

基于地理探测器的广州市大气PM_{2.5}浓度驱动因素分析

周敏丹^{1,4}, 匡耀求^{1,2*}, 云国梁^{3,4}

- 1.中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640
- 2.暨南大学环境学院, 广东 广州 511486
- 3.中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021
- 4.中国科学院大学, 北京 100049

摘要: PM_{2.5}变化的驱动因素是大气PM_{2.5}研究的重要内容. 为了揭示PM_{2.5}污染的特点及其驱动影响因子, 以广州市为例, 采用地理探测器方法探测自然因素(包括平均降水量、平均温度、平均气压、平均相对湿度、平均风速、植被指数)与社会经济因素(包括人口密度、国内生产总值、工业总产值、人均公园绿地面积、公交车辆数、电力消费量)对2015年广州市 ρ (PM_{2.5})变化的影响机制与差异. 结果表明: ①基于因子探测分析发现, 对 ρ (PM_{2.5})变化影响最大的前三位驱动因素分别为植被指数、公交车辆数与电力消费量, 对应的因子影响程度指标值分别为0.51、0.46、0.40. ②基于生态探测分析发现, 植被指数与其他自然因素(如平均温度、平均降水量、平均气压等)对 ρ (PM_{2.5})空间分布的影响均存在显著差异, 与所有社会经济因素对 ρ (PM_{2.5})空间分布的影响均不存在显著差异; 除植被指数外, 公交车辆数与其他自然因素及社会经济因素对 ρ (PM_{2.5})空间分布的影响均存在显著差异. ③基于交互探测分析发现, 所有影响因素(包括自然因素与社会经济因素)对 ρ (PM_{2.5})变化的交互作用均大于单一影响因素的独自作用, 其中平均降水量与平均气压交互作用后对 ρ (PM_{2.5})变化的影响最大. 研究显示, 自然因素(尤其是植被指数、平均降水量)及自然因素与人为活动(如交通出行、电力消费等)交互效应对广州市 ρ (PM_{2.5})的变化起决定性作用.

关键词: PM_{2.5}; 影响因素; 地理探测器; 广州市

中图分类号: X513

文章编号: 1001-6929(2020)02-0271-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.10.01

Analysis of Driving Factors of Atmospheric PM_{2.5} Concentration in Guangzhou City Based on Geo-Detector

ZHOU Mindan^{1,4}, KUANG Yaoqiu^{1,2*}, YUN Guoliang^{3,4}

- 1.Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 520640, China
- 2.College of Environment, Jinan University, Guangzhou 511486, China
- 3.Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
- 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The driving factors of atmospheric PM_{2.5} concentration is of great significance to PM_{2.5} study. In order to identify the characteristics and driving factors of PM_{2.5} pollution, this paper takes the Guangzhou City as a case to detect the impact mechanisms that natural factors (including average precipitation, average temperature, average pressure, average relative humidity, average wind speed, NDVI) and socioeconomic factors (including population density, GDP, industrial output value, per capita park greenspace area, the number of public transport vehicles, the total consumption of electric power) impose on PM_{2.5} concentration in 2015 based on Geo-Detector method. The key results were as follows: (1) Factor detector results reveal that NDVI is the dominant contributor to PM_{2.5} concentration variation, followed by the number of public transport vehicles and the total consumption of electric power, with respective q value of 0.51, 0.46, 0.40. (2) Based on the ecological detector, it is found that there are significant difference in the impact of NDVI with other natural factors (average temperature, average precipitation, average air pressure, etc.), but there is no significant difference in the impact of NDVI with all social factors except for NDVI and the average wind speed. Besides, there is a significant difference in the impact of the number of public transport vehicles on the distribution of PM_{2.5} concentration with other natural and socioeconomic factors.

收稿日期: 2018-03-28 修订日期: 2019-09-25

作者简介: 周敏丹(1995-), 女, 江西南昌人, zhoumindan@gig.ac.cn.

* 责任作者: 匡耀求(1963-), 男, 湖南娄底人, 教授, 博导, 主要从事资源环境与区域可持续发展研究, yaoqiuk@gig.ac.cn

基金项目: 广东省科技计划项目(No.2016A020228009)

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Supported by Science and Technology Project of Guangdong Province, China(No.2016A020228009)

(3) The interaction detector results indicate that the impact of a combination of any natural factor with socioeconomic factor on the distribution of $PM_{2.5}$ concentration is far more powerful than that of any individual factor. Among all the factors, the impact of a combination of the average precipitation with average pressure on the distribution of $PM_{2.5}$ concentration is the most significant. The study shows that the natural factors (especially NDVI, average precipitation) and the effect of interaction between natural factors and human activities, such as traffic travel and electricity consumption, play a decisive role in the impact on the distribution of $PM_{2.5}$ concentration in Guangzhou City.

Keywords: $PM_{2.5}$; impact factors; geographical detector; Guangzhou City

大气污染问题是全球气候变化关注的重要问题,也是社会、经济、环境可持续发展亟待解决的主要问题。作为大气主要污染物之一, $PM_{2.5}$ 是空气动力学直径小于 $2.5\ \mu m$ 的一种可吸入大气颗粒物,在可见光范围内是无法被人类肉眼所见,并且其成分复杂,具有较强的吸附性,可携带微小尘埃、空气中的有机物、重金属甚至病毒等有毒有害物质^[1-2]。高浓度 $PM_{2.5}$ 的聚集极有可能形成雾霾天气,而雾霾天气下大气能见度与 $\rho(PM_{2.5})$ 密切相关,其严重影响环境大气质量^[3-4]。人类长期暴露在雾霾天气下也极易导致各种呼吸道疾病及心血管疾病,严重危害居民身体健康。研究^[5-6]表明,心血管、呼吸系统疾病的发病率与死亡率,以及总非意外死亡率的增加与短期暴露于高浓度 $PM_{2.5}$ 环境中密切相关。一项关于公众对空气污染风险感知空间分布的全国性调查发现,45%的被调查者对目前的空气质量不满意,其中,76%表示对空气污染非常关注,86%表示非常担心暴露在污染空气中的有害后果^[7]。因此,正确理解 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的驱动机制及其与各影响因子之间的关系,进一步改善空气质量以提高公众对大气环境的满意度,对城市的空气质量改善尤其是 $PM_{2.5}$ 的研究和治理有重要现实意义。

20世纪90年代,美国和一些欧洲国家对 $PM_{2.5}$ 展开了大规模研究。为了有效监测 $PM_{2.5}$,美国于1997年7月最先对 $PM_{2.5}$ 的标准进行规范并纳入国际标准^[8]。我国对 $PM_{2.5}$ 研究起步较晚,2012年在GB 3095—2012《环境空气质量标准》里首次对 $\rho(PM_{2.5})$ 设定限值^[9]。2013年,我国许多地区多次出现严重雾霾天气,受到公众的广泛关注。近年来,国内外许多学者对 $PM_{2.5}$ 开展了大量的研究并取得相关的成果,包括 $PM_{2.5}$ 的化学组分与来源解析^[10-11]、时空特征与驱动因素分析^[12-14]、空间格局与异质性^[15-17]、模型估算与预测等^[18-20]。其中,关于 $PM_{2.5}$ 的驱动因素分析是 $PM_{2.5}$ 研究的重要内容。

目前国内外研究 $PM_{2.5}$ 影响因素所采用的方法主要包括相关分析^[21-23]、多元回归分析^[24]、主成分分析^[25-26]、灰色关联分析^[27-28]等,这些方法除了对数据

具有限定条件外,都只是分析自变量对因变量的单一影响,难以揭示和分析空间差异状况。王劲峰等^[29]提出的地理探测器方法是探测地理现象空间分异性及揭示其背后驱动因子的一种新的统计方法,具有以下优势:①对解释变量或响应变量不需要预设任何假定或限定;②不仅可以探测数值型数据也可以探测定性数据,对于顺序量、比值量或间隔量,只要进行适当的离散化,也可以利用地理探测器对其进行统计分析;③可以探测两因子交互作用对响应变量的影响。该研究基于自然因素数据和社会经济因素数据及 $\rho(PM_{2.5})$ 数据,以2015年广州市为例,采用地理探测器方法分析各影响因子与 $\rho(PM_{2.5})$ 的关系,以及 $\rho(PM_{2.5})$ 变化的影响机制,以期为正确认识广州市大气污染和空气质量状况提供理论分析基础,为制定城市 $PM_{2.5}$ 污染控制以及空气质量改善策略方案提供参考依据与科学指导。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

该研究讨论的自然因素数据包括平均降水量、平均温度、平均气压、平均相对湿度、平均风速,均来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。此外还包括植被指数以表征研究时段内地表植被覆盖程度。社会经济数据包括人口密度、国内生产总值、工业总产值、人均公园绿地面积、公交车辆数等。近40年来,我国致力于开发利用风能、太阳能、核能等新能源来代替一次性能源,寻找煤炭的清洁高效利用方法,考虑到广州市工业锅炉(取暖)用煤以及生活用煤量与北方地区相比较少,煤炭主要用于发电,而电力消费量在一定程度上可以间接反映煤炭的消费量状况,因此将电力消费量纳入社会经济因素指标。人口密度、国内生产总值和植被指数数据均基于1 km空间分辨率的中国人口、国内生产总值、植被指数空间公里网格数据集,数据来自中国科学院地理科学与资源环境研究所数据中心(<http://www.resdc.cn>)。其他社会经济数据来源于《广东统计年鉴2016》^[30]。 $\rho(PM_{2.5})$ 数据来自于Atmospheric Composition Analysis Group公布共

享的全球大气 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 数据(http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140)。因收集到的 2015 年数据较为完整, 所以该研究基于 2015 年的所有数据集, 利用 ArcGIS 10.4 软件进行空间插值以及格网化方法得到基于 2 km×2 km 各影响因子和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 格网

栅格数据。图 1 为 2015 年广州市各影响因子空间分布情况。

1.2 研究方法

该研究采用地理探测器模型研究 PM_{2.5} 背后的驱动机制及各影响因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响程

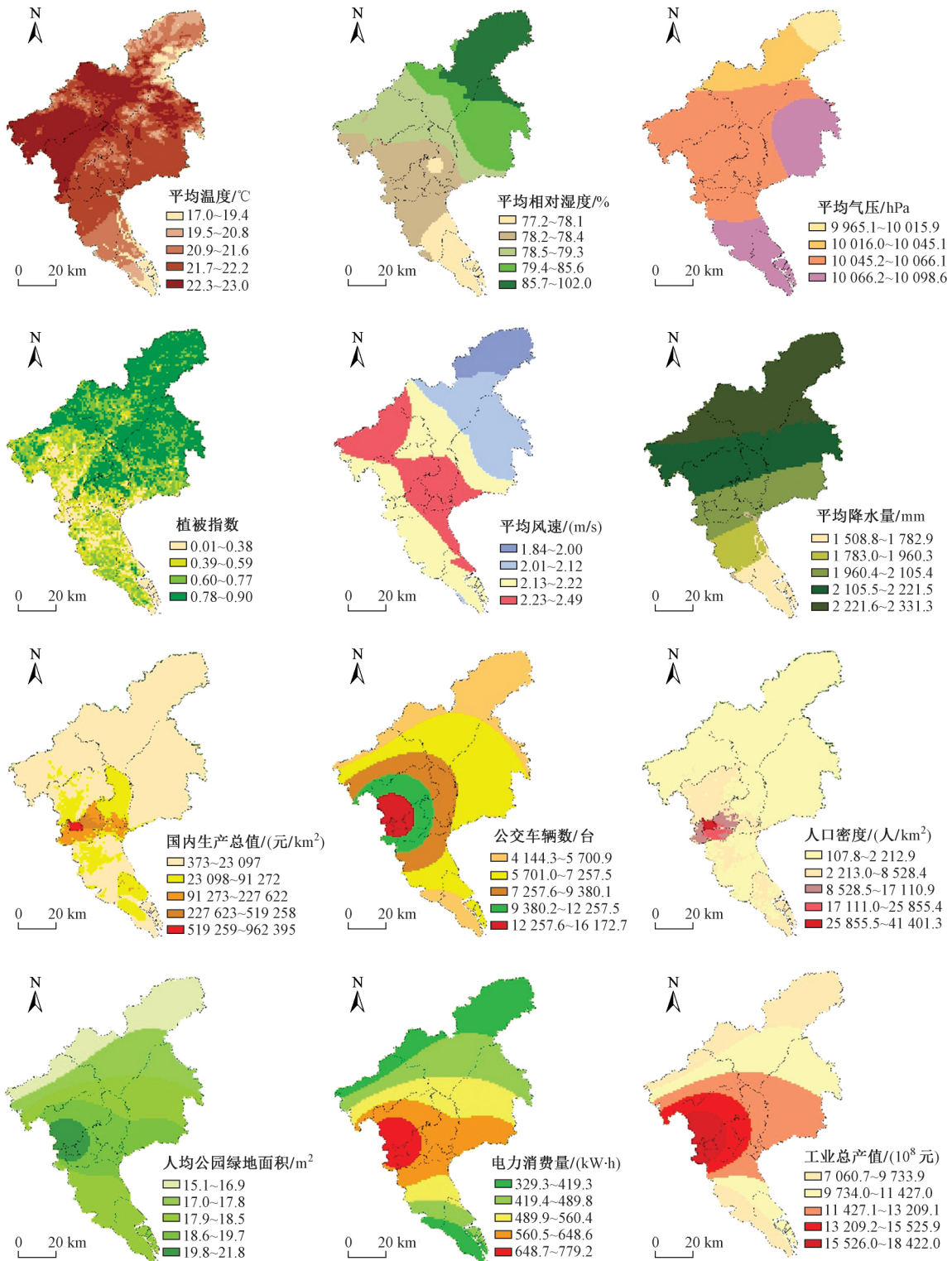


图 1 2015 年广州市各影响因子分布情况

度,该模型是基于地理空间的层(strata)上空间差异分析提出的,分析不同解释变量因素对响应变量的影响,其原理是每个影响因子被分成不同的层或子区域,如果各因子所在的子区域的方差之和小于整个区域的方差,则存在空间分层的异质性^[29].其核心思想是如某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性或一致性^[31].地理探测器是根据变量在空间上的一致性,利用空间分异性探测驱动力影响的工具.开发者基于上述原理和思想编制的免费实用软件共享于网站(<http://www.geodetector.org>)^[32].

因子探测是探测因变量Y的空间分异性及不同因子X对因变量Y的解释力(Power of Determinant, PD),也就是Y在各影响因子X的地理层上的空间异质性以及影响因子X对因变量Y的解释程度,用q度量,计算公式:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma^2}{N \sigma^2}$$

式中:q为衡量因子影响程度的指标;N和N_h分别为

总体和h层的样本数, h=1, 2, …, L; σ²和σ_h²分别为整个研究区域和h层的方差.

由图2可见,整个研究区域Y分为4层(h=1、2、3、4),X_h为各层(h=1、2、3、4)的影响的因子,根据研究对象的空间分异性,Y的值约等于Y的平均值,即Y≈ \bar{Y} ,因此“ \bar{Y}, σ^2 ”为研究区域的方差,如“ $\bar{Y}_{h=1}, \sigma_{h=1}^2$ ”为研究区域1层的方差,最后根据公式计算q值.q的取值范围为[0, 1].当q=1时,说明影响因子能完全解释ρ(PM_{2.5})的空间分布;当q=0时,则说明影响因子与ρ(PM_{2.5})变化无任何关系.q越大,影响因子对PM_{2.5}的影响越强,反之影响越弱.可用F检验判断q值是否显著,即比较每个地理层或子区域中各影响因子的累积方差之和相对于整个研究区域的方差是否显著.

生态探测是探测不同影响因子对因变量Y影响的显著性,也就是比较不同影响因子如(X1和X2)对因变量Y属性的空间分布或分异规律是否有显著差异,也是用F检验来比较在一个地理层或子区域中一个影响因素的方差与另一个影响因素的方差.

交互探测是探测2个或2个以上影响因子共同

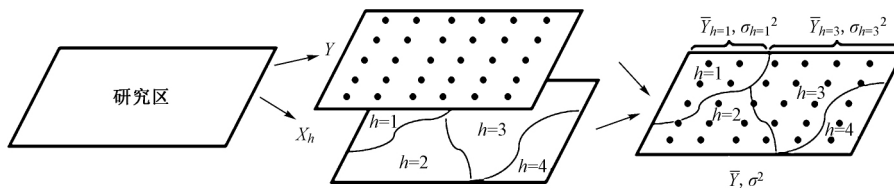


图2 地理探测器原理

Fig.2 Principle of the geodetector

作用对因变量Y的影响程度是否显著大于或小于单一影响因子的独自作用,以及这些影响因子对因变量Y的影响是否是独立的.由图3可见,评估步骤首先

是计算因子X1和X2的q值;然后将2个因子所在的地理层或子区域叠加得到新的层,也就是因子X1和X2交互后新的层(X1∩X2);最后计算因子X1和X2交互作用的q值,并与X1和X2的q值分别比较判断交互类型.因子X1和X2之间的7种交互关系情况如表1所示.

表1 交互关系

Table 1 Relationship of interaction

交互关系	交互类型
PD(X1∩X2) < Min[PD(X1), PD(X2)]	非线性减弱
Min[PD(X1), PD(X2)] < PD(X1∩X2) < Max[PD(X1), PD(X2)]	单线性减弱
PD(X1∩X2) < PD(X1) + PD(X2)	减弱
PD(X1∩X2) > PD(X1) + PD(X2)	非线性加强
PD(X1∩X2) > Max[PD(X1), PD(X2)]	双线性加强
PD(X1∩X2) > Min[PD(X1), PD(X2)]	加强
PD(X1∩X2) = PD(X1) + PD(X2)	相互独立

注:PD(X1)、PD(X2)分别为X1、X2的q值;PD(X1∩X2)为X1与X2交互后的q值;Min[PD(X1), PD(X2)]为判断X1与X2的q值的最小值;Max[PD(X1), PD(X2)]为判断X1和X2的q值的最大值.

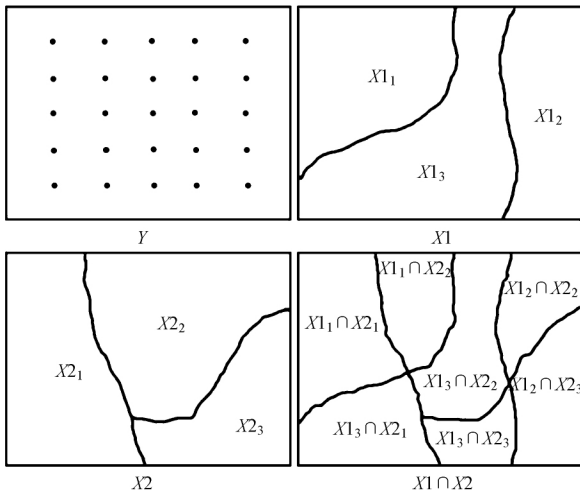


图3 交互探测

Fig.3 Interactive detection

2 结果与分析

2.1 因子探测分析

利用因子探测器来确定各影响因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响程度. 由图 4 可见, 所有影响因子的 q 值范围为 0.03~0.51, 其影响程度大小依次为植被指数 (0.51) > 公交车辆数 (0.46) > 电力消费量 (0.40) > 人均公园绿地面积 (0.39) > 平均降水量 (0.39) > 平均气压 (0.37) > 工业总产值 (0.34) > 人口密度 (0.32) > 平均温度 (0.21) > 国内生产总值 (0.19) > 平均相对湿度 (0.12) > 平均风速 (0.03). 植被指数对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响最大, 说明在适宜的气候条件下, 高密度植被分布区与人类开发密集区在空间上存在此消彼长的关系, 使得使空气中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 减少; 其次是公交车辆数, 公交车辆排放的尾气可能对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化有较大影响, 近年来快速城市化使得广州市公交车的数量不断增多, 尤其在早晚高峰期间排放的废气较多, 废气中 CO、NO₂ 和 NO 会进一步与 PM_{2.5} 发生反应形成二次污染; 第三位是电力消费量, 目前大部分城市均以火力发电为主, 主要是利用煤炭等化学燃料生产电能, 据相关电力行业数据统计, 2015 年煤电在广东省电力来源的占比最大(约为 62%), 因此电力消费量的增加间接说明煤炭消费量需求的增长, 而煤炭燃烧所产生的大量 SO₂、NO_x 等有害气体会加剧空气污染, 导致 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大幅度升高. 此外, 人均公园绿地面积、平均降水量与工业总产值等对空气中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化也有较大的影响.

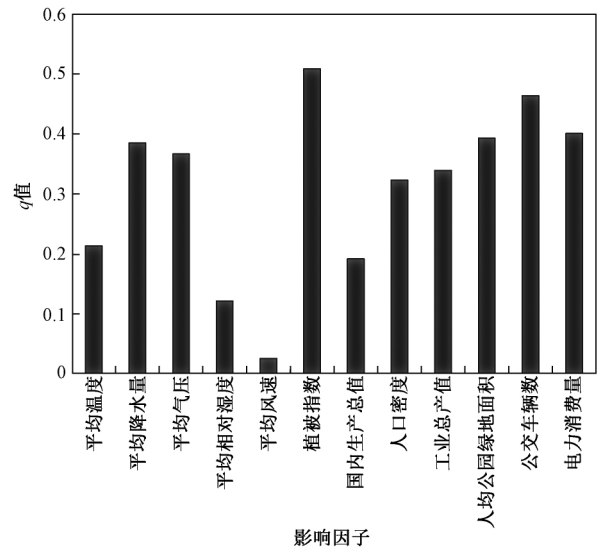


图 4 2015 年广州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 因子探测的 q 值

Fig.4 The q statistic of factor detection on Guangzhou City's $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in 2015

2.2 生态探测分析

利用生态探测器比较各影响因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响是否存在显著差异. 由表 2 可见: 平均风速与植被指数、国内生产总值、人口密度、工业总产值、人均公园绿地面积、公交车辆数、电力消费量对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响均存在显著差异; 植被指数与其他自然因素(如平均温度、平均降水量、平均气压等)对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响也均存在显著差异, 而与所有社会经济因素对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的

表 2 2015 年广州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 生态探测结果

Table 2 Results on Guangzhou City's $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in 2015 by ecological detector

影响因子	平均温度	平均降水量	平均气压	平均相对湿度	平均风速	植被指数	国内生产总值	人口密度	工业总产值	人均公园绿地面积	公交车辆数
平均降水量	Y										
平均气压	Y	N									
平均相对湿度	N	N	N								
平均风速	N	N	N	N							
植被指数	Y	Y	Y	Y	Y						
国内生产总值	N	N	N	Y	Y	N					
人口密度	Y	N	N	Y	Y	N	Y				
工业总产值	Y	N	N	Y	Y	N	Y	N			
人均公园绿地面积	Y	N	N	Y	Y	N	Y	Y	Y		
公交车辆数	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	
电力消费量	Y	N	N	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N

注: F 检验显著水平性为 0.05. Y 表示存在显著差异, N 表示不存在显著差异.

影响均不存在显著差异;除植被指数外,公交车辆数与其他自然因素(如平均温度、平均降水量、平均气压、平均相对湿度与平均风速)及其他社会经济因素(如人口密度、国内生产总值、人均公园绿地面积、电力消费量与工业总产值)对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响均存在显著差异;此外,工业总产值与人均公园绿地面积、公交车辆数、电力消费量对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响也均存在显著差异。

2.3 交互作用探测分析

交互探测器探测各影响因子交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响如表3所示。由表3可见,任何两种影响因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的交互作用均大于单独一种因子的独立影响。如平均降水量与平均气压交互

后作用于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的 q 值为0.76,对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用最大,而平均降水量与所有社会经济因子交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用均显著大于平均降水量的单独作用(0.39)。另外,相比其他因子,平均风速对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用最小,只与植被指数的交互类型为双线性加强,与其他影响因子交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用均为非线性协同。相比与其他因子的交互作用,公交车辆数、电力消费量、人口密度、工业总产值、国内生产总值与植被指数交互后,对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化影响的 q 值均显著增大,分别为0.68、0.64、0.57、0.63、0.55。其他影响因子如平均温度、平均相对湿度、植被指数、工业总产值、电力消费量等因子之间交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响均显著增强。

表3 2015年广州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 交互探测结果

Table 3 Results on Guangzhou City's $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in 2015 by interation detector

影响因子	平均温度	平均降水量	平均气压	平均相对湿度	平均风速	植被指数	国民生产总值	人口密度	工业总产值	人均公园绿地面积	公交车辆数	电力消费量
平均温度	0.21											
平均降水量	0.59	0.39										
平均气压	0.48	0.76	0.37									
平均相对湿度	0.41	0.54	0.60	0.12								
平均风速	0.28	0.47	0.60	0.19	0.03							
植被指数	0.59	0.61	0.70	0.55	0.53	0.51						
国民生产总值	0.42	0.43	0.48	0.29	0.24	0.55	0.19					
人口密度	0.48	0.53	0.52	0.40	0.38	0.57	0.34	0.32				
工业总产值	0.44	0.61	0.58	0.46	0.42	0.63	0.44	0.45	0.34			
人均公园绿地面积	0.57	0.53	0.66	0.44	0.50	0.61	0.44	0.48	0.51	0.39		
公交车辆数	0.52	0.67	0.59	0.54	0.53	0.68	0.54	0.54	0.51	0.56	0.46	
电力消费量	0.50	0.58	0.61	0.48	0.50	0.64	0.47	0.49	0.46	0.49	0.50	0.40

3 讨论

空气污染的加剧在很大程度上与自然气象条件、人为影响作用密切相关。科学可靠的探测方法是揭示 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响因素和影响机理的关键。该研究采用全新的地理探测器方法研究分析了各主要驱动因素对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响机制,结果表明在所有影响因子中,植被指数、公交车辆数及电力消费量是对广州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化贡献最大的3个影响因素。其中,植被指数对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响最显著;社会经济因素中,公交车辆数、电力消费量、工业总产值对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响较为显著,这与前人研究结论一致。如CHEN等^[33]在研究社会经济因子对我国暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 中人口的影响时发现,城镇化与工业总产值比

重对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的贡献率最大;周曙东等^[34]对京津冀地区2013—2014年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响因素研究发现,一个地区煤炭消费量、工业废气重度污染行业工业增加值、黄标车保有量对该地区大气污染物排放量均具有显著影响;杨昆等^[8]在研究2013年和2015年我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与社会经济影响因素的关系时发现, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与人均汽车保有量的平方成正比,与森林覆盖率的平方成反比,人均汽车保有量对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 贡献率最大,森林覆盖率和人均私家车保有量对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响最明显,人均电力消费量对抑制 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 有显著影响。因此,在制定大气污染控制措施时,要进一步提高城市植被覆盖率,合理控制交通出行流量。研究^[35]表明,限制公共交通的流量,减少公共交通线路之间的重叠,同时更新车辆,可将一次

空气污染减少 80%。另外,在全国范围内大力推广使用清洁能源发电,升级优化产业结构,对重污染行业实施清洁生产审核也可以在一定程度上缓解城市大气污染问题。

自然因素方面,该研究发现平均降水量、平均气压对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用最大,而平均风速对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用最小,但平均风速与人为因素对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响差异最显著。此外,平均降水量与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化呈显著负相关,而平均气压、平均温度、平均相对湿度及平均风速与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均呈显著正相关,这与部分研究结论有所区别。如卢文等^[36]研究了 2014—2016 年影响南京市江北地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布的气象因素,发现 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与温度、风速呈负相关,与湿度呈正相关。肖雪等^[37]探索气象因子对 2016 年成都市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响时发现,成都市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与气温和风速均呈显著负相关,而与相对湿度的相关性不明显。张云伟等^[38]通过现场观测研究 2015 年西安市和平路街谷内的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日变化发现 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与温度、湿度有良好的相关性,其中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与温度、风速呈负相关,而与湿度呈正相关性,静风天气条件下,温度变化是影响街谷内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 扩散的主要因素。综上,不同时间尺度和空间尺度上,气象因素(如温度、湿度、降水量、相对湿度及风速)对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响存在时间与空间尺度效应的差异。相关研究^[22,39]表明,影响 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的主要驱动因素是随时间和区域变化而变化的,而气象因子与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的关系存在空间和季节性变化。广州市位于东南沿海地区,相比社会经济因素,气象因素(如降水、温度、气压、湿度)与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的关系机制较复杂,因此,在研究影响大气污染的气象因素时,应进一步考虑时空尺度与地理区位,不能一概而论。

相比传统因素分析方法,地理探测器方法不需要满足任何前提假设条件,同时也不会存在多重共线性问题,也不需要进行规范化处理,对于数值型数据、定性数据以及顺序量、比值量或间隔量,地理探测器都可以对其进行统计分析。地理探测器的另一个独特优势是探测影响因子与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的关联性,该关联性既包括线性关系,也包括非线性关系^[40]。此外,地理探测器方法在探测 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的驱动机制、影响方向和强度以及空间分异方面更深入也更全面,既可探测单个影响因素对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响差异,又能探测自然条件因素和人为活动因素交互作用对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响是否显著,并可与单一影响因子

的单独作用进行比较。近年来,人类在改造自然的过程中对自然的开发有时大大超过环境所能承受的极限,自然环境发生了很大的变化。因此,研究城市环境变化的驱动影响因素时必须把人为影响因素考虑进去,特别是要注意人类活动与自然生态因素交互作用的影响^[41-43]。

4 结论

a) 因子探测分析表明,自然因素中对 2015 年广州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响大小依次为植被指数、平均气压、平均温度、平均相对湿度与平均风速;社会经济因素中,对 2015 年广州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响大小依次为公交车辆数、电力消费量、人均公园绿地面积、工业总产值、人口密度与国内生产总值。其中,植被指数对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响最大,其次是公交车辆数,第三位是电力消费量。

b) 生态探测结果表明,植被指数与其他自然因素(如平均温度、平均降水量、平均气压、平均相对湿度)对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响作用均存在显著差异,而植被指数与所有社会经济因素对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响作用均不存在显著差异。除植被指数外,公交车辆数与其他自然因素(如平均温度、平均降水量、平均气压、平均相对湿度与平均风速)以及其他社会经济因素(如人口密度、国内生产总值、人均公园绿地面积、电力消费量与工业总产值)对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布的影响均存在显著差异。

c) 交互探测结果表明,自然因素与社会经济因素对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响存在交互作用,任何两种影响因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的交互作用均大于单一影响因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的独立作用,其中,平均降水量与平均气压交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用最大,平均降水量与所有社会经济因素交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的影响作用显著增强,其他影响因子如平均温度、平均相对湿度、植被指数、工业总产值、电力消费量等因子之间交互后对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的交互作用均显著增强。

参考文献(References):

- [1] 江佳, 邹滨, 陈璟雯. 中国大陆 1998 年以来 PM_{2.5} 浓度时空分异规律[J]. 遥感信息, 2017, 32(1): 28-34.
JIANG Jia, ZOU Bin, CHEN Jingwen. Spatial-temporal distribution of PM_{2.5} concentrations in mainland Chinese since 1998 [J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(1): 28-34.
- [2] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 PM_{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2498-2504.
DUAN Jiexiong, ZHAI Weixin, CHENG Chengqi, et al. Socio-economic factors influencing the spatial distribution of PM_{2.5}

- concentrations in China: an exploratory analysis [J]. *Environmental Science* 2018, 39(5): 2498-2504.
- [3] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5} 时空格局演变及其影响因素的研究进展 [J]. *地理科学进展* 2018, 37(8): 3-13.
HAN Lijian. Relationship between urbanization and urban air quality: an insight on fine particulate dynamics in China [J]. *Progress in Geography* 2018, 37(8): 3-13.
- [4] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析 [J]. *地理学报* 2017, 72(11): 2079-2092.
ZHOU Liang, ZHOU Chenghu, YANG Fan, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica* 2017, 72(11): 2079-2092.
- [5] KIM Y M, KIM J Y, LEE S B, et al. Review on the recent PM_{2.5} studies in China [J]. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 2015, 31(5): 411-429.
- [6] CAO Junji, XU Hongmei, XU Qun, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city [J]. *Environmental Health Perspectives* 2012, 120(3): 373-378.
- [7] PU Sisi, SHAO Zhijuan, FANG Minrui, et al. Spatial distribution of the public's risk perception for air pollution: a nationwide study in China [J]. *Science of the Total Environment* 2019, 655: 454-462.
- [8] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 等. 中国 PM_{2.5} 污染与社会经济的空间关系及成因 [J]. *地理研究* 2016, 35(6): 1051-1060.
YANG Kun, YANG Yulian, ZHU Yanhui, et al. Social and economic drivers of PM_{2.5} and their spatial relationship in China [J]. *Geographical Research* 2016, 35(6): 1051-1060.
- [9] 环境保护部. GB 3095—2012 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [10] ZHANG R, JING J, TAO J, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2013(13): 7053-7074.
- [11] LI Xin, ZHANG Qiang, ZHANG Yang, et al. Source contributions of urban PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Environment* 2015, 123: 229-239.
- [12] 杨冕, 王银. 长江经济带 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究 [J]. *中国人口·资源与环境* 2017, 27(1): 91-100.
YANG Mian, WANG Yin. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(1): 91-100.
- [13] 詹鹤铭, 刘永红, 林琳, 等. 2014 年冬季珠三角区域典型城市 PM_{2.5} 污染时空关联特征 [J]. *环境科学研究* 2017, 30(1): 110-120.
ZHAN Juanming, LIU Yonghong, LIN Lin, et al. Investigation of spatial and temporal association of PM_{2.5} pollution during winter 2014 in typical cities of Pearl River Delta [J]. *Research of Environmental Sciences* 2017, 30(1): 110-120.
- [14] JIN Q, FANG X, WEN B, et al. Spatial-temporal variations of PM_{2.5} emission in China from 2005 to 2014 [J]. *Chemosphere* 2017, 183: 429-436.
- [15] 赵阳, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 2013 年南昌市区 PM_{2.5} 的浓度水平及时空分布特征与来源 [J]. *环境科学研究* 2017, 30(6): 854-863.
ZHAO Yang, HU Gongren, YU Ruilian, et al. Concentrations and spatial-temporal characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Nanchang City in 2013 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(6): 854-863.
- [16] YE Weifeng, MA Zhongyu, HA Xiuzhen. Spatial-temporal patterns of PM_{2.5} concentrations for 338 Chinese cities [J]. *Science of the Total Environment* 2018, 631-632: 524-533.
- [17] MA Y R, JI Q, FAN Y. Spatial linkage analysis of the impact of regional economic activities on PM_{2.5} pollution in China [J]. *Journal of Cleaner Production* 2016, 139: 1157-1167.
- [18] 张亮林, 潘竟虎, 赖建波, 等. 基于 GWR 降尺度的京津冀地区 PM_{2.5} 质量浓度空间分布估算 [J]. *环境科学学报* 2019, 39(3): 186-196.
ZHANG Lianglin, PAN Jinghu, LAI Jianbo, et al. Estimation of PM_{2.5} mass concentration in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on geographically weighted regression and spatial downscaling method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2019, 39(3): 186-196.
- [19] LI Lianfa, ZHANG Jiehao, MENG Xia, et al. Estimation of PM_{2.5} concentrations at a high spatiotemporal resolution using constrained mixed-effect bagging models with MAIAC aerosol optical depth [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2018, 217: 573-586.
- [20] 杨立娟, 徐涵秋, 金致凡. MODIS 卫星遥感估计福州地区近地面 PM_{2.5} 浓度 [J]. *遥感学报* 2018, 22(1): 64-75.
YANG Lijuan, XU Huanqiu, JIN Zhifan. Estimation of ground-level PM_{2.5} concentrations using MODIS satellite data in Fuzhou, China [J]. *Journal of Remote Sensing* 2018, 22(1): 64-75.
- [21] WANG S J, ZHOU C S, WANG Z B, et al. The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China [J]. *Journal of Cleaner Production* 2017, 142(4): 1800-1809.
- [22] YANG Qianqian, YUAN Qiangqiang, LI Tongwen, et al. The relationships between PM_{2.5} and meteorological factors in China: seasonal and regional variations [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2017, 14(12): 1510-1518.
- [23] TAI A P K, MICKLEY L J, JACOB D J. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change [J]. *Atmospheric Environment* 2010, 44(32): 3976-3984.
- [24] 黄文珂. 多元回归建模过程中共线性的诊断与解决方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1-14.
- [25] 李靖华, 郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究: 主成分评价 [J]. *管理工程学报* 2002, 16(1): 39-43.
- [26] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析 [J]. *中国环境监测* 2013, 29(2): 15-21.
ZHU Qianru, LIU Yonghong, XU Weijia, et al. Analysis on the pollution characteristics and influence factors of PM_{2.5} in Guangzhou [J]. *Environmental Monitoring in China* 2013, 29(2): 15-21.

- [27] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析多因素统计分析新方法[J]. 统计研究, 1995, 12(3): 46-48.
- [28] 贺祥, 林振山, 刘会玉, 等. 基于灰色关联模型对江苏省 PM_{2.5} 浓度影响因素的分析[J]. 地理学报, 2016, 71(7): 1119-1129.
HE Xiang, LIN Zhenshan, LIU Huiyu, et al. Analysis of the driving factors of PM_{2.5} in Jiangsu Province based on grey correlation model[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(7): 1119-1129.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [30] 广东省统计局. 广东统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [31] HUANG Jixia, WANG Jinfeng, BO Yanchen, et al. Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2014, 11(3): 3407-3423.
- [32] WANG Jinfeng, HU Yi. Software, data and modelling news: environmental health risk detection with GeoDetector[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 33(10): 114-115.
- [33] CHEN Jing, ZHOU Chunshan, WANG Shaojian, et al. Identifying the socioeconomic determinants of population exposure to particulate matter (PM_{2.5}) in China using geographically weighted regression modeling[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 494-503.
- [34] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 PM_{2.5} 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(4): 102-109.
ZHOU Shudong, OUYANG Weiqing, GE Jihong. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(4): 102-109.
- [35] TITOS G, LYAMANI H, DRINOVEC L, et al. Evaluation of the impact of transportation changes on air quality[J]. Atmospheric Environment, 2015, 114: 19-31.
- [36] 卢文, 王红磊, 朱彬, 等. 南京江北 2014—2016 年 PM_{2.5} 质量浓度分布特征及气象和传输影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1039-1048.
LU Wen, WANG Honglei, ZHU Bin, et al. Distribution characteristics of PM_{2.5} concentration and their impacting factors including meteorology and transmission in North Suburb of Nanjing during 2014 to 2016[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4): 1039-1048.
- [37] 肖雪, 曹云刚, 张敏. 成都市 PM_{2.5} 浓度时空变化特征及影响因素分析[J]. 地理信息世界, 2018, 25(1): 65-70.
XIAO Xue, CAO Yungang, ZHANG Min. An analysis of temporal and spatial variation of PM_{2.5} concentration and influencing factors in Chengdu[J]. Geomatics World, 2018, 25(1): 65-70.
- [38] 张云伟, 王晴茹, 陈嘉, 等. 城市街谷内 PM_{2.5} 浓度时空变化及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 2944-2949.
ZHANG Yunwei, WANG Qingru, CHEN Jia, et al. Temporal and spatial characteristics of PM_{2.5} concentration in urban street canyons and analysis on the affecting factors[J]. China Environmental Science, 2016, 36(10): 2944-2949.
- [39] HE Jianhua, DING Su, LIU Dianfeng. Exploring the spatiotemporal pattern of PM_{2.5} distribution and its determinants in Chinese cities based on a multilevel analysis approach[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 1513-1525.
- [40] 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 966-975.
ZHAN Dongsheng, ZHANG Wenzhong, YU Jianhui, et al. Analysis of influencing mechanism of residents' livability satisfaction in Beijing using geographical detector[J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 966-975.
- [41] CAO Zheng, LIU Tao, LI Xing, et al. Individual and interactive effects of socio-ecological factors on dengue fever at fine spatial scale: a geographical detector-based analysis[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(7): 795-808.
- [42] YUN Guoliang, ZUO Shudi, DAI Shaoqing, et al. Individual and interactive influences of anthropogenic and ecological factors on forest PM_{2.5} concentrations at an urban scale[J]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 521-534.
- [43] YANG Dongyang, WANG Xiaomin, XU Jianhua, et al. Quantifying the influence of natural and socioeconomic factors and their interactive impact on PM_{2.5} pollution in China[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 475-483.

(责任编辑: 刘 方)