding in Chinese children: The Seven Northeastern Cities Chinese Children's Study. *International Journal of Cardiology* 2014 ,176(3) :956-961.
- [40] 黄秋兰 唐咸艳 周红霞 等. 四种空间回归模型在疾病空间数据影响因素筛选中的比较研究. *中国卫生统计* ,2013 ,30(3) :334-338.
- [41] Zhou C ,Chen J ,Wang S. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter(PM 2.5) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique. *Science of The Total Environment* 2017 ,619:436-445.
- [42] 叶子容 陈佳 周冀 等. 空间回归方法在慢性病研究中的应用进展. *中国卫生统计* 2018 ,35(1) :137-141.
- [43] Brunson C ,Fotheringham S ,Charlton M. Geographically Weighted Regression-Modelling Spatial Non-Stationarity. *Journal of the Royal Statistical Society* ,1998 ,47(3) :431-443.
- [44] Kaul B ,Maier W ,Schweikart J ,et al. Exploring the small-scale spatial distribution of hypertension and its association to area deprivation based on health insurance claims in Northeastern Germany. *BMC Public Health* 2018 ,18(1) :121.
- [45] Ye Z ,Xu L ,Zhou Z ,et al. Application of SCM with Bayesian B-Spline to Spatio-Temporal Analysis of Hypertension in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2018 ,15(1) :55.

(责任编辑: 郭海强)