

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO_x 总量控制中的应用 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM₁₀ 及部分化学组成的季节变化 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A²-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH₄ 排放的变化特征及影响因素 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N₂O 排放的影响 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则(4261) 《环境科学》征订启事(4270) 信息(4186, 4404, 4446)

卫星遥感在 NO_x 总量控制中的应用

武卫玲, 薛文博*, 王燕丽, 雷宇

(环境保护部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 基于美国 Aura 卫星臭氧观测仪(OMI)提供的对流层 NO₂ 垂直柱浓度数据, 分析 2015 年北京世界反法西斯战争胜利 70 周年纪念活动期间和 2016 年杭州 G20 峰会期间 NO₂ 柱浓度变化趋势, 发现 NO₂ 柱浓度能灵敏地捕捉到地面 NO_x 排放量的变化状况. 因此, 本文利用 OMI NO₂ 柱浓度评估“十二五”期间及“十三五”初期我国 NO_x 排放量的变化状况, 结果表明, “十二五”期间我国 NO₂ 柱浓度降幅为 24.98%, NO_x 减排取得显著成效. “十三五”初期, 2016 年全国 NO₂ 柱浓度相比 2015 年下降 3.18%, NO_x 排放量继续下降.

关键词: 卫星遥感; NO₂; 柱浓度; NO_x 排放; 总量控制

中图分类号: X511; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-3998-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703172

Application of Satellite Remote Sensing in NO_x Emission Control

WU Wei-ling, XUE Wen-bo*, WANG Yan-li, LEI Yu

(Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Tropospheric NO₂ vertical column densities (VCDs) from ozone monitoring instrument(OMI) were analyzed to evaluate the decrease in NO_x emissions during two special events, 70th anniversary of the end of World War II in 2015 and the G20 summit in 2016. Results showed a positive correlation between NO₂ VCDs and near ground NO_x emissions and verified that the NO_x emission control policy during “12th five-year plan” were remarkably effective, with a 24.98% drop in VCDs in five years. At the early stage of “13th five-year plan”, in 2016, NO₂ VCDs decreased by 3.18% year-on-year, showing a consistent drop in NO_x.

Key words: satellite remote sensing; NO₂; vertical column densities; NO_x emissions; emission control

现阶段我国煤烟型大气污染趋势得到初步遏制, 以 PM_{2.5}、O₃ 为主要污染物的复合型污染日益突出, 其中 NO_x 排放是引起 PM_{2.5}、O₃ 的重要因素之一. NO_x 经化学反应生成的硝酸盐是二次 PM_{2.5} 的重要组成部分, 而且 NO_x 是 O₃、过氧酰基硝酸(peroxyacyl nitrate, PAN) 等光化学污染物的重要前体物^[1-6]. 此外, NO_x 可以氧化二氧化硫, 促进硫酸盐迅速生成, 是导致重污染天气的关键因素^[7], 控制 NO_x 排放已成为改善我国空气质量的重要手段. 为此, 我国自“十二五”将 NO_x 纳入污染物总量控制指标, 确定了 NO_x 排放量下降 10% 的目标^[8], “十三五”继续加大 NO_x 减排力度, 《国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》明确要求 NO_x 排放总量下降 15%^[9].

从“十一五”、“十二五”总量减排经验来看, 传统总量核查核算方式符合我国当时总量控制工作的客观要求^[10, 11], 对于落实减排目标发挥了关键作用. 但存在的问题是总量核查工作所花费的人力及行政成本较大, 且核查结果存在一定的主观性, 缺乏第三方数据印证. 进入“十三五”之后, 随着环境管理模式的转变^[12], 总量核查思路将从传统的“工

程项目核算”转变为“以质量改善为导向”的宏观核查, “以质量改善为导向”宏观核查思路是: “首先由各省份上报 NO_x 总量减排量, 再由环保部核实减排量的合理性、科学性”, 其中 NO₂ 地基监测和卫星遥感观测将作为重要的核查依据. 从国内外的经验及研究成果来看, 卫星遥感技术已在环境管理中得到广泛应用^[13-17], 但针对我国环境管理中 NO_x 总量控制政策的实践研究几乎空白, 本文基于 OMI NO₂ 对流层柱浓度数据, 分析全国及重点省份 NO₂ 柱浓度变化, 来印证我国 NO_x 减排效果.

1 材料与方 法

卫星观测相比地面观测的优势主要体现在 3 个方面: 一是空间覆盖范围广(水平、垂直); 二是空间分辨率高; 三是观测数据较客观, 人为干扰因素少. 本文通过验证重大赛会期间 NO₂ 柱浓度能灵敏捕捉地面 NO_x 排放量变化, 进而利用 NO₂ 柱浓度评估“十二五”期间及“十三五”初期我国 NO_x 总量

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208805)

作者简介: 武卫玲(1985~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为大气环境卫星遥感应用, E-mail: wuwl@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: xuewb@caep.org.cn

减排效果. 本文 OMI NO₂ 对流层柱浓度数据为 2 级产品的逐日网格化数据, 来源于 <http://www.temis.nl/airpollution/no2.html>, 由荷兰皇家气象研究所 (KNMI) 提供, 数据云量小于 30%, 空间分辨率为 0.25°. 对流层 NO₂ 柱浓度的产品是基于差分吸收光谱算法 (DOAS) 获取, 大量实验表明 OMI NO₂ 对流层柱浓度与地基及航空实测数据具有较强相关性, 相关系数在 0.8 以上^[18-20].

1.1 方法学设计

通过卫星遥感技术表征污染物排放量包括两个步骤: 首先通过卫星探测的光学信号反演“污染物浓度”; 最后通过“污染物浓度”表征“污染物排放量”的变化. 从现有研究来看^[21-23], 利用卫星观测 NO₂ 柱浓度表征 NO_x 排放量的技术最为广泛, 主要原因是: ①NO₂ 柱浓度算法较成熟; ②NO₂ 在大气中的寿命和传输距离较短, “NO₂ 浓度”与“NO_x 排放”具有基本相同的空间分布特征. 由于重大赛会期间区域空气质量保障实施污染减排措施, NO_x 排放量显著降低, 本文利用重大赛会期间 OMI NO₂ 对流层柱浓度变化来印证 NO_x 排放量的变化状况.

本文方法学设计如下: ①为分析全国及各省 NO₂ 柱浓度的总体变化趋势, 将行政辖区内所有国控空气质量监测站点所在网格 NO₂ 柱浓度的平均值作为全国及各省 NO₂ 柱浓度, 通过 NO₂ 柱浓度增减百分比表征全国及各省 NO_x 排放量的变化趋势; ②为分析城市辖区 NO₂ 柱浓度的总体变化趋势, 同样利用辖区内所有国控空气质量监测站点所在网格 NO₂ 柱浓度的平均值作为该城市 NO₂ 柱浓度. 但是由于城市范围相对较小, 平均浓度的系统稳定性较差. 特别是对于 NO₂ 浓度水平较低的城市, 微小的变化将引起较大误差. 因此, 利用 NO₂

柱浓度绝对值增减幅度表征城市 NO_x 排放量的变化趋势.

1.2 方法学验证

2015 年 8 月 22 ~ 30 日世界田径锦标赛在北京举行, 9 月 3 日是“中国人民抗日战争胜利纪念日”, 为作好这“两大活动”期间的空气质量保障工作, 北京市和周边六省区实施机动车行驶限制、工业停限产减排、施工工地停止土石方和拆除作业、放假调休等措施, NO_x 排放量大幅下降^[24]. 为了排除气象条件干扰, 选择 2014 ~ 2016 年同期 NO₂ 柱浓度进行分析, 结果表明: 2015 年 8 月 20 日至 9 月 3 日期间, 北京市 NO₂ 柱浓度相比 2014 年同期降低 45.4%, 但 2016 年同期 NO₂ 柱浓度同比增加 45.3%, 柱浓度呈现显著的先降低后升高的 V 型特征; 从空间分布来看, 以北京市为中心的周边区域改善效果明显, 直接证实了“两大活动”期间 NO_x 排放量大幅下降 (图 1 及图 2).

为了保证 2016 年杭州 G20 峰会期间的空气质

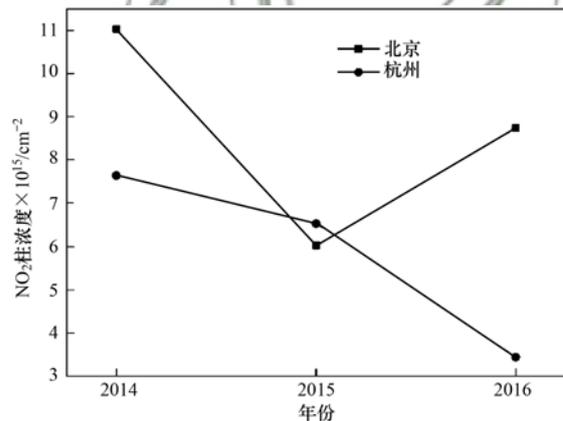


图 1 2014 ~ 2016 年 8 月 20 日至 9 月 5 日 NO₂ 柱浓度变化
Fig. 1 NO₂ VCDs from Aug 20 to Sep 5, 2014-2016

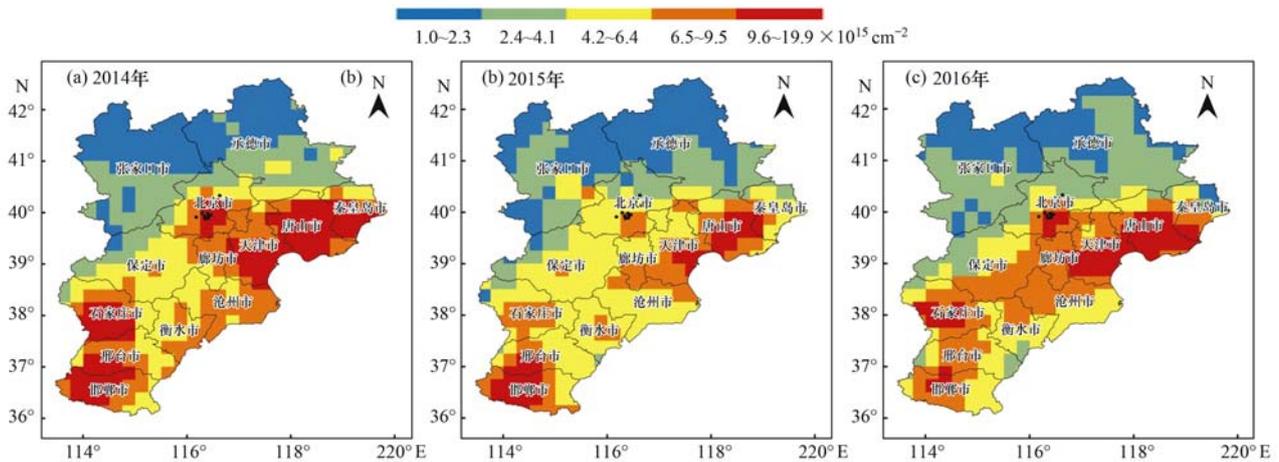


图 2 2014 ~ 2016 年 8 月 20 日至 9 月 3 日北京及周边地区 NO₂ 柱浓度

Fig. 2 NO₂ VCDs over Beijing and surrounding regions from Aug 20 to Sep 3, 2014-2016

量,长三角区域实施大气污染联防联控^[25],区域 NO_x 排放量下降明显. 2016年8月20日至9月5日期间杭州市 NO_2 柱浓度均值同比下降47.4%,相比2014年同期下降55.1%. 从空间分布来看,

2016年杭州市区与周边地区 NO_2 柱浓度明显降低, NO_x 排放特征呈现以杭州为中心的低值区(图1及图3), 综上, 卫星观测 NO_2 柱浓度变化可以灵敏地反映地面 NO_x 排放量的变化趋势.

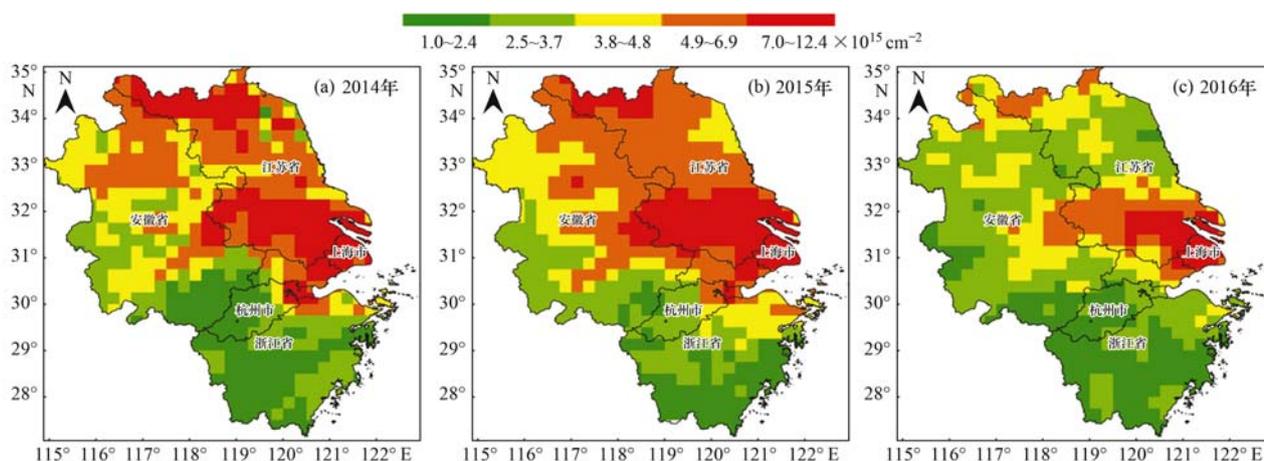


图3 2014~2016年8月20日至9月5日长三角区域 NO_2 柱浓度

Fig. 3 NO_2 VCDs over Yangtze River Delta from Aug 20 to Sep 5, 2014-2016

2 结果与讨论

2.1 NO_x 排放变化趋势

根据2011~2015年环境统计数据^[26], 全国 NO_x 排放量逐年下降, 从2011年2404.3万t下降到2015年1851.9万t, 下降幅度高达22.98%, 见图4. 从全国31省份来看, 除青海、新疆、广西、西藏等西部省份 NO_x 排放时有上升外, 大部分省份 NO_x 排放量保持逐年下降的趋势. “十二五”期间 NO_x 减排主要集中在火电、钢铁、水泥等重点行业, “十二五”初期重点行业脱硝装置开始普及, 尤其是自2013年国务院印发《大气污染防治行动计划》(“大气十条”)之后, “大气十条”提出10条35项重点任务措施^[27], NO_x 排放量下降速度加快, “十二五”期间我国 NO_x 减排取得显著成效.

2.2 “十二五”期间 NO_2 柱浓度变化

虽然2011~2015年环境统计数据表明我国 NO_x 减排效果明显, 但鉴于卫星观测数据具有空间覆盖范围广、人为干扰因素少的特点, 本文利用卫星观测 NO_2 柱浓度变化来印证区域尺度 NO_x 排放量的变化趋势.

(1) 全国及各省 NO_2 柱浓度变化

2015年全国对流层 NO_2 柱浓度均值为 $4.75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 三大重点区域京津冀、长三角、珠三角分别为 13.01×10^{15} 、 9.99×10^{15} 、 $4.79 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 京津冀区域是全国 NO_2 重污染地区. 2015年天津、

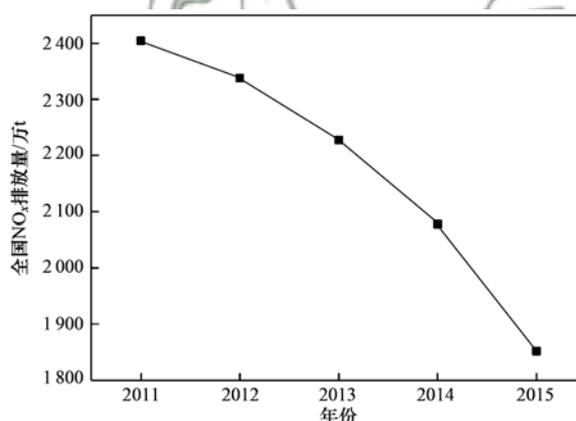


图4 2011~2015年全国 NO_x 排放量

Fig. 4 National NO_x emissions, 2011-2015

上海、北京 NO_2 柱浓度年均值位居全国三甲, 分别为 14.45×10^{15} 、 12.98×10^{15} 、 $12.91 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 特大型城市 NO_2 污染严重. 从空间分布来看, 大部分省份 NO_2 柱浓度高值出现在2011年和2012年, 之后呈明显下降趋势, 全国超过 $13.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的区域自2011年有所增加后, 2012年以后逐年减少. 2015年与2010年差值图显示, 整个华北、华中地区 NO_2 柱浓度下降明显, 见图5. 相比2010年全国对流层 NO_2 柱浓度降幅为24.98%, “十二五”期间我国 NO_2 对流层柱浓度下降明显, 证明我国 NO_x 减排取得显著成效, 这与 NO_x 总量核查结果一致. NO_2 对流层柱浓度除了青海、西藏两省有所上升外, 其他29个省市均下降, 其中, 河南、贵州、河

北、山东、浙江、湖北、广东、江苏、陕西、天津、内蒙古、山西等 12 省市 NO₂ 柱浓度降幅超过 25%，河南省下降幅度最大为 36.89%，黑龙江省降幅最小为 3.65%。各省 NO₂ 柱浓度变化趋势见表 1(香港、澳门、台湾资料暂缺)。

(2) 地级及以上城市 NO₂ 柱浓度变化

Aura/OMI 遥感数据的空间分辨率约为 25 km，可以重采样到 12.5 km，OMI NO₂ 柱浓度不仅可以用于区域 NO_x 排放量的趋势性分析，同时可以用于反映城市尺度甚至单个污染源的 NO_x 排放状况。本文对 2010~2015 年全国 338 个地级及以上城市 NO₂ 柱浓度变化进行分析，结果表明：焦作、邯郸、新乡、鹤壁、邢台等 37 个城市的 NO₂ 柱浓度下降较为明显，柱浓度下降量超过 $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，主要集中在天津、河北、河南、山东、山西、上海、江苏等华北、华东地区，见表 2，这些城市“十二五”期

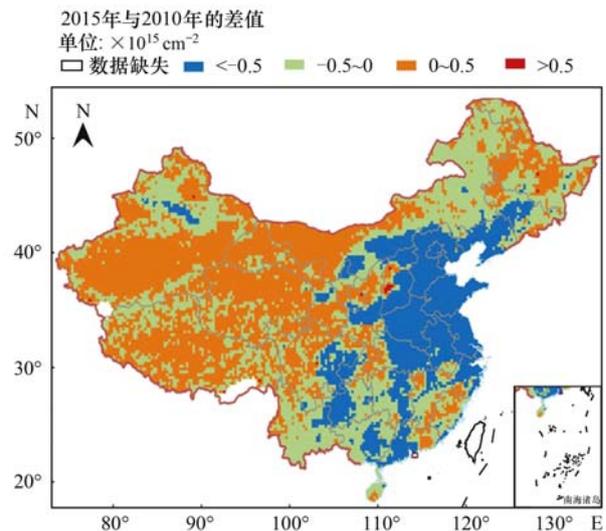


图 5 2015 年与 2010 年中国 NO₂ 对流层柱浓度差值

Fig. 5 Decrease in annual NO₂ VCDs over China in 2015 compared to 2010

表 1 2010~2015 年全国及各省 NO₂ 柱浓度变化 $\times 10^{15} / \text{cm}^{-2}$

Table 1 NO₂ VCDs over China, 2010-2015 ($\times 10^{15} / \text{cm}^{-2}$)

省份 ¹⁾	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	降幅/%
北京	16.83	16.44	17.79	16.42	14.18	12.91	23.31
天津	19.38	18.99	19.43	19.82	17	14.45	25.45
河北	16.21	17.19	16.61	15.72	13.9	11.7	27.79
山西	10.28	12.25	11.63	10.97	8.83	7.7	25.04
内蒙	3.53	4.33	3.91	3.48	3.13	2.63	25.45
辽宁	8.16	8.05	7.98	7.74	7.49	6.37	22
吉林	4.03	4.21	3.64	3.53	3.62	3.36	16.81
黑龙江	2.55	3.1	2.89	2.82	2.53	2.46	3.65
上海	17.15	18.34	15.21	14.71	14.57	12.98	24.32
江苏	14.35	15.85	13.99	13.78	12.7	10.64	25.9
浙江	8.73	9.95	8.58	8.37	8.23	6.35	27.34
安徽	9.09	11.34	9.68	9.93	8.63	6.94	23.63
福建	3.65	4.34	3.83	3.9	3.62	3.17	13.21
江西	3.62	4.82	3.93	4.25	4.16	3.23	10.83
山东	14.64	16.66	14.88	14.98	13.02	10.63	27.39
河南	13.69	15.76	13.54	13.67	10.82	8.64	36.89
湖北	6.4	7.35	6.21	6.91	6.17	4.72	26.33
湖南	3.75	4.8	3.77	3.8	3.83	2.98	20.53
广东	6.48	7.08	5.96	6.41	5.71	4.79	26.08
广西	2.46	2.61	2.39	2.48	2.27	1.85	24.66
海南	1.31	1.49	1.27	1.41	1.3	1.23	6.11
重庆	8.2	9.36	9.34	9.14	8.47	6.52	20.59
四川	3.33	3.45	3.42	3.55	3.19	2.69	19.28
贵州	2.99	2.87	3	2.93	2.51	1.99	33.47
云南	1.09	1.09	1.11	1.22	1.13	0.93	14.74
西藏	0.49	0.49	0.52	0.48	0.48	0.5	-3.21
陕西	6.18	6.53	6.26	5.81	5.22	4.58	25.88
甘肃	2.05	2.3	2.3	2.22	2.02	1.82	10.93
青海	1.06	1.33	1.2	1.37	1.29	1.16	-9.57
宁夏	3.66	5.24	5.04	4.48	3.84	3.09	15.56
新疆	2.3	2.42	2.74	3.13	2.78	2.01	12.61
全国	6.34	7.14	6.45	6.46	5.75	4.75	24.98

1) 香港、澳门、台湾资料暂缺，下同

表 2 2015 年相比 2010 年柱浓度变化量 $\times 10^{15}/\text{cm}^{-2}$ Table 2 Decrease in NO_2 VCDs in 2015 compared to 2010 $\times 10^{15}/\text{cm}^{-2}$

省份	城市	下降量	省份	城市	下降量
河南	焦作	9.33	浙江	湖州	4.63
河北	邯郸	9.24	江苏	南京	4.59
河南	新乡	8.36	江苏	泰州	4.5
河南	鹤壁	8.01	广东	江门	4.41
河北	邢台	7.85	河北	衡水	4.33
河南	洛阳	7.75	山东	菏泽	4.31
山东	济宁	7.02	陕西	西安	4.24
河南	安阳	6.75	上海	上海	4.17
河北	石家庄	6.28	河南	开封	4.17
河南	濮阳	6.19	山东	东营	4.14
山东	德州	5.9	河北	唐山	4.14
山东	聊城	5.6	江苏	无锡	4.13
河南	郑州	5.55	陕西	渭南	4.11
江苏	扬州	5.34	山东	潍坊	4.1
山西	晋城	5.07	河南	平顶山	4.09
江苏	常州	5.04	山东	济南	4.08
江苏	镇江	5.02	安徽	淮北	4.07
天津	天津	4.93	山东	淄博	4.06
广东	佛山	4.75			

间 NO_x 减排效果明显。

2.3 “十三五”初期 NO_2 柱浓度变化

(1) 全国及各省 NO_2 柱浓度变化

我国对流层 NO_2 柱浓度均值由 2015 年的 $4.75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 下降到 2016 年的 $4.60 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，年均降幅为 3.18%，这表明“十三五”开局之年 NO_x 排放量持续下降。从各省 NO_2 柱浓度变化来看，安徽、重庆、浙江等省份（市）降幅超过 10%，但北京、天津、河北、上海、福建、广东、广西等地区有所上升，见表 3。2016 年三大重点区域京津冀、长三角、珠三角 NO_2 柱浓度均值分别为 13.26×10^{15} 、 9.49×10^{15} 、 $4.99 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，相比 2015 年京津冀、珠三角 NO_2 柱浓度均有上升趋势，长三角区域 NO_2 柱浓度有所下降，见图 6。2016 年 NO_2 对流层柱浓度表明，天津、北京、上海、河北、山东、江苏位居全国前六名，均超过 $10 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，远高于全国平均浓度 $4.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，整个华北、华东地区 NO_2 污染程度最严重，见图 7。

表 3 2015-2016 年全国及各省 NO_2 柱浓度变化趋势 $\times 10^{15}/\text{cm}^{-2}$ Table 3 Variations in NO_2 VCDs in 2016 compared to 2015 $\times 10^{15}/\text{cm}^{-2}$

省份	2015 年	2016 年	降幅/%	省份	2015 年	2016 年	降幅/%
北京	12.91	13.09	-1.38	湖北	4.72	4.5	-4.61
天津	14.45	14.69	-1.69	湖南	2.98	2.94	1.61
河北	11.7	12.02	-2.68	广东	4.79	4.99	-4.11
山西	7.7	7.61	1.18	广西	1.85	1.95	-5.34
内蒙	2.63	2.61	0.87	海南	1.23	1.13	7.79
辽宁	6.37	6.22	2.34	重庆	6.52	5.84	10.43
吉林	3.36	3.25	3.04	四川	2.69	2.64	1.86
黑龙江	2.46	2.3	6.46	贵州	1.99	1.99	-0.19
上海	12.98	13.02	-0.27	云南	0.93	1.1	-18.35
江苏	10.64	9.77	8.15	西藏	0.5	0.59	-16.51
浙江	6.35	5.69	10.33	陕西	4.58	4.17	9.09
安徽	6.94	6.2	10.67	甘肃	1.82	1.76	3.29
福建	3.17	3.21	-1.32	青海	1.16	1.1	5.15
江西	3.23	3.13	3.25	宁夏	3.09	3.12	-0.89
山东	10.63	10.37	2.52	新疆	2.01	1.96	2.49
河南	8.64	8.03	7.03	全国	4.75	4.6	3.18

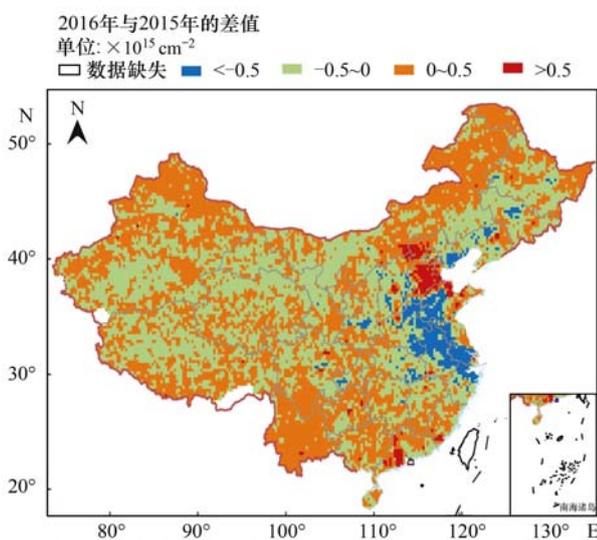
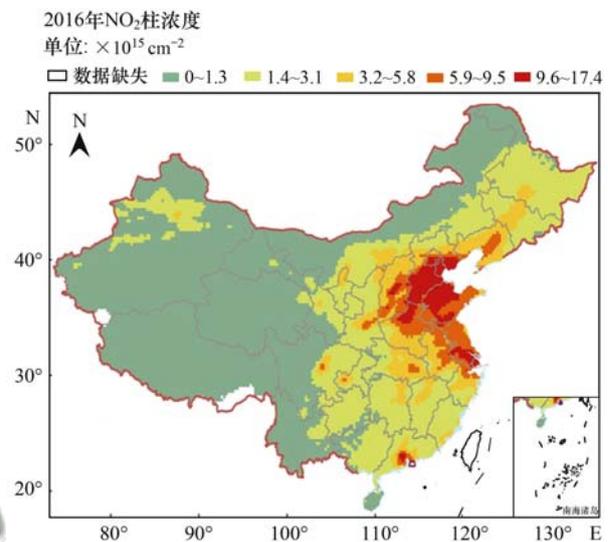
(2) 地级及以上城市 NO_2 柱浓度变化

对 2015~2016 年全国 338 个地级及以上城市 NO_2 柱浓度的变化趋势进行分析(表 4)，结果表明：新乡、苏州、南通、无锡、马鞍山等 20 城市 NO_2 柱浓度下降较为明显，下降量超过 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，但佛山、衡水、保定、沧州 NO_2 柱浓度上升较为明显，上升 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 以上，建议将以上城市辖区内的污染源作为下一年度 NO_x 总量核查工作的重点。2016 年城市 NO_2 柱浓度由高到低依次是石家庄、

唐山、邢台、邯郸、淄博、天津、廊坊、北京、上海、安阳、济南、保定、苏州、滨州、无锡、临沂、常州、新乡、东营、焦作等，由此可见，华北平原及华东地区城市群 NO_2 污染严重。城市 NO_2 柱浓度升高可能由三方面原因导致：一是城市机动车保有量增大，致使 NO_2 浓度升高；二是城市辖区内新建 NO_x 高排放企业，如火电厂、水泥厂等；三是城市辖区内现役企业 NO_x 治理水平降低；具体原因应结合现场核查结果确定。

表 4 2016 年 NO₂ 柱浓度同比变化明显的城市 × 10¹⁵/cm⁻²Table 4 Cities with large variations of NO₂ VCDs in 2016 compared to 2015 × 10¹⁵/cm⁻²

省份	城市	2015 年	2016 年	下降量	省份	城市	2015 年	2016 年	下降量
河南	新乡	13.47	11.64	1.83	河北	秦皇岛	10.77	9.66	1.11
江苏	苏州	14.26	12.7	1.56	山东	淄博	16.18	15.08	1.1
江苏	南通	12.56	11.08	1.47	浙江	绍兴	8.7	7.6	1.1
江苏	无锡	13.75	12.34	1.42	江苏	泰州	10.28	9.2	1.08
安徽	马鞍山	10.56	9.18	1.38	陕西	咸阳	8.52	7.47	1.06
浙江	杭州	9.45	8.13	1.33	江苏	南京	11.9	10.85	1.05
江苏	常州	13.05	11.73	1.32	江苏	宿迁	8.22	7.2	1.02
山东	聊城	11.58	10.33	1.25	安徽	宿州	7.56	6.55	1.01
安徽	芜湖	9.39	8.22	1.17	河北	沧州	10.21	11.22	-1.01
江苏	镇江	11.87	10.73	1.13	河北	保定	11.72	12.91	-1.19
陕西	西安	9.35	8.23	1.12	河北	衡水	9.54	10.81	-1.27
河南	安阳	14.08	12.97	1.11	广东	佛山	8.97	10.49	-1.53

图 6 2016 年与 2015 年 NO₂ 对流层柱浓度的差值Fig. 6 Decrease in annual NO₂ VCDs over China in 2016 compared to 2015图 7 2016 年中国 NO₂ 对流层柱浓度Fig. 7 Annual NO₂ VCDs over China in 2016

3 结论

(1) 卫星观测 NO₂ 柱浓度能够敏感地反映 NO_x 排放趋势。由于重大活动期间城市 NO_x 排放量大幅下降, 本文采用国控空气质量监测站点所在网格处 NO₂ 柱浓度数据, 分析该城市不同年份同期 NO₂ 柱浓度的变化, 证明卫星观测 NO₂ 柱浓度变化可以表征地面 NO_x 排放量的变化趋势。

(2) “十二五”期间我国 NO_x 减排取得显著效果。2015 年相比 2010 年全国 NO₂ 对流层柱浓度降幅为 24.98%, 大部分省份 NO₂ 柱浓度高值出现在 2011 年和 2012 年, 重点行业脱硝装置开始普及之后, 尤其是“大气十条”实施以来, NO_x 排放量呈明显下降趋势, 这与 NO_x 总量核查结果基本一致。

(3) “十三五”初期, 2016 年我国 NO_x 排放量相

比 2015 年继续下降。2016 年全国 NO₂ 对流层柱浓度年均降幅为 3.18%, 但北京、天津、河北、上海、福建、广东、广西等省份有所上升, 建议将以上地区作为下一年度 NO_x 总量核查的重点。

参考文献:

- [1] 周维, 王雪松, 张远航, 等. 我国 NO_x 污染状况与环境效应及综合控制策略[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(2): 323-330.
Zhou W, Wang X S, Zhang Y H, et al. Current status of nitrogen oxides related pollution in China and integrated control strategy [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(2): 323-330.
- [2] Geng F H, Zhao C S, Tang X, et al. Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: a case study[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(5): 989-1001.
- [3] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 北京市夏季不同 O₃ 和 PM_{2.5} 污染状况研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 807-815.
Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, et al. Different air pollution situations of O₃ and PM_{2.5} during summer in Beijing [J].

- Environmental Science, 2016, **37**(3): 807-815.
- [4] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district[J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 443-451.
- [5] 周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 等. 南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1926-1934.
Zhou Y Y, Ma Y, Zheng J, *et al.* Pollution characteristics and light extinction effects of water-soluble ions in PM_{2.5} during winter hazy days at north suburban Nanjing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1926-1934.
- [6] Beirle S, Boersma K F, Platt U, *et al.* Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space[J]. Science, 2011, **333** (6050): 1737- 1739, doi: 10.1126/science.1207824.
- [7] Cheng Y F, Zheng G J, Wei C, *et al.* Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China [J]. Science Advances, 2016, **2** (12): E1601530, doi: 10.1126/sciadv.1601530.
- [8] 国务院. 节能减排“十二五”规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zw/gk/2012-08/21/content_2207867.htm, 2012-08-21.
- [9] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. <http://www.mit.gov.cn/n1446290/n146392/c4676365/content.html>, 2016-03-18.
- [10] 杨晓东. 实施污染物总量控制的要点和保证[J]. 环境科学, 1998, **19**(S1): 7-13.
- [11] 环境保护部. 环境保护部发布 2013 年度全国主要污染物总量减排考核公告[EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201408/t20140828_288398.htm, 2014-08-28.
- [12] 陈吉宁. 以改善环境质量为核心 全力打好补齐环保短板攻坚战[N]. 中国环境报, 2016-01-14(001).
- [13] 张强, 耿冠楠, 王斯文, 等. 卫星遥感观测中国 1996~2010 年氮氧化物排放变化[J]. 科学通报, 2012, **57**(16): 1446-1453.
Zhang Q, Geng G N, Wang S W, *et al.* Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China during 1996-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **57**(22): 2857-2864.
- [14] 余环, 王普才, 宗雪梅, 等. 奥运期间北京地区卫星监测 NO₂ 柱浓度的变化[J]. 科学通报, 2009, **54**(3): 299-304.
- [15] 王英, 李令军, 刘阳. 京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3685-3692.
Wang Y, Li L J, Liu Y. Characteristics of atmospheric NO₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei region and the Yangtze River delta analyzed by satellite and ground observations[J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3685-3692.
- [16] 高晋徽, 朱彬, 王言哲, 等. 2005~2013 年中国地区对流层二氧化氮分布及变化趋势[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2307-2318.
Gao J H, Zhu B, Wang Y Z, *et al.* Distribution and long-term variation of tropospheric NO₂ over China during 2005 to 2013 [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2307-2318.
- [17] 张兴赢, 张鹏, 张艳, 等. 近 10a 中国对流层 NO₂ 的变化趋势、时空分布特征及其来源解析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, **37**(10): 1409-1416.
- [18] Kramer L J, Leigh R J, Remedios J J, *et al.* Comparison of OMI and ground-based in situ and MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113** (D16): D16S39, doi: 10.1029/2007JD009168.
- [19] Bucsela E J, Perring A E, Cohen R C, *et al.* Comparison of tropospheric NO₂ from in situ aircraft measurements with near-real-time and standard product data from OMI[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113** (D16): D16S31, doi: 10.1029/2007JD008838.
- [20] Huijnen V, Eskes H J, Poupkou A, *et al.* Comparison of OMI NO₂ tropospheric columns with an ensemble of global and European regional air quality models[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(7): 3273-3296.
- [21] Lin J T, McElroy M B. Detection from space of a reduction in anthropogenic emissions of nitrogen oxides during the Chinese economic downturn[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11** (15): 8171- 8188, doi: 10.5194/acp-11-8171-2011.
- [22] Mijling B, Van Der A R J, Boersma K F, *et al.* Reductions of NO₂ detected from space during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Geophysical Research Letters, 2009, **36** (13): L13801, doi: 10.1029/2009GL038943.
- [23] Duncan B N, Lamsal L N, Thompson A M, *et al.* A space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO_x pollution around the world (2005-2014) [J]. Journal of Geophysical Research, 2015, **121** (2): 976- 996, doi: 10.1002/2015JD024121.
- [24] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 2015 年田径锦标赛和大阅兵活动期间北京市 NO_x 浓度特征[J]. 中国科学院大学学报, 2016, **33**(6): 834-843.
Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Characteristics of NO_x concentrations during IAAF world championships in Athletics and 9.3 military parade periods in 2015 in Beijing [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, **33**(6): 834-843.
- [25] 环境保护部, 大气环境管理司. 长三角区域大气污染防治协作机制办公室会议召开 动员部署杭州 G20 峰会空气质量保障工作 [EB/OL]. http://dqhj.mep.gov.cn/qyxyzwrhjd/201605/t20160523_343693.shtml, 2016-12-10.
- [26] 国家统计局. 环境统计资料[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/zjtc/ztsj/hjtjzl/>, 2017-02-03.
- [27] 国务院. 大气污染防治行动计划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zw/gk/2013-09/12/content_2486773.htm, 2013-09-12.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qiong-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)