

方知库  
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



2019

Vol.40 No.3  
第40卷 第3期

目次

|                                                                                             |                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估                                                         | 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)               |
| 利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响                                                     | 李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)                |
| 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 来源解析                                                         | 王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)                               |
| 四川省典型工业行业 PM <sub>2.5</sub> 成分谱分析                                                           | 冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)  |
| 典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析                                         | 赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)           |
| 沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及来源分析                                                   | 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)             |
| 新乡冬季 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析                                                | 闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071) |
| 烟台市环境受体 PM <sub>2.5</sub> 四季污染特征与来源解析                                                       | 刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)             |
| 常州市冬季 PM <sub>2.5</sub> 中类腐殖质昼夜特征分析                                                         | 顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)                     |
| 西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险                                                                   | 曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)            |
| 京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析                                                                        | 邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)                |
| 中国城市 O <sub>3</sub> 浓度时空变化特征及驱动因素                                                           | 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)                             |
| 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征                                                            | 张倩倩, 张兴赢 (1132)                                       |
| 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析                                                                            | 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)       |
| 中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立                                                                  | 高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)                          |
| 异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化                                                                      | 黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)                              |
| 兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征                                                                        | 栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)                          |
| 成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析                                                                        | 胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)                         |
| 基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO <sub>2</sub> 扩散通量估算                                             | 张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)                      |
| 渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化                                                             | 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)                             |
| 思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学                                                                   | 劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)                |
| 厦门湾海滩微塑料污染特征                                                                                | 刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)                          |
| 高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析                                                                    | 王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)                    |
| 鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素                                                                    | 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)                     |
| 成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征                                                                     | 吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)                  |
| 丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析                                                             | 张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)        |
| 蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响                                                                           | 刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)                     |
| 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价                                                                   | 苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)               |
| 生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响                                                                  | 黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)                           |
| 城市不同材料屋面径流的污染负荷特性                                                                           | 何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)                    |
| BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制 | 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)                              |
| 微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除                                                                | 吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)                         |
| 鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除                                                                        | 邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)                        |
| Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性                                                                    | 易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)                |
| 两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素                                                                   | 程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)                    |
| 静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响                                                             | 俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)       |
| 4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制                                                                 | 王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)                                   |
| 以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析                                                                 | 徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)                          |
| 进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响                                                                          | 李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)                       |
| 除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复                                                                            | 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)                                |
| CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能                                                                      | 马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)                          |
| 不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能                                                | 袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)              |
| ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水                                                                     | 李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)                     |
| 室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性                                                                  | 谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)                   |
| 不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征                                                                      | 任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)               |
| 降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征                                                                     | 付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)                |
| IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析                                                                 | 刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)                    |
| 温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响                                                               | 于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)                |
| 零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化                                                                         | 牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)               |
| 牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响                                                                          | 彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)                                |
| 环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响                                                                  | 张彦军, 郭胜利 (1446)                                       |
| 三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应                                                                     | 李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)                              |
| 三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响                                                                     | 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)                         |
| 长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征                                                                    | 宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)               |
| 不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征                                                                         | 童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)          |
| 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征                                                             | 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)         |
| 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征                                                                     | 王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)                       |
| 大气污染对居民健康影响研究进展                                                                             | 秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)                                   |
| 《环境科学》征订启事 (1042)                                                                           | 《环境科学》征稿简则 (1162)                                     |
| 信息 (1208, 1235, 1286)                                                                       |                                                       |



# 大气污染对居民健康影响研究进展

秦耀辰<sup>1,2</sup>, 谢志祥<sup>1\*</sup>, 李阳<sup>1</sup>

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004; 2. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004)

**摘要:** 随着经济飞速发展, 中国面临严峻的大气污染形势, 这给人群健康造成极大威胁。本文在梳理国内外文献的基础上, 从研究内容和方法出发归纳评述大气污染对居民健康的影响。从中可以发现, 当前研究内容集中在宏观区域层面健康损失核算、健康损失的经济代价评估及控制大气污染的潜在健康收益等方面, 微观个体层面的研究相对匮乏。其中, 微观个体层面又以国外流行病案例研究为主, 国内研究尚处于定性的起步阶段。大气污染对居民健康影响的定量评估方法呈增多趋势, 除元分析、泊松回归、人力资本法、支付意愿法和疾病成本法外, 投入产出和可计算的一般均衡模型等也得到广泛应用。总体来看, 大气污染对居民健康的毒性作用机制主要表现为长期慢性性和短期急性效应, 同时也涉及社会经济、自然条件、行为偏好及个体生理等诸多要素, 虽然当前研究深度和广度大为拓展, 但未来仍需加强国内流行病案例研究、注重宏观区域与微观个体的融合、聚焦健康视角下污染物削减分配及重视基础数据库建设等, 以期构建系统的大气污染与居民健康分析框架奠定基础。

**关键词:** 大气污染; 居民健康; 健康损失; 暴露响应关系; 健康终端

中图分类号: X820.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1512-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201807108

## Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents

QIN Yao-chen<sup>1,2</sup>, XIE Zhi-xiang<sup>1\*</sup>, LI Yang<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Region, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** With the rapid development of the economy, the atmospheric pollution in China has become very severe, and poses a great threat to human health. On the basis of relevant research achievements at home and abroad, this paper summarizes the impact of atmospheric pollution on the health of residents from the two aspects of research content and method. It was found that current research is mainly focused on calculating the health losses, evaluating the economic cost of health losses, and analyzing the health benefits of controlling atmospheric pollutants at the macro level, while studies at the micro level are relatively scarce. Moreover, current studies at the micro individual level is mostly empirical research related to epidemic cases abroad; however, domestic research at the micro individual level is still at the initial stage of qualitative analysis. In addition, the quantitative assessment method of atmospheric pollution on the health of residents is also improving. Apart from methods in common use (meta-analysis, Poisson regression model, human capital method, willingness to pay method and disease cost method), there are other methods that are widely used (input-output model and computable general equilibrium model). In general, the effects of atmospheric pollution on resident health include both chronic and short-term acute effects, and involve many other factors as well, such as socioeconomics, natural conditions, behavioral preferences, and personal physiology. Although the depth and breadth of the research are expanding, and the level of discipline integration is being continuously improved, it is necessary to strengthen domestic epidemiological studies, to pay attention to the integration of macro (regions) and micro (individuals), to focus on the reduction and distribution of atmospheric pollutants from a health perspective, and to attach importance to the construction of a basic database in the future to provide a scientific basis for establishing a systematic framework for the analysis of the effects of atmospheric pollution on the health of residents.

**Key words:** atmospheric pollution; residents' health; loss of health; exposure response relationship; health terminal

20 世纪 30 年代以来世界范围内相继发生比利时马斯河谷、美国洛杉矶光化学烟雾、英国伦敦烟雾和日本四日哮喘病等骇人听闻的大气污染事件, 这不仅造成巨大的财产损失, 而且吞噬着居民的健康与生命<sup>[1,2]</sup>。面对严峻的大气污染形势, 英、美、法、日等国纷纷采取优化产业结构、革新生产工艺、提升能源效率、推广清洁能源及发展公共交通等措施来防治大气污染, 经过几十年不懈努力, 空气质量恶化趋势初步得到遏制<sup>[3]</sup>。发达国家的经验充分说明大气污染与人类活动关系极为密切, 与工

业化、城市化进程同步发生发展<sup>[4~6]</sup>。改革开放以来, 中国经济保持长达 40 年的高速增长, 但由此也付出惨痛的环境代价, 具体表现为以霾为主要代表的大气污染事件发生频率之高、波及范围之广和危

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671536, 41501588); 河南省国际科技合作计划项目(152102410024); 河南省高等学校重点科研项目(18A170002)

作者简介: 秦耀辰(1959~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为区域可持续发展理论、模型与信息系统, E-mail: qinye@henu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: zhixiang1108@163.com

害程度之深前所未有<sup>[7~9]</sup>。国家环保部发布的《环境统计公报》指出, 2013 年中国平均霾日数约为 35.9 d, 达到 1961 年来的最高峰<sup>[10]</sup>; 雾-霾灾害风险热点区范围囊括 96 个城市, 占据国土面积 92.4 万 km<sup>2</sup>, 波及人群数量高达 5.9 亿<sup>[11]</sup>; 北京市仅 PM<sub>2.5</sub> 污染就造成 2 万多人死亡, 100 余万人患病, 引发经济损失约 9 亿元<sup>[12]</sup>。

学术界关注大气污染的健康危害由来已久, 但是由于知识和学科背景的差异, 致使学者们基于不同视角开展的研究侧重点也不尽相同。国外学者的研究最早可追溯至 20 世纪 60 年代, Ridker<sup>[13]</sup> 从经济学视角出发, 估算出 1958 年美国因大气污染诱发的健康经济损失约为 802 亿美元, 成为定量评估大气污染健康效应的开端。随着研究的深入, 从流行病学视角出发开展的大气污染对居民健康影响研究亦呈增多趋势, Dockery 等<sup>[14]</sup> 通过追踪美国 6 个城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度与 8 000 名被调查人群的健康变化状况, 发现 PM<sub>2.5</sub> 浓度最高城市的人口死亡率大约是浓度最低城市的 1.26 倍。Seethaler 等<sup>[15]</sup> 采用支付意愿法评估 1996 年欧洲奥地利、法国和瑞典 PM<sub>10</sub> 污染引发的健康损失, 得出健康损失的经济价值约为 270 亿欧元, 占据同年国内生产总值比重的 1.7%。Katanoda 等<sup>[16]</sup> 采用队列研究方法着重探究日本分项大气污染物对 63 520 位居民的健康影响, 揭示出 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 浓度增加均会导致居民死于肺癌和呼吸系统疾病人数的显著上升。Grouse 等<sup>[17]</sup> 基于加拿大空气污染物浓度和居民死亡数据探寻不同类型污染物的健康危害, 发现众多大气污染物之中 O<sub>3</sub> 造成的居民死亡风险最高, 而 NO<sub>2</sub> 的死亡风险最低。流行病研究案例的增多为 Meta 方法的应用奠定坚实基础, Aunan 等<sup>[18]</sup> 基于搜集到的 42 篇文献成果, 借助 Meta 方法探寻中国 PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 污染对居民健康的影响, 结果发现 PM<sub>10</sub> 和 SO<sub>2</sub> 浓度每增加 1 μg·m<sup>-3</sup>, 人口死亡率分别上升 0.03% 和 0.04%。国内学者的研究则开始较晚, 过孝民等<sup>[19]</sup> 依据 1985 年中国 SO<sub>2</sub> 浓度和居民健康数据, 采用修正人力资本法揭示出其造成的健康损失价值为 37.64 亿元。进入 21 世纪, 国内学者的研究表现出数量上不断增多、方法上持续改进和深度上广为拓展的特征。陈仁杰等<sup>[20]</sup> 评价 2006 年中国 113 个城市 PM<sub>10</sub> 污染的健康危害, 发现 PM<sub>10</sub> 引发 29.97 万人早逝、25.49 万人住院。Song 等<sup>[21]</sup> 探寻 PM<sub>2.5</sub> 对心血管和呼吸系统疾病的影响, 发现 2013 年中国 PM<sub>2.5</sub> 污染造成 14.98 万人死于心血管疾病、44.60 万人死于呼吸系统疾病。此外, 也有学者利用卫星遥感数据判定不同大气污染物胁迫下暴露人

群数量, 为核算居民健康损失提供新的视角, 但该方法总体较为粗略<sup>[22]</sup>。归纳来看, 当前研究集中在宏观区域层面健康损失核算和微观个体层面健康损失差异两个方面。为此, 本文从研究内容和方法方面归纳评述大气污染对居民健康的影响, 展望未来的发展方向, 以期为推进大气污染健康损失核算提供较为系统完整的分析框架。

## 1 研究内容

大气污染对居民健康的毒性作用机制极为复杂, 主要表现为长期慢性和短期急性效应两种形式<sup>[23]</sup>。无论是急性还是慢性效应, 大气中的毒害物质主要通过破坏人体呼吸、免疫和血液循环系统等诱发致病或致死症状, 进而造成健康或经济损失<sup>[24~26]</sup>。目前公认的大气污染物致病效应主要表现在呼吸系统和心血管疾病方面, 致死效应则主要表现在总死亡、呼吸系统疾病、心血管疾病和肺癌等方面<sup>[27,28]</sup>。鉴于慢性效应与急性效应之间并无明显的区分界限, 不同学者对此认知差异较大。为此, 可将大气污染对居民健康的影响研究划分为宏观区域层面和微观个体层面两大部分<sup>[29]</sup>。

### 1.1 宏观区域层面

宏观区域层面的研究聚焦在居民健康损失核算、健康损失的经济代价评估以及控制大气污染的健康收益等方面, 实质上强调人体对大气污染做出的被动响应, 优点在于能从全局把握大气污染的健康危害, 缺点在于这是以不考虑个体特性差异为前提的。

居民健康损失核算方面, 目前主要是依据流行病学理论方法, 通过追踪大气污染物和样本人群的健康变化状况, 以此确定两者之间的暴露响应系数, 在此基础上推算特定区域居民遭受的健康损失量<sup>[30~32]</sup>。下面将从大气污染物类别、健康终端选取和暴露响应系数确定 3 个方面展开阐述。从大气污染物类别来看, 学者们最初关注 SO<sub>2</sub> 的健康危害, 随后逐渐转移到 NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 上来, 随着霾成为当下社会的热点话题, 学者们意识到 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 的健康危害更大, 研究的兴趣点也转移到 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 对居民健康影响方面<sup>[13,33,34]</sup>。健康终端选取方面, 最初研究主要探讨大气污染物与死亡率的变化关系, 随着流行病研究案例的增多, 研究大气污染物和分项健康终端对应的死亡或发病关系成为主流<sup>[35~38]</sup>。暴露响应系数确定是核算居民健康损失的关键, 也是开展健康损失价值评估及不同污染物控制情景下潜在健康收益分析的前提, 表 1 列举出部分暴露响应系数实证研究结果。从中发现, 早期



暴露响应系数主要来自发达国家的流行病实证研究,随着研究案例的增多,使得 Meta 方法被广泛应用于求取案例区以外的暴露响应系数成为可能.与此同时,由于中国流行病研究案例匮乏,导致国内研究多基于国外流行病案例,采用 Meta 方法求取大气污染物与特定健康终端之间的暴露响应系数<sup>[36]</sup>.然而,中国与西方国家在产业结构、能源构

成和环保投入等方面的差异决定着中国大气污染也与西方存在较大差别.从这个角度来看,依据国外案例求取的暴露响应系数存在着不确定性<sup>[34]</sup>.部分学者已经注意到这个问题,于是从统计学视角出发研究空气中总悬浮颗粒物(TSP)对居民平均预期寿命的影响,得出大气污染造成中国北方地区居民预期寿命比南方地区缩短 5.5 a 的结论<sup>[39]</sup>.

表 1 大气污染物与健康终端之间暴露响应系数的实证研究

| Table 1 Empirical study of exposure response coefficient between atmospheric pollution and health terminal |                       |         |                                                                                               |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 污染物                                                                                                        | 研究区域/年份               | 确定依据    | 暴露响应关系                                                                                        | 文献   |
| SO <sub>2</sub>                                                                                            | 上海市/1990              | 统计回归    | 浓度每增加 0.01 mg·m <sup>-3</sup> , 呼吸系统疾病死亡率增加 5%                                                | [19] |
|                                                                                                            | 北京市/2003              | 流行病研究   | 浓度每增加 10 μg·m <sup>-3</sup> , 心血管疾病死亡率增加 0.40%                                                | [40] |
| NO <sub>2</sub>                                                                                            | 日本/1983 ~ 1985        | 流行病研究   | 浓度每增加 10 × 10 <sup>-9</sup> , 肺癌死亡率上升 1.17%                                                   | [16] |
|                                                                                                            | 北京市/2011              | Meta 分析 | 浓度每增加 0.01 mg·m <sup>-3</sup> , 心血管和呼吸系统疾病死亡人数增加 0.004 8% 和 0.003 9%                          | [41] |
| TSP                                                                                                        | 中国/1990-2001          | Meta 分析 | 浓度每增加 100 μg·m <sup>-3</sup> , 慢性总死亡率增加 1.08%, 慢性支气管炎和肺气肿死亡风险增加 1.30% 和 1.59%                 | [35] |
|                                                                                                            | 中国 90 座城市/1981 ~ 2000 | 统计回归    | 浓度每增加 100 μg·m <sup>-3</sup> , 死亡率增加 3%, 平均预期寿命减少 0.52 a                                      | [39] |
| PM <sub>10</sub>                                                                                           | 中国/1990 ~ 2008        | Meta 分析 | 浓度每增加 10 μg·m <sup>-3</sup> , 人群急性死亡率、呼吸系统疾病和心血管疾病死亡率增加 0.38%、0.65% 和 0.40%                   | [36] |
|                                                                                                            | 中国 113 个城市/2006       | Meta 分析 | 浓度每增加 10 μg·m <sup>-3</sup> , 早逝、慢性支气管炎、内科门诊、心血管疾病和呼吸系统疾病住院增加 4.29%、4.50%、0.90%、0.70% 和 0.85% | [20] |
| PM <sub>2.5</sub>                                                                                          | 美国 6 个城市/1977 ~ 1993  | 流行病研究   | 浓度每增加 10 μg·m <sup>-3</sup> , 死亡率上升 14%                                                       | [14] |
|                                                                                                            | 中国京津冀地区/2009          | Meta 分析 | 浓度每增加 10 μg·m <sup>-3</sup> , 呼吸疾病和心血管疾病住院人数增加 1.09% 和 0.68%                                  | [42] |
| O <sub>3</sub>                                                                                             | 美国 96 个区域/1977 ~ 2000 | 流行病研究   | 浓度增加 10 × 10 <sup>-9</sup> , 呼吸系统疾病死亡率上升 1.04%                                                | [31] |
|                                                                                                            | 加拿大/1991 ~ 2006       | 流行病研究   | 浓度每增加 5%, 死亡率上升 1.075%                                                                        | [17] |

健康损失的经济代价评估是指对大气污染物引发的健康损失量进行货币估计,以便能够直观认知大气污染给经济发展带来的不利影响<sup>[43]</sup>.当前研究主要集中在健康损失的直接和间接经济代价评估这 2 个方面.其中,直接经济代价是指大气污染造成居民自身直接经济损失,包括早逝经济损失、治病费用支出以及误工收入损失.间接经济代价则是指大气污染诱发劳动力供应和医疗支出费用变化而对宏观国民经济产生的冲击<sup>[44]</sup>.直接经济代价评估通常可分为以下步骤:首先根据暴露响应系数核算特定健康终端对应的损失量,其次,借助人力资本法(HCA)、支付意愿法(WTP)和疾病成本法(COI)等对居民健康损失量进行货币估计.需要指出的是,学者们通常借助 HCA 或 WTP 法计算早逝经济损失,采用 COI 法计算治病产生的医疗费用,因治病而造成的误工损失通常也采用 HCA 法计算.其中,住院费用支出由对应健康终端单位人次平均诊疗费用乘以平均住院天数求得,门诊治疗费用由对应健康终端单位人次诊疗费用乘以门诊总人数求得;因治病造成的误工损失则采用不同健康终端发病对应的平均住院天数乘以每天的人均 GDP<sup>[45]</sup>.

人是物质财富的创造者,在社会经济活动中发挥主导性作用,同时产业间的关联性特征又决定着发病与死亡人群变化最终会反馈到宏观经济层面.间接经济代价评估主要包括 3 个步骤,除前 2 个步骤与直接经济代价评估完全相同外,间接经济代价评估还需依据投入产出表,采用投入产出模型(I-O)或可计算的一般均衡模型(CGE)将大气污染物造成的劳动力和医疗费用变化数据等代入,以此估算大气污染造成的宏观经济损失<sup>[46]</sup>.

控制大气污染物的潜在健康收益方面,众多国家或组织纷纷意识到大气污染的健康危害,于是出台或修订更为严格的空气质量控制标准<sup>[47]</sup>.在此背景下,学术界也开展不同污染物浓度控制情景下居民健康收益方面的研究,虽然不同地区模拟结果相差甚大,但毫无疑问均证实削减大气污染物能够带来巨大的健康收益<sup>[21,33]</sup>.当然,也有部分学者尝试借鉴健康损失经济代价评估的思路,采用货币化手段量化削减大气污染的健康收益,同样说明削减大气污染物可以获得极大的经济收益<sup>[42]</sup>.以上开展的健康收益分析大多是基于不同国家或组织的空气质量控制标准为前提的,强调的是区域大气污染

物浓度假定被控制或削减到同一浓度水平下的理想化状态,现实中由于经济发展、产业政策、能源构成及环保投入等因素千差万别,导致不同地区削减大气污染物的能力也不尽相同,如若采用统一的污染物浓度控制标准,势必造成污染重灾区由经济发达地区向欠发达地区转移,导致“污染天堂假说”情形的出现<sup>[48~49]</sup>。有鉴于此,部分学者开始将关注重点转向大气污染物削减分配方面,强调削减分配过程应在满足区域总体目标的前提下,因地制宜确定区域内部单元的浓度控制目标,提出不同原则导向下的大气污染物削减分配方案<sup>[50~53]</sup>。

## 1.2 微观个体层面

微观个体层面的研究认为应从人的生理差异、行为偏好、自然环境和社会经济等属性出发,着重探讨大气污染胁迫下居民个体遭受的健康损失差异,更多强调的是居民个体具备主动降低或缓解大气污染健康危害的能力。

暴露于大气污染状态下的居民不可避免地承受着大气污染给健康带来的袭扰,但是由于以下因素的差异,导致居民个体抵御大气污染健康危害的能力也各不相同。一是个体生理差异,包括种族、性别和年龄等。美国心脏协会研究证实黑人比其他种族的人群更多暴露于大气污染,大气中的毒素会导致黑人患心脏病的风险比白人高出 25%<sup>[54]</sup>。世界卫生组织(WHO)指出中国每 10 万人中就有 161 人死于大气污染,且男性比例高于女性<sup>[55]</sup>。另外,还有学者发现老人和儿童是易受大气污染危害的脆弱人群,其中老人构成了心血管疾病早逝的主要人群,而儿童则构成呼吸系统疾病早逝的主要群体<sup>[41]</sup>。二是居民行为偏好,包括职业选择、出行方式、锻炼习惯、饮食搭配和健康意识等。职业选择与居民室内外活动时长紧密相关,2011 年 WHO 发布的《室内空气污染与健康》指出,室内空气污染高出室外 5~10 倍,每年全球有约 200 万人死于室内空气污染,死于室外空气污染的人数在 130 万左右<sup>[56]</sup>。孙斌栋等<sup>[57]</sup>认为出行方式由私人机动车向公交系统、体力型交通转变有助于提升居民健康水平,并据此提出改善社区设施可达性和减少居民个体机动化出行的建议。吴丹等<sup>[58]</sup>对比南京市不同交通工具内部的颗粒物浓度,发现乘坐地铁遭受的空气污染程度显著低于乘坐私家车和出租车。但是,也有学者认为出行方式对健康的作用会随空气质量变化而变化,当空气质量状况较好时,步行或骑行带来的健康收益要优于乘坐私家车或出租车;当空气质量状况较差时,情况则恰好相反<sup>[59]</sup>。此外,具有锻炼习惯或注重膳食搭配的人群往往体质

较好,因而抵御大气污染健康危害的能力较强<sup>[60]</sup>。健康意识也关系着居民防范大气污染健康危害的能力,具有健康防护意识的居民可通过乘坐地铁、佩戴口罩及使用空气净化装置等降低大气污染的健康危害<sup>[61]</sup>。三是自然条件差异,包括大气污染物浓度、气象条件、地形因素和地表覆被等。Cuijpers 等<sup>[62]</sup>研究夏季烟雾暴露对儿童呼吸系统的急性影响,发现污染越严重地区儿童患过敏性病症的几率越高。气象条件在大气污染形成过程中发挥重要作用,有研究表明温度、风速、日照、气压和降水等均会对大气污染起加剧或缓解作用<sup>[63~64]</sup>。周亮等<sup>[65]</sup>分析了 2001~2011 年中国 PM<sub>2.5</sub> 的时空演化特征,发现 PM<sub>2.5</sub> 污染严重区域集中在华北与长江中下游地区,具有明显的低地平原指向性特征。另外,还有研究表明植物能够削减大气污染物浓度,所以植被覆盖较高地区的大气污染程度往往低于植被覆盖较低的区域<sup>[66]</sup>。四是社会经济水平,反映在居住环境、收入水平、教育程度和医疗卫生等方面。居住环境包括土地利用混合度、距公交或地铁站距离及社区绿化状况等,这些因素关系着居民出行、娱乐和休闲方式的选择,最终会反馈到个体健康层面<sup>[57]</sup>。收入水平决定着居民的生活质量,通常情况下高收入人群减少大气污染健康危害的支付意愿要强于中低收入人群<sup>[61]</sup>。教育水平影响个体认知大气污染健康危害的能力,高学历人群大多具有较强的防范意识,因而遭受的健康损失相对较小<sup>[29]</sup>。医疗条件对改善大气污染诱发的致病或致死效应具有重要作用,配套的社会保障政策使得广大人群尤其是低收入群体接受医疗救助成为可能,所以医疗条件和社会保障也会影响居民个体遭受的健康损失差异<sup>[67]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源及处理

开展大气污染对居民健康影响研究的前提在于获取大气污染物浓度和特定健康终端对应的发病与死亡数据。大气污染物数据来源主要有以下途径:一是政府部门发布的空气质量实测数据,这类数据通常比较权威且在研究中得到广泛应用。发达国家的空气质量监测工作已相当完善,然而,发展中国家的监测工作尚处于起步阶段,存在着时序过短、站点设置不合理、部分监测指标缺失及数据可获取性差等问题,这在不同程度上影响着评价结果<sup>[68]</sup>。二是研究机构公布的大气污染物浓度数据,这类数据多是由学者结合地面监测站点数据和土地利用类型数据对卫星遥感影像进行校正,推算缺失年份或



地区的大气污染物浓度. 该类数据优点在于有效解决部分年份或地区的数据缺失问题, 为研究长时序大气污染物浓度变化提供了可能, 缺点在于受云层反射等因素影响部分地区的数据精度偏低<sup>[69]</sup>. 三是个人实测获取的污染物数据, 这类数据利于精准反映微观尺度的污染物变化, 缺点则在于获取数据的成本较高且容易受到主观因素的干扰<sup>[58]</sup>. 健康终端数据主要来自以下方面: 一是政府部门发布的统计资料, 如人口普查资料、卫生统计年鉴和疾病监测资料等<sup>[35]</sup>, 该类数据适用于研究宏观区域层面居民的健康变化状况. 二是 WHO 公布的全球疾病负担报告 (GBD), 该报告详细提供全球 100 多个国家和地区居民的死亡与发病成因, 与政府部门的数据相比, 该数据覆盖面大, 内容翔实, 标准相对统一. 三是医院调研获取的健康数据. 较前两类数据而言, 这类数据通常获取难度较大, 样本容量偏小<sup>[29]</sup>. 此外, 评估健康损失的经济代价时还需用到以下数据: 一是统计数据, 如投入产出表、人均国内生产总值、平均诊疗费用和住院日数等; 二是调研数据, 如居民为减轻大气污染健康危害的支付愿意等<sup>[42,46]</sup>.

2.2 主要研究方法

早期大气污染对居民健康的影响研究以定性方法为主, 重点在于探讨大气污染致病或致死效应的生物学机制<sup>[23]</sup>. 随着学科融合水平的提升, 定量测

度大气污染的健康及经济损失成为学者关注的热点 (表 2). 确定暴露响应系数时, 经常用到的是 Meta 分析和流行病学研究方法. 测算居民健康损失量时常用 Poisson 回归模型, 但对于污染物安全阈值的设定尚无统一标准. 评估健康损失的直接经济代价时, COI 主要被用于求取居民的医疗费用支出, WTP 和 HCA 则用来评估居民早逝和误工造成的经济损失, 但有学者认为 WTP 是以问卷调查为基础的, 因此在样本选取过程中存在着主观随意性; 而采用 HCA 评估早逝或误工的经济损失时存在着伦理学缺陷, 因此有学者主张采用修正的人力资本法进行估算<sup>[70]</sup>. 评估健康损失的间接经济代价时, 常以国民经济投入产出表为依据, 采用 I-O 或 CGE 模型将劳动力供应和医疗支出费用变化等数据代入模型, 以此估算大气污染对宏观国民经济产生的冲击<sup>[71]</sup>. 大气污染物削减分配方面, 用到的有层次分析法、熵权法和环境基尼系数等<sup>[53]</sup>. 归纳来看, 这些方法均存在着各自的优缺点和特定适用范围, 不同方法的灵活组合极大丰富着大气污染健康效应方面的研究内容. 另外, 运用这些方法评估大气污染的健康和经济损失时, 得到的结果也不尽相同, 有的研究能够对现存结果起印证作用, 有的则与之相反, 这主要是由研究区域选取、大气污染物类型、健康终端选择和阈值标准设定等因素造成的.

表 2 大气污染对居民健康影响的主要评估方法  
Table 2 Main evaluation methods on the health effects of atmospheric pollution

| 研究方法               | 方法概述                                                                                                                                             | 优点                         | 缺点                       | 文献               |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------|
| Meta-analysis      | 采用定量合成手段对收集文献进行统计处理                                                                                                                              | 解决流行病学案例匮乏的缺陷              | 忽视污染水平和医疗条件等因素的差异        | [18,72]          |
| Poisson regression | $\Delta I = I \times \{1 - 1/\exp[\beta(c - c_0)]\}$ 式中, $\Delta I$ 为健康损失量; $I$ 为实际大气污染物的健康风险; $\beta$ 为暴露响应系数; $c$ 为实际大气污染物浓度; $c_0$ 为大气污染物安全阈值 | 提供较为精准计算大气污染健康损失的方法        | 暴露响应系数和大气污染物安全阈值设定存在不确定性 | [17,31,37,38,42] |
| HCA                | 强调大气污染对体现在劳动者身上资本所造成的损失                                                                                                                          | 用来核算大气污染诱发早逝和误工损失          | 暗示富人生命更有价值, 儿童、老年人价值低    | [13,41]          |
| WTP                | 基于调查手段估测非市场物品或服务价值的方法                                                                                                                            | 衡量人力资本时兼顾被调查人群偏好           | 受调查地点、人群等因素影响, 存在随意性     | [42,70]          |
| COI                | 适用于计算疾病引起的门诊、住院和药费等                                                                                                                              | 细化大气污染引发疾病的经济损失            | 难以核算某些慢性疾病的经济损失          | [15,43]          |
| I-O 模型             | 依据投入产出表建立线性关系描述大气污染对经济的冲击                                                                                                                        | 对数据要求低、运用灵活方便              | 未将价格机制引入, 难以模拟混合经济       | [44]             |
| CGE 模型             | 在经济各部分建立数量联系, 考察劳动力和医疗支出费用变化对宏观经济影响                                                                                                              | 能够模拟混合经济下不同产业、经济主体对大气污染的反映 | 忽视技术进步、企业竞争和劳动力非自愿失业等因素  | [12,46]          |

3 存在问题

(1) 关注单一类型大气污染物的健康危害, 缺乏同时考虑多种大气污染物对居民健康的影响. 随

着城市化推进、机动车普及和能源消耗量增长, 复合型大气污染特征日益凸显. 在此背景下, 居民往往同时受到多种大气污染物困扰, 大气中的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  及颗粒物等均会给居民带来健康危害, 因

此在评价单一类型大气污染物诱发居民健康损失的过程中存在着忽略其它类型大气污染物对居民健康交叉影响的缺陷,而这会错估某些特定类型大气污染物对居民健康的影响。

(2)宏观区域层面研究集中在单一城市层面,微观个体层面研究以定性为主且发展滞后。众所周知,大气污染具有极强的空间传输特性,因此开展大的区域范围内不同城市健康损失差异研究对于明晰大气污染危害、识别暴露人群分布及推进区域大气污染联防联控等具有重要参考价值。与宏观区域层面强调居民对大气污染危害的被动响应不同,基于微观个体视角探究居民健康损失差异有助于针对特定群体(妇女、儿童、老年人和高收入群体等)定制个性化防范策略。

(3)较多聚焦大气污染诱发的健康及经济损失,对大气污染物的削减调控研究重视不够。定量评估大气污染胁迫下居民遭受健康或经济损失的目的在于为政府部门进行大气污染防治决策的成本效益分析提供科学依据,而污染物削减分配则是实现这一目标的有效途径。然而,现有研究仍大量集中在居民健康及经济损失核算方面,少有的大气污染物削减调控研究亦是围绕区域内部单元污染物浓度被削减到同一理想水平而展开的,这在不同程度上弱化着研究结果的应用性。

(4)数据可得性、阈值参数设置和健康终端选取等也会造成评价结果的不确定性。由于国内流行病实证研究案例匮乏,直接借鉴国外暴露响应系数结果会导致健康损失核算产生偏差。采用泊松回归模型测度居民健康损失量时需要确定污染物安全阈值,事实上,不仅不同类型大气污染物安全阈值不同,即便同类型污染物也无相同阈值标准,而这会影响最终评价结果。考察大气污染健康危害时多从心血管疾病、呼吸系统疾病和肺癌等入手,存在着忽略其它健康终端的缺陷。

#### 4 未来展望

(1)加强国内不同类型大气污染物与居民特定健康终端的流行病案例研究。流行病案例研究是目前确定暴露响应系数相对较为科学的方法,它可以最大限度避免不同类型大气污染物对居民健康造成的交叉影响,也是顺利进行多种大气污染物健康效应评估的前提。由于中国流行病案例匮乏,致使现有研究多采用元分析或统计回归方法求取暴露响应系数,然而,中国与西方国家大气污染方面的差异制约着国外流行病研究案例的普适性,因此未来应积极开展国内流行病案例研究。

(2)更加注重宏观区域与微观个体层面健康损失差异研究的定量融合。长期以来,宏观区域与微观个体层面居民健康损失差异研究割裂现象明显,但两者对于国家大气污染防治和卫生健康政策制定具有重要意义。尤其是近年来随着遥感数据、站点数据、调研数据和居民健康终端数据可获取性增强,新技术和新方法不断涌现,初步具备在大的地域范围内开展特定居民群体遭受健康损失差异研究的基本条件,这有助于探寻居民健康损失的地域分异规律,深刻揭示其驱动作用机制。

(3)聚焦居民健康视角下大气污染物浓度的削减调控研究。大气污染极大危害着人群的生命健康和财产安全,在未来相当长的时期内将是国家环境污染防治的重点,未来研究应立足于居民健康损失核算的基础上,将居民健康与大气污染物削减调控结合起来,提出健康收益视角导向下区域内部单元因地制宜的大气污染物浓度削减调控目标,这不仅能够给区域带来较大的健康和经济收益,而且也能政府部门决策提供行之有效的方案,进而减轻大气污染诱发的健康及经济损失。

(4)重视大气污染物和居民健康终端数据库建设。大气污染的健康危害同时存在长短期效应,鉴于国内大气污染监测数据时序过短,所以建立长时序大气污染物数据库不仅是进行长短期健康效应评估的前提,而且也能为综合评价多种大气污染物的健康损失奠定基础。另外,政府和相关组织公布的居民健康终端数据多是以年为单位进行统计的,忽略居民健康损失量的年内变化特征,这给大气污染的急性健康效应评估带来巨大障碍,因此建立精细化的居民健康终端数据也刻不容缓。

#### 参考文献:

- [1] Ciocco A, Thompson D J. A follow-up of Donora ten years after: methodology and findings[J]. *American Journal of Public Health and the Nation's Health*, 1961, **51**(2): 155-164.
- [2] Ajmal M, Tarar M A, Arshad M I, et al. Air pollution and its effect on human health: a case study in dera ghazi khan urban areas, Pakistan[J]. *Journal of Environment and Earth Science*, 2016, **6**(9): 87-93.
- [3] 刘春兰, 关婧, 李铮, 等. 世界城市空气污染治理与空气质量研究[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.  
Liu C L, Guan J, Li Z, et al. Study on air pollution control and air quality management in world cities[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [4] Lin G, Fu J Y, Jiang D, et al. Spatio-temporal variation of PM<sub>2.5</sub> 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.
- [5] Xu L J, Zhou J X, Guo Y, et al. Spatiotemporal pattern of air quality index and its associated factors in 31 Chinese provincial capital cities[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, **10**



- (5): 601-609.
- [6] Wu J N, Zhang P, Yi H T, *et al.* What causes haze pollution? An empirical study of PM<sub>2.5</sub> concentrations in Chinese cities[J]. Sustainability, 2016, **8**(2): 132.
  - [7] 李名升, 张建辉, 张殷俊, 等. 近 10 年中国大气 PM<sub>10</sub> 污染时空格局演变[J]. 地理学报, 2013, **68**(11): 1504-1512.  
Li M S, Zhang J H, Zhang Y J, *et al.* Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM<sub>10</sub> pollution in China from 2002 to 2012 [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, **68**(11): 1504-1512.
  - [8] Hu J L, Wang Y G, Ying Q, *et al.* Spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **95**: 598-609.
  - [9] Zhao S P, Yu Y, Yin D Y, *et al.* Annual and diurnal variations of gaseous and particulate pollutants in 31 provincial capital cities based on in situ air quality monitoring data from China National Environmental Monitoring Center[J]. Environment International, 2016, **86**: 92-106.
  - [10] 中华人民共和国环境保护部. 2013 中国环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526564151497131.pdf>, 2014-05-27.
  - [11] 谢志祥, 秦耀辰, 李亚男, 等. 基于 PM<sub>2.5</sub> 的中国雾霾灾害风险评价[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(12): 4503-4510.  
Xie Z X, Qin Y C, Li Y N, *et al.* Evaluation of haze press risk in China based on PM<sub>2.5</sub>[J]. 2017, **37**(12): 4503-4510.
  - [12] 王桂芝, 武灵艳, 陈纪波, 等. 北京市 PM<sub>2.5</sub> 污染健康经济效应的 CGE 分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2779-2785.  
Wang G Z, Wu L Y, Chen J B, *et al.* A CGE-based analysis on PM<sub>2.5</sub>-induced health-related economic effect in Beijing [J]. China Environment Science, 2017, **37**(7): 2779-2785.
  - [13] Ridker R G. Economic costs of air pollution: studies in measurement[M]. New York: F. A. Praeger, 1967.
  - [14] Dockery D W, Pope C A, Xu X P, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities[J]. New England Journal of Medicine, 1993, **329**(24): 1753-1759.
  - [15] Seethaler R K, Herry M, Sommer H, *et al.* Economic costs of air pollution-related health impacts: An impact assessment project of Austria, France and Switzerland [J]. Clean Air and Environmental Quality, 2003, **37**(1): 35-43.
  - [16] Katanoda K, Sobue T, Satoh H, *et al.* An association between long-term exposure to ambient air pollution and mortality from lung cancer and respiratory diseases in Japan [J]. Journal of Epidemiology, 2011, **21**(2): 132-143.
  - [17] Crouse D L, Peters P A, Hystad P, *et al.* Ambient PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> exposures and associations with mortality over 16 years of follow-up in the Canadian census health and environment cohort[J]. Environment Health Perspectives, 2015, **123**(11): 1180-1186.
  - [18] Aunan K, Pan X C. Exposure-response functions for health effects of ambient air pollution applicable for China- a Meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2004, **329**(1-3): 3-16.
  - [19] 过孝民, 张慧勤, 李平. 我国环境污染造成经济损失估算[J]. 中国环境科学, 1990, **10**(1): 51-59.  
Guo X M, Zhang H Q, Li P. The calculation of economic losses from environment pollution in China [J]. China Environment Science, 1990, **10**(1): 51-59.
  - [20] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东, 等. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(3): 410-415.  
Chen R J, Chen B H, Kan H D, *et al.* A health-based economic assessment of particulate air pollution in 113 Chinese cities[J]. China Environment Science, 2010, **30**(3): 410-415.
  - [21] Song Y S, Wang X K, Maher B A, *et al.* The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 1312-1318.
  - [22] Han L J, Zhou W Q, Li W F, *et al.* Global population exposed to fine particulate pollution by population increase and pollution expansion[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2017, **10**(10): 1221-1226.
  - [23] 杜鹏瑞, 杜睿, 任伟珊. 城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2815-2827.  
Du P R, Du R, Ren W S. Research progress on toxicological characteristics and mechanisms of urban atmospheric particulate matters[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2815-2827.
  - [24] Churg A, Brauer M, del Carmen Avila-Casado M, *et al.* Chronic exposure to high levels of particulate air pollution and small airway remodeling [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, **111**(5): 714-718.
  - [25] Thurston G D, Ahn J, Cromar K R, *et al.* Ambient particulate matter air pollution exposure and mortality in the NIH-AARP diet and health cohort [J]. Environmental Health Perspectives, 2016, **124**(4): 484-490.
  - [26] Pope III C A, Ezzati M, Cannon J B, *et al.* Mortality risk and PM<sub>2.5</sub> air pollution in the USA: an analysis of a national prospective cohort [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2018, **11**(3): 245-252.
  - [27] Hoek G, Krishnan R M, Beelen R, *et al.* Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review[J]. Environmental Health, 2013, **12**(1): 43.
  - [28] GBD 2015 DALYs and HALE Collaborators. Global, regional, and national disability-adjusted life years (DALYs) for 306 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE) for 188 countries, 1990- 2013: quantifying the epidemiological transition[J]. Lancet, 2015, **386**(10009): 2145-2191.
  - [29] 马静, 柴彦威, 符婷婷. 居民时空行为与环境污染暴露对健康影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, **36**(10): 1260-1269.  
Ma J, Chai Y W, Fu T T. Progress of research on the health impact of people's space-time behavior and environmental pollution exposure[J]. Progress in Geography, 2017, **36**(10): 1260-1269.
  - [30] Samet J M, Dominici F, Currier I C, *et al.* Fine particulate air pollution and mortality in 20 U. S. cities, 1987-1994 [J]. New England Journal of Medicine, 2000, **343**(24): 1742-1749.
  - [31] Jerrett M, Burnett R T, Ma R J, *et al.* Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles[J]. Epidemiology, 2005, **16**(6): 727-736.
  - [32] Beelen R, Raaschou-nielsen O, Stafoggia M, *et al.* Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project[J]. Lancet, 2014, **383**(9919): 785-795.
  - [33] World Bank. Cost of pollution in China: economic estimates of physical damages[EB/OL]. <http://documents.worldbank.org/curated/en/782171468027560055.html>, 2007-02-01.
  - [34] Fang D, Wang Q G, Li H M, *et al.* Mortality effects assessment of ambient PM<sub>2.5</sub> pollution in the 74 leading cities of China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 1545-1552.

- [35] 阙海东, 陈秉衡. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系[J]. 环境与健康杂志, 2002, **19**(6): 422-424.  
Kan H D, Chen B H. Analysis of exposure-response relationships of air particulate matter and adverse health outcomes in China [J]. Journal of Environment and Health, 2002, **19**(6): 422-424.
- [36] 谢鹏, 刘晓云, 刘兆荣, 等. 我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(10): 1034-1040.  
Xie P, Liu X Y, Liu Z R, *et al.* Exposure-response functions for health effects of ambient particulate matter pollution applicable for China[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(10): 1034-1040.
- [37] Cheng Z, Jiang J K, Fajardo O, *et al.* Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011) [J]. Atmospheric Environment, 2013, **65**: 186-194.
- [38] Liu J, Han Y Q, Tang X, *et al.* Estimating adult mortality attributable to PM<sub>2.5</sub> exposure in China with assimilated PM<sub>2.5</sub> concentrations based on a ground monitoring network [J]. Science of the Total Environment, 2016, **568**: 1253-1262.
- [39] Chen Y Y, Ebenstein A, Greenstone M, *et al.* Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(32): 12936-12941.
- [40] 杨敏娟, 潘小川. 北京市大气污染与居民心脑血管疾病死亡的时间序列分析[J]. 环境与健康杂志, 2008, **25**(4): 294-297.  
Yang M J, Pan X C. Time-series analysis of air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China [J]. Journal of Environment and Health, 2008, **25**(4): 294-297.
- [41] 赵晓丽, 范春阳, 王予希. 基于修正人力资本法的北京市空气污染物健康损失评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, **24**(3): 169-176.  
Zhao X L, Fan C Y, Wang Y X. Evaluation of health losses by air pollution in Beijing: a study based on corrected human capital method [J]. China Population Resources and Environment, 2014, **24**(3): 169-176.
- [42] 黄德生, 张世秋. 京津冀地区控制 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康效益评估[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(1): 166-174.  
Huang D S, Zhang S Q. Health benefit evaluation for PM<sub>2.5</sub> pollution control in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(1): 166-174.
- [43] 魏国茹, 史兴民. 西安市 PM<sub>2.5</sub> 健康损害价值评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3014-3021.  
Wei G R, Shi X M. Evaluation the extent of health damage caused by PM<sub>2.5</sub> particulate in Xi'an city [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3014-3021.
- [44] 王桂芝, 顾赛菊, 陈纪波. 基于投入产出模型的北京市雾霾间接经济损失评估[J]. 环境工程, 2016, **34**(1): 121-125.  
Wang G Z, Gu S J, Chen J B. Assessment of the indirect economic loss caused by heavy haze in Beijing based on input-output model [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(1): 121-125.
- [45] 曹彩虹, 韩立岩. 雾霾带来的社会健康成本估算[J]. 统计研究, 2015, **32**(7): 19-23.  
Cao C H, Han L Y. The assessment on the social health costs caused by fog and haze [J]. Statistical Research, 2015, **32**(7): 19-23.
- [46] 谢杨, 戴瀚程, 花岡達也, 等. PM<sub>2.5</sub> 污染对京津冀地区人群健康影响和经济影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, **26**(11): 19-27.  
Xie Y, Dai H C, Hanaoka T, *et al.* Health and economic impacts of PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. China Population Resources and Environment, 2016, **26**(11): 19-27.
- [47] 何书申, 赵兵涛, 俞致远. 环境空气质量国家标准的演变与比较[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(4): 50-55.  
He S S, Zhao B T, Yu Z Y. Development and comparison of national ambient air quality standards in China [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(4): 50-55.
- [48] He J. Pollution haven hypothesis and environmental impacts of foreign direct investment: the case of industrial emission of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) in Chinese provinces [J]. Ecological Economics, 2006, **60**(1): 228-245.
- [49] Druckman A, Jackson T. Measuring resource inequalities: the concepts and methodology for an area-based Gini coefficient [J]. Ecological Economics, 2008, **65**(2): 242-252.
- [50] Heil M T, Wodon Q T. Inequality in CO<sub>2</sub> emissions between poor and rich countries [J]. Journal of Environment & Development, 1997, **6**(4): 426-452.
- [51] List J A. Have air pollutant emissions converged among U. S. regions? Evidence from unit root tests [J]. Southern Economic Journal, 1999, **66**(1): 144-155.
- [52] 王奇, 陈小鹭, 李菁. 以二氧化硫排放分析我国环境公平状况的定量评估及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, **18**(5): 118-122.  
Wang Q, Chen X L, Li J. Evaluation on environmental factors in China and its factor: take environmental resources consumption as example [J]. China Population Resources and Environment, 2008, **18**(5): 118-122.
- [53] 蒋洪强, 张静, 卢亚灵, 等. 基于主体功能区约束的大气污染物总量控制目标分配研究[J]. 地域研究与开发, 2015, **34**(3): 137-142.  
Jiang H Q, Zhang J, Lu Y L, *et al.* Control target assignment of air pollutant emission considering the environmental effects of main functional regions [J]. Areal Research and Development, 2015, **34**(3): 137-142.
- [54] American Heart Association. Black Americans are exposed to more air pollution-driving up their heart disease risk by 25% [EB/OL]. <http://www.dailymail.co.uk/health/article-5510751/Black-Americans-exposed-pollution-raising-heart-risk-25.html>, 2018-05-16.
- [55] World Health Organization. World Health Statistics 2017: Monitoring health for the SDGs [EB/OL]. [http://www.who.int/gho/publications/world\\_health\\_statistics/2017/en/](http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2017/en/), 2017-05-18.
- [56] World Health Organization. Policy brief- indoor air pollution: environment and health linkages [EB/OL]. [http://news.ifeng.com/shendu/xmzk/detail\\_2013\\_03/21/23363828\\_0.shtml](http://news.ifeng.com/shendu/xmzk/detail_2013_03/21/23363828_0.shtml), 2013-03-21.
- [57] 孙斌栋, 阎宏, 张婷麟. 社区建成环境对健康的影响——基于居民个体超重的实证研究[J]. 地理学报, 2016, **71**(10): 1721-1730.  
Sun B D, Yan H, Zhang T L. Impact of community built environment on residents' health: A case study on individual overweight [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(10): 1721-1730.
- [58] 吴丹, 朱嫣红, 夏俊荣, 等. 南京市不同交通工具内部颗粒物污染状况的研究[J]. 环境科学与技术, 2016, **39**(12): 117-123.  
Wu D, Zhu Y H, Xia J R, *et al.* The investigation of particulate



- pollution in different vehicles of Nanjing [J]. Environmental Science and Technology, 2016, **39**(12): 117-123.
- [59] Huang J, Deng F R, Wu S W, *et al.* Comparisons of personal exposure to PM<sub>2.5</sub> and CO by different commuting modes in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2012, **425**: 52-59.
- [60] Li F Z, Harmer P A, Cardinal B J, *et al.* Built environment, adiposity, and physical activity in adults aged 50-75 [J]. American Journal of Preventive Medicine, 2008, **35**(1): 38-46.
- [61] 张延吉, 秦波, 唐杰. 基于倾向值匹配法的城市建成环境对居民生理健康的影响 [J]. 地理学报, 2018, **73**(2): 333-345.
- Zhang Y J, Qin B, Tang J. The impact of urban built environment on residential physical health: based on propensity score matching [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(2): 333-345.
- [62] Cuijpers C E J, Swaen G M H, Wesseling G, *et al.* Acute respiratory effects of summer smog in primary school children [J]. Toxicology Letters, 1994, **72**(1-3): 227-235.
- [63] Yang Q Q, Yuan Q Q, Li T W, *et al.* The relationships between PM<sub>2.5</sub> and meteorological factors in China: seasonal and regional variations [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, **14**(12): 1510.
- [64] Cai W J, Li K, Liao H, *et al.* Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change [J]. Nature Climate Change, 2017, **7**(4): 257-262.
- [65] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征及驱动因素解析 [J]. 地理学报, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in China between 2000 and 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [66] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate (PM<sub>2.5</sub>) in China [J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 183-187.
- [67] 杨林生, 李海蓉, 李永华, 等. 医学地理和环境健康研究的主要领域与进展 [J]. 地理科学进展, 2010, **29**(1): 31-44.
- Yang L S, Li H R, Li Y H, *et al.* Progress of medical geography and environmental health studies [J]. Progress in Geography, 2010, **29**(1): 31-44.
- [68] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 空气质量监测网络发展现状与趋势分析 [J]. 中国环境监测, 2007, **23**(2): 113-118.
- Zhong L J, Zheng J Y, Lei G Q, *et al.* Analysis of current status and trends of air quality monitoring networks [J]. Environmental Monitoring in China, 2007, **23**(2): 113-118.
- [69] Shi Y S, Matsunaga T, Yamaguchi Y, *et al.* Long-term trends and spatial patterns of satellite-retrieved PM<sub>2.5</sub> concentrations in South and Southeast Asia from 1999 to 2014 [J]. Science of the Total Environment, 2018, **615**: 177-186.
- [70] Hammit J K, Zhou Y. The economic value of air-pollution-related health risks in China: A contingent valuation study [J]. Environmental and Resource Economics, 2006, **33**(3): 399-423.
- [71] Chen S M, He L Y. Welfare loss of China's air pollution: How to make personal vehicle transportation policy [J]. China Economic Review, 2014, **31**: 106-118.
- [72] 钱孝琳, 阚海东, 宋伟民, 等. 大气细颗粒物污染与居民每日死亡关系的 Meta 分析 [J]. 环境与健康杂志, 2005, **22**(4): 246-248.
- Qian X L, Kan H D, Song W M, *et al.* Meta-analysis of association between air fine particulate matter and daily mortality [J]. Journal of Environment and Health, 2005, **22**(4): 246-248.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                          |                                                              |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017 .....                                                      | YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>        | (1011) |
| Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014 .....                        | LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>      | (1024) |
| Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter .....                                                                    | WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>            | (1035) |
| Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province .....                                                                                                   | FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i> | (1043) |
| Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City .....                  | ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>             | (1052) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Heating and Non-heating Periods in Shenyang .....                                                             | ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>       | (1062) |
| Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment .....                                   | YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>   | (1071) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM <sub>2.5</sub> During Four Seasons in Yantai City .....                                                                 | LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>            | (1082) |
| Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Changzhou .....                                                                                 | GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>              | (1091) |
| Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China .....   | CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>            | (1101) |
| Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations .....                                                                    | QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>               | (1111) |
| Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China .....                                                                                                 | HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>     | (1120) |
| Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation .....                                                                | ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying                             | (1132) |
| Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan .....                                                                                               | WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>         | (1143) |
| Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China .....                                                                       | GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>               | (1152) |
| Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone .....                                                                                              | HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>         | (1163) |
| Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City .....                                                                | LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>               | (1172) |
| Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu .....                                                           | HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>           | (1179) |
| Diffusive CO <sub>2</sub> Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model .....                                       | ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>       | (1188) |
| Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea .....                                                     | LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>    | (1198) |
| Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir .....                                                                | LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>                  | (1209) |
| Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China .....                                                                                                                         | LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>         | (1217) |
| Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring .....                                                                               | WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>       | (1222) |
| Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River .....                                                             | HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>          | (1236) |
| Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City .....                                                                          | WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>             | (1245) |
| Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir .....                                                              | ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>                 | (1252) |
| Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China .....                                                                                            | LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>                 | (1261) |
| Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....                                                                            | SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>                 | (1270) |
| Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland .....                       | HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>           | (1280) |
| Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials .....                                                                                                   | HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>            | (1287) |
| Preparation of BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants .....           | ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>      | (1295) |
| High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source .....                                               | WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>             | (1302) |
| Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite .....                                                                                                              | DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>   | (1310) |
| Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar .....                                                                                | YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>             | (1318) |
| Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....                                                                         | CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>           | (1328) |
| Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions .....                | YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>           | (1337) |
| Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant .....                                                      | WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou                     | (1347) |
| Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes .....                                                           | XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>                  | (1353) |
| Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System .....                                                                                        | LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>          | (1360) |
| Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification .....                                                                                      | LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>               | (1367) |
| Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance .....                                                                | MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>           | (1375) |
| Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times .....                                             | YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>    | (1382) |
| ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater .....                                                                                                 | LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>           | (1390) |
| Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature ..... | XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>      | (1396) |
| ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics .....                                                                                         | REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>          | (1405) |
| Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process .....                                                                                    | FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>      | (1412) |
| Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System .....                                     | LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>           | (1419) |
| Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i> .....                                                                                                               | YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>              | (1426) |
| Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron .....                                                       | NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>            | (1431) |
| Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems .....                                                              | PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>                    | (1439) |
| Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity .....                                                         | ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li                                  | (1446) |
| Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area .....                                                | LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>              | (1457) |
| Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area .....                                                 | WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>       | (1468) |
| Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management .....                                          | NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>         | (1475) |
| Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil .....                                                                       | TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>        | (1483) |
| Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....                                 | XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>       | (1491) |
| Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain .....                                                                          | WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>             | (1504) |
| Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents .....                                                                                              | QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang                         | (1512) |