Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

双奖期刊

2019
Vol.40 No.4
第40卷 第4期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 40 卷　第 4 期
2019 年 4 月 15 日

目　次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 …… 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶污染特征…… 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩尧, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 $PM_{2.5}$ 化学组分特征与来源解析 …… 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逄妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 …… 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评价 …… 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 …… 金同俊, 祁建华, 郗梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 …… 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析…… 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015～2017 年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 …… 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 …… 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 …… 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征…… 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O_3 分析 …… 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长秦(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 …… 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市扬尘 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 …… 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用 …… 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机尾气排放特征分析 …… 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 …… 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 …… 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用…… 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析 …… 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应：以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 …… 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 …… 刘成, 孙翠竹, 张弢, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 …… 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析：以盐龙湖春季为例 …… 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系：基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) …… 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 …… 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 …… 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征…… 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 …… 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险 …… 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 …… 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型嗅味…… 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(Ⅵ) …… 闫增元, 习海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 …… 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化镧改性介孔稻壳生物炭除磷性能…… 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 …… 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生 …… 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 …… 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 …… 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试 …… 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 …… 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉颖(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能 …… 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学…… 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔珅, 郦丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响 …… 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落…… 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 …… 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布 …… 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价…… 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N_2O)浓度特征及影响因素 …… 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH_4 吸收规律 …… 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 …… 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 …… 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 …… 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 …… 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与嗅味治理技术研究与发展 … 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)　《环境科学》征稿简则(1787)　信息(1663, 1796, 1833)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第 40 卷 第 4 期 2019 年 4 月
Vol. 40, No. 4 Apr., 2019

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析

孙爽[1], 李令军[2*], 赵文吉[1], 齐梦溪[1], 田欣[1], 李珊珊[3]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 3. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 基于 2017 年逐时空气质量监测数据、归一化植被指数(NDVI) 16 d 合成数据以及社会经济数据, 对京津冀大气污染特征进行了系统分析, 并利用线性回归、地理加权回归模型等探讨了其变化规律与 NDVI 的关系, 及其受社会经济因素的影响. 结果表明:①京津冀地区大气污染整体表现为南高北低、平原高山区低的分布特征, 由北向南递次升高, 大气污染呈现出显著的空间异质性; ②从季节变化看, 呈现冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的总体规律, 京津冀地区大气污染呈现出显著的时间异质性; ③SO_2、NO_2、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}等污染物浓度均与 NDVI 值呈负相关关系; 在气候、地形等自然条件较为一致的前提下, NDVI 值越低人类活动干扰越明显、产业经济布局越集中, 进而污染排放量越大, 对空气质量产生显著负面影响; ④NDVI 指数一定程度上反映了土地利用、人口分布以及产业布局状况, 而这些因素直接或间接决定着大气污染排放水平, 进而能够指示区域的污染分布特征; ⑤地理加权回归模型(GWR)计算结果表明, 经济发展水平越高的地区 NDVI 与社会经济因子、$PM_{2.5}$等污染物浓度相关性越好. NDVI 的分布可以大体反映社会经济发展水平. 对 $PM_{2.5}$的分布也有一定的指示作用.

关键词:大气污染; 空气质量指数(AQI); 归一化植被指数; 相关关系; 地理加权回归模型(GWR)

中图分类号: X171; X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)04-1585-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201809178

Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei

SUN Shuang[1], LI Ling-jun[2*], ZHAO Wen-ji[1], QI Meng-xi[1], TIAN Xin[1], LI Shan-shan[3]

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 3. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on 2017 hourly air quality monitoring data, NDVI 16 d synthetic data, and socio-economic data, the air pollution characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei were systematically analyzed, and its variation, normalized vegetation index, and the relationship between the index (NDVI) and its impact on socio-economic factors, were analyzed by linear regression analysis and a geographically weighted regression model. The conclusions are as follows: ①The overall air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region is characterized by high-level pollution over the southern plain areas and low-level pollution over the northern mountainous areas. The air pollution increases from north to south, and shows significant spatial heterogeneity. ②From the perspective of seasonal changes, the overall order winter > autumn > spring > summer is observed, and atmospheric pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region shows significant temporal heterogeneity. ③The concentrations of pollutants such as SO_2, NO_2, CO, $PM_{2.5}$, and PM_{10} all have a negative correlation with the NDVI value. Assuming that natural conditions such as climate and topography are relatively consistent, the lower the NDVI value, the more obvious the interference of human activities, the more concentrated the industrial economy layout, and the greater the pollution emissions, the more significant the negative impact on air quality. ④The NDVI reflects the land use, population distribution, and industrial layout to a certain extent, and these factors directly or indirectly determine the level of air pollution emissions and thus indicate the pollution distribution characteristics of the region. ⑤The results of the GWR model calculation show that the higher the level of economic development, the better the correlation between the NDVI and socioeconomic factors, $PM_{2.5}$, and other pollutant concentrations. The distribution of the NDVI can generally reflect the level of social and economic development. The distribution of the NDVI also correlates to the distribution of $PM_{2.5}$ to a certain extent.

Key words: atmospheric pollution; air quality index (AQI); normalized vegetation index (NDVI); correlation coefficient; geographically weighted regression model (GWR)

随着我国经济和社会的高速发展、城市化进程的加快、工业规模的扩大、GDP 持续快速增长, 空气污染的问题也越来越严重, 已严重影响到了生态环境、经济发展和人们的身体健康[1]. 京津冀城市群是中国的政治、文化中心, 也是北方经济的重要核心区, 区域人口稠密, 工农业发达. 近年来, 由于经济迅猛发展、人口急剧增加, 加之京津冀地区特殊的地形和气候特征, 空气污染状况变得日趋严重, 引起普遍关注[2]. 针对京津冀区域空气污染问题, 有学者利用统计分析[3,4], 化学组分分析[5,6], 模型解析[7~9], 遥感反演[10,11]以及空间分析[12~14]

收稿日期: 2018-09-21; **修订日期**: 2018-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0706004, 2018YFC0706000)

作者简介: 孙爽(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染遥感监测, E-mail:sunshuang2017@126.com

* 通信作者, E-mail:lilj2000@126.com

等不同方法进行了研究，也有学者结合气象数据[15,16]、统计数据[17,18]、空间数据[19]对京津冀地区空气污染变化情况进行综合分析，得到了区域内污染物的来源、分布以及变化规律. 相关研究对改善区域空气质量有指导性意义，对进一步预防、控制及治理京津冀地区的空气污染提供科学依据和技术支撑.

有研究表明，绿色植物在近地表大气污染物的清除中起着主要作用[20,21]. 而 NDVI 作为归一化植被指数，可以表征一个区域的植被覆盖情况，进而反映区域内人口分布、产业经济布局. 研究 NDVI 与 PM_{10} 等大气污染物的相关关系，可以有助于构建有不同净化作用的生态型城市绿地，从而有效利用植物修复这一新型手段进行大气污染治理，对城市园林绿化、环境规划和生态环境建设具有直接的指导意义和应用价值[22,23]

目前在京津冀大气污染规律及其成因的研究中，很少有将 NDVI 作为指标进行相关分析的，本文利用 NDVI 对经济发展水平以及空气质量的指示特性，定量分析其与大气中污染物的相关关系，探讨污染物浓度的影响因素，以期为京津冀地区大气污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀位于环渤海心脏地带，是中国北方经济规模最大、最具活力的地区[24]. 其地势西北高东南低，西部、西北部和北部地区均被太行山和燕山所包围，而东南地区多为平原，形成了向东南方向开口的“U”字型地形[25]，华北地区大气污染沿太行山前地带呈现面域扩展、转移和复合加重态势[26].

本研究中京津冀地区空气质量地面监测站点共选取 96 个，其中北京 35 个站点，天津 10 个站点，河北 51 个站点，涵盖了京津冀所有地级以上城市，站点分布如图 1 所示.

1.2 数据来源

本文的大气污染物质量浓度数据来自全国空气质量实时发布平台公布的逐时浓度数据(http://106.37.208.233:20035/)，指标包括空气质量指数(air quality index，AQI)、SO_2、NO_2、CO、O_3、$PM_{2.5}$、PM_{10}，数据时间跨度为 2017 年 1 ~ 12 月. NDVI 数据来自 NASA 官方遥感影像数据中心(https://ladsweb.modaps.Eosdis.nasa.gov/)的 MOD13Q 数据集，250 m 空间分辨率的归一化植被指数数据，时间段为 2016 ~ 2017 年数据. 文中涉及的统计数据来自《2017 年河北经济年鉴》、《2017 年北京统计年鉴》以及《2017 年天津统计年鉴》. 夜间灯光数据为 NASA 的 NPP-VIIRS 数据(http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html).

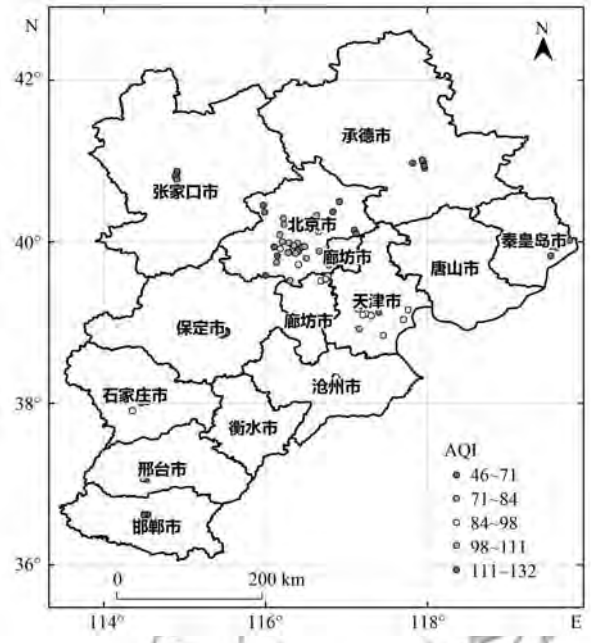

图 1 京津冀地区环境空气质量自动监测点分布

Fig. 1 Distribution of automatic air quality monitoring stations in the Beijing-Tianjin-Hebei region

1.3 数据处理

对 AQI 及污染物浓度逐小时数据，去除其中的异常值和缺失值，分别求月均值、年均值. 大气中污染物存在着显著的空间关联性，即相近地区的污染物浓度值在统计上会更加接近[27]. 京津冀地区环境监测点分布尚不均匀，大多集中在每个城市的中心. 通过插值即可了解区域内的完整空间分布. Pan 等[28]在对全国主要城市的 $PM_{2.5}$ 空间分布特征研究中，对几种方法得到的结果对比分析，证明克里金插值方法相对更准确，可以表示污染物的空间分布情况[29]，所以本文采用克里金插值方法，对京津冀地区污染物表面分布进行模拟.

利用 MRT 工具将 MOD13Q 的数据拼接、重新投影并输出 NDVI 结果. 栅格计算得到京津冀地区春、夏、秋、冬四季以及年均 NDVI 结果. 使用区域统计方法，将每个站点 1km 缓冲区范围内的 NDVI 栅格数据对应的值求平均，代表该站点对应的 NDVI 值.

每个环境空气质量评价城市点代表范围一般为半径 500 m ~ 4 km 的范围[30]. 本文以空气质量监测站点为中心，选取 1km 为半径，分别代表各站点的作用范围，可以保证该范围内的地物类别和 NDVI 值不会因为距离过近而失去代表性，亦不会因为过远引入不必要的干扰因素.

1.4　地理加权回归分析

地理加权回归分析（geographically weighted regression，GWR）是对最小二乘模型的空间扩展，允许回归参数随地理位置的变化而变化. GWR 使用核函数来确定空间依赖性的空间范围，利用距离衰减函数对此空间范围内样点进行加权计算，假设距离越近的样点其影响越显著[31]. GWR 模型如下式：

$$y_j = \beta_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^{k}\beta_i(\mu_j, v_j)x_{ij} + \varepsilon_j$$

式中，x 和 y 分别为自变量和因变量，k 为自变量数，j 为样本点；u_j 和 v_j 为样本点 j 的空间位置，$\beta_0(u_j, v_j)$ 为截距，$\beta_i(u_j, v_j)$ 为系数，会随着样本点位置的变化而变化. 每一个局部的 $\beta_i(u_j, v_j)$ 都是用来估计它相邻的空间观测值[32].

2　结果与讨论

2.1　京津地区大气污染区域空间特征

对京津冀所有城市的各类污染物的年均浓度进行统计分析（如图 2），得出 2017 年各区域的污染分布情况. 结合图 3 的 AQI 指数的空间分布情况，可以将京津冀 13 个城市分为：北部轻度污染城市，包括张家口、承德和秦皇岛；中部较轻污染城市，包括北京、天津和廊坊；中度污染过渡城市，包括保定、沧州和衡水；东部较重污染城市唐山；以及西南重度污染城市，包括石家庄、邯郸和邢台. 位于北部的承德空气质量最好，其次是北京；钢铁工业集中的邯郸和唐山等地空气质量最差. 唐山的 SO_2、NO_2、CO 浓度在 13 个城市中最高，北京的 SO_2 浓度最低，承德 NO_2、CO 浓度最低；13 个城市中 O_3 浓度差距不大，天津和廊坊的 O_3 浓度相对较高；$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度邯郸和石家庄最高，承德最低. 从污染物的年均浓度分布来看，邯郸、石家庄和唐山除 O_3 外各类污染物的浓度水平都很高.

利用克里格插值方法对京津冀地区各站点污染物年均浓度进行插值分析，得到各类污染物的空间分布图（图 3）. 其中，北部高原的空气质量优于中南部平原地区，各城市中北京总体空气质量最优，中南部平原地区空气质量较差. 其中 SO_2 呈现南高北低，东高西低的分布趋势，邯郸、邢台和唐山这 3 个城市 SO_2 污染最严重. CO 浓度在京西南琉璃河站点、京南榆垡和京东南永乐店几个区域传输点处浓度最高，唐山、邢台以及邯郸 CO 浓度也高于其他区域，钢铁工业集中，工业生产以及集中小锅炉、小作坊排放了大量 CO[33]. 大气中 NO_2 主要由交通、工业生产、生物质燃烧贡献，道路分布密集以及工业密集区域 NO_2 浓度明显较高. 张家口 O_3 浓度较高，与当地工业生产等排放的臭氧前体物 NO_x 和 VOCs 等以及植被释放的 VOCs 密切相关，此外张家口地区在区域内光照条件好，对光化学反应生成 O_3 有促进作用. 颗粒物浓度分布特征与 NO_2 较为相近，污染重的区域主要分布在京津冀中部及南部地区，此外，北京南部通州区和大兴区由于大规模城市建设，土石施工面积较大，也使得颗粒物浓度大大增加[34]. 受区域复杂地形以及污染物排放空间分布的影响，京津冀地区污染物浓度的分布有较大的空间异质性.

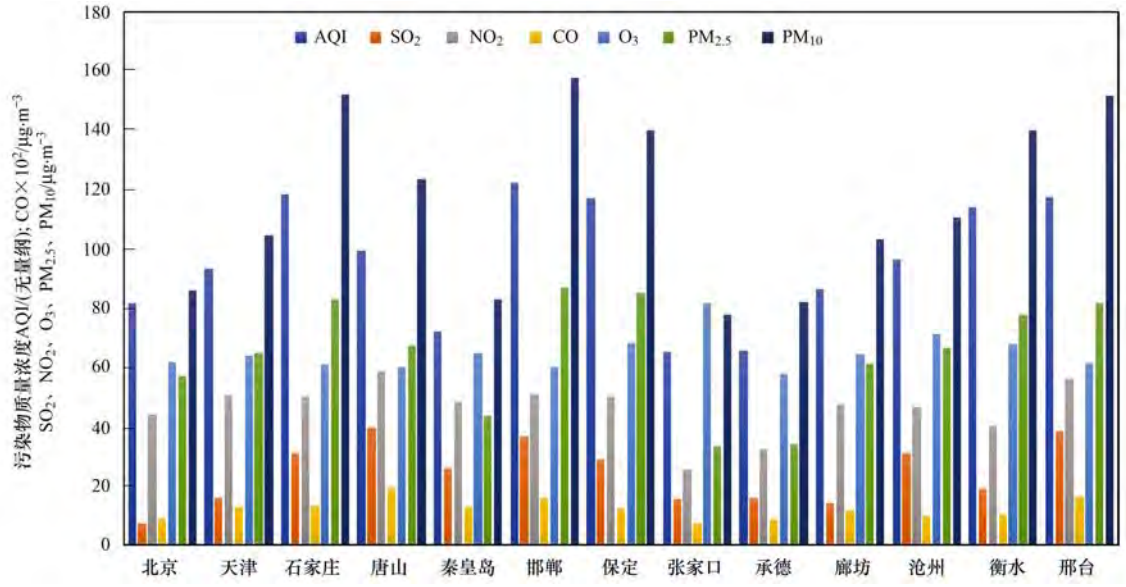

图 2　京津冀典型城市污染物年均分布

Fig. 2　Average annual distribution of pollutants in the typical city of Beijing-Tianjin-Hebei

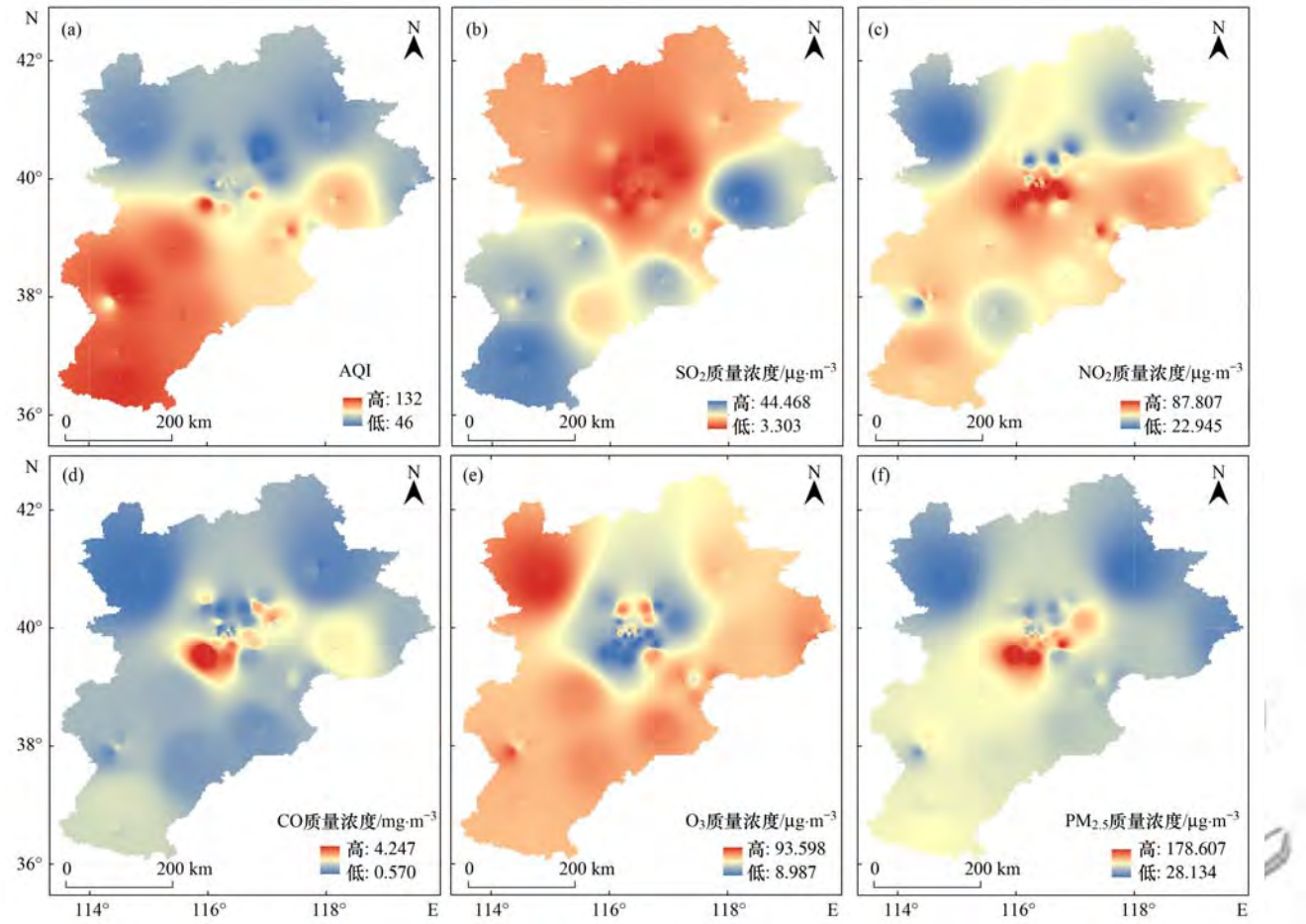

图 3 京津冀地区各污染物分布趋势

Fig. 3 Distribution trends of various pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region

2.2 京津地区大气污染季节变化规律

分析京津冀地区各污染物浓度季节变化(如图 4)可以看出，大部分污染物的月变化趋势较为一致，呈现秋冬高春夏低的变化趋势，臭氧的变化规律刚好相反. 其中空气质量指数在冬季最高，夏季最低. 与冬季高污染与燃煤取暖等污染物排放增多、逆温等不利扩散条件有关；SO_2 的月均浓度变化呈现出冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的变化规律，取暖季结束后 SO_2 浓度大幅下降，这说明居民冬季取暖对 SO_2 的贡献占了很大的比例. NO_2 季节变化规律为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季，秋收季节之后的秸秆焚烧、冬季取暖都会加重 NO_2 的污染程度. O_3 浓度夏秋季节高，冬春季节低. 温度与 O_3 浓度呈现较好的正相关，除了 NO_2 等前体物的转化，植物释放的 VOCs 对臭氧的贡献也很大. 所以在气温高、植被丰富的月份臭氧浓度高. 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 主要由局地排放贡献，$PM_{2.5}$ 的浓度在取暖季明显高于其他季节，而且冬季比较容易形成近地面逆温层，污染难于扩散，使得 $PM_{2.5}$ 累积. 京津冀地区 PM_{10} 主要来自于本地建设施工、道路扬尘、农田裸地、矿山扬尘以及外地传输，受气象条件影响比较大. 春季地表植被稀疏，大风天气裸露地表的沙尘极易进入空气中，造成 PM_{10} 浓度增加；夏季，地表植被覆盖较好，地表颗粒物被保护起来，加之降雨量大，因而 PM_{10} 的浓度降低.

2.3 京津冀地区大气污染与 NDVI 相关性分析

2.3.1 NDVI 对大气污染空间分布的指示意义

从季节分布来看，京津冀西北部以山地为主，NDVI 值全年居高；东南地区主要为耕地，夏秋季节 NDVI 值较高，植被覆盖好，对地表扬尘的抑制能力较强；而冬春季节 NDVI 值较低(图 5). 京津冀东南平原区为我国重要粮食产地，耕作活动频繁，大量的沙尘、粉尘及其他污染物暴露在外，在风力作用下极易起尘，形成或加重大气污染[25].

对照分析京津冀地区 2017 年夜间灯光数据[图 5(b)]，NDVI 值高的区域，夜间灯光亮度值低，人口分布稀少. 人类活动少的区域，空气质量一般会优于人为活动密集的区域. 图 4 京津冀地区各污染物浓度分布趋势也显示，西北部 NDVI 高值区对应大气污染水平都相对较低. 北京南部、天津东部以及河北南部夜间灯光亮度值高，NDVI 值低，人口分布密集，能源消耗强度大，污染排放也相应较

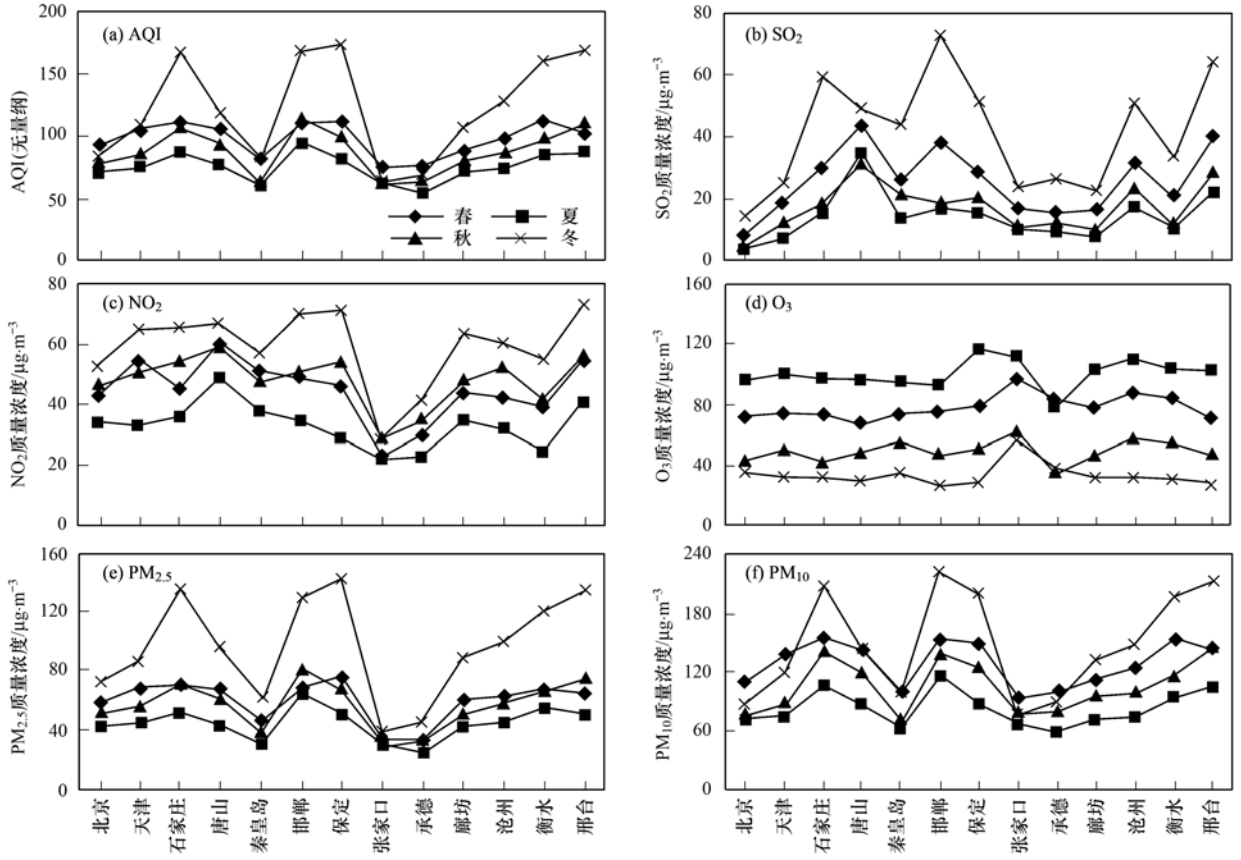

图 4　2017 年京津冀各类污染物季节平均浓度变化

Fig. 4　Seasonal average concentrations of pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017

高. 即植被覆盖较少的区域，灯光值越亮，区域人口分布越多，工农业经济体量越大，相应污染排放也越多；反之，植被覆盖尤其是林地分布越多的区域，夜间灯光亮度值低，人口分布越少，经济水平越差，相应污染排放也越少.

2.3.2　NDVI 值与大气污染水平相关性分析

以京津冀空气质量监测站点为中心做 1 km 缓冲区，计算每个站点范围内的 NDVI 逐月均值，分析每个站点 AQI、SO_2、NO_2、O_3、$PM_{2.5}$月均值与 NDVI 相关关系，得到污染因子与 NDVI 值的相关性如表 1 所示.

AQI 与 NDVI 值的相关系数 $|r| = 0.54$，为中度线性负相关；SO_2 与 NDVI 值的相关系数 $|r| = 0.599$，为中度线性负相关；NO_2 与 NDVI 值的相关系数 $|r| = 0.711$，为高度线性负相关；O_3 与 NDVI 值的相关系数 $|r| = 0.729$，为高度线性正相关；$PM_{2.5}$与 NDVI 值的相关系数 $|r| = 0.616$，为中度线性负相关；除 O_3 外，SO_2、NO_2、$PM_{2.5}$ 等污染物均与 NDVI 值呈负相关关系，而且 NDVI 低值区，几种污染物浓度都很高；NDVI 值越大的区域，污染物浓度越低. 高植被覆盖区域，污染物浓度低，NDVI 值高，表征植被生长状况良好，受人为活动影响少. 而在低植被覆盖区域，扬尘对 $PM_{2.5}$等颗粒物有一定贡献，相应地人类活动也会间接增加 SO_2、NO_2 等污染物的排放.

表 1　各类污染物浓度与 NDVI 值一元线性回归结果

Table 1　Results of linear regression analysis of various pollutants and the NDVI

项目	AQI	SO_2	NO_2	CO	O_3	$PM_{2.5}$	PM_{10}
R^2	0.293	0.359	0.506	0.362	0.531	0.379	0.219
系数	-0.011	-64.500	-68.850	-2.370	0.015	-0.012	-0.014
斜率	0.012	38.840	62.660	1.800	33.210	92.980	0.015

2.3.3　$PM_{2.5}$与 NDVI 地理加权回归分析

选取行政区土地面积、年末总人口数、地区生产总值、工业生产总值作为衡量社会经济水平的指标，利用地理加权回归模型分别拟合 NDVI 和社会经济数据、$PM_{2.5}$与社会经济数据及其与 NDVI 之间的关系. 回归结果中标准化误差在 -2 ~ 2 的范围

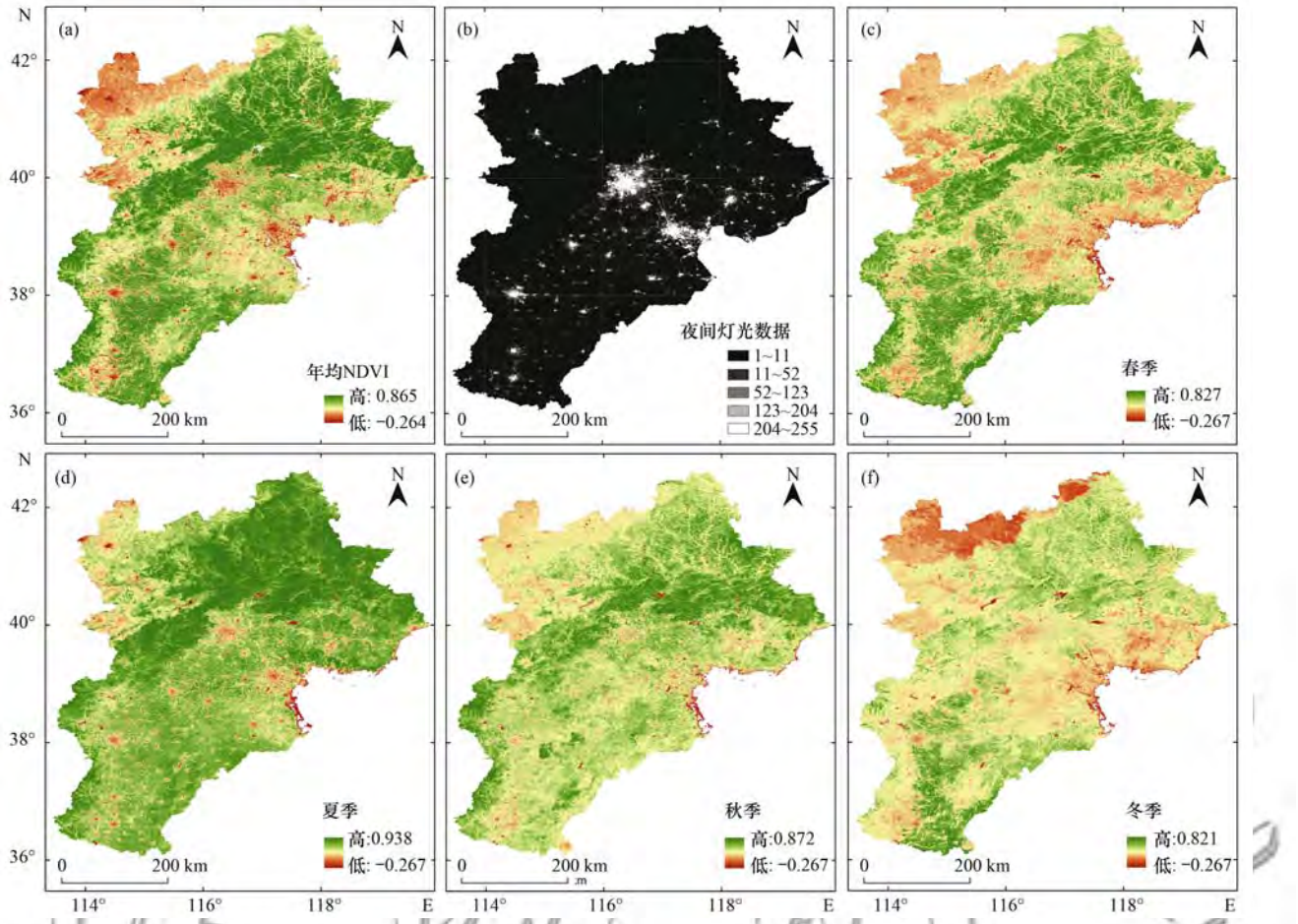

图 5 2017 年 NDVI 与夜间灯光数据对照

Fig. 5 Comparison of NDVI and nighttime lighting data, 2017

分别占各自结果的 93.550%、93.737% 以及 91.569%，拟合的关系稳定[35]. NDVI 和社会经济数据经 GWR 模型计算调整后的 R^2 为 0.661；$PM_{2.5}$ 与社会经济数据经计算调整后的 R^2 为 0.889；$PM_{2.5}$ 与 NDVI 经计算调整后的 R^2 为 0.804，GWR 模型拟合效果良好.

图 6 为 NDVI 与社会经济数据地理加权回归后的局部 R^2 和标准化残差分布，其 R^2 范围在 0.008 ~0.753 之间，其中北京、天津、唐山以及秦皇岛的局部 R^2 较高，NDVI 与社会经济数据拟合度较高；石家庄、邯郸、承德、廊坊拟合度一般；张家口、保定、沧州、衡水、邢台拟合度较弱，北京、天

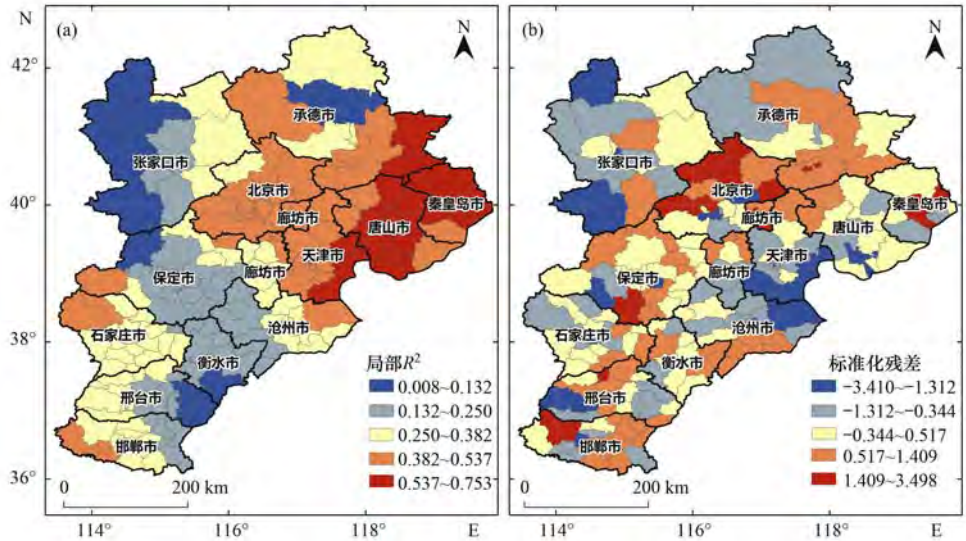

图 6 NDVI 与社会经济数据地理加权回归结果

Fig. 6 Geographically weighted regression results of NDVI and socioeconomic data

津、唐山等地经济发展水平高，NDVI 与经济发展水平关系更密切. 由京津冀各城市经济情况可得，经济越发达的城市拟合效果越好.

图 7 为 $PM_{2.5}$ 与 NDVI 地理加权回归结果，局部相关系数的高低与城市经济水平相关性很大，并且呈现以京津唐为中心向外扩散的趋势. 其中北京、天津北部、唐山、秦皇岛以及承德南部 NDVI 与 $PM_{2.5}$ 的局部 R^2 最高；其次为石家庄、邯郸、沧州和保定；经济水平较低的张家口、邢台和衡水相关性较弱. 除社会经济水平影响外，还可能受汽车保有量、公路里程数、煤炭使用量等因素影响[36]. Local R^2 的分布表现出 $PM_{2.5}$ 受 NDVI 的影响在空间上有着较强的异质性. $PM_{2.5}$ 与 NDVI 回归的标准化残差约 70% 为负值，30% 为正值，说明大部分区域 NDVI 与 $PM_{2.5}$ 呈负相关关系.

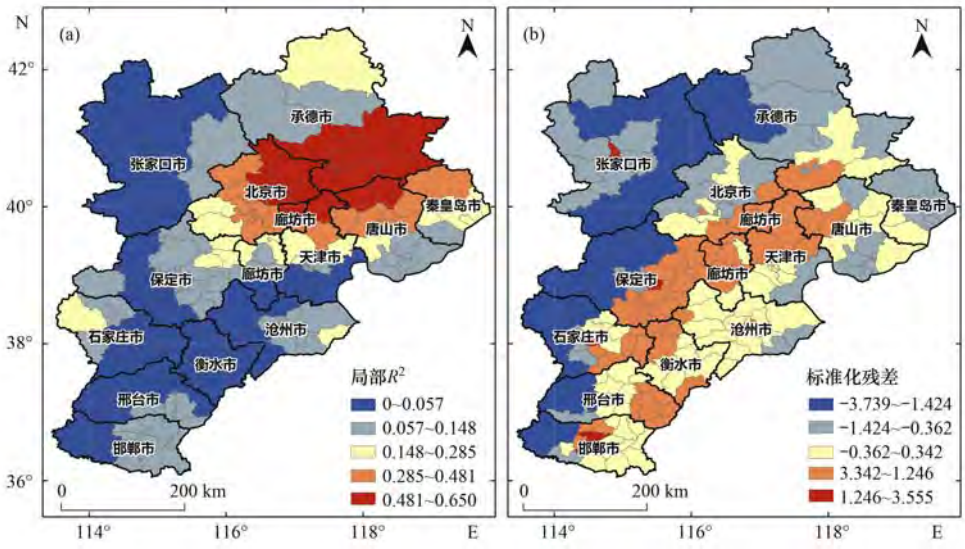

图 7　$PM_{2.5}$ 与 NDVI 地理加权回归结果

Fig. 7　Geographically weighted regression results of $PM_{2.5}$ and NDVI

图 8 为 $PM_{2.5}$ 与社会经济水平地理加权回归结果，局部相关系数呈现出由西到东逐渐递减带状分布的变化趋势. $PM_{2.5}$ 和社会经济数据 GWR 计算结果中，标准化残差在城市区域均为正值，负值大部分出现在非城市山区. 在城市区域 $PM_{2.5}$ 和城市经济水平呈正相关[37]，经济越发达地区，$PM_{2.5}$ 浓度相对会越高. 而非城市山区经济发展主要依赖于农业、旅游业等产业，经济发展模式与 $PM_{2.5}$ 相关关系与其他区域迥异.

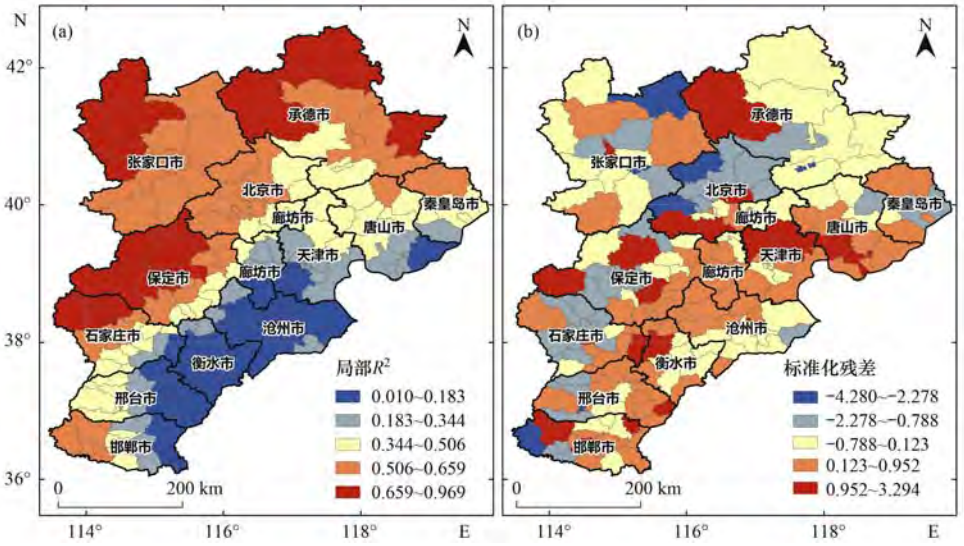

图 8　$PM_{2.5}$ 与社会经济数据地理加权回归结果

Fig. 8　Geographically weighted regression results of $PM_{2.5}$ and socioeconomic data

3　结论

(1)受区域复杂地形以及气象因素的影响，京津冀地区污染物浓度的分布有较大的空间异质性，北部高原地区优于中南部平原地区，由空气质量指数反映出位于河北北部的承德空气质量最好，其次

是北京；河北省南部平原地区空气质量较差，钢铁等工业企业集中的邯郸、唐山和石家庄等地空气质量最差.

(2)京津冀地区空气质量指数在冬季较高，其中 1 月最高；在夏季比较低，其中 8 月最低. 各季节污染物受气象因素影响较大，与 NDVI 值的分布也密切相关.

(3)NDVI 值低即植被覆盖较少的区域，建筑裸地等分布较多，表征区域人口分布越多，经济发展水平越好，相应污染物的产生排放也越多；反之，植被覆盖尤其是林地分布越多的区域，人口分布越少，经济水平越差，相应污染物的排放也越少.

(4)除 O_3 外，SO_2、NO_2、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}等污染物浓度均与 NDVI 值呈负相关关系，而且在 NDVI 值接近零的范围内，几种污染物的浓度都很高，说明植被分布与 SO_2、NO_2、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}等污染物浓度的分布有很大关联，NDVI 值的高低所反映的一个地区内的生产生活、社会经济活动等对不同类型的污染物排放会产生相应的影响.

(5)GWR 模型计算结果表明，经济发展水平越好的地区，NDVI 与社会经济数据、$PM_{2.5}$与 NDVI 以及 $PM_{2.5}$与社会经济数据拟合结果越好. 社会经济发展水平对 $PM_{2.5}$浓度分布、NDVI 值高低的分布有一定的指示作用，NDVI 的分布可以大体反映社会经济发展水平. $PM_{2.5}$浓度分布与 NDVI 呈负相关，NDVI 对 $PM_{2.5}$的分布有一定的指示作用.

致谢：NASA 官网为本研究提供了 MODIS 数据，中国环境监测总站提供地面环境空气质量观测数据，北京统计局、天津统计局、河北统计局提供的社会经济数据，在此一并致谢.

参考文献：

[1] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al*. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, **514**(7521): 218-222.

[2] 王冠岚，薛建军，张建忠. 2014 年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J]. 气象与环境科学，2016，**39**(1)：34-42.
Wang G L, Xue J J, Zhang J Z. Analysis of spatial-temporal distribution characteristics and main cause of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region in 2014[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, **39**(1): 34-42.

[3] 陶双成，邓顺熙，高硕晗，等. 北京采暖期典型区域环境空气污染特征分析[J]. 生态环境学报，2016，**25**(11)：1741-1747.
Tao S C, Deng S X, Gao S H, *et al*. Characteristics of air pollution in typical regions of Beijing during heating season[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(11): 1741-1747.

[4] 白鹤鸣. 京津冀地区空气污染时空分布研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2013. 8-26.
Bai H M. Study on spatial and temporal distribution of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. 8-26.

[5] 李星，赵文吉，熊秋林，等. 北京采暖季 $PM_{2.5}$水溶性无机离子污染特征及其影响因素[J]. 生态环境学报，2018，**27**(1)：93-100.
Li X, Zhao W J, Xiong Q L, *et al*. The pollution characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ inorganic water-soluble ions in Beijing during heating season[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(1): 93-100.

[6] 贾佳，韩力慧，程水源，等. 京津冀区域 $PM_{2.5}$及二次无机组分污染特征研究[J]. 中国环境科学，2018，**38**(3)：801-811.
Jia J, Han L H, Cheng S Y, *et al*. Pollution characteristic of $PM_{2.5}$ and secondary inorganic ions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 801-811.

[7] 陈云波. 京津冀地区典型大气污染物区域来源解析的数值模拟研究[D]. 北京：中国环境科学研究院，2016. 5-16.
Chen Y B. Modeling and Source apportionment on typical air pollutants over Beijing-Tianjin-Hebei Region[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2016. 5-16.

[8] 张众志. 京津冀民用散煤燃烧对该地区冬季 $PM_{2.5}$污染贡献模拟研究[D]. 济南：山东大学，2017. 10-20.
Zhang Z Z. The Contribution of residential coal combustion to $PM_{2.5}$ pollution over China's Beijing-Tianjin-Hebei Region in winter[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017. 10-20.

[9] 王燕丽，薛文博，雷宇，等. 京津冀区域 $PM_{2.5}$污染相互输送特征[J]. 环境科学，2017，**38**(12)：4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al*. Regional transport matrix study of $PM_{2.5}$ in Jingjinji Region[J]. Environmental Science, 2015, **38**(12): 4897-4904.

[10] 赵笑然，石汉青，杨平吕，等. NPP 卫星 VIIRS 微光资料反演夜间 $PM_{2.5}$质量浓度[J]. 遥感学报，2017，**21**(2)：291-299.
Zhao X R, Shi H Q, Yang P L, *et al*. Inversion algorithm of $PM_{2.5}$ air quality based on nighttime light data from NPP-VIIRS[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, **21**(2): 291-299.

[11] 郝静，孙成，郭兴宇，等. 京津冀内陆平原区 $PM_{2.5}$浓度时空变化定量模拟[J]. 环境科学，2018，**39**(4)：1455-1465.
Hao J, Sun C, Guo X Y, *et al*. Simulation of the spatio-temporally resolved $PM_{2.5}$ aerosol mass concentration over the inland plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1455-1465.

[12] 刘海猛，方创琳，黄解军，等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报，2018，**73**(1)：177-191.
Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al*. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(1): 177-191.

[13] 梁增强. 京津冀典型城市环境污染特征、变化规律及影响机制对比分析[D]. 北京：北京工业大学，2014. 7-10.
Liang Z Q. Comparison of environmental pollution characteristics, variation law and influence mechanism of typical urban in Beijing-Tianjin-Hebei Region[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. 7-10.

[14] 张伟，张杰，汪峰，等. 京津冀工业源大气污染排放空间集聚特征分析[J]. 城市发展研究，2017，**24**(9)：81-87.
Zhang W, Zhang J, Wang F, *et al*. Spatial agglomeration of industrial air pollutant emission in Beijing-Tianjin-Hebei Region

[J]. Urban Development Studies, 2017, **24**(9): 81-87.

[15] 褚建功. 气象因子对京津冀区域大气污染的影响[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018. 7-10.
Chu J G. The influence of meteorological factors on air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Regions [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018. 7-10.

[16] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(10): 1747-1754.
Yang X C, Zhao W J, Xiong Q L, *et al*. Spatio-temporal distribution of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) area in 2016 and its relationship with meteorological factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(10): 1747-1754.

[17] 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 S D, Ouyang W Q, Ge J H. 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.

[18] Han L J, Zhou W Q, Li W F, *et al*. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2014, **194**: 163-170.

[19] 王桂林, 杨昆, 杨扬. 京津冀地区不透水表面扩张对 $PM_{2.5}$ 污染的影响研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2470-2481.
Wang G L, Yang K, Yang Y. The spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ pollution and the its correlation with the impervious surface expansion[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(7): 2470-2481.

[20] Nguyen T, Yu X X, Zhang Z M, *et al*. Relationship between types of urban forest and $PM_{2.5}$ capture at three growth stages of leaves[J]. Journal of Environmental Science, 2015, **27**: 33-41.

[21] Simonich S L, Hites R A. Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere [J]. Nature, 1994, **370**(6484): 49-51.

[22] 谢丽宏, 黄芳芳, 甘先华, 等. 城市森林净化大气颗粒物污染作用研究进展[J]. 林业与环境科学, 2017, **33**(3): 96-103.
Xie L H, Huang F F, Gan X H, *et al*. Research progress on the purification effects of urban forest vegetation on atmospheric particulate pollution matter [J]. Forestry and Environmental Science, 2017, **33**(3): 96-103.

[23] 陈小平. 武汉城市干道绿化隔离带消减颗粒物效应及优化建议[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. 111-114.
Chen X P. Research on the particle attenuation effect and optimizing strategy of roadside greenbelt of urban major road in Wuhan[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. 111-114.

[24] 张静. 京津冀一体化政府环境责任问题研究[J]. 法制博览, 2015, (8): 136-137.

[25] 谢志英. 北京地区空气污染现状及影响因子的地学分析研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
Xie Z Y. Study on air pollution situation and its influencing factors based on geoscience in Beijing area [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.

[26] 徐辉. 京津冀城市群: 探索生态文明理念下的新型城镇化模式[J]. 北京规划建设, 2014, (5): 39-44.

[27] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, **70**(11): 1720-1734.
Wang Z B, Fang C L, Xu G, *et al*. Spatial-temporal characteristics of the $PM_{2.5}$ in China in 2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(11): 1720-1734.

[28] 潘竟虎, 张文, 李俊峰, 等. 中国大范围雾霾期间主要城市空气污染物分布特征[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(12): 3423-3431.
Pan J H, Zhang W, Li J F, *et al*. Spatial distribution characteristics of air pollutants in major cities in China during the period of wide range haze pollution [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, **33**(12): 3423-3431.

[29] Zhang A, Qi Q W, Jiang L L, *et al*. Population exposure to $PM_{2.5}$ in the urban area of Beijing[J]. PLoS One, 2013, **8**(5): e63486.

[30] HJ/T 193-2005, 环境空气质量自动监测技术规范[S].

[31] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. 9-24.
Qin W Z. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. 9-24.

[32] Fotheringham A S, Charlton M E, Brunsdon C. Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis [J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 1998, **30**(11): 1905-1927.

[33] 段文娇, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 $PM_{2.5}$ 影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1445-1454.
Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al*. Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1445-1454.

[34] 张立坤, 李令军, 姜磊, 等. 北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 135-142.
Zhang L K, Li L J, Jiang L, *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics and fugitive dust emission of Building Sites in Beijing[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 135-142.

[35] 张西雅, 扈海波. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究[J]. 大气科学, 2017, **41**(4): 797-810.
Zhang X Y, Hu H B. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, **41**(4): 797-810.

[36] 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 J X, Zhai W X, Cheng C Q, *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.

[37] Lin G, Fu J Y, Jiang D, *et al*. Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in china [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, **11**(1): 173-186.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 4

Apr. 15, 2019

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area ····· YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, *et al.* (1521)

Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in $PM_{2.5}$ in Xi'an ····· MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, *et al.* (1529)

Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ During Winter in Taiyuan ····· LIU Su, MA Tong, YANG Yan, *et al.* (1537)

Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou ····· YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, *et al.* (1545)

Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric $PM_{2.5}$ in a Suburb of Zhuhai City ····· YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, *et al.* (1553)

Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean ····· JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, *et al.* (1562)

CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on $PM_{2.5}$ in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism ··· GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, *et al.* (1575)

Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei ····· SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, *et al.* (1585)

Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017 ····· ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, *et al.* (1594)

Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region ····· QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, *et al.* (1604)

Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, *et al.* (1613)

Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions ····· GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, *et al.* (1627)

Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station ····· ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, *et al.* (1634)

Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing ····· HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, *et al.* (1645)

Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the $PM_{2.5}$ Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City ····· YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, *et al.* (1656)

Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization ····· FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, *et al.* (1664)

Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators ····· MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, *et al.* (1670)

Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days ····· YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, *et al.* (1680)

Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days ····· ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)

Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting ····· SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, *et al.* (1697)

Analysis of PHEV CO_2 Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities ····· HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, *et al.* (1705)

Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing ····· DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, *et al.* (1715)

Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay ····· LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, *et al.* (1726)

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay ····· PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, *et al.* (1734)

Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring ····· MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, *et al.* (1742)

Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis ····· LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, *et al.* (1751)

Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin ····· XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, *et al.* (1760)

Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model ····· ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, *et al.* (1770)

Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs ····· CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, *et al.* (1779)

Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn ····· HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, *et al.* (1788)

Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers ····· WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, *et al.* (1797)

Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis ····· LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, *et al.* (1803)

Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water ····· SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, *et al.* (1811)

Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(Ⅵ) in Aqueous Solution ····· YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)

Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake ····· GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, *et al.* (1826)

Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide ····· XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, *et al.* (1834)

Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals ····· CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, *et al.* (1842)

Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles ····· LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, *et al.* (1849)

Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater ····· HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)

Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor ····· MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, *et al.* (1865)

Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test ····· LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, *et al.* (1871)

Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System ····· LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, *et al.* (1878)

Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System ····· ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, *et al.* (1885)

Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Pseudomonas putida* YH and Its Kinetic Characteristics ····· WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, *et al.* (1892)

Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process ····· WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, *et al.* (1900)

Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions ····· WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, *et al.* (1906)

Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature ····· YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, *et al.* (1914)

Contents and Forms of Phosphorous in the Municipal Sewage Sludge of China ····· WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, *et al.* (1922)

Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perflurorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou ····· WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, *et al.* (1931)

Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N_2O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River ····· TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, *et al.* (1939)

CH_4 Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia ····· YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, *et al.* (1950)

Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application ····· WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, *et al.* (1957)

Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China ····· XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, *et al.* (1965)

Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region ····· QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, *et al.* (1973)

Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land ····· KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, *et al.* (1981)

VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry ····· WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, *et al.* (1990)