

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

**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

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 ..... 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 ..... 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中汞形态污染及其与碳组分的关系 ..... 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM<sub>2.5</sub> 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 ..... 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 ..... 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 ..... 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 ..... 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 ..... 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM<sub>2.5</sub> 日均值变化分析: 以常州为例 ..... 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 ..... 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 ..... 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 ..... 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 ..... 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 ..... 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 ..... 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 ..... 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 ..... 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 ..... 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 ..... 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 ..... 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO<sub>2</sub>/膨润土复合材料对 Hg<sup>2+</sup> 的吸附性能研究 ..... 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 ..... 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 ..... 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 ..... 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 ..... 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N<sub>2</sub>O 的产生特性 ..... 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 ..... 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 ..... 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 ..... 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 ..... 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 ..... 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 ..... 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 ..... 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 ..... 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 ..... 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 ..... 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 ..... 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 ..... 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 ..... 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 ..... 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 ..... 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 ..... 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 ..... 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 ..... 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 ..... 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 ..... 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 ..... 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

## 2003 ~ 2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析

张宸赫<sup>1,3</sup>, 赵天良<sup>1\*</sup>, 王富<sup>2</sup>, 徐祥德<sup>3</sup>, 苏航<sup>4</sup>, 程兴宏<sup>3</sup>, 谭成好<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 中国气象局, 国家卫星气象中心, 北京 100081; 3. 中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 4. 辽宁省气象台, 沈阳 110166)

**摘要:** 利用 2003 ~ 2014 年 MODIS-Aqua 气溶胶光学厚度(AOD)产品、DMSP 卫星夜间灯光时间资料和基本气象资料, 分析我国东北三省(辽宁、吉林、黑龙江)大气气溶胶光学厚度年际变化及季节变化的空间分布特征。结果表明, 东北三省多年平均 AOD 空间分布存在由大连、沈阳、长春和哈尔滨等城市构成的一个高值带, 呈东北-西南走向, 多年平均 AOD 值为 0.4 ~ 0.8; 东北三省植被覆盖率较高的东部和北部是 AOD 的低值区, 多年平均 AOD 小于 0.3; 东北三省 AOD 季节变化为 AOD 春季到夏季升高, 秋季下降, 冬季再次升高。东北三省 AOD 年际变化特征为大部分低值地区呈减小趋势, 但以沈阳、长春和哈尔滨为轴线的东北-西南走向的高值区域呈增大趋势, 反映了近 10 多年出现的空气质量两极分化趋势。此外研究了东北三省年 AOD 在强、弱西北太平洋夏季风年时的空间分布差异, 受地面风场影响, AOD 在强季风年时较弱季风年偏低。

**关键词:** 气溶胶光学厚度; 中国东北三省; MODIS; 西北太平洋夏季风; 年际变化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0476-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608043

## Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014

ZHANG Chen-he<sup>1,3</sup>, ZHAO Tian-liang<sup>1\*</sup>, WANG Fu<sup>2</sup>, XU Xiang-de<sup>3</sup>, SU Hang<sup>4</sup>, CHENG Xing-hong<sup>3</sup>, TAN Cheng-hao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 4. Meteorological Observatory of Liaoning Province, Shenyang 110166, China)

**Abstract:** Based on the MODIS-Aqua aerosol optical depth (AOD) products from 2003 to 2014, Nighttime Lights Time data from DMSP satellites and basic meteorological data, the AOD spatial distributions of interannual and seasonal variations over three northeastern provinces of China (Liaoning, Jilin, Heilongjiang) were analyzed. It was found that there was a northeast-southwest area of high annual average AOD composed of Dalian, Shenyang, Changchun, Harbin and other cities, the 12-year average AOD value was 0.4-0.8. The low AOD occurred in the eastern and northern areas of the three northeastern provinces of China, where the forest-covering rate was high, and the 12-year average AOD value was less than 0.3. The seasonal variations of annual average AOD showed an increasing trend from spring to summer, then decreased in autumn and increased again in winter. The interannual variations of AOD over three northeastern provinces of China showed a decreasing trend in most areas, but the increasing trend occurred in the northeast-southwest region with the axis formed by Shenyang, Changchun and Harbin, revealing the polarization in recent 10 years over three northeastern provinces of China. In addition, spatial distribution of annual average AOD over three northeastern provinces of China in the years of strong and weak Western North Pacific Summer Monsoon was studied. Affected by the surface wind field, annual average AOD in weak monsoon years was higher than that in strong monsoon years.

**Key words:** aerosol optical depth (AOD); three northeastern provinces of China; MODIS; western north pacific summer monsoon; interannual variation

大气气溶胶是指悬浮在大气中,具有一定稳定性的固态或液态微粒,主要集中在对流层尤其是大气边界层。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)的物理意义为沿辐射传输路径,单位截面上气溶胶吸收和散射对太阳辐射产生的总削弱强度。AOD 是表征气溶胶总含量的基本参数,受垂直方向

上大气气溶胶的柱浓度影响,而影响气溶胶浓度时

收稿日期: 2016-08-07; 修订日期: 2016-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0203304); 环境保护公益性行业科研专项(201509001)

作者简介: 张宸赫(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境与空气质量数值模拟, E-mail: zhangchmet66@163.com

\* 通信作者, E-mail: josef\_zhao@126.com

空分布的因素很多,首先是气溶胶排放源,其次是气象条件改变引起的气溶胶转化、传输和沉降<sup>[1]</sup>. 气溶胶光学厚度既可以表征大气气溶胶特性及其辐射效应,也可以作为评价大气环境污染的关键因子. 因此,分析 AOD 的时空分布信息,对于全面了解大气污染状况具有重要意义.

地基气溶胶光学厚度观测的精度较高,但由于站点分布稀疏,无法获取大范围高分辨率的 AOD 空间分布特征. 卫星遥感可以提供广阔范围内气溶胶的多种信息<sup>[2,3]</sup>,从而弥补地面观测资料缺乏、难以反映 AOD 空间分布和整体变化趋势的不足<sup>[4]</sup>. 当前使用最多的 MODIS(中分辨率成像光谱仪)卫星产品包含种类丰富的气溶胶时空变化信息,已发展成为监测区域气溶胶光学厚度分布的有效手段之一<sup>[5]</sup>. Luo 等<sup>[1]</sup>分析 2001 ~ 2010 年 MODIS 卫星资料,发现中国地区 AOD 分布存在“两低两高”的特征,人口密度和工业化程度对 AOD 分布的影响较大;关佳欣等<sup>[6]</sup>、郑小波等<sup>[7]</sup>发现中国地区 AOD 呈增长趋势;徐冉冉<sup>[8]</sup>利用 MODIS 卫星数据分析了环渤海地区 AOD 的空间分布情况,发现辽宁省中南部地区是 AOD 值较大的地区. 综合前人的研究,本文利用 MODIS 卫星产品,针对东北三省,对其气溶胶光学厚度的时空变化特征进行研究.

东北三省(辽宁、吉林、黑龙江)属大陆性季风气候,四季分明,是我国最大的商品粮生产基地、发展较早的工业重镇和城市群建设区. 近年来随着东北经济迅速发展以及城市规模扩大导致能源消耗迅速增加,使得该地区空气污染事件频发,生态环境的恶化严重地制约着东北地区经济和生态的发展<sup>[9,10]</sup>. 东北三省幅员辽阔,地形地貌复杂,加之气溶胶在时间和空间上的分布差异,因此利用高分辨率的卫星遥感数据分析东北三省气溶胶光学厚度时空分布特征及变化趋势,对认识区域环境气候变化具有重要意义.

## 1 材料与方法

美国国家宇航局(NASA)发射的 Aqua 太阳同步极地轨道卫星于每日地方时 13:30 过境,称作对地观测下午星(ESO-PM1). MODIS 是 Aqua 卫星上搭载的重要仪器,每天覆盖全球一次,可提供可见光、近红外和红外共 36 个通道的探测资料,扫描宽度为 2 330 km<sup>[6]</sup>. 本文使用数据来自于该传感器 2003 ~ 2014 年 Level-3 月平均陆上气溶胶数据集(<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>),版本为

5.1,分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,波段为 550 nm.

MODIS 卫星的 AOD 产品在中国地区的适用性已经有国内外的学者做了广泛的验证. 李晓静等对 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品在中国区域的适用性做了检验<sup>[11]</sup>. Chu 等<sup>[12]</sup>通过与 AREONET 数据对比,认为 MODIS 陆地气溶胶光学厚度产品在 AOD 较大时(大于 0.25),相对误差在 20% 以内,符合科学研究要求. 王莉莉等<sup>[13]</sup>评估了这一产品在东北地区的适用性,结果表明 49% ~ 69% 的产品满足误差标准. AOD 的反演方法有暗像元法和深蓝算法两种,暗像元法适用于一般陆地上空的反演,深蓝算法适用于高纬度、高亮度下垫面的反演<sup>[14]</sup>. 东北地区受积雪覆盖的时间较长,造成地表的反照率较高,使用暗像元法反演的 AOD 数据会带来较大的误差<sup>[8]</sup>,因此本文采用深蓝算法反演的数据.

本文选取中国东北  $110 \sim 140^\circ \text{E}$ ,  $30 \sim 60^\circ \text{N}$  范围内辽宁、吉林和黑龙江三省为研究区域,季节划分根据天文因子,以 3 ~ 5 月为春季,6 ~ 8 月为夏季,9 ~ 11 月为秋季,12 月 ~ 翌年 2 月为冬季,计算东北三省 12 年间气溶胶光学厚度 AOD 多年和季节平均值、变化趋势. 使用最小二乘法计算 AOD 年(季节)的变化趋势  $b$ :

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中,  $x_i$  为年份序数,  $y_i$  为当年(季节) AOD 值,  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为年份序数和 AOD 的年(季节)平均值.

为了研究 AOD 变化趋势的影响因素,本文采用了 DMSP 卫星的夜间灯光时间数据(<http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>)和东北地区典型站点的地面气象数据(<http://data.cma.cn/data/index/>),分别讨论人为活动和气象条件对于 AOD 的影响. 为了研究季风活动对东北三省 AOD 的影响,本文挑选了研究年限内西北太平洋季风强、弱最显著的年份(<http://apdr.c.soest.hawaii.edu/projects/monsoon/seasonal-monidx.html>),对其 AOD 年平均值的空间分布差异进行分析,同时结合季风强、弱年分典型站点的地面气象数据,探究季风活动对 AOD 变化的影响.

## 2 结果与讨论

本文首先分析东北三省 2003 ~ 2014 年气溶胶

光学厚度 AOD 多年平均特征和年际变化趋势,然后按照季节差异分析东北三省 2003 ~ 2014 年气溶胶光学厚度 AOD 多年平均季节特征和季节年际变化趋势. 利用 DMSP 卫星提供的夜间灯光数据和东北三地区典型站点地面气象数据,分析了 AOD 多年平均特征和年际变化趋势出现的原因. 为了探究季风活动对气溶胶光学厚度的影响,本文还分别分析了强、弱西北太平洋季风年东北三省 AOD 年平均值的空间分布;利用东北地区典型站点的地面风速数据,研究季风活动引起的风场变化对 AOD 的影响.

## 2.1 AOD 多年平均及变化趋势

中国东北三省 2003 ~ 2014 年气溶胶光学厚度 AOD 多年平均特征的空间分布如图 1 所示,东北三省 AOD 值在 0 ~ 0.8 范围内. AOD 分布存在一个带状高值中心,该中心由大连、沈阳、长春和哈尔滨等大型城市构成,呈东北—西南走向,辽宁和吉林两省中部地区作为高值中心,多年平均 AOD 值为 0.4 ~ 0.8. AOD 以此为中心,向四周降低,辽宁、吉林两省西部地区多年平均 AOD 值为 0.3 ~ 0.4. 东北三省东部和北部等的地区是 AOD 的低值区,多年平均 AOD 小于 0.3,上述结论与 Luo 等<sup>[1]</sup>研究结果一致,徐冉冉<sup>[8]</sup>研究也发现,40°N 以北地区辽宁中部平原地带 AOD 值较大.

居民生活及工业排放是气溶胶污染物的主要来源之一. 图 2 所示是 2003 和 2013 年东北地区夜间灯光时间年平均归一化后的空间分布,夜间灯光时间的长短可以反映电力消耗量的多少,从而表征城市规模、人口密度和能源使用量等信息<sup>[15]</sup>. 从中可以看出,2003 和 2013 年东北地区夜间灯光时间的高值都位于沈阳、长春、哈尔滨等地区,呈现明显的带状分布,这说明上述地区是东北三省城

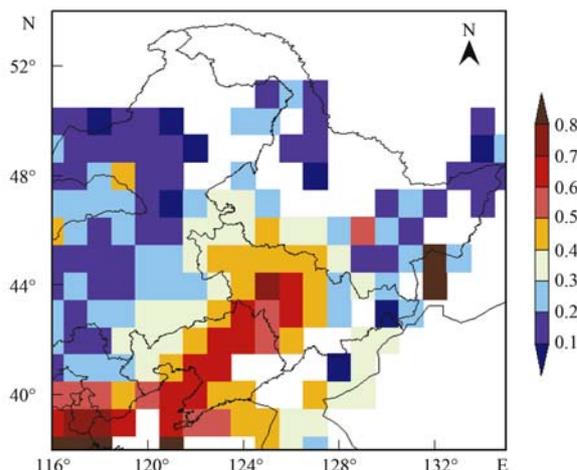


图 1 2003 ~ 2014 年东北三省多年平均 AOD 空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of annual average AOD over three northeastern provinces of China from 2003 to 2014

市规模大、工业生产集中以及人口密度大的地区,气溶胶排放量大导致 AOD 高值出现在这一地区. 东北地区多年平均 AOD 次高值出现在辽宁和吉林西部地区,该地区城市和工业规模虽然较小,但由于与内蒙古沙漠区相邻,易受输送的沙尘气溶胶影响,从而可能使 AOD 值较高. 东北地区 AOD 低值主要分布在黑龙江兴安岭山区和位于东北三省东部的东北—西南走向的长白山山脉. 这些地区植被茂密,地表覆盖度高,而且这些地区城市分布稀疏、人口稀少(图 2),所以大气气溶胶水平较低;有研究指出,地势较高的地区通常 AOD 值较低<sup>[16,17]</sup>. 因此,黑龙江和长白山地区多年平均 AOD 低于 0.3.

中国东北三省 2003 ~ 2014 年 AOD 变化趋势空间分布如图 3 所示,3 个省份的大部分地区 AOD 都呈减小趋势,AOD 变率为 0 ~ -0.05 a<sup>-1</sup>. AOD 呈增大趋势的地区是以沈阳、长春和哈尔滨为轴线的

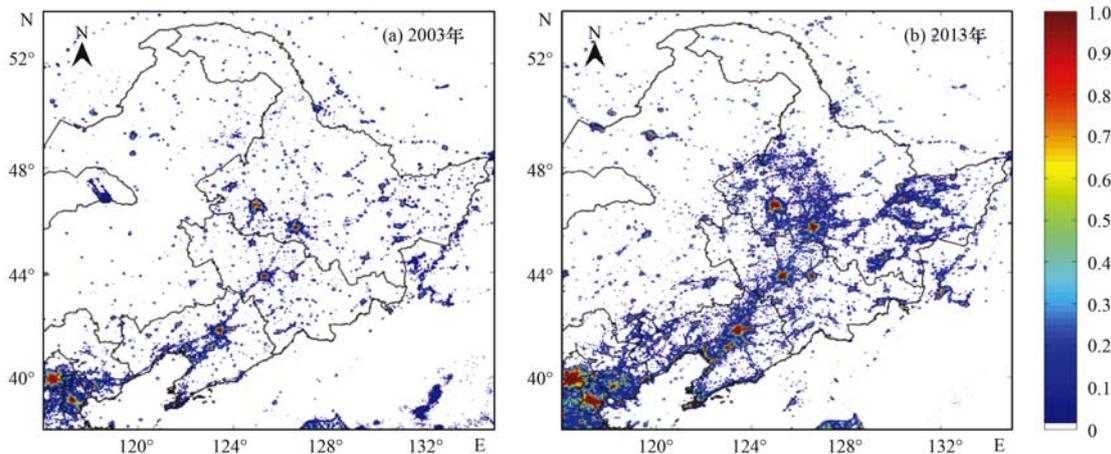


图 2 2003 和 2013 年东北地区夜间灯光时间空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of Nighttime Lights Time over three northeastern provinces of China in 2003 and 2013

东北—西南走向区域, AOD 变率在  $0 \sim 0.05 \text{ a}^{-1}$ . 结合 AOD 多年平均值(图 1), 本研究发 现东北三省 AOD 变化特征表现为: 高值区出现增大、低值区出现减小的“两极分化”趋势. 赵胡笏<sup>[18]</sup>、柳晶<sup>[19]</sup>的研究也分别与本文“两极分化”趋势的结论一致.

对比图 2 中 2003 年和 2013 年东北地区夜间灯光时间来看, 东北地区城市规模有扩大趋势, 这一扩大趋势在沈阳、长春和哈尔滨形成的带状城市群区域尤为明显; 图 2 中大型城市的对应区域颜色逐渐变红, 说明夜间灯光时间也在变长, 反映了人为活动增强. 城市规模的逐年扩大, 加之人口向大型城市流入且人为活动增强, 就必然导致以煤、石油等化石燃料为主的能源消费不断增加<sup>[20]</sup>, 城市保有机动车数量大幅度上升导致尾气污染严重, 这就最终造成气溶胶排放量逐年增加, AOD 呈现变大趋势.

对于 AOD 值本身较低的东北三省其他地区而言, 虽然其城市规模也有轻微扩大, 但是全国第六次人口普查数据显示, 东北三省人口连续多年净流出,

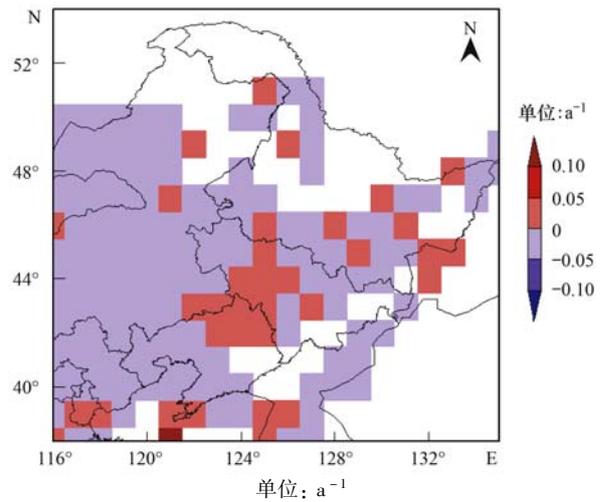


图 3 2003 ~ 2014 年东北三省 AOD 变化趋势空间分布  
Fig. 3 Spatial distributions of interannual variations of AOD over three northeastern provinces of China from 2003 to 2014

流失人口多达 400 余万人, 除沈阳、长春和哈尔滨等省会城市外, 其他地区均为人口净流出<sup>[21]</sup>, 这就说明 AOD 值较低的地区, 虽然城市规模变大, 但人

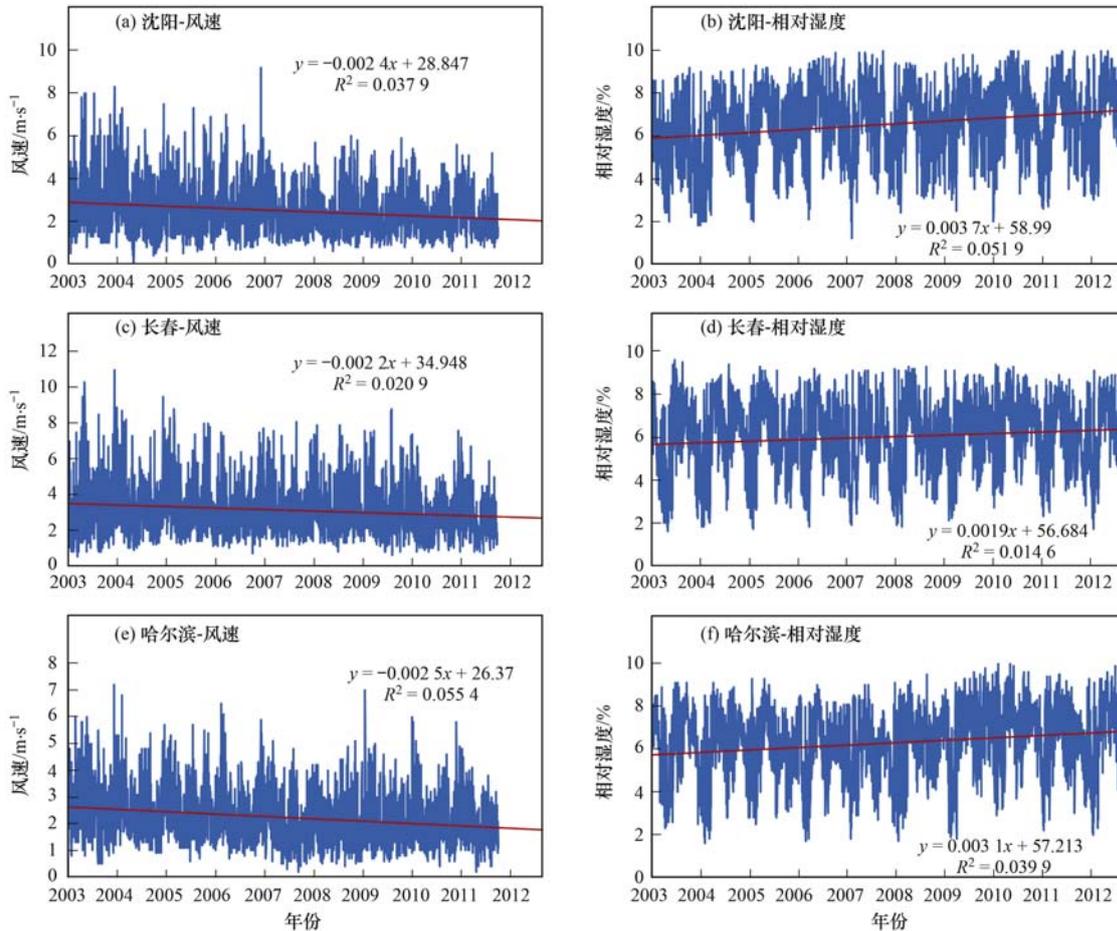


图 4 东北地区城市站点(沈阳、长春、哈尔滨)风速和相对湿度变化趋势

Fig. 4 Variation trends of surface wind speed and relative humidity of three urban stations over three northeastern provinces of China (Shenyang, Changchun and Harbin)

口逐年流失,就会导致人为活动明显减弱而造成气溶胶污染排放量降低,AOD 呈现变小的趋势.图 2 中非大型城市对应区域颜色未出现明显变化,也证明了这一结论.

本文选取了沈阳、长春、哈尔滨这 3 个城市站点的地面风速和相对湿度逐日数据,通过分析其变化趋势研究气象条件对于东北地区 AOD 变化趋势的影响.由图 4 可知,2003~2012 年间东北三省城市地区风速呈减小趋势,相对湿度呈增大趋势(通过 90% 的显著性检验).地面风速减小或无风微风天气频繁出现,说明大气在水平和垂直方向的输送和混合受到抑制,即静稳天气出现频率增加,因此城市地区的气溶胶污染物不易稀释扩散<sup>[22,23]</sup>;相对湿度的增大有利于气溶胶粒子的吸湿增长和二次转化,使得气溶胶质量浓度变大以及对太阳辐射的削弱加强.地面风速和相对湿度的共同作用导致 AOD 呈现变大趋势.对非城市地区而言,其气溶胶污染物主要来自于城市地区的输送.随着城市地区气溶胶污染物传输受到的

抑制作用加强,非城市地区气溶胶污染物的浓度就会逐渐降低,从而导致 AOD 呈现减小趋势.

## 2.2 季节 AOD 多年平均及变化趋势

中国东北三省 2003~2014 年不同季节 AOD 多年均值空间分布如图 5 所示.时间变化上,东北三省 AOD 春季到夏季升高,秋季下降,冬季再次升高;空间变化上,春、夏季 AOD 均自南向北逐渐降低,秋、冬季 AOD 高值则出现在辽宁中部至吉林中部地区.杨琨等<sup>[24]</sup>研究指出,在中国东北地区 AOD 季节变化存在“从春季到夏季是逐渐增大,到秋季有所减小,冬季又有所增大”的变化特征.赵胡箭对东北城市地区 AOD 研究发现,气溶胶光学厚度最大值多出现在 5 月及 7 月,最小值多出现在 10 月,而进入取暖期后,1 月气溶胶光学厚度有所增加<sup>[18]</sup>.相比于上述学者通过地面单站太阳辐射强度变化推算 AOD 变化的方法,本研究采用卫星遥感得到的 AOD 数据,能够更加准确地反映出 AOD 季节变化的空间分布特性.

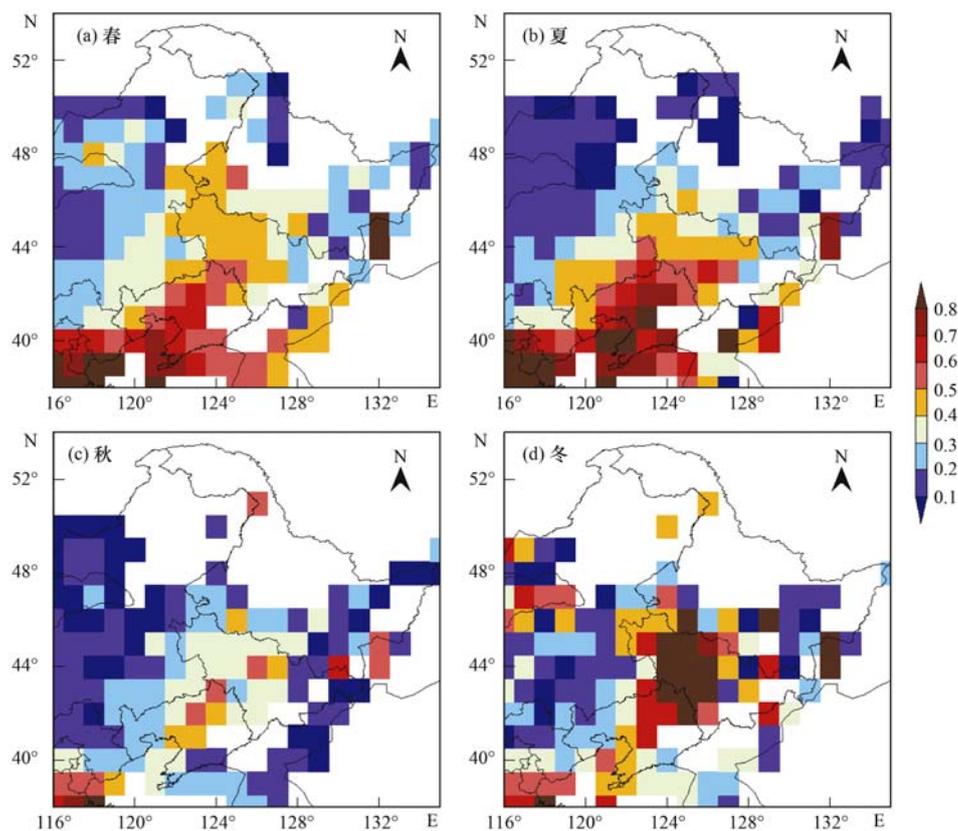


图 5 2003~2014 年东北三省 AOD 春、夏、秋、冬季节平均空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of seasonal average AOD over three northeastern provinces of China from 2003 to 2014 in spring, summer, autumn and winter

春季,辽宁省大部分地区 AOD 多年均值在 0.4 以上且一直延伸至吉林中、西部地区;辽西地区和黑龙江南部地区 AOD 略有降低,在 0.3~0.4 之间.

东北三省属于大陆性季风气候,春季降水少,空气干燥且植被覆盖率较低,扬沙天气等较多<sup>[25]</sup>.有研究指出,在沙尘天气的多发季节,气溶胶光学厚度与沙

尘天气有较好的相关性<sup>[26]</sup>;加之来自内蒙古沙尘气溶胶向东北输送,在城市与人为排放的气溶胶相叠加,造成东北三省春季 AOD 数值高。

夏季,东北三省 AOD 较春季增大,辽东半岛和辽宁中部城市群 AOD 多年均值在 0.7 ~ 0.8 之间,吉林地区和黑龙江南部地区 AOD 多年均值为 0.4 ~ 0.5 之间。夏季东北地区混合层发展较高,水平风速小,颗粒物不易扩散;降水充沛<sup>[8]</sup>,相对湿度增大以及温度达到年内最高,会促进气溶胶的吸湿增长和气粒转化<sup>[27,28]</sup>,从而增加气溶胶光学厚度。此外,当夏季副热带高压北移时,华北地区的污染物就会在东亚夏季风的输送作用下也会影响到东北地区<sup>[29]</sup>。

秋季 AOD 值相比于夏季降低,辽宁中部至吉林中部地区多年 AOD 均值约 0.4 ~ 0.6,辽宁西部和吉林西部地区多年 AOD 均值在 0.2 ~ 0.4 之间,其他地区 AOD 低于 0.2。秋季空气相对干燥,常有大

尺度、大强度的天气系统自北向南移动,带来“清洁”的空气对气溶胶污染物有稀释作用<sup>[27]</sup>,同时也阻止了华北地区的污染物北移对东北地区的污染,从而导致 AOD 下降。

冬季东北三省 AOD 值再次升高,辽宁、吉林和黑龙江南部地区多年 AOD 均值高于 0.7。冬季 AOD 增大最主要的原因可能是煤炭使用量增加,东北地区冬季供暖主要依靠燃煤,这就会导致气溶胶粒子排放量增加。另外,冬季气温较低,混合层不高,静稳天气出现频繁,污染物不易向外输送而在近地层堆积<sup>[18]</sup>,从而导致气溶胶浓度增大。

中国东北三省 2003 ~ 2014 年不同季节的 AOD 变化趋势空间分布如图 6 所示,可以看出,东北三省大部分地区 AOD 在春、夏季以减小趋势为主,呈增大趋势的地区主要出现在冬季的辽宁和吉林中、西部地区以及秋季的黑龙江中、南部地区。

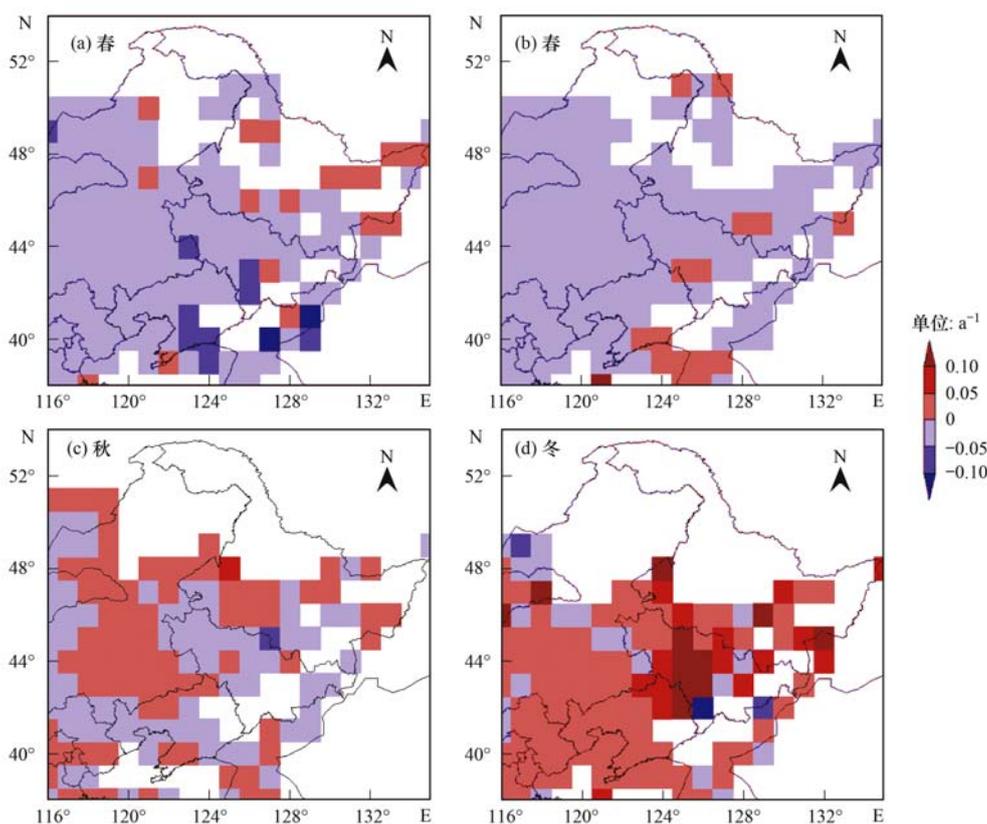


图 6 2003 ~ 2014 年东北三省 AOD 春、夏、秋、冬季节变率空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of seasonal variations of AOD over three northeastern provinces of China from 2003 to 2014 in spring, summer, autumn and winter

春季和夏季,东北三省 AOD 均以呈减小的趋势为主。东北地区的春季 AOD 浓度主要取决于沙尘气溶胶含量,东北三省的沙尘气溶胶主要来自于我国北方及外蒙沙漠地区的远距离输送<sup>[18]</sup>。东亚冬季风活动会给东北地区带来春季的沙尘暴和扬沙天

气,80 年代中后期以来东亚冬季风活动严重偏弱<sup>[21]</sup>,导致春季大气中沙尘气溶胶含量降低,AOD 减小。相比于春季,夏季 AOD 的变率在辽宁和吉林的部分地区达到  $-0.05 \sim -0.1 \text{ a}^{-1}$ 。1999 年以来,东北地区夏季降水进入偏少阶段<sup>[30,31]</sup>,夏季降水偏

少不利于气溶胶粒子吸湿增长,从而导致夏季 AOD 呈减小趋势。

秋季和冬季,辽宁中北部、吉林中、西部以及黑龙江中、南部地区 AOD 呈现增大趋势。黑龙江南部和中部是东北最大的农耕区,秋天为农业收获季节,秸秆焚烧和地表的快速裸露使得大气中气溶胶含量上升,AOD 增大。冬季,辽宁中北部,吉林中部和黑龙江的哈尔滨地区 AOD 呈增大趋势,增幅大于  $0.05 \text{ a}^{-1}$ 。东北地区冬季的燃煤供暖过程向大气排放气溶胶<sup>[20]</sup>,特别是大型城市的气溶胶排放量巨大,而辽宁中北部、吉林中部和哈尔滨地区在 21 世纪以来城市规模迅速扩大(图 2),人口密度持续升高,这就导致冬季排放的气溶胶也增多;吉齐等研究指出中国东北近 50 年冬季气温有上升趋势,冬季温度升高利于气溶胶粒子发生二次转化,使得污染加重而导致该地区冬季 AOD 呈增大趋势<sup>[23]</sup>。

### 2.3 季风变化的影响

东北三省属温带大陆性季风气候,西北太平洋夏季风对东北地区气候气象有明显的影响。亚洲是受季风影响最显著的地区之一<sup>[32]</sup>,季风活动会影响区域风场,风场的变化对大气气溶胶分布有重要影响<sup>[33]</sup>。本文为了研究东北三省 AOD 在季风强、弱年份的差异,选取 2004 年(季风指数为 0.176,强季风年)和 2009 年(季风指数为 -2.689,弱季风年)分析东北三省 AOD 年平均值空间分布情况。

在强、弱季风年东北三省 AOD 年平均值空间分布如图 7 所示,可以看出在强季风年东北三省 AOD 年平均值较弱季风年低,在人口和工业密集的辽宁中部城市群、吉林中部和黑龙江南部地区该特征尤为明显。以吉林中部地区为例,在强季风年,AOD 年均值为 0.2~0.5,在弱季风年,AOD 年均值大于 0.7,长春等大城市 AOD 年均值在 0.8 以上。

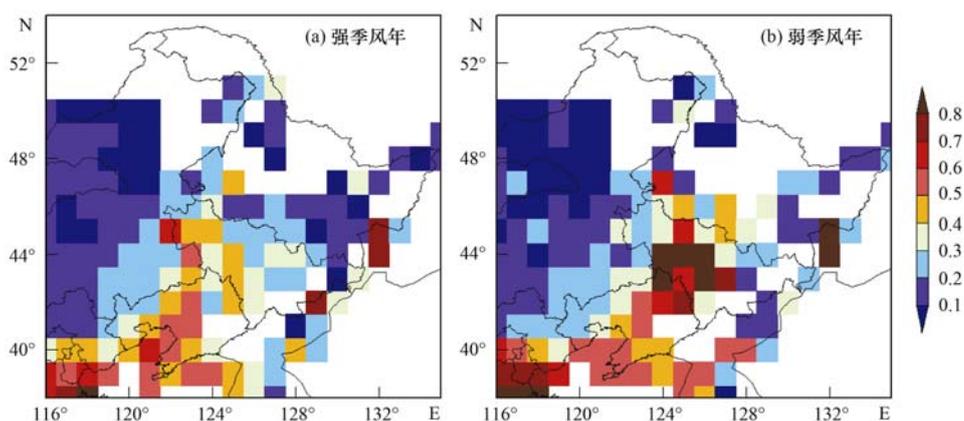
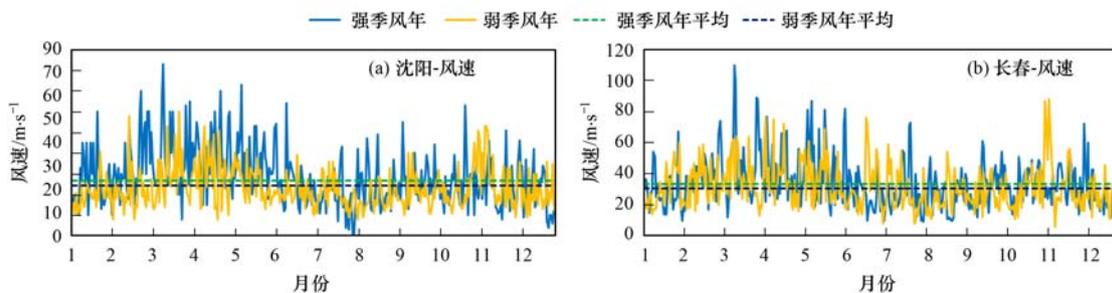


图 7 强季风年和弱季风年东北三省 AOD 年平均值空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of annual average AOD over three northeastern provinces of China during the years of strong and weak Western North Pacific Summer Monsoon

造成此差异的主要原因是强、弱季风年东北三省地面风场强度不同。东北三省大气气溶胶主要来自于人为活动排放,城市群是气溶胶浓度的高值区,

气溶胶污染物主要依靠地面风进行稀释,并且向非城市区输送。从图 8 可以看出,2003~2011 年间沈阳和长春两个站点的强季风年地面风速年均值高于



沈阳和长春的强、弱季风年平均值分别为  $2.676 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $2.447 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $3.371 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $3.067 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 8 沈阳和长春强、弱季风年地面风速变化趋势

Fig. 8 Variation trends of surface wind speed in Shenyang and Changchun during the years of strong and weak Western North Pacific Summer Monsoon

弱季风年地面风速年均值; 对比强、弱季风年地面风速的逐日变化, 地面风速在强季风年基本大于弱季风年, 这使得气溶胶污染物在强季风年更容易被稀释, 气溶胶向外输送强烈, AOD 减小. Liu 等<sup>[33]</sup>研究发现, 在东北亚地区强季风年时, 经向风的传输作用更强; Bao 等<sup>[34]</sup>也指出, 东亚地区 AOD 的时空分布特征与风场密切相关.

### 3 结论

(1) 东北三省 AOD 多年平均值存在由大连、沈阳、长春和哈尔滨构成的东北-西南走向高值中心, 城市集中、人口密度大是该地区出现 AOD 高值的主要原因; 东北三省东部和北部是植被覆盖率较高的地区, 所以 AOD 多年均值较低. 东北三省 AOD 多年变化特征表现为: AOD 高值区出现 AOD 增大、AOD 低值区出现 AOD 减小的“两极分化”趋势. 人为活动和气象条件变化是导致该两极分化趋势出现的原因.

(2) 东北三省 AOD 春季到夏季升高, 秋季下降, 冬季再次升高. 夏季 AOD 高值与降水增多, 温度升高有关; 冬季 AOD 高值与供暖排放有关. 春、夏季东北三省 AOD 均以呈减小趋势为主, 主要原因与东北地区季风活动减弱、夏季降水减少有关. 秋、冬季 AOD 变化在辽宁中北部、吉林中、西部以及黑龙江中、南部地区呈现增大趋势, 其余地区呈减少趋势, 秋、冬季 AOD 增大与城市规模扩大, 人口密度增加有关.

(3) 西北太平洋夏季风对东北三省 AOD 年平均值存在影响, 强季风年 AOD 年平均值较弱季风年偏低, 在人口和工业密集地区该特征尤为明显. 强季风发生时, 地面风场增强, 对气溶胶有稀释作用, 从而导致 AOD 偏低.

(4) 本文受 MODIS 卫星数据时间尺度的影响, 只研究了 2003~2014 年间的东北三省 AOD 变化情况. 在后续的研究中, 可以使用时间尺度更长、空间分辨率更高、高纬度适用性更强的气溶胶光学厚度数据进行深入的分析.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Luo Y X, Zheng X B, Zhao T L, *et al.* A climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, **34**(3): 863-870.
- [ 2 ] 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM<sub>10</sub> 监测方面的应用研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(2): 178-184.
- He X, Deng Z Z, Li C C, *et al.* Application of MODIS AOD in surface PM<sub>10</sub> evaluation [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(2): 178-184.
- [ 3 ] 郭建平, 吴业荣, 张小曳, 等. BP 网络框架下 MODIS 气溶胶光学厚度产品估算中国东部 PM<sub>2.5</sub>[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 817-825.
- Guo J P, Wu Y R, Zhang X Y, *et al.* Estimation of PM<sub>2.5</sub> over Eastern China from MODIS aerosol optical depth using the back propagation neural network [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 817-825.
- [ 4 ] 张明明, 刘振波, 葛云健. 江苏省大气气溶胶光学厚度时空分布研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(12): 1775-1782.
- Zhang M M, Liu Z B, Ge Y J. Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosol optical depth in Jiangsu province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(12): 1775-1782.
- [ 5 ] 张丽娟. 北京市 MODIS 遥感气溶胶光学厚度与空气质量关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009. 11-15.
- Zhang L J. Study on the correlation between MODIS AOD products and the air pollution in Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009. 11-15.
- [ 6 ] 关佳欣, 李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, **46**(2): 185-191.
- Guan J X, Li C C. Spatial distributions and changes of aerosol optical depth over Eastern and Central China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, **46**(2): 185-191.
- [ 7 ] 郑小波, 周成霞, 罗宇翔, 等. 中国各省区近 10 年遥感气溶胶光学厚度和变化[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(4): 595-599.
- Zheng X B, Zhou C X, Luo Y X, *et al.* Chinese province-level variations and trends in aerosol optical depth from recent 10 years of remote sensing data [J]. *Ecology and Environment*, 2011, **20**(4): 595-599.
- [ 8 ] 徐冉冉. 基于 MODIS 遥感数据的环渤海地区气溶胶光学厚度获取及应用研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2011. 20-21.
- Xu R R. Information Acquisition of aerosol optical depth from MODIS sensor and application study in Bohai Rim [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2011. 20-21.
- [ 9 ] 马雁军, 杨洪斌, 方志刚, 等. 辽宁中部城市群大气污染现状及发展趋势分析[J]. *城市环境与城市生态*, 2003, **16**(5): 89-91.
- Ma Y J, Yang H B, Fang Z G, *et al.* Analysis of status and trends on the air pollution in the center multi-cities of Liaoning [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003, **16**(5): 89-91.
- [ 10 ] 李元宜, 李艳红. 辽宁中部城市群大气污染防治对策探讨[J]. *气象与环境学报*, 2010, **26**(4): 57-60.
- Li Y Y, Li Y H. Discussion on prevention and cure countermeasures of air pollution in the city group of middle Liaoning province [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, **26**(4): 57-60.
- [ 11 ] 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 中国区域 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品检验[J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(2): 147-156.
- Li X J, Zhang P, Zhang X Y, *et al.* Validation of aerosol optical thickness product over China with MODIS data operated at NSMC [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, **20**(2): 147-156.

- [12] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, *et al.* Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(12): MOD2-1-MOD2-4.
- [13] 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性[J]. *科学通报*, 2007, **52**(4): 477-486.
- Wang L L, Xin J Y, Wang Y S, *et al.* Validation of MODIS aerosol products by CSHNET over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(12): 1708-1718.
- [14] 胡蝶. 中国地区大气气溶胶光学厚度的卫星遥感监测分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012. 12-13.
- Hu D. Aerosol optical depth based on satellite observations in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. 12-13.
- [15] 潘竟虎, 李俊峰. 基于夜间灯光影像的中国电力消耗量估算及时空动态[J]. *地理研究*, 2016, **35**(4): 627-638.
- Pan J H, Li J F. Estimate and spatio-temporal dynamics of electricity consumption in China based on DMSP/OLS images [J]. *Geographical Research*, 2016, **35**(4): 627-638.
- [16] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J]. *科学通报*, 2003, **48**(19): 2094-2100.
- Li C C, Mao J T, Lau K H A, *et al.* Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(22): 2488-2495.
- [17] 郭阳洁, 洪松, 庄艳华, 等. 湖北省气溶胶光学厚度时空分布特征研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, **35**(11): 1381-1385.
- Guo Y J, Hong S, Zhuang Y H, *et al.* Temporal variation and spatial distribution of atmospheric aerosols over Hubei Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(11): 1381-1385.
- [18] 赵胡箭. 中国东北城市地区大气气溶胶光学特性及其直接辐射效应研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014. 35-45.
- Zhao H J. Analyses of the aerosol optical properties and direct radiative forcing over a group of urban and industrial region in Northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science, 2014. 35-45.
- [19] 柳晶. 中国地区气溶胶光学特性及辐射强迫的卫星遥感观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. 60-65.
- Liu J. Aerosol optical properties and its radiative effects based on satellite observations in China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008. 60-65.
- [20] 王浩洋, 吴艳兰. 安徽及周边地区气溶胶时空特征及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(7): 1972-1981.
- Wang H Y, Wu Y L. Characteristics and causes of spatio-temporal distribution of aerosol optical depth over Anhui and surrounding areas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(7): 1972-1981.
- [21] 姜玉. 东北地区人口变动对经济影响研究[J]. *黑河学刊*, 2016, (1): 8-11.
- Jiang Y. Impact on economic of population change in the northeast China [J]. *Heihe Journal*, 2016, (1): 8-11.
- [22] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 691-719.
- Huang R Y, Gu L, Chen J L, *et al.* Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the east asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(4): 691-719.
- [23] 吉奇, 宋冀凤, 刘辉. 近 50 年东北地区温度降水变化特征分析[J]. *气象与环境学报*, 2006, **22**(5): 1-5.
- Ji Q, Song J F, Liu H. Characteristics of temperature and precipitation in Northeast China from 1951 to 2000 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, **22**(5): 1-5.
- [24] 杨琨, 孙照渤, 倪东鸿. 1999-2003 年我国气溶胶光学厚度的变化特征[J]. *南京气象学院学报*, 2008, **31**(1): 92-96.
- Yang K, Sun Z B, Ni D H. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth over China during 1999-2003 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, **31**(1): 92-96.
- [25] 马雁军, 刘宁微, 洪也, 等. 2011 年春季辽宁一次沙尘天气过程及其对不同粒径颗粒物和空气质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(5): 1160-1167.
- Ma Y J, Liu N W, Hong Y, *et al.* The impacts on various particle sizes and the air quality caused by a dust weather process in Spring 2011 in Liaoning [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(5): 1160-1167.
- [26] 韩晶晶, 王式功, 祈斌, 等. 气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系[J]. *中国沙漠*, 2006, **26**(3): 362-369.
- Han J J, Wang S G, Qi B, *et al.* Distribution of aerosol optical thickness and its relation with dusty weather in China [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, **26**(3): 362-369.
- [27] Schaap M, Apituley A, Timmermans R M A, *et al.* Exploring the relation between aerosol optical depth and PM<sub>2.5</sub> at Cabauw, the Netherlands [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(3): 909-925.
- [28] Deng X L, Shi C E, Wu B W, *et al.* Analysis of aerosol characteristics and their relationships with meteorological parameters over Anhui province in China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **109-110**: 52-63.
- [29] 刘贞, 郑有飞, 刘建军, 等. 基于 A-train 卫星对中国北方地区气溶胶分布的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2891-2898.
- Liu Z, Zheng Y F, Liu J J, *et al.* Research on the distribution of the northern region of China aerosol based on A-train satellite [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2891-2898.
- [30] 丁婷, 陈丽娟, 崔大海. 东北夏季降水的年代际特征及环流变化[J]. *高原气象*, 2015, **34**(1): 220-229.
- Ding T, Chen L J, Cui D H. Decadal variations of summer precipitation in Northeast China and the associated circulation [J]. *Plateau Meteorology*, 2015, **34**(1): 220-229.
- [31] 李叶妮. 近 50 年来我国东北地区主要城市气候变化分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. 43-45.
- Li Y N. The analysis of climate change within major urban area approximate fifty years in Northeast China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013. 43-45.
- [32] Wang B, Fan Z. Choice of South Asian summer monsoon indices [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, **80**(4): 629-638.
- [33] Liu X D, Yan L B, Yang P, *et al.* Influence of Indian summer monsoon on aerosol loading in East Asia [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, **50**(3): 523-533.
- [34] Bao Z H, Zhu C Z, Hulugalla R, *et al.* Spatial and temporal characteristics of aerosol optical depth over East Asia and their association with wind fields [J]. *Meteorological Applications*, 2008, **15**(4): 455-463.

## CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing .....	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> ( 423 )
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China .....	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> ( 429 )
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Shengsi Region .....	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> ( 438 )
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM <sub>2.5</sub> from Mt. Taishan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> ( 445 )
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> ( 453 )
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> ( 461 )
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing .....	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> ( 469 )
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 .....	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> ( 476 )
Variation Analysis of Daily PM <sub>2.5</sub> Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou .....	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> ( 485 )
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> ( 495 )
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong .....	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> ( 502 )
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations .....	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> ( 510 )
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century .....	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> ( 517 )
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> ( 527 )
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> ( 535 )
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer .....	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> ( 547 )
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone .....	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> ( 555 )
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water .....	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> ( 563 )
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO .....	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> ( 572 )
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> ( 580 )
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants .....	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> ( 589 )
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> ( 600 )
Experimental Research of Hg <sup>2+</sup> Removal by TiO <sub>2</sub> /Bentonite Composite .....	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> ( 608 )
Impact of Ammonia and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> on Bromate and Disinfection By-products Control .....	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> ( 616 )
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks .....	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> ( 622 )
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite .....	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> ( 629 )
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 640 )
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes .....	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources .....	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 654 )
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System .....	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> ( 665 )
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> ( 672 )
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge .....	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> ( 679 )
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> .....	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 688 )
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge .....	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 697 )
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City .....	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> ( 703 )
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China .....	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> ( 711 )
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes .....	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 721 )
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil .....	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> ( 728 )
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> ( 735 )
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment .....	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> ( 743 )
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas .....	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> ( 752 )
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils .....	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 760 )
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances .....	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> ( 769 )
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity .....	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> ( 783 )
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain .....	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 792 )
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics .....	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> ( 802 )
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain .....	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> ( 809 )
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat .....	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> ( 815 )
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat .....	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> ( 825 )
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure .....	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> ( 832 )
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures .....	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei ( 837 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172