

中国 NO_x 排放时空分布变化及其驱动因素分析*

牛铭杰^{1,2} 赵海霞^{1,2#} 孟 菲^{1,2} 顾 湘³

(1.中国科学院流域地理学重点实验室,中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008;

2.中国科学院大学,北京 100049;3.南京信息工程大学法政学院,江苏 南京 210044)

摘要 NO_x是一种主要的空气污染物。分析了中国 NO_x排放量的时空分布特征,并利用**地理探测器探析 NO_x排放量空间分异驱动因素的交互作用**。结果表明:(1)2011—2018年,中国 NO_x排放量整体下降超过 50%,呈中东部高、西部低的格局;NO_x排放强度整体降低 71.29%,呈西北高、东南低的分布格局,且东西部差异明显。(2)2017年,经济发展与人口数量、汽车保有量、环境规制,汽车保有量与人口数量、环境规制之间的交互作用对 NO_x排放量空间分异的解释力较强,且与 2011 年相比均有不同程度提高;产业结构与人口数量、经济发展、能源结构、环境规制,能源结构与人口数量、环境规制,人口数量与环境规制之间的交互作用对 NO_x排放量空间分异的解释力较弱,且与 2011 年相比均有不同程度降低。

关键词 NO_x 时空分布 交互作用 **地理探测器**

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.02.020

Spatial and temporal distribution and driving factors of NO_x emission in China NIU Mingjie^{1,2}, ZHAO Haixia^{1,2}, MENG Fei^{1,2}, GU Xiang³. (1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210008; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. School of Law & Public Affairs, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044)

Abstract: NO_x is a major air pollutant. Spatial and temporal distribution characteristics of NO_x emission in China were analyzed, and the interaction of driving factors of NO_x emission spatial differentiation was analyzed by the Geodetector. The results showed that: (1) in 2011–2018, the amount of NO_x emission in China generally decreased by more than 50%, showing a pattern of high in the central and eastern regions and low in the western regions. The overall NO_x emission intensity decreased by 71.29%, showing a distribution pattern of high in the northwest and low in the southeast, with obvious differences between the east and the west. (2) In 2017, the interaction between economic development and population, car ownership, environmental regulation, car ownership and population, environmental regulation had a strong explanatory power on the spatial differentiation of NO_x emissions, and had improved in varying degrees compared with 2011. The interaction between industrial structure and population, economic development, energy structure, environmental regulation, energy structure and population, environmental regulation, population and environmental regulation had weak explanatory power on the spatial differentiation of NO_x emissions, and had decreased to some extent compared with 2011.

Keywords: NO_x; spatial and temporal distribution; interaction effect; Geodetector

NO_x 主要指一氧化氮、二氧化氮以及其他氮氧化物,是一种主要的空气污染物,不仅会对人体健康产生威胁,而且能导致酸雨的形成、臭氧层的破坏等^[1-3]。“十二五”期间,国家出台新的节能减排目标,将 NO_x 列为新的减排指标,“脱硝”成为继“脱硫”后“十二五”期间的又一重要减排目标。《“十三五”生态环境保护规划》指出“十二五”期间全国 NO_x 排放量减少 18.6%,并将未来五年减排目标定

为减少 15%。在此背景下,对全国 NO_x 排放的研究将有助于为中国减排政策的制定实施提供更具针对性的参考。

“十二五”后,国内学者对于 NO_x 排放量的研究逐渐增多,排放因子法能间接计算 NO_x 排放量^[4]。王圣等^[5]、梁俊宁等^[6]分别计算了火电、煤化工行业的 NO_x 排放因子,为后续研究奠定了基础。同时,也有学者利用遥感监测技术分析 NO_x 浓度的变化

第一作者:牛铭杰,男,1994年生,硕士研究生,研究方向为环境经济与环境地理学。# 通讯作者。

* 国家重点研发计划项目(No.2018YFD1100101);国家自然科学基金资助项目(No.71573250、No.71704082);教育部人文社会科学研究项目(No.17YJCZH052)。

©1994–2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

特征^[7-9]。随后,学术界对 NO_x 排放量时空特征的分析逐渐深入,已有研究主要从工业^[10]、能源消费^[11]和电力行业^[12]等方面分析探讨 NO_x 的时空分布特征,或针对京津冀地区^[13]、长三角地区^[14]、13 大城市群^[15]、农村地区^[16]和中国省域范围^[17-18]等区域研究其时空变化规律。关于 NO_x 排放时空分布的驱动机理,大量研究表明,能源效率^[19]¹⁸⁵、产业结构^[20]、经济发展^[21]、人口^[22]、汽车保有量^[23]¹¹⁹⁶等均是重要的驱动因素。在研究方法上,目前学者大都采用结构分解法(SDA)^[24]、对数平均迪氏指数法(LMDI)法^[19]¹⁷⁹等定量研究其驱动机理,少数学者采用定性的方法^[23]¹¹⁹⁵从原理上对 NO_x 排放的驱动因素进行解析。可以发现,目前对 NO_x 排放量时空分布及其驱动因素的研究已较丰富,但驱动机理的研究方法较单一,且多针对单个驱动因素进行分析,没有考虑驱动因素之间的交互作用。NO_x 来源复杂,其排放和分布的驱动因素多种多样,且中国各地区具有地域差异,发展政策也不尽相同,因此有必要对各驱动因素间的交互作用进行探析。本研究利用地理探测器,分析 NO_x 排放空间分异性的驱动因素,并研究驱动因素之间的交互作用,以深入分析 NO_x 排放空间分异原因。

1 研究方法与数据处理

1.1 地理探测器

地理探测器是可用来探测空间分异性及其驱动因素的统计学方法,主要基于“如果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”的核心假设^[25]。计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \delta_i^2}{N \delta^2} \quad (1)$$

式中: q 为驱动因素 X 对 NO_x 排放量时空分异的解释力,值域为 0~1,值越大表示解释力越强; i 为驱动因素 X 的层序号; L 为驱动因素 X 的总层数; N_i 、 N 分别为驱动因素 X 的第 i 层中、全区内的单

元数; δ_i^2 、 δ^2 分别为驱动因素 X 的第 i 层中、全区内的 NO_x 排放量的方差。

本研究采用地理探测器交互探测研究 NO_x 排放时空变化的驱动机理。交互探测能识别两个驱动因素之间的交互作用,评估多驱动因素交互时是否会增加或减弱对应变量的解释力。由于 NO_x 排放的驱动因素具有综合性,本研究着重探讨驱动因素间交互作用的影响。

1.2 指标体系选取

NO_x 排放驱动因素很多,借鉴前人研究成果,综合考虑数据的可获得性,筛选人口数量、经济发展、产业结构、汽车保有量、能源结构、环境规制用以分析 NO_x 排放驱动因素,具体见表 1。

1.3 数据来源与处理

涉及数据主要为社会经济统计数据,其中 NO_x 排放量、人口、GDP、汽车保有量等数据主要来源于中国统计年鉴,个别省份 2018 年 NO_x 排放量数据来源于各省份统计年鉴或统计公报,能源消费和煤炭消费数据主要来源于各省份统计年鉴,环境治理投资数据来源于中国环境统计年鉴。由于统计数据缺失等原因,本次研究范围暂不包括西藏(只缺失能源数据)、香港特别行政区、澳门特别行政区和中国台湾地区。

2011—2018 年 GDP 数据按可比指数统一转化为以 2011 年为基期的不变价,煤炭消耗量根据能源折标准煤系数统一折算为以标准煤为单位。驱动因素采用自然间断法将其分为 5 级,其中产业结构和环境规制因各省份水平相差较小,故只分为 3 级。

2 结果与讨论

2.1 NO_x 排放时空变化

“十二五”以来,中国把大幅度降低能源消耗强度、二氧化碳排放强度和主要污染物的排放总量作为重要的约束性指标,并实施节能减排等一系列措施,特别是火电厂超低排放、新能源汽车的推广及脱硝技术的成熟等,全国节能减排成效显著,NO_x 排

表 1 NO_x 排放驱动因素指标体系
Table 1 Driving factor index system of NO_x emission

指标名称	指标解释	指标表征
人口数量	影响区域的发展水平,进而影响 NO _x 排放	年末常住人口
经济发展	对 NO _x 排放产生基础性作用,不同阶段产生不同作用	转换为以 2011 年为基期的可比值
汽车保有量	汽车已成为中国空气污染的主要来源,对 NO _x 排放具有正向推动作用	民用汽车数量
产业结构	各产业在区域经济结构中所占比例	第二产业产值占比
能源结构	煤炭燃烧是 NO _x 的重要来源,煤炭消费占比越少,NO _x 排放一般越低	煤炭消费量占总消费量的比例
环境规制	可体现政府对污染物排放与治理的重视程度	环境治理投资总额占 GDP 比例

放量呈逐年下降趋势,由 2011 年的 2 404.27 万 t 下降到 2018 年的 1 197.15 万 t(见图 1),整体降幅超过 50%。NO_x 排放强度与排放量的下降趋势基本保持一致,由 2011 年 4.61 kg/万元下降至 2018 年 1.32 kg/万元,下降了 71.29%。

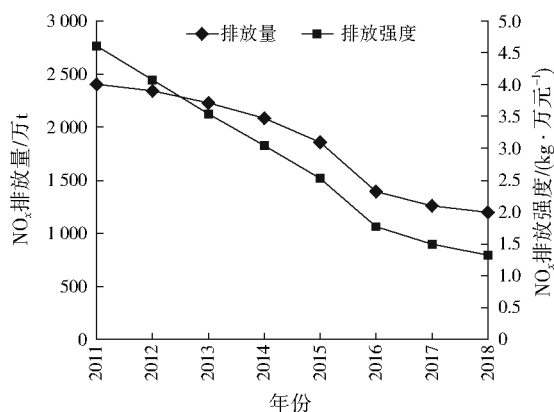


图 1 全国 NO_x 排放变化

Fig.1 The change of NO_x emission in China

尽管各省份 NO_x 排放量总体下降趋势明显,但排放量依然较高(见图 2)。河北、江苏、山东、广东、河南等人口密度、工业发展水平较高的中东部地区较高,广西、云南、宁夏、西藏等经济发展落后的西部

地区较低。如河北 2018 年 NO_x 排放量高达 96.50 万 t,由于工业发达且重化工业占比高,化石燃料的大量使用导致 NO_x 排放量居高不下。与 2011 年相比,2017 年天津、河南、内蒙古、宁夏的 NO_x 排放量下降最明显,超过 60%,上海、山西、吉林、云南、陕西、甘肃下降超过 50%。但 2017 年以来,全国 NO_x 排放量下降速率总体降低,个别省份如浙江 2018 年甚至有反弹。

相反,NO_x 排放强度呈西北高、东南低的分布格局,且东西部差异明显。山西、内蒙古、贵州、甘肃、宁夏、新疆等西部地区排放强度较高,其中排放强度最高的是宁夏,2018 年仍达 3.87 kg/万元,远高于北京市 0.46 kg/万元(见图 3)。一方面,西部地区如新疆的主导产业以石油天然气开采、石油化工为主,NO_x 排放量大;另一方面,相较北京、上海、江苏与广东等东部地区,西部地区脱硝技术仍然较落后,所以 NO_x 排放强度较高。与 2011 年相比,2017 年各省份 NO_x 排放强度有不同程度下降,除北京降幅为 49.39%外,其余地区降幅均超过 50%。

2.2 NO_x 排放变化驱动因素

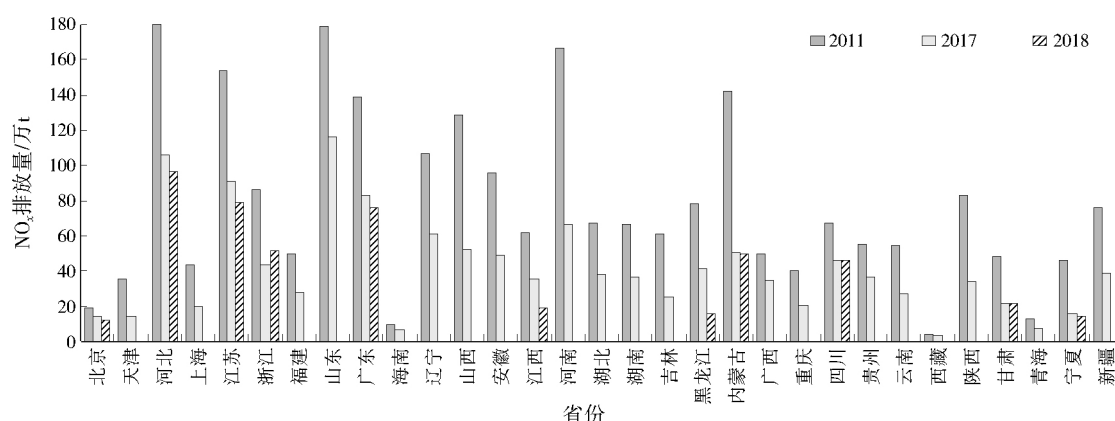


图 2 各省份 NO_x 排放变化

Fig.2 The change of NO_x emissions in each province

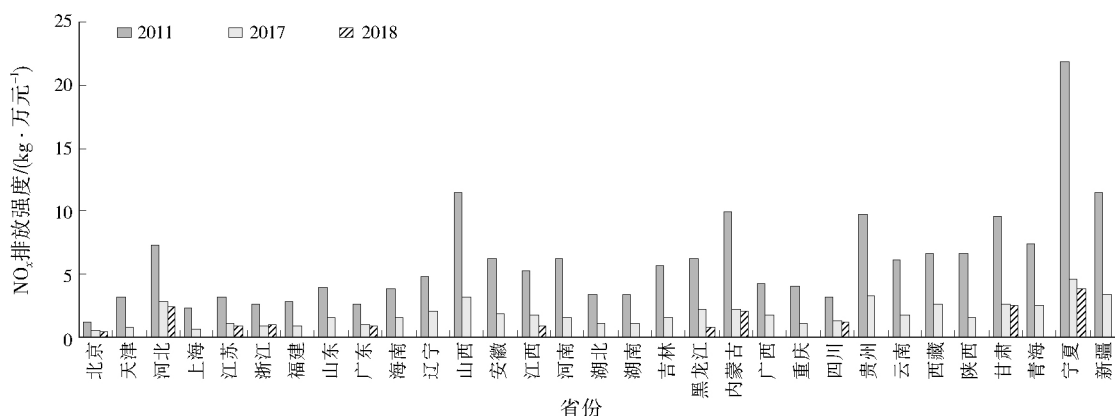


图 3 各省份 NO_x 排放强度变化

Fig.3 The change of NO_x emission intensity in each province

表 2 2011 年 NO_x 排放量驱动因素交互探测
Table 2 Interaction detection of NO_x emission driving factors in 2011

%

指标	人口数量	经济发展	产业结构	汽车保有量	能源结构	环境规制
人口数量	51.33					
经济发展	58.96	48.90				
产业结构	69.94	70.14	18.76			
汽车保有量	76.79	74.97	83.79	58.41		
能源结构	80.42	87.25	57.43	92.38	42.19	
环境规制	72.00	64.96	26.56	76.24	50.23	5.80

表 3 2017 年 NO_x 排放量驱动因素交互探测
Table 3 Interaction detection of NO_x emission driving factors in 2017

%

指标	人口数量	经济发展	产业结构	汽车保有量	能源结构	环境规制
人口数量	53.54					
经济发展	74.58	61.78				
产业结构	66.91	66.15	4.45			
汽车保有量	76.96	88.97	75.45	73.68		
能源结构	69.06	84.40	23.78	85.10	12.53	
环境规制	61.51	78.60	19.46	80.16	37.47	3.23

2011、2017 年 NO_x 排放量驱动因素交互探测结果见表 2 和表 3。2017 年,经济发展与人口数量、汽车保有量、环境规制,汽车保有量与人口数量、环境规制之间的交互作用对 NO_x 排放量空间分异的解释力较强,均在 74% 以上,且与 2011 年相比均有不同程度提高。中国目前仍处于经济快速增长的时代,经济发展仍是 NO_x 排放的重要驱动力,2017 年,全国各省份 NO_x 排放量与 GDP 之间显示出明显的正相关关系(见图 4)。另一方面,汽车保有量呈快速增长态势,且汽车尾气脱硝技术还不成熟,2017 年全国机动车 NO_x 排放量为 574.30 万 t,约占 NO_x 总排放量的 45.6%。同时,虽然中国 2009 年开始大力推行新能源汽车,且新能源商用车(如公交车)已取得较大进展,但民用汽车领域进度仍然缓慢,因此汽车保有量对 NO_x 排放量空间分异的解释力有所提高。此外,汽车保有量与人口数量、经济发展直接相关,环境规制也受经济发展状况及发展理

念的影响,环渤海地区、长三角地区及珠三角地区作为中国发达地区,经济实力、人口数量均居前列,汽车保有量相应较多,环境规制强度也相应较高,因此两两交互作用的解释力度较强。

2017 年,产业结构与人口数量、经济发展、能源结构、环境规制,能源结构与人口数量、环境规制,人口数量与环境规制之间的交互作用对 NO_x 排放量空间分异的解释力较弱,且与 2011 年相比均有不同程度降低。火电厂脱硝机组投运容量大幅增加,由 2011 年 0.97 亿 kW 增加至 2017 年的 9.20 亿 kW,使煤炭燃烧对 NO_x 排放的贡献度降低。同时,《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 18352.6—2016)相比上一代标准更严格,其实施将促使 NO_x 排放量减少 77%,也遏制了汽车 NO_x 排放量的增加。但也应注意到,2017 年中国能源结构中煤炭消费占比达 67.2%,远高于美国、日本的 30%,中国整体煤炭消费偏高的局面并未完全打破,2017 年能源结构与其他指标交互作用虽有降低但解释力仍能达到 60%~85%。此外,中国第二产业占比整体高于 40%,与欧美发达国家约 20%的比例差距较大,因此产业结构与人口数量、经济发展和汽车保有量的交互作用解释力仍然达 60% 以上。

此外,根据部分地区已公开的最新数据,分析 2018 年北京、河北、内蒙古、黑龙江、江苏、浙江、江西、广东、四川、甘肃与宁夏的 NO_x 排放量的驱动因素。经济发展与汽车保有量依然是 NO_x 排放量空间分异最主要的驱动因素,解释力分别达 74.02%、72.24%,与其他驱动因素交互作用也均在 75% 以

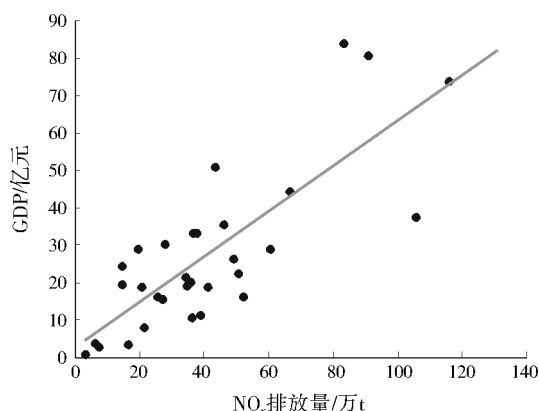


图 4 2017 年 GDP 与 NO_x 排放量

Fig.4 GDP and NO_x emission in 2017

上,因此加速推广新能源汽车与新一代汽车尾气排放标准的实施,并继续改善中国能源消费结构,增加清洁能源消费占比,立足生态文明、发展绿色经济是今后中国 NO_x 减排的主导方向。

3 结 论

(1) 2011—2018 年,中国 NO_x 排放量整体下降超过 50%。“十二五”期间脱硝政策的实施效果虽较明显,但整体排放量仍然较大,呈中东部高、西部低的格局,其中河北、江苏、山东、广东、河南等人口密度、工业发展水平较高的东部和中部地区 NO_x 排放量较高,广西、云南、宁夏、西藏等经济发展落后的西部地区 NO_x 排放量较低。

(2) 2011—2018 年,中国 NO_x 排放强度整体降低 71.29%,呈西北高、东南低的分布格局,且东西部差异明显,其中排放强度较高的区域主要分布在脱硝技术落后的山西、内蒙古、贵州、甘肃、宁夏、新疆等西部地区。北京、上海、江苏、广东等东部地区工业生产技术与脱硝技术较先进,排放强度较低。

(3) 2017 年,经济发展与人口数量、汽车保有量、环境规制,汽车保有量与人口数量、环境规制之间的交互作用对 NO_x 排放量空间分异的解释力较强,且与 2011 年相比均有不同程度提高;产业结构与人口数量、经济发展、能源结构、环境规制,能源结构与人口数量、环境规制,人口数量与环境规制之间的交互作用对 NO_x 排放量空间分异的解释力较弱,且与 2011 年相比均有不同程度降低。

参考文献:

- [1] 王丽琼.基于 LMDI-SMC 中国 NO_x 减排绩效动态演化规律研究[J].生态环境学报,2019,28(1):90-96.
- [2] 肖娜,张健恺,田文寿,等.东亚地区 NO_x 排放对北半球 UTLS 区域臭氧和温度的影响[J].高原气象,2020,39(2):402-415.
- [3] 梁银双,刘黎明.京津冀地区 PM_{2.5} 污染特征的研究——基于函数型数据分析的视角[J].运筹学学报,2018,22(2):105-114.
- [4] 耿静,任丙南,吕永龙,等.海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价[J].环境科学,2016,37(6):2401-2408.
- [5] 王圣,王慧敏,朱法华,等.我国火电行业 NO_x 排放因子的样本容量确定方法[J].长江流域资源与环境,2012,21(9):1067-1072.
- [6] 梁俊宁,陈洁,卢立栋,等.煤化工行业氮氧化物排放系数研究[J].中国环境科学,2014,34(4):862-868.
- [7] 周春艳,王桥,厉青,等.近 10 年长江三角洲对流层 NO₂ 柱浓度时空变化及影响因素[J].中国环境科学,2016,36(7):1921-1930.
- [8] 王跃启,江洪,张秀英,等.基于 OMI 卫星遥感数据的中国对流层 NO₂ 时空分布[J].环境科学研究,2009,24(8):932-937.
- [9] 陶金花,王子峰,韩冬,等.华北地区秸秆焚烧前后的 NO₂ 卫星遥感监测分析[J].中国环境科学,2009,29(10):1016-1020.
- [10] 刁贝娣,曾克峰,苏攀达,等.中国工业氮氧化物排放的时空分布特征及驱动因素分析[J].资源科学,2016,38(9):1768-1779.
- [11] 杨春玉,夏梦凡,董战峰,等.长三角地区能源消费氮氧化物排放的影响因素分解与预测研究[J].生态经济,2018,34(12):158-165.
- [12] 杨春玉,林潇,董战峰,等.中国电力行业氮氧化物排放的时空分布特征与类群分析[J].生态环境学报,2018,27(9):1688-1697.
- [13] 郑晓霞,李令军,赵文吉,等.京津冀地区大气 NO₂ 污染特征研究[J].生态环境学报,2014,23(12):1938-1945.
- [14] 张军,王圣.我国长江流域中三角区域大气污染物排放特征研究[J].中国环境管理,2017,9(3):83-88.
- [15] 林永生.中国大气污染防治重点区污染物排放的驱动因素研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(增刊 2):65-68.
- [16] 虞江萍,崔萍,王五一.我国农村生活能源中 SO₂、NO_x 及 TSP 的排放量估算[J].地理研究,2008,27(3):547-555.
- [17] 王丽琼.基于探索性空间分析的中国氮氧化物排放强度研究[J].生态环境学报,2013,22(3):494-497.
- [18] 李新艳,李恒鹏.中国大气 NH₃ 和 NO_x 排放的时空分布特征[J].中国环境科学,2012,32(1):37-42.
- [19] DING L, LIU C, CHEN K L, et al. Atmospheric pollution reduction effect and regional predicament: an empirical analysis based on the Chinese provincial NO_x emissions[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 196.
- [20] 湛社霞.粤港澳大湾区常规大气污染物变化趋势与影响因素研究[D].广州:中国科学院大学,2018.
- [21] 武娟妮,程亮,逯元堂,等.中国工业大气污染物排放的影响因素研究[J].环境污染与防治,2018,40(11):1321-1326.
- [22] WANG J F, QIU Y, HE S T, et al. Investigating the driving forces of NO_x generation from energy consumption in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 836-846.
- [23] 周春艳,厉青,张丽娟,等.遥感监测 2005~2015 年中国 NO₂ 时空特征及分析影响因素[J].遥感技术与应用,2016,31(6).
- [24] 施亚岚,崔胜辉,许肃,等.中国产业能源消费氮氧化物排放影响因素分析[J].环境科学与技术,2014,37(增刊 1):355-362.
- [25] 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.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2019-12-08)