

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征

秦雨¹, 张强^{2*}, 李鑫², 赵红艳², 同丹², 郑逸璇², 耿冠楠¹, 贺克斌^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 清华大学地球系统科学系, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于全国高分辨率燃煤电厂排放数据库, 利用全球-区域嵌套的大气化学伴随模式 GEOS-Chem Adjoint, 分析了全国各电网区域不同类型燃煤机组对 PM_{2.5} 污染相关健康影响的贡献。结果发现, 2010 年中国燃煤电厂大气污染物排放产生的 PM_{2.5} 污染导致 10.6 万人 (95% CI: 6.8 ~ 13.2 万人) 过早死亡, 占全国人为源 PM_{2.5} 污染相关过早死亡人数的 9.8%。其中, 小型机组和老旧机组的健康损失强度 (定义为单位发电量导致的过早死亡人数) 显著高于大型机组和新建机组。装机容量小于 100 MW 机组的健康损失强度达到 62 人·(TW·h)⁻¹, 是装机容量 600 MW 以上机组的 2.8 倍。类似地, 投运年限超过 30 a 的老旧机组的健康损失强度为 58 人·(TW·h)⁻¹, 是投运年限 5 a 以内新机组的 2.1 倍。在电网层面, 华中电网的健康损失强度较大, 达到 77 人·(TW·h)⁻¹。进一步分析跨电网区域电力输送隐含的健康损失发现, 2010 年跨电网输电导致燃煤电厂健康损失较无跨电网输电情景增加过早死亡 680 人。本研究结果表明我国应当加快小型机组和老旧机组的淘汰步伐, 降低燃煤电厂的污染健康影响, 同时通过优化区域间输电结构, 减少整体污染健康损失水平。

关键词: 燃煤电厂; 大气污染; 过早死亡; 伴随模式; 高分辨率; 电网区域

中图分类号: X503.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5289-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201804157

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants

QIN Yu¹, ZHANG Qiang^{2*}, LI Xin², ZHAO Hong-yan², TONG Dan², ZHENG Yi-xuan², GENG Guan-nan¹, HE Ke-bin^{1,2}

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the high-resolution coal-fired power plant emission database, GEOS-Chem Adjoint, a global-regional nested atmospheric chemistry model and its adjoint were applied to analyze PM_{2.5}-related premature deaths caused by the power sector in six grid regions of China due to air pollutant emissions and subsequent pollution. The results show that power sector-related PM_{2.5} pollution caused 106 000 (95% CI: 68000-132000) premature deaths in 2010, accounting for 9.8% of China's anthropogenic PM_{2.5}-related premature deaths. The health loss intensity (defined as number of premature deaths caused by a unit of power generation) of small and old units is significantly higher than that of large and new units; units with a capacity below 100 MW reach 62 people·(TW·h)⁻¹, 2.8 times that of units with a capacity above 600 MW. Similarly, the health loss intensity of units older than thirty years is 58 people·(TW·h)⁻¹, 2.1 times that of new units. From the perspective of regional grids, the health impact index of Central China is relatively large, reaching 77 people·(TW·h)⁻¹. Further analysis reveals that transregional power transmission led to a net increase of 680 premature deaths compared with the scenario without transmission in 2010. Our study implies that China should accelerate the pace of phasing out small and old units and optimize the power transmission distribution between grid regions to reduce the overall level of pollution and health losses.

Key words: coal-fired power plants; air pollution; premature death; adjoint model; high resolution; regional grids

大气环境污染已成为我国第四大健康风险因素^[1]。细颗粒物 PM_{2.5}, 即空气动力学直径小于 2.5 μm 的微粒, 与人体多种疾病相关, 可能引起呼吸道、心血管和脑血管等疾病, 甚至导致过早死亡^[2,3]。据全球疾病负担研究 (global burden of disease study, GBD)^[4] 估计, PM_{2.5} 污染在我国导致每年超过 100 万人过早死亡。电力作为我国最大的煤炭消费行业^[5], 其燃烧产生的大气污染物排放及

环境污染和健康影响受到研究者广泛关注^[6~8]。在电力行业快速发展的背景下^[9,10], 研究全国各电网区域不同类型燃煤机组对 PM_{2.5} 污染相关过早死亡的贡献, 对于中国电力行业整体减排决策制订具有

收稿日期: 2018-04-19; 修订日期: 2018-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0201506); 国家自然科学基金项目 (41571130032, 91744310)

作者简介: 秦雨 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染与控制, E-mail: qin-y15@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: qiangzhang@tsinghua.edu.cn

重要意义.

近年来,国内外对电力行业大气污染物排放产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的过早死亡(以下称相关过早死亡)的研究逐渐增多^[11~15]. Lelieveld 等^[11]运用 EMAC 全球大气化学模式和 EDGAR 排放清单研究了全球各个行业排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关过早死亡的贡献,发现电力行业贡献了中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关过早死亡的 18%. Wang 等^[15]采用关闭排放法分析了中国长三角地区电力等 3 个行业污染物排放产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的过早死亡,结果显示电力行业贡献了长三角地区约 10% 的过早死亡. 由于相关基础数据较难获取,目前针对电厂排放和健康影响的研究多在行业尺度开展^[11~15],难以支撑精准治理的决策需求. 此外,相关研究多采用正向的大气化学传输模型计算各行业污染物排放的环境及健康影响^[11~15],模拟耗时较长. 而伴随(adjoint)方法能够在正向模拟基础上反向追踪污染物浓度、过早死亡人数等目标函数对各种前体物排放的敏感性,具备分源灵活、计算高效的优势^[16~18].

Liu 等^[19]开发的涵盖装机容量、发电量等机组信息的中国高分辨率燃煤电厂排放数据库(China coal-fired power plants emission database, CPED)提供了详细的电力机组基础信息,本研究结合 CPED 高分辨率数据库,基于全球-区域嵌套的大气化学伴随模式 GEOS-Chem Adjoint,将污染物排放及人

群健康影响溯源至燃煤电厂的单个机组水平,提供了包括全国和各电网区域的空间特征、装机容量和投运年限的机组特征等多个维度的分析结果. 该方法框架可与未来新的精细排放清单及减排政策信息结合,对高效分析行业排放与健康损失贡献具有重要意义.

1 材料与方法

本研究的技术路线如图 1 所示. 第 1 步,依据清华大学开发的中国多尺度排放清单模型(multi-resolution emission inventory for China, MEIC; <http://www.meicmodel.org>)及 CPED 高分辨率燃煤电厂数据库,获取网格化污染物排放清单以及各网格中不同燃煤机组的污染物排放量、发电量等信息. 第 2 步,使用卫星反演 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据^[20]与综合暴露-响应方程(integrated exposure-response, IER),计算我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的过早死亡人数. 第 3 步,以第 1 步中的全行业网格化清单作为排放输入,以第 2 步获取的各电网区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过早死亡人数为目标函数,利用 GEOS-Chem Adjoint 模型逐网格计算各电网区域的健康损失对网格内各类排放源的敏感性(源敏感性),并根据网格内的不同类型燃煤机组的排放分担率,将上述源敏感性分解至机组水平. 第 4 步,结合第 3 步结果和跨电网区域电力传输数据计算跨电网输电的健康影响.

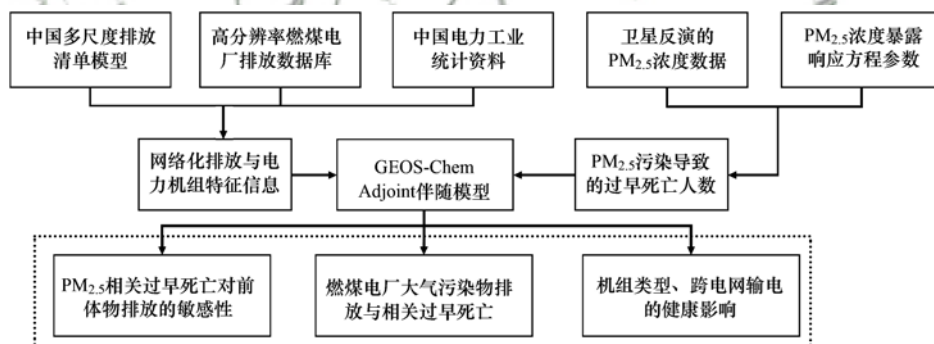


图 1 研究技术路线示意

Fig. 1 Methodology framework

1.1 GEOS-Chem Adjoint 伴随模式

GEOS-Chem Adjoint 大气化学伴随模式可在物理、化学正向模拟基础上,反向追踪目标函数对相关物种浓度的敏感性,从而得到源敏感性结果. 本研究运用全球-区域嵌套的 GEOS-Chem Adjoint 35i 版本,按我国六大电网区域计算 $\text{PM}_{2.5}$ 污染导致的过早死亡人数对 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物排放量的源敏感性^[17,21]. 源敏感性 SS 的定义由

式(1)给出:

$$SS_{(r,t,lat,lon,spe)} = \frac{\partial Q_{M(r)}}{\partial S_{E(t,lat,lon,spe)}} \times S_{E(t,lat,lon,spe)} \quad (1)$$

式中, Q_M 为目标函数(cost function),定义为受体区域 r 的过早死亡总人数; S_E 为敏感性来源,对应 t 时刻、(lat, lon) 网格上大气污染物的排放量. 对源敏感性结果的归一化处理参见文献[21].

本研究的水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.666^\circ$, 水平模

拟范围是 GEOS-Chem 该分辨率下东亚模拟域的子区域(11°S~55°N, 70°E~150°E), 覆盖全部中国陆地部分, 垂直方向分为 47 层. 气象数据由美国宇航局戈达德地球观测系统模型第五版(Goddard Earth observing system, GEOS-5; <https://gmao.gsfc.nasa.gov>) 提供, 排放数据来源详见 1.3 节. 边界条件来自相同配置的 GEOS-Chem 2°×2.5°全

球模拟结果. 受体区域按六大电网范围分为华北、华东、南部、华中、西北、东北电网区域, 其地理范围依据中国电力系统建设规划与管理现状^[10] 确定, 详见表 1. 为降低计算成本, 依据现有研究方法^[21,22], 模拟选用 2010 年 1、4、7、10 月代表冬、春、夏、秋这 4 个季节, 并进行平均以代表年均结果.

表 1 全国各电网区域燃煤电厂的大气污染物排放与健康影响相关指标

Table 1 Air pollutant emissions and related health impact index caused by the power sector in China and six grids

电网 区域 ¹⁾	燃煤电厂排放量/万 t(分担率/%)			过早死亡人数/万人		发电量 /TW·h	健康损失强度 /人·(TW·h) ⁻¹
	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	全部门	燃煤电厂		
华北	233 (28.2)	283 (36.5)	26 (9.2)	22.7	2.0	976	21
华东	100 (28.5)	191 (35.9)	13 (8.6)	20.5	1.8	865	21
南方	144 (34.8)	118 (35.4)	9 (6.0)	15.0	1.6	473	34
华中	154 (19.9)	131 (24.6)	13 (4.6)	38.7	4.0	513	77
西北	79 (33.7)	73 (34.2)	8 (8.8)	5.3	0.6	277	23
东北	74 (27.8)	109 (30.2)	15 (11.2)	6.8	0.7	313	21
全国合计	784 (27.4)	905 (32.9)	84 (7.7)	109.0	10.6	3 417	31

1) 华北电网区域下辖行政区包括北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古西地区; 华东包括上海、江苏、浙江、安徽、福建; 南方包括广东、广西、云南、贵州、海南; 华中包括河南、四川、重庆、湖北、江西、湖南; 西北包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、西藏; 东北包括辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古东地区; 全国合计不含香港、澳门、台湾, 下同

1.2 PM_{2.5}污染导致的过早死亡计算

本研究采用 IER 暴露-响应方程^[23] 计算 PM_{2.5} 污染导致的过早死亡人数. IER 方程假设 PM_{2.5} 污染会导致与 4 种疾病相关的成年人过早死亡, 分别为缺血性心脏病、中风、慢性肺阻塞和肺癌, 按照式(2)计算每种疾病的相对风险 RR:

$$RR = \begin{cases} 1 + \alpha(1 - e^{-\gamma(c-c_0)^\delta}), & c > c_0 \\ 1, & c \leq c_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, c 为 2010 年年均 PM_{2.5} 浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 由 Geng 等^[20] 基于卫星观测的气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)反演的近地面 PM_{2.5} 浓度数据集提供. c_0 为长期暴露导致过早死亡风险的理论健康阈值浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于此值的 PM_{2.5} 浓度无过早死亡风险; α 、 γ 、 δ 均为暴露-响应方程的参数, 本研究采用 Lee 等^[17] 给出的参数结果.

PM_{2.5} 污染导致的过早死亡总人数(D_i)使用式(3)计算:

$$D_i = \frac{RR - 1}{RR} \times B \times P \quad (3)$$

式中, B 为对应疾病全年龄段人口的死亡率, 由全球疾病负担研究(2013 年)^[24] 提供; P 为 2010 年 LandScan(<http://www.ornl.gov/landscan>) 全球人口数据集.

由于 IER 方程具有非线性特征, 即 PM_{2.5} 相关

过早死亡在曲线上的分配是累积且不均匀的. 本研究使用直接比例法^[21,25] 评估燃煤电厂排放导致的 PM_{2.5} 污染相关过早死亡, 该方法假设任一排放源贡献的过早死亡人数正比于其产生的 PM_{2.5} 浓度增加值, 由此排除因计算顺序不同而导致的各排放源过早死亡人数贡献的差异, 并保证了所有排放源贡献的过早死亡总人数的闭合性. 为评估健康影响结果的不确定性, 本研究通过 1 000 组 IER 参数的 1 000 次模拟定量计算过早死亡人数的平均值与 95% 置信区间(confidence interval, CI)^[1,11].

1.3 排放清单数据

GEOS-Chem Adjoint 大气化学模式的排放输入数据来自清华大学 MEIC 排放清单模型, 其中燃煤电厂排放数据来源于 CPED^[19] 数据库. CPED 数据库提供了全国燃煤电力机组的排放量、发电量、装机容量、投运年限等信息. 将上述信息与 GEOS-Chem Adjoint 大气化学伴随模式获取的过早死亡人数的源敏感性结果结合, 分析不同类型机组排放对 PM_{2.5} 污染相关过早死亡的贡献.

本研究利用中国电力工业统计资料^[26] 提供各区域跨电网输电量、火力发电量等资料, 结合 CPED 数据库信息与源敏感性结果, 分析与跨电网输电导致排放转移相关的 PM_{2.5} 健康损失.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

为评估 GEOS-Chem Adjoint 模式的可靠性,本研究利用基于卫星 AOD 反演的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据^[20]对 GEOS-Chem 正向模型模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行验证。

图 2 展示了 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度(纵坐标)相对于卫星反演浓度(横坐标)的散点序列。以其中所示的散点间相关系数 R 、拟合直线斜率、标准误差(normalized mean error, NME)及标准偏差(normalized mean bias, NMB)作为模拟效果的评价指标。验证结果显示,中国区域 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟结果与卫星反演结果基本一致,两者相关系数为 0.82。从区域尺度来看,华中、华东、东北、西北及南方区域的模拟相关性均较好(R 为 0.78 ~ 0.92), $\text{PM}_{2.5}$

模拟偏差主要集中在华北区域,这与其内蒙等地沙尘排放有关^[21]。

2.2 燃煤电厂大气污染排放及健康影响

表 1 列出了中国及各电网区域燃煤电厂相关大气污染物排放与健康影响指标。2010 年中国燃煤电厂排放了 SO_2 784 万 t、 NO_x 905 万 t、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 84 万 t, 分别占全国排放总量的 27.4%、32.9%、7.7%。燃煤电厂排放对 NH_3 的贡献较小,因此后文不再单独分析。燃煤电厂排放分担率在不同区域间存在较大差异, SO_2 排放分担率从华中区域的 19.9% 至南方区域的 34.8%, NO_x 排放分担率从华中区域的 24.6% 至华北区域的 36.5%, 一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分担率从华中的 4.6% 至东北的 11.2%。华北、华东区域的电力需求量较大^[5], 相应地电力生产引起的污染物排放量较高;同时,南方、西北区域由于具有较高的火力发电排放因子^[19], 燃煤电

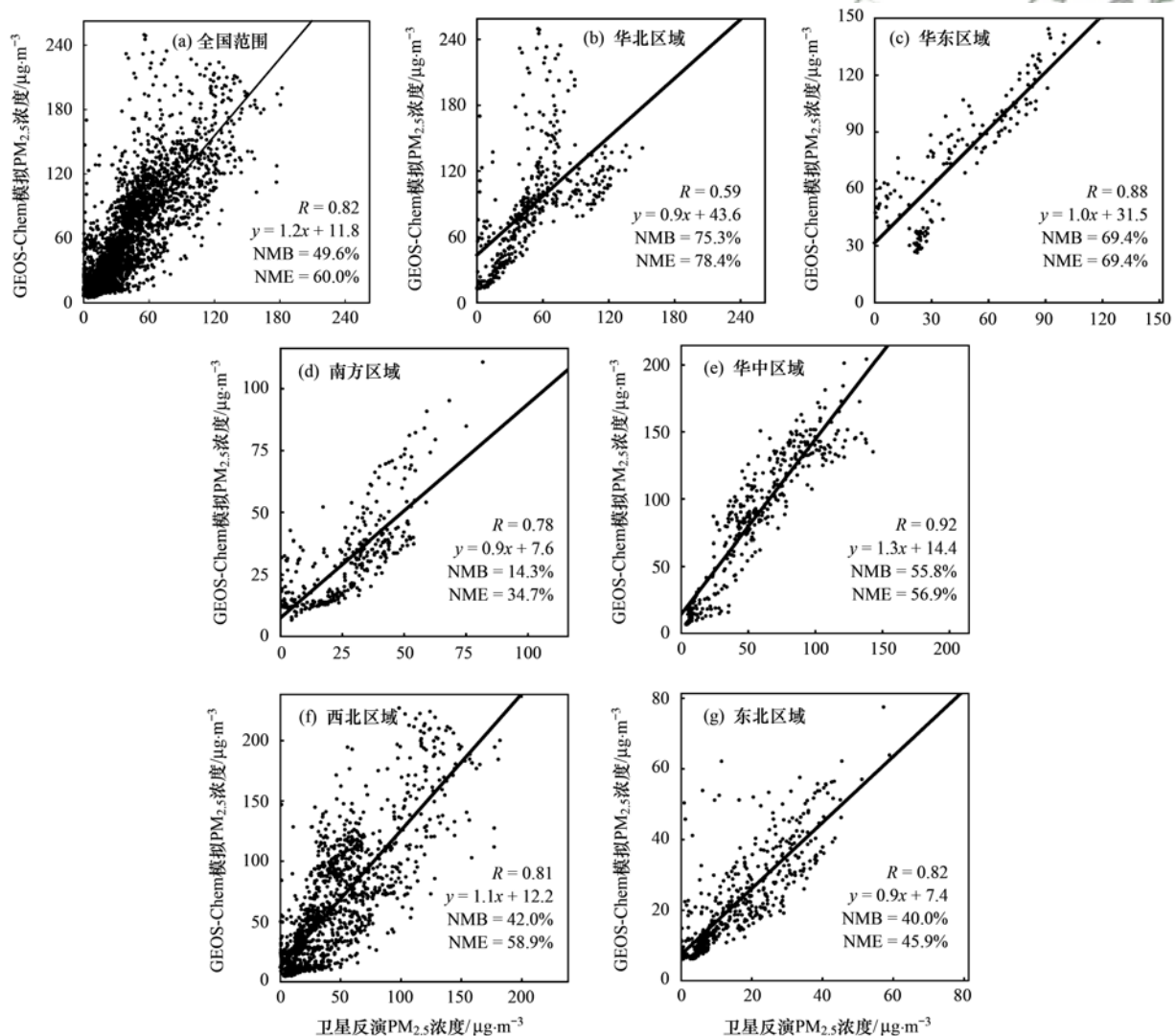


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟结果与卫星反演结果对比

Fig. 2 Comparison between modeled and satellite-retrieved $\text{PM}_{2.5}$ concentrations

厂的排放量分担率较大。

2010 年中国燃煤电厂大气污染物排放导致的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关过早死亡人数为 10.6 万人 (95% CI: 6.8 ~ 13.2 万人), 约占全国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关过早死亡总人数的 9.8%, 此比例位于现有研究结果的区间内 (8% ~ 18%)^[4,15]。在区域尺度, 华中区域燃煤电厂 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关过早死亡人数最多, 达到 4.0 万人, 占全国燃煤电厂相关过早死亡总人数的 37.2%; 其次为华北和华东区域, 分别为 2.0 万人 (18.8%) 与 1.8 万人 (17.0%)。考虑到区域间发电量的差异, 本研究定义健康损失强度 (单位发电量导致的过早死亡人数) 以评估各电网区域电力生产的健康代价。研究发现, 我国六大电网区域的电力部门健康损失强度差异较大, 华中电网区域单位发电量导致的过早死亡人数最多, 其健康损失强度达到 $77 \text{ 人} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$, 其次为南方电网, 华北、东北、华东和西北电网的健康损失强度较小。各电网间健康损失的差异与区域排放总量、大气扩散条件、人口密度等相关, 健康损失强度分析消除了发电与排放量规模的影响, 体现了区域间机组排放水平的贡献。值得指出的是, 本研究中健康影响定量结果的不确定性主要由 IER 模型参数贡献, 后续研究可进一步考虑模式模拟、排放清单等因素的不确定性。

2.3 不同机组类型的健康风险差别

对不同类型燃煤机组排放导致的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染相关过早死亡贡献分析发现, 全国装机容量 300 MW 以下的中小型机组发电量占火力发电总量的 26.2% (895 $\text{TW} \cdot \text{h}$), 贡献了燃煤电厂相关过早死亡的 40.6% (4.3 万人); 而占火力发电总量 73.8% (2 522 $\text{TW} \cdot \text{h}$) 的 300 MW 以上大型机组对燃煤电厂相关过早死亡的贡献为 59.4% (6.3 万人)。图 3 (a) 展示了机组装机容量与健康损失强度的关系, 小型机组的健康损失强度显著高于大型机组, 装机容量 600 MW 以上机组的健康损失强度为 $22 \text{ 人} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$, 而装机容量小于 100 MW 机组的健康损失强度达到 $62 \text{ 人} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。随着电力机组装机容量增大, 机组燃料燃烧效率逐步提升, 单位发电量能耗减少, 同时大机组污染控制效率通常较高^[27], 因此健康损失强度要低于中小机组。这类机组发电贡献与其环境及健康影响的不均衡问题在国际相关研究中也是存在的^[27,28]。各电网区域的中小机组健康损失强度均明显高于大型机组, 东北区域中小机组的整体健康影响相对更高, 与区域中小型

机组比例偏高有关。研究表明中小型机组排放对健康损失具有重要贡献, 证明了我国电力行业“上大压小”政策的科学性^[29]。

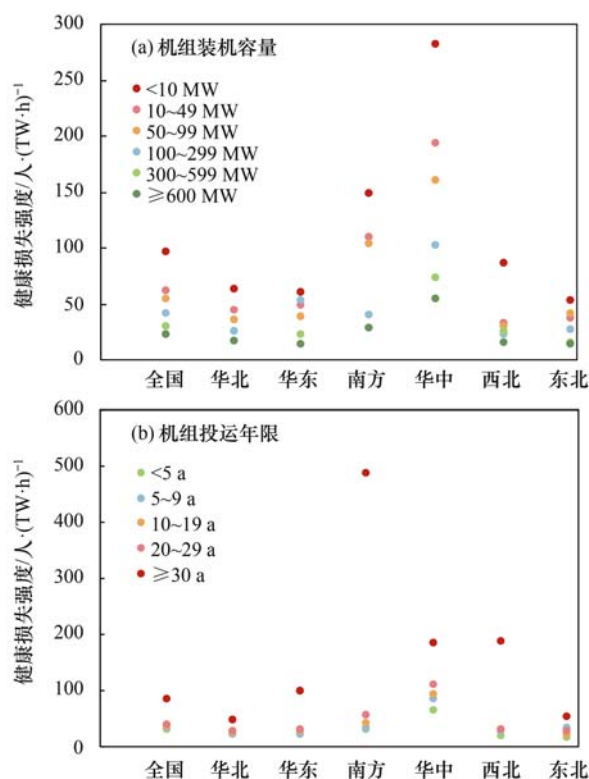


图3 基于装机容量和投运年限分级的电力机组健康损失强度
Fig. 3 Health loss intensity classified by the capacity and operation age of the power unit

图 3 (b) 展示了全国及各区域不同投运年限机组的健康损失强度, 随着机组投运年限增长, 机组的健康损失强度显著增加。投运年限超过 30 a 的老旧机组的健康损失强度为 $58 \text{ 人} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$, 而投运年限 5 a 以内新机组的健康损失强度仅为 $27 \text{ 人} \cdot (\text{TW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。各电网区域也呈现出老旧机组健康损失强度显著高于新机组的特征, 其中东北区域由于老旧型机组比例偏高, 老旧机组的整体健康影响相对更高。南方电网区域 30 a 以上的老旧机组健康损失强度远高于其他区域主要与其排放强度较高有关。淘汰或改造老旧机组, 降低其健康损失强度是降低燃煤电厂的污染健康损失的重要途径。

2.4 跨电网输电的健康影响

电力的跨电网输送与消费改变了排放与大气污染的空间分布, 引起了相关过早死亡在区域间的转移^[30]。本研究分析了我国跨电网输电量及其隐含排放 (即在电力生产和输送过程中排放^[31]) 导致的过早死亡人数 (表 2), 结果显示, 2010 年我国跨电网火电输送的电量 (定义为跨电网输电量) 占燃煤

电厂生产总量的 2.8%，西北、华北是主要的电量净输出电网，华东、南方是主要的电量净输入电网，华中电网输出、输入量均较大，为净输出电网。跨电网输电量的隐含排放导致全国 PM_{2.5} 污染相关过早死亡 3 810 人，占燃煤电厂相关过早死亡总人数

的 3.6%。其中，华中电网由于对外输出电量而增加了过早死亡 2 530 人，华东电网因消费外区域电量而避免了过早死亡 1 840 人。本研究表明，跨电网输电隐含排放导致的过早死亡是评价各电网区域电力行业健康影响的重要因素。

表 2 跨电网火电输送量及其隐含排放导致的过早死亡人数

Table 2 Transregional thermal power transmission and related premature deaths

项目	电力输入区域						输出总计
	华北	华东	南方	华中	西北	东北	
电力输出区域	华北	— ¹⁾	460 (160.8) ²⁾	—	200 (70.3)	—	660 (231.1)
	华东	—	—	—	20 (7.4)	—	20 (7.4)
	南方	—	—	—	100 (31.6)	—	100 (31.6)
	华中	150 (28.4)	1 380 (255.5)	940 (175.4)	—	60 (10.4)	2 530 (469.7)
	西北	40 (15.5)	—	—	290 (106.4)	—	330 (121.9)
	东北	170 (79.4)	—	—	—	—	170 (79.4)
输入总计	360 (123.3)	1 840 (416.3)	940 (175.4)	610 (215.7)	60 (10.4)	—	3 810 (941.2)

1) “—”表示电力工业统计资料中无对应区域间火电传输量数据；2) 括号前数字代表该列指示区域减少的过早死亡人数，即该行指示区域增加的过早死亡人数；括号内数字代表跨电网火电输出或输入量 (亿kW·h)

从煤炭资源丰富的地区向空气污染严重的地区长距离输电被认为是能够改善污染状况的一种手段^[22]。前述分析表明，跨电网输电量实际导致的过早死亡为 3 810 人；本研究对比设置无跨电网输电情景，假设 2010 年各区域输送电量在用电区域本地生产，发现其健康影响较实际跨区输电情景减少过早死亡 680 人，为 3 130 人。从区域角度看 (图 4)，虽然跨电网输电导致的健康影响对部分区域不显著 (如华东、东北等) 或略有减少 (西北)，但其导致华中区域增加过早死亡 1 230 人，是跨电网输电健康损失增加的主要来源；这与各区域电力生产的健康损

失强度有关。结果表明 2010 年跨电网输电对全国空气污染没有改善作用，未来应当综合考虑不同区域之间大气环境容量的差别，对跨网输电进行合理规划布局，以降低火电行业的整体污染水平。

3 结论

(1) 本研究基于全国高分辨率燃煤电厂排放数据库 CPED，利用 GEOS-Chem Adjoint 大气化学伴随模式，构建了关联我国燃煤电厂污染物排放及其产生 PM_{2.5} 污染导致人群过早死亡的敏感性分析框架，提供了一种可灵活定量不同行业、不同区域排放源敏感性的计算方法。

(2) 2010 年中国燃煤电厂大气污染物排放导致 PM_{2.5} 污染相关过早死亡为 10.6 万人，占全国人为源 PM_{2.5} 污染相关过早死亡人数的 9.8%。中小型机组和老旧机组的健康损失强度显著高于大型机组和新建机组。研究显示我国应当加快小型机组和老旧机组的淘汰步伐，降低燃煤电厂的整体污染水平。

(3) 电网区域层面的分析表明，燃煤电厂相关健康损失强度最大的是华中区域。跨电网输电导致燃煤电厂健康损失较无跨电网输电情景增加过早死亡 680 人。研究结果表明我国应当通过优化区域间输电结构，减少火电行业整体污染健康损失水平。

参考文献：

[1] Lim S S, Vos T, Flaxman A D, *et al.* A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *Lancet*, 2012, **380** (9859): 2224-2260.

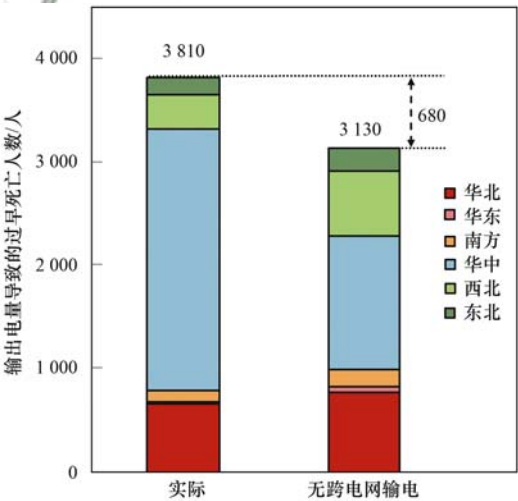


图 4 各区域的输送电量分别在实际情景和无跨电网输电情景下产生的健康影响对比

Fig. 4 Comparison of health impacts caused by the amount of power transmitted from six grids under a realistic transmission scenario and a no-power transmission scenario

- [2] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *Jama*, 2002, **287** (9): 1132-1141.
- [3] 阚海东, 陈秉衡. 我国部分城市大气污染对健康影响的研究 10 年回顾[J]. *中华预防医学杂志*, 2002, **36**(1): 59-61.
- [4] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, *et al.* Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J]. *Lancet*, 2017, **389**(10082): 1907-1918.
- [5] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015. 54-204.
National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015. 54-204.
- [6] Li M, Klimont Z, Zhang Q, *et al.* Comparison and evaluation of anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x over China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(5): 3433-3456.
- [7] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [8] 史妍婷, 杜谦, 高建民, 等. 燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 470-474.
Shi Y T, Du Q, Gao J M, *et al.* Hazard evaluation modeling of particulate matters emitted by coal-fired boilers and case analysis [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 470-474.
- [9] 袁家海, 张文华. 中国煤电过剩规模量化及去产能路径研究[J]. *中国能源*, 2017, **39**(8): 14-20.
Yuan J H, Zhang W H. Excess scale of coal power and de-capacity pathway in China[J]. *Energy of China*, 2017, **39**(8): 14-20.
- [10] 叶敏华. 中国电力部门分区域优化模型及排放控制政策模拟[D]. 北京: 清华大学, 2013.
Ye M H. Simulation of emission control policies for China's power sector using a multi-regional bottom-up optimization model[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [11] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, *et al.* The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. *Nature*, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [12] Koplitz S N, Jacob D J, Sulprizio M P, *et al.* Burden of disease from rising coal-fired power plant emissions in Southeast Asia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1467-1476.
- [13] Driscoll C T, Buonocore J J, Levy J I, *et al.* US power plant carbon standards and clean air and health co-benefits[J]. *Nature Climate Change*, 2015, **5**(6): 535-540.
- [14] Kim B U, Kim O, Kim H C, *et al.* Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, South Korea [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, **66**(9): 863-873.
- [15] Wang J D, Wang S X, Voorhees A S, *et al.* Assessment of short-term PM_{2.5}-related mortality due to different emission sources in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 440-448.
- [16] Kharol S K, Martin R V, Philip S, *et al.* Persistent sensitivity of Asian aerosol to emissions of nitrogen oxides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(5): 1021-1026.
- [17] Lee C J, Martin R V, Henze D K, *et al.* Response of global particulate-matter-related mortality to changes in local precursor emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4335-4344.
- [18] Henze D K, Hakami A, Seinfeld J H. Development of the adjoint of GEOS-Chem[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(9): 2413-2433.
- [19] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13299-13317.
- [20] Geng G N, Zhang Q, Tong D, *et al.* Chemical composition of ambient PM_{2.5} over China and relationship to precursor emissions during 2005-2012 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(14): 9187-9203.
- [21] Zhao H Y, Li X, Zhang Q, *et al.* Effects of atmospheric transport and trade on air pollution mortality in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(17): 10367-10381.
- [22] Peng W, Yuan J H, Zhao Y, *et al.* Air quality and climate benefits of long-distance electricity transmission in China [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, **12**(6): 064012.
- [23] Burnett R T, Pope III C A, Ezzati M, *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, **122**(4): 397-403.
- [24] Forouzanfar M H, Alexander L, Anderson H R, *et al.* Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013 [J]. *Lancet*, 2015, **386**(10010): 2287-2323.
- [25] Zhang Q, Jiang X J, Tong D, *et al.* Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade [J]. *Nature*, 2017, **543**(7647): 705-709.
- [26] 中国电力企业联合会. 电力工业统计资料汇编 2010[M]. 北京: 中国电力企业联合会, 2011.
- [27] Tong D, Zhang Q, Davis S J, *et al.* Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units [J]. *Nature Sustainability*, 2018, **1**(1): 59-68.
- [28] Jorgenson A, Longhofer W, Grant D. Disproportionality in power plants' carbon emissions: a cross-national study [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 28661.
- [29] 丁青青, 魏伟, 沈群, 等. 长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2389-2394.
Ding Q Q, Wei W, Shen Q, *et al.* Major air pollutant emissions of coal-fired power plant in Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2389-2394.
- [30] Zhao H Y, Zhang Q, Guan D B, *et al.* Assessment of China's virtual air pollution transport embodied in trade by using a consumption-based emission inventory [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(10): 5443-5456.
- [31] Davis S J, Caldeira K. Consumption-based accounting of CO₂ emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, **107**(12): 5687-5692.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physiochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)