

城市化对中国地级市 NO₂ 污染的影响研究*

王媛媛^{1,2,3} 韩 骥² 过仲阳³

(1.山西财经大学资源环境学院,地表过程与生态环境研究所,山西 太原 030006;

2.华东师范大学生态与环境科学学院,上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室,上海 200241;

3.华东师范大学地理科学学院,地理信息科学教育部重点实验室,上海 200241)

摘要 近年来随着中国城市化进程的加快,社会经济的发展深刻影响着城市的空气质量。利用地表空气质量监测数据、城市形态数据以及人口数据等,研究中国 2018 年 NO₂ 浓度的时空分布特征,构建了地级市尺度下城市形态(城市面积、斑块数量、形状指数、分维数)、人口密度与 NO₂ 之间的地理加权回归(GWR)模型,探索城市形态、人口密度对 NO₂ 浓度分布的影响。结果表明:(1)2018 年中国的京津冀、中原、山东半岛和长三角等城市群 NO₂ 污染最突出;(2)GWR 模型的结果表明,城市形态、人口密度与 NO₂ 之间呈显著正相关关系;(3)城市形态对 NO₂ 浓度分布的影响有着较大的空间差异。应构建集约高效、紧凑型的城市形态,并通过提高植被覆盖度以及调节城市形态的结构与配置,从而降低能源消耗以及 NO₂ 浓度。

关键词 大气污染 NO₂ 城市形态 人口密度 城市化

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.10.003

Influence of urbanization on NO₂ pollution in prefecture-level city in China WANG Yuanyuan^{1,2,3}, HAN Ji², GUO Zhongyang³. (1. Institute of Surface Processes and Ecological Environment, School of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan Shanxi 030006; 2. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241; 3. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241)

Abstract: In recent years, with the acceleration of urbanization in China, the development of social and economic has a profound impact on urban air quality. By using surface air quality data, urban form data and population data, the spatial and temporal characteristic of NO₂ concentration in China in 2018 was investigated. Prefecture-level geographically weighted regression (GWR) model of NO₂ concentration on urban form (urban area, number of patches, shape index, division) and population density were used to explore the influence of urban form, population density on distribution of NO₂ concentrations. The results indicated that: (1) the higher NO₂ region was Beijing-Tian-Hebei, Central Plain, Shandong Peninsula and Yangtze River Delta urban agglomerations in China during 2018. (2) GWR model showed that there was a significant positive correlation between urban form and NO₂, as well as population density and NO₂. (3) There were large spatial differences between the distribution of NO₂ concentration and urban form. An intensive, efficient and compact urban form should be constructed. Increasing vegetation coverage and adjusting the structure and configuration of urban form could reduce energy consumption and NO₂ concentrations.

Keywords: air pollution; NO₂; urban form; population density; urbanization

近年来随着中国城市化进程的加快,机动车快速增长,导致城市中 NO₂ 污染显著增加,尤其是大城市^[1-2]。NO₂ 污染在大气污染中扮演重要角色,NO₂ 不仅是主要的一次污染物,还可以在光化学反应条件下转化成多种二次污染物如 O₃ 和 PM_{2.5} 等^[3-4]。NO₂ 对人体呼吸器官黏膜有强烈的刺激作用,对肺的危害作用明显高于 SO₂ 和 NO,严重时导致肺气肿,甚至死亡^[5]。

NO_x 的产生和排放主要来自能源消耗,如电厂、机动车尾气,并且与人均国内生产总值(GDP)之间呈显著正相关关系^[6]。NO₂ 一方面来自火力发电厂和其他工业的燃料燃烧,贡献率在 60% 左右,而另外 40% 则主要来自机动车尾气排放^[7]。7:00—9:00 和 19:00—21:00 是 NO₂ 日变化的高峰时段,10—12 月是全年 NO₂ 浓度较高的月份。大气污染物(除 O₃ 外)的峰值基本出现在冬季,尤其是中国的

第一作者:王媛媛,女,1985 年生,博士,讲师,主要从事社会经济发展对城市生态环境的影响研究。

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(No.31901151);国家重点研发计划项目(No.2017YFC0210000)。

©1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
• 1200 •

北方地区,这与中国北方冬季燃煤取暖密切相关,生物燃料的燃烧也可能导致丰收季节(10月)的 NO₂、PM_{2.5}和 PM₁₀处于高浓度水平^[8]。

以往的研究探讨了 NO₂污染和城市人口规模、城市形态之间关系^[9]。然而,由于城市经济发展的差异,能源的生产和排放强度以及利用效率不同,发达城市和不发达城市、大城市和中小城市在人均大气污染物排放量上存在很大差异^[10]。城市形态对城市空气质量具有重要的影响,城市规模、形状和聚集度等特征深刻影响着城市的空气质量,并且随着地理位置的不同也存在较大的差异^[11-12]。通常紧凑型城市的人均大气污染物浓度相对较低,建成区斑块的连接度越高,城市人均 NO₂浓度越低^[13]。

由于我国地域广,不同地区土地覆盖、经济发展等因素存在较大差异,城市空气质量也呈现明显的空间差异。本研究探讨了中国地级市 NO₂污染与城市形态之间的空间变化关系,利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)地表覆盖、地面空气质量观测数据,运用地理加权回归(GWR)模型分析了城市形态、人口密度与 NO₂浓度之间的空间联系。这项研究能够为更好地了解城市形态与大气污染的关系提供经验,并为改善空气质量、治理大气污染的相关工作提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 概况

黑河—腾冲线通常用来划分中国东西部地区^[14],东部地区经济发达、人口稠密,西部地区经济落后、人口稀少^[15]。

自1979年中国实施改革开放以来,中国城市人口比例从1979年的18.96%(1.85亿)上升至2017年的57.35%(7.93亿),在这期间有6亿多人口从农村移居到城市。能源消费总量从1979年的6.03万t(以标准煤计)上升至2017年的43.58万t,增长了6倍以上。建成区面积从1979年的10 791.3 km²上升到2017年的54 331.5 km²,扩张了4倍以上。

1.2 数据

1.2.1 地表空气质量监测数据

NO₂浓度数据来自全国空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)的逐时监测数据,研究时段为2018年1月1日至12月31日,包括中国大陆地区337个地级市共1 496个环境空气质量监测站的 NO₂浓度数据。

1.2.2 城市形态数据

土地利用/土地覆盖(LUCC)数据(<http://landsweb.nascom.nasa.gov/>)来自MODIS的Land Cover产品,空间分辨率为500 m,时间为2017年。该数据包含5种土地覆盖分类体系,本研究采用全球地表分类方案,选择建成区来计算城市形态特征。

1.2.3 人口数据

中国地级市城市人口数据来源于2017年度的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》以及各省市统计年鉴。

1.3 方法

1.3.1 城市形态

基于建成区面积,城市形态考虑了城市面积(以斑块面积总和计)、斑块数量、形状指数和分维数4个指标,计算方法参照文献^[11]。城市面积和斑块数量是其他景观指标的基础;形状指数用来反映城市形状的复杂程度,形状指数越大说明形状越不规则;分维数用来度量斑块的物理连通性,表征斑块之间的聚集和相邻程度。

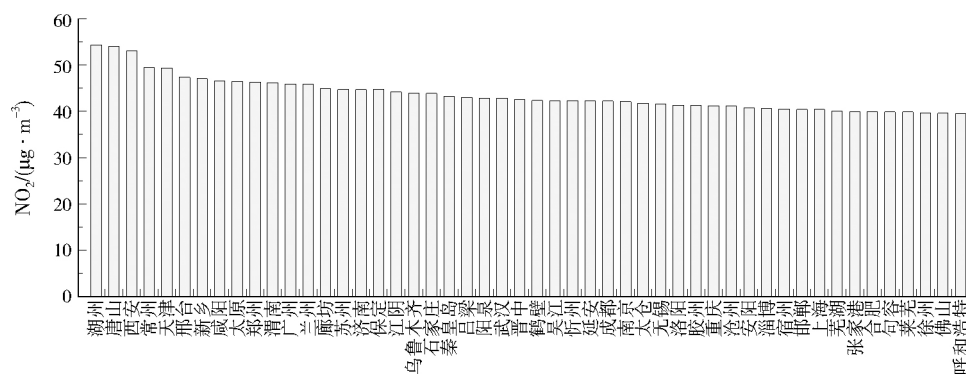
1.3.2 GWR模型

建立GWR模型前,首先需进行全局自相关性和局部自相关性分析;接下来,对数据建立普通最小二乘法(OLS)模型,来检验模型的全局拟合程度;然后再进行GWR模型的构建。不同于普通的多元回归模型,GWR模型是面向局部关系的建模,添加了地理位置参数,因此能较好地解释空间异质性及空间非平稳性下变量间的空间关系。模型的自变量系数随空间位置的变化而变化。权重函数使用高斯距离衰减加权来计算。使用拟合优度(R^2)和赤池信息准则(AIC)来检验模型的拟合性能^[16]。

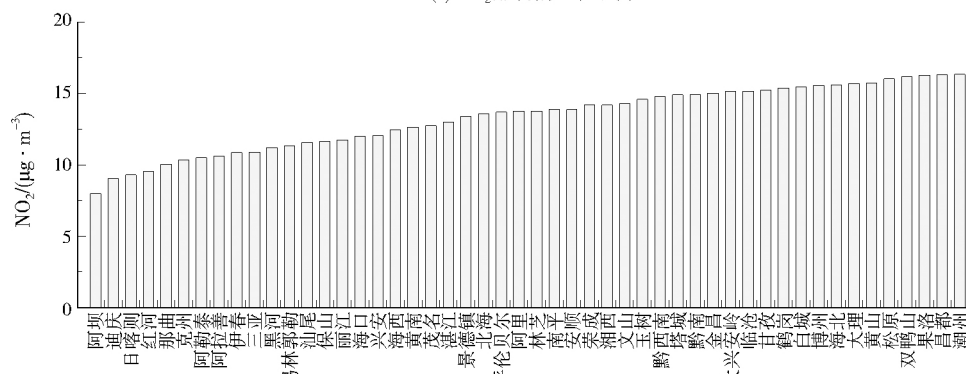
2 结果与讨论

2.1 中国 NO₂浓度的时空分布特征

中国2018年平均 NO₂质量浓度为28.42 μg/m³,且具有较大的时空分布差异。单个城市中,NO₂质量浓度最高为54.09 μg/m³(浙江湖州),最低为7.98 μg/m³(四川阿坝)。NO₂年均值高于《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级限值(40 μg/m³)的城市超过40个,约占12%。如图1所示,NO₂浓度最高的50个城市多分布在人口稠密、经济发达的中东部地区;而NO₂浓度最低的50个城市大多人口稀少。图2为月平均 NO₂浓度变化趋势,NO₂浓度通常在12月最高,平均值为43.30 μg/m³。



(a) NO₂排名前50位城市



(b) NO₂排名后50位城市

图 1 2018 年地级市年平均 NO₂ 质量浓度排序

Fig.1 Ranking of annual average NO₂ concentration in prefecture-level cities in 2018

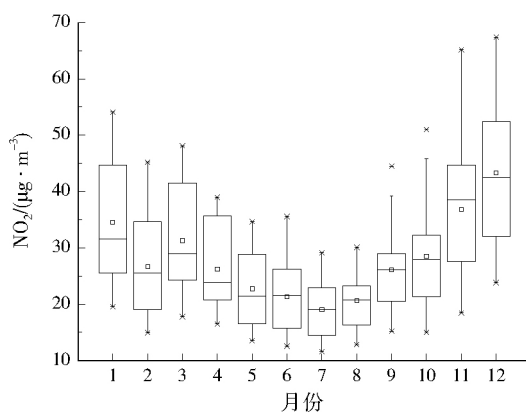


图 2 2018 年月平均 NO₂ 质量浓度变化趋势

Fig.2 Monthly NO₂ concentrations level in 2018

7 月最低,平均值为 19.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

城市群中,京津冀的 NO₂ 质量浓度最高,平均值为 42.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,北部湾最低,平均值为 17.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,京津冀地区是北部湾地区的近 2.5 倍。京津冀 NO₂ 年均值超过 GB 3095—2012 二级限值,其次是长三角、珠三角、山东半岛、中原和晋中,NO₂ 年均值为 30~40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其余城市群 NO₂ 年均值低于 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

冬季 NO₂ 浓度的主要来源为北方城市燃煤取

暖,丰收季节的秸秆燃烧也贡献了一部分 NO₂。机动车尾气排放逐渐成为 NO₂ 不可忽视的一种来源,大城市机动车保有量剧增,NO₂ 浓度也普遍高于其他城市。城市经济发展较好的地区,NO₂ 浓度也相对较高,城市人均 GDP 与城市 NO₂ 浓度呈显著正相关关系^[17]。

2.2 中国地级市的城市形态与人口密度的分布特征

图 3 展示了各指标归一化后排名前 20 的城市。城市面积东部大于西部,斑块数量东部多于西部,可能是由于东部平原较多;形状指数东部高于西部,说明东部城市形状更复杂;分维数东部明显高于西部;人口密度东部高于西部,以中部平原城市群最高。随着城市人口密度升高,城市面积扩张,NO₂ 浓度增长,而经济发达的大城市群的 NO₂ 浓度高于中小城市群。

2.3 中国城市形态指标与 NO₂ 浓度的空间回归模型结果

对全国地级市 NO₂ 浓度进行全局自相关性分析,结果显示数据存在显著的空间自相关性;局部自相关性分析发现,热点区(高-高)主要集中在京津

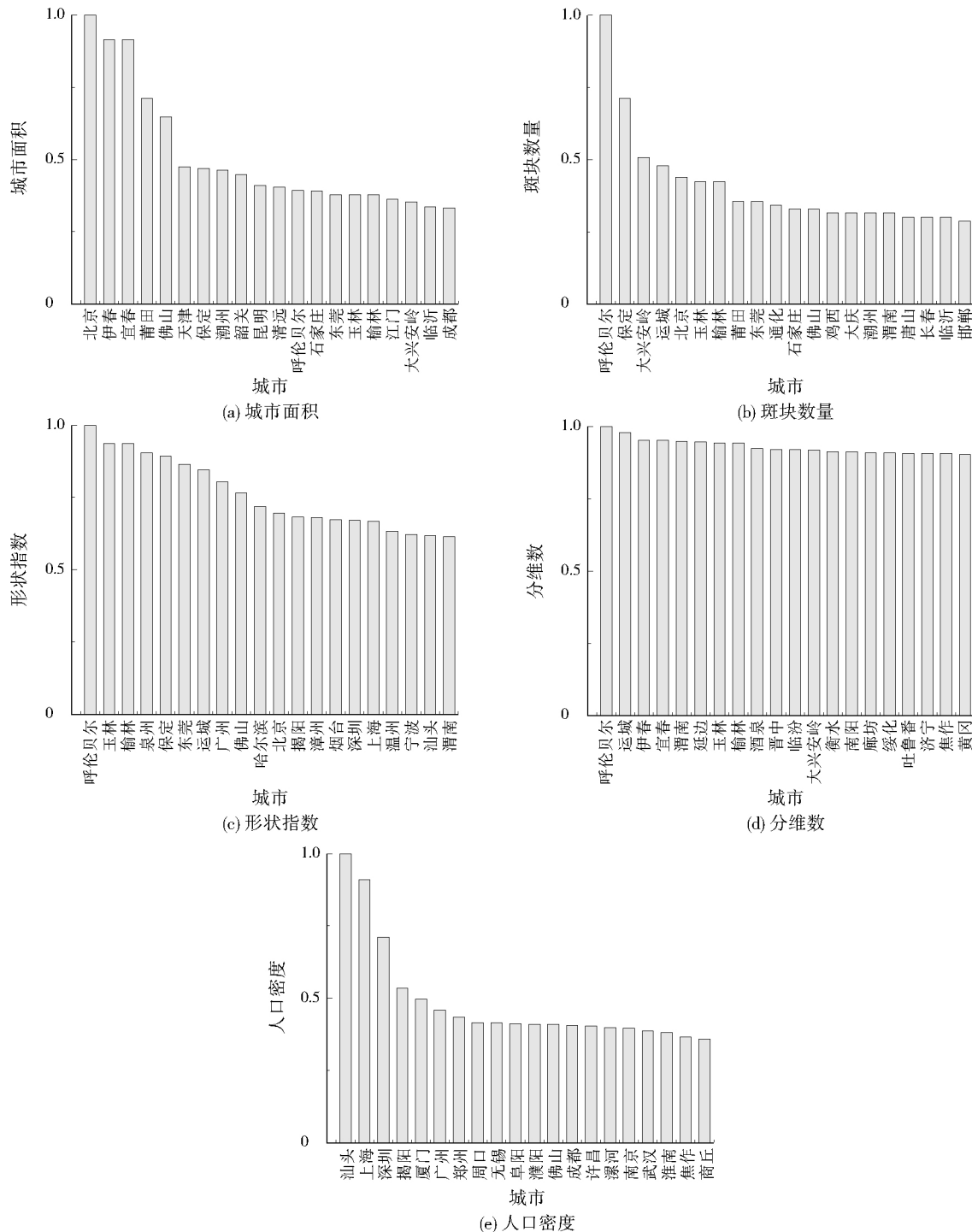


图3 城市形态和人口密度分布

Fig.3 Maps urban form and population density distribution

冀、山东半岛、中原和长三角城市群,而冷点区(低-低)位于滇中、北部湾和黔中城市群。空间自相关性分析表明,中国城市的 NO₂ 浓度表现出全局自相关和局部自相关,表明数据具有明显的空间非平稳性,与张淑平等^[18]的研究结果一致。

对 NO₂ 浓度与城市形态、人口密度之间构建的 GWR 模型结果表明,模型的截距为 19.954,解释变

量系数从最低的 0.129 到最高的 0.302(见表 1)。VIF 可用于检验解释变量是否冗余,当 $VIF > 7.5$ 时,该解释变量为冗余因子。表 1 中解释变量 VIF 均低于 7.5,表明所有解释变量为非冗余因子。可见,城市 NO₂ 浓度与城市形态、人口密度之间存在显著的正相关性。

GWR 模型的截距能表征 NO₂ 的基本水平。截

表 1 解释变量系数和截距

Table 1 Coefficients of intercept and explanatory variables

项目	数值	方差膨胀因子(VIF)
截距	19.954	
人口密度系数	0.135	1.316
城市面积系数	0.254	1.873
斑块数量系数	0.180	2.746
形状指数系数	0.302	3.187
分维数系数	0.129	1.655

距从我国东北到西南依次递减,表明在相同的城市化因素下,西南部的 NO_2 浓度水平低于东北部城市。中国城市的 NO_2 浓度与城市形态指标之间显示出明显的空间变异性。从模型系数的空间分布可以看出,城市形态指标在中部和西部地区具有较高的系数;人口密度的系数除少数西部城市外,中部城市高于其他城市。总体上, NO_2 浓度和城市形态之间的关系是空间非平稳的。

如表 2 所示,OLS 模型的 R^2 低于 GWR 模型,而 AIC 值高于 GWR 模型,表明 GWR 模型的拟合性能更好。西北和东北地区具有较高的 R^2 ,表明西北和东北地区的 GWR 模型能更好地捕捉到 NO_2 浓度和城市形态之间的关系。相比之下,东部和南部地区的 NO_2 可能受到其他因素的影响,如植被覆盖度。

表 2 OLS 和 GWR 模型系数

Table 2 Coefficients of OLS and GWR models

模型	R^2	调整后 R^2	AIC 值
OLS	0.23	0.22	2 814.33
GWR	0.58	0.57	2 754.32

城市形态的结构和配置能够影响出行方式、出行距离和出行频率,从而影响机动车使用化石燃料所产生的 NO_2 排放量。紧凑型、人口密集的城市能够减少交通污染物排放,但是城市布局过于密集却会导致污染物稀释和扩散的速度降低^[19-20]。因此,应构建集约高效、紧凑型的城市形态,并通过提高植被覆盖度以及调节城市形态的结构与配置,从而降低能源消耗以及 NO_2 浓度。

3 结 论

(1) 全国 337 个地级市的 NO_2 浓度表现出明显的时空异质性,其中约 12% 的城市年平均 NO_2 浓度超过了 GB 3095—2012 二级限值。 NO_2 浓度高值区域位于京津冀、长三角、珠三角、中原和山东半岛等城市群。 NO_2 浓度在 12 月最高,7 月最低。

(2) 地级市 NO_2 浓度存在明显的自相关性,热点区位于京津冀、中原、山东半岛、长三角城市群,冷

点区位于滇中、北部湾和黔中城市群。地级市 NO_2 浓度表现出全局空间自相关和局部空间自相关。

(3) GWR 模型结果表明,城市 NO_2 浓度与城市形态、人口密度之间存在显著的正相关性,且 NO_2 浓度和城市形态之间的关系是空间非平稳的。

参考文献:

- [1] SHENG N, TANG U W. The first official city ranking by air quality in China - a review and analysis[J]. Cities, 2016, 51: 139-149.
- [2] HAN L, ZHOU W, LI W, et al. Urbanization strategy and environmental changes: an insight with relationship between population change and fine particulate pollution[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 789-799.
- [3] LIU C, HENDERSON B H, WANG D, et al. A land use regression application into assessing spatial variation of intra-urban fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and nitrogen dioxide (NO_2) concentrations in City of Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 607-615.
- [4] AN J, SHI Y, WANG J, et al. Temporal variations of O_3 and NO_x in the urban background atmosphere of Nanjing, East China[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 71(2): 224-234.
- [5] LAMSAL L N, MARTIN R V, PARRISH D D, et al. Scaling relationship for NO_2 pollution and urban population size: a satellite perspective[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(14): 7855-7861.
- [6] WANG Y, DU H, XU Y, et al. Temporal and spatial variation relationship and influence factors on surface urban heat island and ozone pollution in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 921-933.
- [7] MEAD R W, BRAJER V. Rise of the automobiles: the costs of increased NO_2 pollution in China's changing urban environment[J]. Journal of Contemporary China, 2006, 47(15): 349-367.
- [8] SONG C, WU L, XIE Y, et al. Air pollution in China: status and spatiotemporal variations[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 334-347.
- [9] BECHLE M J, MILLET D B, MARSHALL J D. Does urban form affect urban NO_2 ? Satellite-based evidence for more than 1 200 cities[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(21): 12707-12716.
- [10] LIN X, WANG D. Spatiotemporal evolution of urban air quality and socioeconomic driving forces in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(11): 1533-1549.
- [11] MCCARTY J, KAZA N. Urban form and air quality in the United States[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 139: 168-179.
- [12] SHE Q, PENG X, XU Q, et al. Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 75: 297-306.
- [13] CLARK L P, MILLET D B, MARSHALL J D. Air quality and urban form in U.S. urban areas: evidence from regulatory monitors[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(16): 7028-7035.

(下转第 1210 页)

- Biochemistry, 2015, 87: 90-96.
- [9] BIEDERMAN L A, BOUTTON T W, WHISENANT S G. Nematode community development early in ecological restoration: the role of organic amendments[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(9): 2366-2374.
 - [10] SANTINI T C, KERR J L, WARREN L A. Microbially-driven strategies for bioremediation of bauxite residue[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 293: 131-157.
 - [11] ALPEOVITCH N, SHAINBERG I, KEREN R. Specific effect of magnesium on the hydraulic conductivity of sodic soils[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 32(4): 543-554.
 - [12] COURTNEY R, KIRWAN L. Gypsum amendment of alkaline bauxite residue - plant available aluminium and implications for grassland restoration[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 279-282.
 - [13] WU Y, LI Y, ZHENG C, et al. Organic amendment application influence soil organism abundance in saline alkali soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 54: 32-40.
 - [14] ZHU F, LIAO J, XUE S, et al. Evaluation of aggregate microstructures following natural regeneration in bauxite residue as characterized by synchrotron-based X-ray micro-computed tomography[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 155-163.
 - [15] 王日鑫, 李成学. 绿色环保型腐植酸磷肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
 - [16] 牛育华, 李媛, 龙学莉, 等. 腐植酸肥料在农业生产中的应用及研究进展[J]. 化肥工业, 2016, 43(5): 9-12, 46.
 - [17] BANNING N C, SAWADA Y, PHILLIPS I R, et al. Amendment of bauxite residue sand can alleviate constraints to plant establishment and nutrient cycling capacity in a water-limited environment[J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 179-187.
 - [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
 - [19] KLUTE A, FRITSCH DANIELSON R, SUTHERLAND P, et al. Methods of soil analysis: Part 1, physical and mineralogical methods[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(2): 413-423.
 - [20] ZHU F, HOU J T, XUE S G, et al. Vermicompost and gypsum amendments improve aggregate formation in bauxite residue[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 2109-2120.
 - [21] YILMAZ E. Assessment of the role of agricultural wastes in aggregate formation and their stability[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 144(21): 93-100.
 - [22] SOCHAN A, BIEGANOWSKI A, RYŻAK M, et al. Comparison of soil texture determined by two dispersion units of Mastersizer 2000[J]. International Agrophysics, 2012, 26: 99-102.
 - [23] BERHARDT R W, FOSTER D R, MOTZKIN G, et al. Conservation of changing landscapes: vegetation and land-use history of Cape Cod National Seashore[J]. Ecological Applications, 2003, 13(1): 68-84.
 - [24] COURTNEY R G, MULLEN G J. Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types[J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 2913-2918.
 - [25] AL MAJOU H, BRU A, DUVAL O, et al. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and type of horizon[J]. Soil Use and Management, 2008, 24: 383-391.
 - [26] HAYNES R, ZHOU Y F. Natural ripening with subsequent additions of gypsum and organic matter is key to successful bauxite residue revegetation[J]. Journal of Central South University, 2019, 26: 289-303.
 - [27] JONES B E H, HAYNES R J, PHILLIPS I R. Addition of an organic amendment and/or residue mud to bauxite residue sand in order to improve its properties as a growth medium[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 95(1): 29-38.
 - [28] COURTNEY R, HARRINGTON T, BYRNE K A. Indicators of soil formation in restored bauxite residues[J]. Ecological Engineering, 2013, 58: 63-68.
 - [29] MONREAL C M, SCHNITZER M, SCHULTEN H R, et al. Soil organic structures in macro and microaggregates of a cultivated Brown Chernozem[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27(6): 845-853.
 - [30] ZHENG F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 420-427.
 - [31] KONG X, LI M, XUE S, et al. Acid transformation of bauxite residue: conversion of its alkaline characteristics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 324: 382-390.
 - [32] SMITH R, TONGWAY D, TIGHE M, et al. When does organic carbon induce aggregate stability in vertosols? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 201: 92-100.
 - [33] PICCOLO A, MBAGWU J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Plant and Soil, 1990, 123: 27-37.
 - [34] BURKE I T, PEACOCK C L, LOCKWOOD C L, et al. Behavior of aluminum, arsenic, and vanadium during the neutralization of red mud leachate by HCl, gypsum, or seawater[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(12): 6527-6535.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2019-10-22)

(上接第 1204 页)

- [14] LIU C, WANG T, GUO Q. Factors aggregating ability and the regional differences among China's urban agglomerations[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 4179.
- [15] GAO X, WANG X, ZHU B. The distribution of Chinese minority populations and its change based on the study of the Hu Huanyong line[J]. International Journal of Anthropology and Ethnology, 2017, 1: 2.
- [16] FANG C, LIU H, LI G, et al. Estimating the impact of urbanization on air quality in China using spatial regression models[J]. Sustainability, 2015, 7(11): 15570-15592.
- [17] 汪发元, 郑军, 汪宗顺. 城市化水平、工业化水平对空气质量的影响分析——基于湖北省 16 城市 2005~2017 年数据的时空模型[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1411-1421.
- [18] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 城市规模对大气污染物 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5049-5057.
- [19] BECHLE M J, MILLET D B, MARSHALL J D. Effects of income and urban form on urban NO_2 : global evidence from satellites[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(11): 4914-4919.
- [20] 朴珠希. 紧凑城市形态对交通能耗及大气污染的影响实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2020-03-31)