

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及生态、健康风险评估 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 陈姗, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N₂O排放的影响 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N₂O和CH₄排放的影响 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析

陈卫卫¹, 刘阳¹, 吴雪伟^{1,2}, 鲍秋阳³, 高枫亭⁴, 张学磊¹, 赵红梅¹, 张世春¹, 修艾军¹, 程天海⁵

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 吉林省环境科学研究院, 长春 130012; 4. 吉林省气象科学研究所, 长白山气象与气候变化吉林省重点实验室, 长春 130062; 5. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100049)

摘要: 东北已成为我国又一个霾污染多发和重发区域。采用2013~2017年东北区域大气污染物地面监测数据、卫星数据和气象数据等信息, 探讨了我国东北地区空气质量时空分布特征与重度污染成因。结果表明, “沈阳-长春-哈尔滨”带状城市群是全年污染最严重的区域, 空气质量指数(AQI)的空间分布具有明显的季节性, 冬季污染最严重, 春季吉林省西部周围为椭圆形污染区, 夏季和秋季大部分时间空气质量最佳。3个典型的霾污染时期是10月下旬和11月上旬(即秋末和初冬, 时期一), 12月下旬和1月(即冬季最冷的时候, 时期二), 及4月到5月中旬(即春季沙尘和农业耕作期)。时期一, 季节性作物残茬焚烧和冬季采暖用煤燃烧产生的PM_{2.5}强排放是极端霾事件发生的主要原因(AQI > 300); 时期二, 在最严寒月份里, 重度霾污染事件(200 < AQI < 300), 主要由燃煤和汽车燃料消耗的PM_{2.5}排放量高, 大气边界层较低, 以及大气扩散性差等共同引起; 时期三, 春季PM₁₀浓度较高, 主要是由内蒙古中部退化草原的风沙和吉林省西部裸地的区域性扬尘传输造成的。同时, 当地农业耕作本身也释放PM₁₀, 并提升了裸土的人为源矿物尘的排放强度。

关键词: PM₁₀; PM_{2.5}; 中分辨率成像光谱仪(MODIS); 云-气溶胶激光雷达与红外探路者卫星观测(CALIPSO); 农业活动; 燃料消耗; 气溶胶光学厚度(AOD)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4810-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807159

Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China

CHEN Wei-wei¹, LIU Yang¹, WU Xue-wei^{1,2}, BAO Qiu-yang³, GAO Zong-ting⁴, ZHANG Xue-lei¹, ZHAO Hong-mei¹, ZHANG Shi-chun¹, XIU Ai-jun¹, CHENG Tian-hai⁵

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jilin Provincial Academy of Environmental Sciences, Changchun 130012, China; 4. Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology & Climate Change, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China; 5. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Northeastern China experiences severe atmospheric pollution, with an increasing occurrence of heavy haze episodes. Based on ground monitoring data, satellite products and meteorological products of atmospheric pollutants in northeast China from 2013 to 2017, the characteristics of spatial and temporal distribution of air quality and the causes of heavy haze events in northeast China were discussed. It was found that the “Shenyang-Changchun-Harbin” city belt was the most polluted area in the region on an annual scale. The spatial distribution of air quality index (AQI) values had a clear seasonality, with the worst pollution occurring in winter, an approximately oval-shaped polluted area around western Jilin Province in spring, and the best air quality occurring in summer and most of autumn. The three periods that typically experienced intense haze events were Period I from late-October to early-November (i. e., late autumn and early winter), Period II from late-December to January (i. e., the coldest time in winter), and Period III from April to mid-May (i. e., spring). During Period I, strong PM_{2.5} emissions from seasonal crop residue burning and coal burning for winter heating were the dominant reasons for the occurrence of extreme haze events (AQI > 300). Period II had frequent heavy haze events (200 < AQI < 300) in the coldest months of January and February (200 < AQI < 300), which were due to high PM_{2.5} emissions from coal burning and vehicle fuel consumption, a lower atmospheric boundary layer, and stagnant atmospheric conditions. Haze events in Period III, with high PM₁₀ concentrations, were primarily caused by the regional transportation of windblown dust from degraded grassland in central Inner Mongolia and bare soil in western Jilin Province. Local agricultural tilling could also release PM₁₀ and enhance the levels of windblown dust from tilled soil.

Key words: PM₁₀; PM_{2.5}; moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS); cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation (CALIPSO); agricultural activity; coal burning; aerosol optical depth (AOD)

收稿日期: 2018-07-19; 修订日期: 2019-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212303, 2017YFC0212304); 国家自然科学基金项目(41775116, 41575129); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC045); 吉林省科技发展项目(20180520095JH); 中国科学院青年创新促进会项目(2017275); 中国科学院东北地理与农业生态研究所“一三五”培育项目(IGA-135-05)

作者简介: 陈卫卫(1983~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为东北区域大气环境及农业源大气污染物排放, E-mail: chenweiwei@iga.ac.cn

过去几十年来我国经济飞速增长,城市化进程不断加速,大气污染问题(特别是霾污染)日益突出,严重影响了生态环境、人体健康和区域经济的可持续发展^[1~3]。大量研究表明,大气污染呈现出区域性、复合性和长期性的特点^[4,5],污染影响范围已不再局限于单个城市或区域,城市间及区域间的大气污染传输和影响日渐突出。对大气霾污染成因的科学认识是制定治理措施的重要依据^[6],尽管近年来我国大气污染监测预警和治理技术已取得了长足的进展,《大气污染防治行动计划》实施以来,全国空气质量改善已初显成效^[7],然而很多区域的复合污染特征、形成机制、污染物来源及传输等科学问题仍然不清,限制了区域大气污染联防联控技术集成和应用。

自东北振兴“十二五”发展规划实施以来^[8],伴随着经济发展和能源消耗的增长,东北地区的大气霾污染问题日益突显,并逐渐发展成为我国第5大霾污染区域。霾天气已经是引发公众焦虑和政府关注的区域性重大灾害天气之一^[9,10]。东北具有典型的区域性特征,一方面,作为我国传统老工业基地、重要农业基地以及主要的集中供暖地区,该区域大气污染源排放呈现多样化;另一方面,东北呈现“三山夹平原”的地形,不利于大气污染物的扩散和传输,且其缺口正好面对京津冀重霾污染地区,远距离的污染物传输可能会影响本地区空气质量。东北地区秋冬寒冷,受供暖等多种因素影响,秋冬初霾污染事件频繁发生,已经成为一个典型事件^[11,12]。

有研究表明50年来(1961~2013年)东北地区霾日呈现出显著增加的趋势^[13]。近年来针对东北地区大气霾污染的研究逐渐增多,主要集中在典型城市尺度的大气污染物的监测、大气颗粒物的物理化学组分分析和气象要素分析。东北地区是中国的重工业基地,产业结构和布局不合理,对资源的依存度高^[14]。然而相对于其它区域,东北区域霾污染成因和发展机制的研究都还很欠缺,因此加强该区域的霾污染事件及大气颗粒物的研究对有效控制东北区域复合大气污染及改善区域空气质量具有重要指导意义。

本文采用地面监测的大气污染数据(2013~2017年)、气象数据、卫星遥感资料及统计资料等,系统分析了东北区域尺度上的空气质量现状、重度霾污染事件发生的时空特征和主要成因,并提出重度霾污染应对建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域

东北地区包括辽宁省、吉林省、黑龙江省和内

蒙古自治区东部(即“东四盟市”:呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市)。东北地区人口约1.2亿,占全国人口总数的8%。东北地区的地表结构,略呈半环状的三带,外围是黑龙江、乌苏里江、兴凯湖、图们江和鸭绿江等流域低地;紧接着是山地和丘陵地,主要包括西侧的大兴安岭、北西向的小兴安岭和东侧的长白山地等;山地丘陵以内则是广阔的平原,三者围成马蹄形,环抱肥沃的东北平原(即三江平原、松嫩平原和辽河平原),也称为“三山夹平原”地形。东北地区是我国重要的商品粮基地、重工业基地、畜牧业基地和林业基地。全境耕地面积为 $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$,是世界三大黑土区之一。属于温带湿润、半湿润季风气候,水热条件满足一年一熟,农作物以玉米,大豆,水稻和小麦等为主,生长季节一般为5~9月,而非生长季从10月持续到次年4月。2015年黑龙江、吉林、辽宁三省与内蒙古自治区粮食总产量14 800.5万t,占全国粮食总量的23.8%。东北地区气候寒冷,冬季月份的最低气温在 $-12 \sim -19^\circ\text{C}$,采暖期持续4~6个月。近年来,随着中国经济继续私有化和自由化,东北的重工业经济停滞不前,政府发起了“振兴东北”运动^[15],以应对这一问题,东北振兴“十三五”规划^[15]中明确指出把治理霾放在突出位置,逐渐消除重污染天气,探索建立防治空气污染跨省协调机制,提升重污染天气监测预警能力。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 地面监测数据

东北40个地级城市空气质量指数(AQI)、2013~2017年的大气污染物(即:PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO₂和CO)浓度和地面监测数据(小时值)来自于环保部发布信息。每个地级市设有3~12个地面监测站点,共计183个站点。空间变化分析基于城市站点年度和季节平均值,采用克里金插值法进行空间插值从而获得这些参数的区域分布和年际统计信息。东北区域,春季为4~5月,夏季为6~8月,秋季为9~10月,冬季从11月持续到翌年3月。时间分析基于11个重点城市(即辽宁省的沈阳市、抚顺市、丹东市和葫芦岛市,黑龙江省的哈尔滨市、齐齐哈尔市、牡丹江市和大庆市,吉林省的长春市和吉林市,内蒙古自治区的赤峰市),对2013~2017年重点城市的AQI和大气污染物浓度旬数据进行平均及标准偏差计算,以代表东北空气质量时间变化。

1.2.2 气溶胶光学厚度数据(AOD)

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)数据为基于搭载在Terra和Aqua卫星上中分辨率

成像光谱仪 (MODIS) 对陆地和海洋观测中 550nm 暗目标和深蓝气溶胶算法的每日综合产品. AOD 产品分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. 数据从美国国家航空航天局 (NASA) 相关网址获取 (<http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>). AOD 产品用于区域大气污染物定量评价和空气质量等级评定. AOD 数据显示范围采用东北矢量边界相切获得. 在每一个霾污染时期研究中, 对霾污染前、中和后期 AOD 日平均数据进行差异分析.

1.2.3 火点信息

火点信息从 FIRMS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/request.php>) 中获取, 这些信息同样来源于 Terra 和 Aqua 卫星 MODIS 观测产品. 火点信息产品提供了给定时间内观测到的火点信息经纬度及相关参数. 与 AOD 相似, 区域火点信息范围是由东北地区边界划定的. 在秋季霾污染研究中, 对霾污染前、中和后期火点信息时空分布进行差异分析, 来辅助分析其对霾污染时期的影响.

1.2.4 气溶胶亚类垂直分布信息

高分辨率的气溶胶亚类 (煤烟、沙尘、污染沙尘、洁净大陆、污染大陆和清洁海洋) 垂直分布信息由 CALIPSO 星载激光雷达 (cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations) 获得 (https://www-calipso.larc.nasa.gov/tools/data_avail/). CALIPSO 的主要任务是通过观测对星下大气当中的云和气溶胶垂直结构进行观测, 同时还可以提供反演获取气溶胶产品, 将气溶胶分成不同亚类, 提高对不同气溶胶水平和垂直分布的认识. 在霾污染期间, 获取来自 CALIPSO 产品越过中国东北部时的垂直气溶胶亚型数据, 这些气溶胶亚型结合地面监测大气污染物的数据, 来识别并鉴定主要的或可能的排放源.

1.2.5 气象数据

2013 ~ 2017 年, 东北城市尺度逐日气象指标 (气温、降水、能见度、相对湿度、风速和风向) 从中国气象局获得. 在指定霾污染时期, 区域尺度气象数据 (例如: 风速和气压等) 由美国国家环境预报中心 (NCEP, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/histdata/>) 获得并进行在线作图. 这些气象数据作为霾污染过程分析的辅助信息.

1.3 统计分析

通过皮尔逊相关系数获得全年尺度、季节尺度和月尺度上的 AQI 与霾污染的关系. 运用独立样本 t 检验, 检验不同时期 AQI 值和大气污染物浓度差异的显著性. 所有的统计过程和作图都用 Sigmaplot 10.0 和 Arcgis 10.3 完成.

2 结果与讨论

2.1 东北区域空气质量概况

表 1 中显示, 2013 ~ 2017 年, 东北区域所有城市的 AQI、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 平均浓度呈显著下降趋势 ($0.85 < r^2 < 1.0$, $P < 0.05$), 而 O_3 -8h 浓度值呈显著上升趋势 ($r^2 = 0.74$, $P < 0.05$). 2017 年, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 指标年平均浓度分别为 $39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 2013 相比分别下降了 38%、33%、52%、33% 和 9%. 结果表明, PM_{10} 和 SO_2 浓度值呈显著下降, 这说明东北区域在扬尘源和燃煤源控制方面效果最显著. 而 O_3 -8h 呈上升趋势, 2017 年 O_3 -8h 平均浓度为 $87 (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$, 与 2013 年相比上升了 26%, 表明随着大气颗粒物控制措施的实施, O_3 问题在东北地区未来的重要性会逐步凸显. 2014 年其他城市 O_3 -8h 平均浓度值高于省会城市, 其他平均数值均为省会城市高于其他城市, 说明了省会城市的空气污染水平最严重.

2013 ~ 2017 年优和良的总天数分别为 251、266、285、311 和 303 d, 与 2013 年相比, 2017 年的东北地区中度和重度污染的天数减少, 图 1 显示, 省会城市优和良天数明显少于其他城市天数. 在 2013 ~ 2017 年, 中度和重度污染总天数分别为 51、32、20、12 和 16 d. 2013 ~ 2017 年严重污染天气共出现过 13 d, 省会天气的污染天数比例中, 重度污染的天数明显高于其它地级市. 根据 2013 ~ 2017 年 5 a 平均数据, 东北地区的所有城市中, 优、良天数占全年的 78%, 轻度污染天数占比 15%. 而省会城市优、良天数占全年的 69%, 轻度污染天数占比 19%, 严重污染天数占全年天数的 2%, 而其它城市则无严重污染天数.

图 2 显示, 根据 5 a 的平均值, 当污染等级为良时, PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为主要的污染物, 所占比例分别为 39%、30% 和 27%; 随着污染等级的逐步提高, $PM_{2.5}$ 成为首要污染物, 轻度污染、中度污染和重度污染中 $PM_{2.5}$ 所占比例, 分别为 62%、77% 和 91%; 严重污染期间, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 作为首要污染物的比例分别是 72% 和 28%; 首要污染物的信息表明, 随着污染程度增加, $PM_{2.5}$ 作为首要污染物的比例增加, 这主要与秋冬季节的污染细颗粒物排放增加有关, 而严重污染期间 PM_{10} 作为首要污染物比重增加则主要是春季的沙尘事件所引起. 结果表明, 污染等级较低阶段, O_3 的污染影响也不可忽视, 随着大气颗粒物排放的降低, O_3 贡献率逐渐增大.

表 1 2013 ~ 2017 年东北地区地级市及以上城市空气质量概况¹⁾

Table 1 Overview of air quality at prefecture-level cities and above in Northeast China from 2013 to 2017

地区	年份	AQI	PM _{2.5} /μg·m ⁻³	PM ₁₀ /μg·m ⁻³	SO ₂ /μg·m ⁻³	NO ₂ /μg·m ⁻³	O ₃ -8h/μg·m ⁻³	CO/mg·m ⁻³
全部城市	2013	95 ± 60 (22 ~ 500)	63 ± 56 (7 ~ 747)	103 ± 70 (17 ~ 847)	44 ± 45 (2 ~ 392)	40 ± 19 (7 ~ 160)	69 ± 34 (9 ~ 228)	1.1 ± 0.7 (0.2 ~ 6)
	2014	88 ± 49 (20 ~ 500)	56 ± 45 (4 ~ 640)	96 ± 59 (11 ~ 834)	41 ± 38 (2 ~ 342)	36 ± 17 (5 ~ 221)	82 ± 39 (3 ~ 284)	1.2 ± 0.7 (0.1 ~ 5.7)
	2015	79 ± 50 (14 ~ 500)	48 ± 44 (2 ~ 891)	80 ± 59 (5 ~ 939)	28 ± 31 (1 ~ 348)	28 ± 16 (2 ~ 166)	79 ± 38 (1 ~ 291)	1 ± 0.6 (0 ~ 6.1)
	2016	71 ± 14 (43 ~ 96)	40 ± 9 (19 ~ 55)	69 ± 15 (34 ~ 94)	24 ± 11 (6 ~ 52)	27 ± 7 (14 ~ 44)	83 ± 16 (55 ~ 114)	1 ± 0 (0 ~ 2)
	2017	72 ± 14 (41 ~ 92)	39 ± 9 (18 ~ 57)	69 ± 15 (33 ~ 88)	21 ± 9 (3 ~ 45)	27 ± 7 (14 ~ 16)	87 ± 13 (64 ~ 113)	1 ± 0 (0 ~ 1)
省会城市	2013	102 ± 69 (22 ~ 500)	69 ± 65 (8 ~ 747)	113 ± 79 (18 ~ 847)	47 ± 51 (2 ~ 392)	44 ± 20 (12 ~ 160)	72 ± 38 (9 ~ 228)	1.1 ± 0.6 (0.3 ~ 5.9)
	2014	104 ± 63 (26 ~ 500)	70 ± 59 (9 ~ 640)	115 ± 71 (16 ~ 834)	55 ± 54 (2 ~ 342)	49 ± 18 (16 ~ 134)	81 ± 40 (13 ~ 242)	1 ± 0.4 (0.4 ~ 3.2)
	2015	103 ± 70 (25 ~ 500)	68 ± 67 (9 ~ 891)	106 ± 84 (16 ~ 920)	44 ± 52 (3 ~ 321)	46 ± 19 (11 ~ 146)	80 ± 43 (9 ~ 242)	1 ± 0.5 (0.3 ~ 4.1)
	2016	83 ± 6 (79 ~ 90)	50 ± 4 (46 ~ 54)	83 ± 10 (75 ~ 94)	35 ± 11 (28 ~ 47)	41 ± 2 (40 ~ 44)	83 ± 15 (66 ~ 95)	1 ± 0 (1 ~ 1)
	2017	89 ± 5 (83 ~ 92)	51 ± 6 (46 ~ 57)	84 ± 3 (82 ~ 88)	29 ± 6 (25 ~ 36)	41 ± 2 (40 ~ 44)	91 ± 6 (87 ~ 98)	1 ± 0 (1 ~ 1)
其他城市	2013	85 ± 43 (23 ~ 302)	53 ± 37 (7 ~ 252)	89 ± 51 (17 ~ 324)	40 ± 35 (3 ~ 258)	34 ± 14 (7 ~ 108)	65 ± 27 (10 ~ 211)	1.1 ± 0.8 (0.2 ~ 6)
	2014	85 ± 45 (20 ~ 500)	53 ± 40 (4 ~ 606)	92 ± 56 (11 ~ 782)	33 ± 15 (5 ~ 221)	33 ± 15 (5 ~ 221)	82 ± 39 (3 ~ 284)	0.6 ± 0.2 (0.2 ~ 1.1)
	2015	77 ± 47 (14 ~ 500)	46 ± 41 (2 ~ 755)	78 ± 57 (5 ~ 939)	27 ± 29 (1 ~ 348)	26 ± 15 (2 ~ 166)	79 ± 38 (1 ~ 291)	1 ± 0.6 (0 ~ 6.1)
	2016	70 ± 14 (43 ~ 96)	39 ± 9 (19 ~ 55)	68 ± 14 (34 ~ 92)	24 ± 11 (6 ~ 52)	25 ± 6 (14 ~ 36)	83 ± 16 (55 ~ 114)	1 ± 0 (0 ~ 2)
	2017	71 ± 13 (41 ~ 91)	38 ± 9 (18 ~ 51)	67 ± 15 (33 ~ 87)	20 ± 9 (3 ~ 45)	26 ± 6 (14 ~ 16)	87 ± 13 (64 ~ 113)	1 ± 0 (0 ~ 1)

1) 表中数值为平均值 ± 标准偏差 (最小值 ~ 最大值); O₃-8h 表示臭氧 8 h, 即 1 d 内空气中臭氧浓度最高的 8 h 的平均臭氧浓度

2.2 东北区域空气质量时空分布特征

由图 3 可知, 东北区域在 2015 ~ 2017 年的 AQI 空间分布. 全年尺度上, AQI 高值 (> 80) 呈现出“哈尔滨-长春-沈阳”省会城市为中心的条带状分布, 逐步向周围其它地级城市扩展和递减, 表明这些城市是中国东北污染严重的地区.

由图 4 可知, 在所有城市中, 沈阳污染最严重. 春季 3 省 (吉林、辽宁和内蒙古) 交界地区, 城市 (如四平、通辽和营口) 的空气质量 AQI 平均值为 80 ~ 100. 其中, 营口市 AQI (104) 最高. 该地区大部分为退化草地, 含盐渍土. 在大多数地区, 夏季空气质量最好, AQI 的 3a 平均值低于 60 的有黑龙江省全部城市、吉林省的通化市与延边朝鲜族自治州、辽宁省的丹东市. 其中营口具有较高的 AQI, 为 94. 秋季平原城市的空气质量开始恶化, 省会城市 AQI 均值超过了 65 (黑龙江、吉林和辽宁省省会城市分别为 69、76 和 75), 长春和沈阳污染最重. 整个冬季, 中国东北地区 AQI 都显著增加, 原因是秸秆焚烧和冬季燃煤, 冬季哈尔滨和沈阳污染最重

AQI 平均值分别为 130 和 121. 在季节规模上中国东北地区空气污染水平遵循冬 > 春 > 秋 > 夏的顺序.

由图 5 可知, 东北 11 个重点城市 2013 ~ 2017 年的 AQI 旬时间变化趋势. 从中可见, 东北区域出现 3 个典型的霾污染时期, 第一个时期是污染最严重的时期, 11 月上旬, 大规模秸秆露天焚烧和供暖燃煤产生的大量颗粒物是霾发生的主因. 第二个时期是冬季温度最低的时期, 12 月下旬和 1 月上中旬, 供暖燃煤、民用散煤及汽车尾气等排放大气污染物强度增大, 与不利的扩散条件 (特别是较低的大气边界层高度) 是该时期霾污染发生的主要原因. 第三个时期是春季, 随着风速增大和积雪融化, 裸露沙漠和农田土壤在强风驱使下, 容易形成沙尘天气. 此外, 农田耕作和春季的秸秆露天焚烧会加重该时期的霾污染. 整个东北区域, 8 月空气质量最好, 优良的天气条件和茂盛的植被是净化空气污染物的最佳方式. 此外, 2 月下旬 AQI 在冬季出现波谷, 由于此时天气开始转暖, 供暖强度较弱

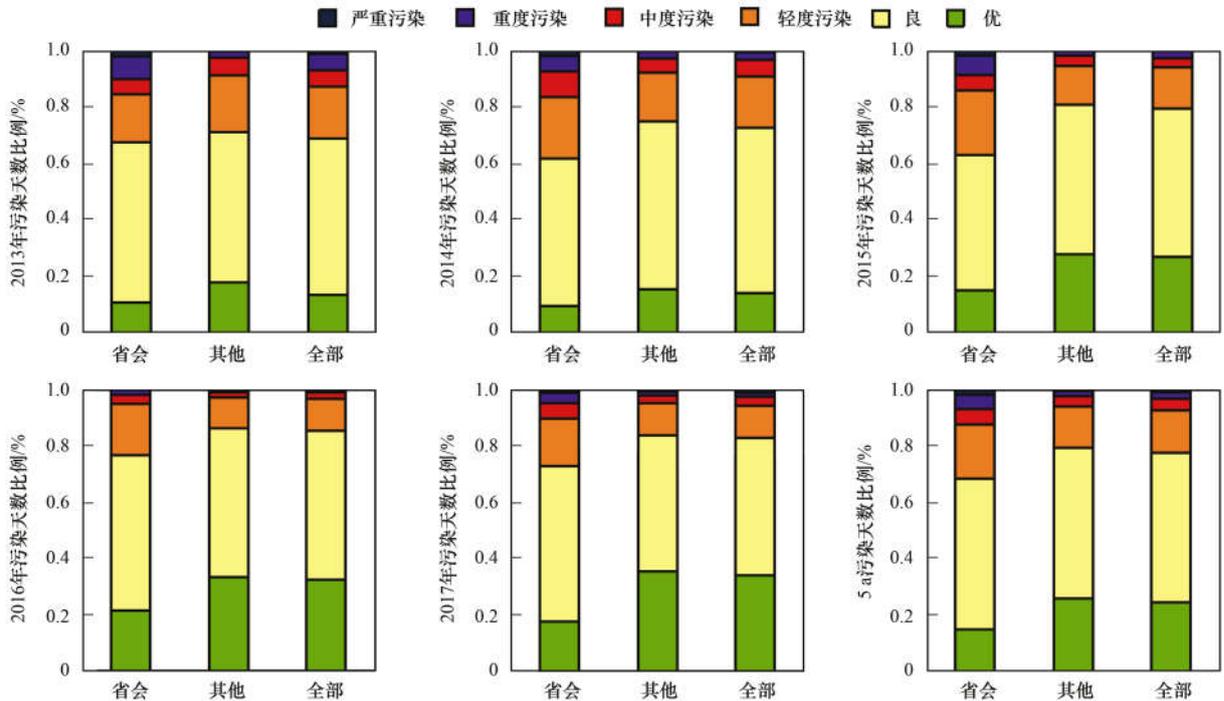


图 1 2013 ~ 2017 年不同污染天数占全年污染天数的比例

Fig. 1 Percentage of pollution days per year from 2013 to 2017

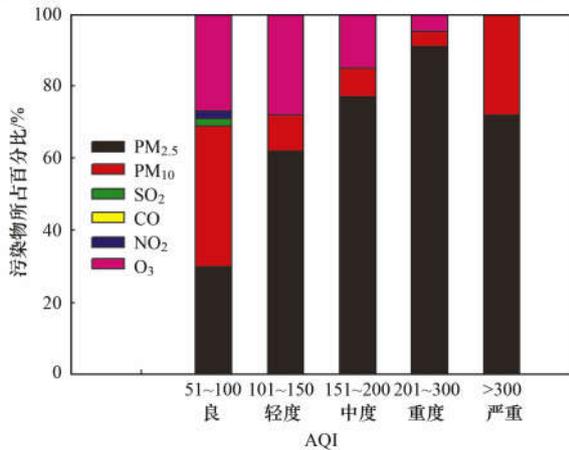


图 2 2013 ~ 2017 年不同污染等级首要污染物的贡献

Fig. 2 Contribution of primary pollutants at different pollution levels from 2013 to 2017

会使燃煤污染物排放强度降低, 且此时积雪尚未融化或者部分融化, 土壤湿度较大, 阻碍扬尘等粗颗粒物释放。

2.3 区域典型重度污染成因分析

2.3.1 秋末冬初(时期一)

由图 6 ~ 8 可知, 根据中国东北部的传统农业耕作方式和实际天气条件, 将整个作物收获期划分为 2015 年秸秆焚烧前期(2015-10-06 ~ 2015-10-20)、秸秆焚烧中期(2015-10-21 ~ 2015-11-10)和秸秆焚烧后期(2015-11-11 ~ 2015-11-20)阶段; 2016 年秸秆焚烧前期(2016-10-06 ~ 2016-10-20), 秸秆焚烧中期(2016-10-21 ~ 2016-11-10), 秸秆焚烧后

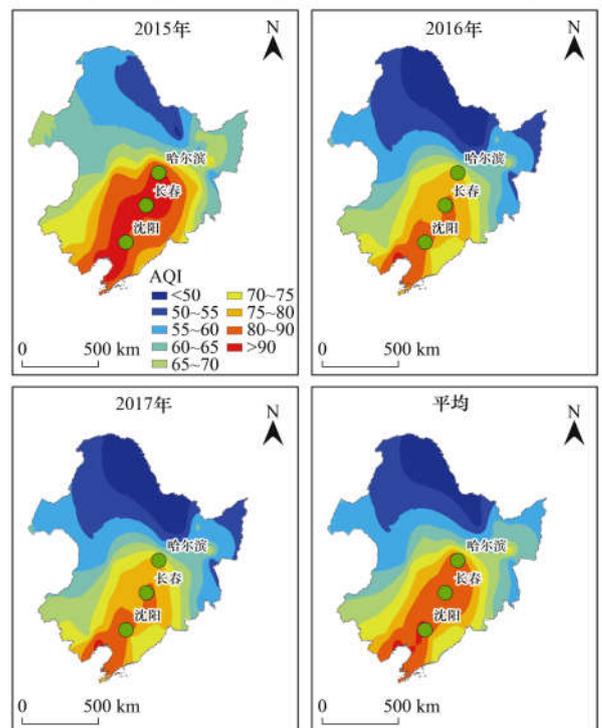
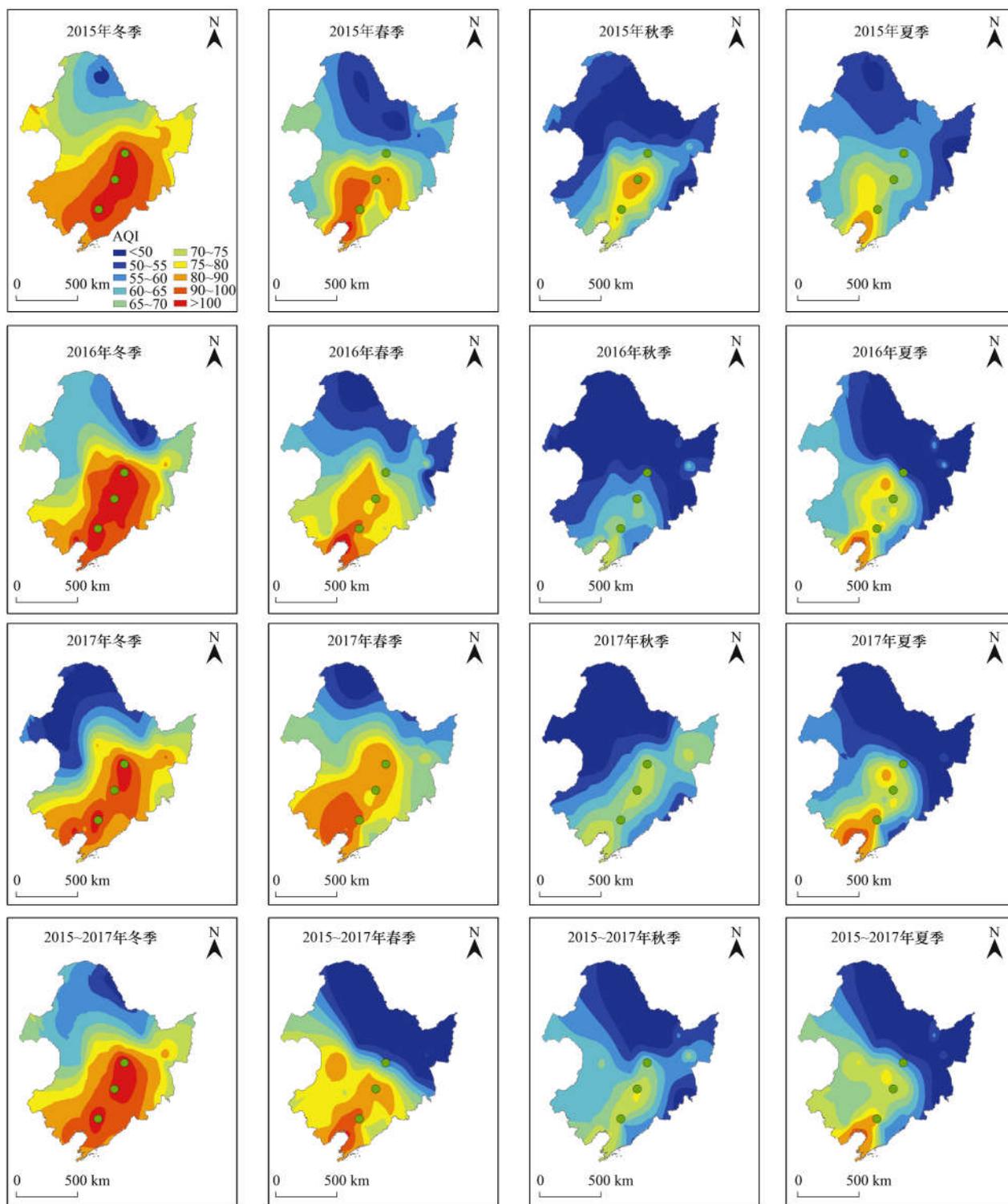


图 3 2015 ~ 2017 年空气质量指数 (AQI) 年平均空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average annual air quality index (AQI) from 2015 to 2017

期(2016-11-11 ~ 2016-11-20); 2017 年数据分别对应时间段为秸秆焚烧前期(2017-10-06 ~ 2017-10-20), 秸秆焚烧中期(2017-10-21 ~ 2017-11-10) 秸秆焚烧后期(2017-11-11 ~ 2017-11-20). 燃烧前典型的农业活动是作物收获、谷物处理和少量的秸秆焚



冬季:11月~翌年3月;春季:4~5月;夏季:6~8月;秋季:10~11月.绿色圆点从上而下分别代表哈尔滨、长春和沈阳这3个省会城市

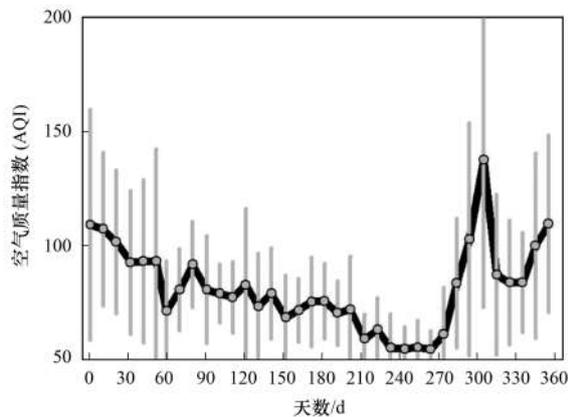
图4 2015~2017年空气质量指数(AQI)季节平均空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean seasonal air quality index(AQI) from 2015 to 2017

烧. 秸秆焚烧阶段涉及两种活动,即大部分的作物残茬焚烧和各城市的冬季供热. 哈尔滨、长春和沈阳的供热正式日期分别为10月15日、10月25日和11月5日. 在焚烧后期阶段,大部分作物残茬已经燃烧完,此时供暖的强度还不小. 地面监测数据清楚地表明东北地区AQI数值中,秸秆焚烧时期数

值比秸秆焚烧前期与后期高,哈尔滨-长春-沈阳城市带状区的AQI值也显著地高于其他地方. 2017年,整个三江平原和松嫩平原的城市AQI浓度也是相似度非常高的,卫星AOD数据也验证了地面AQI监测数据,两类数据的空间分布非常相似.

区域空气质量与大气污染物排放(包括一次排



每个数据点为 11 个重点城市 4 a 旬平均值和标准偏差

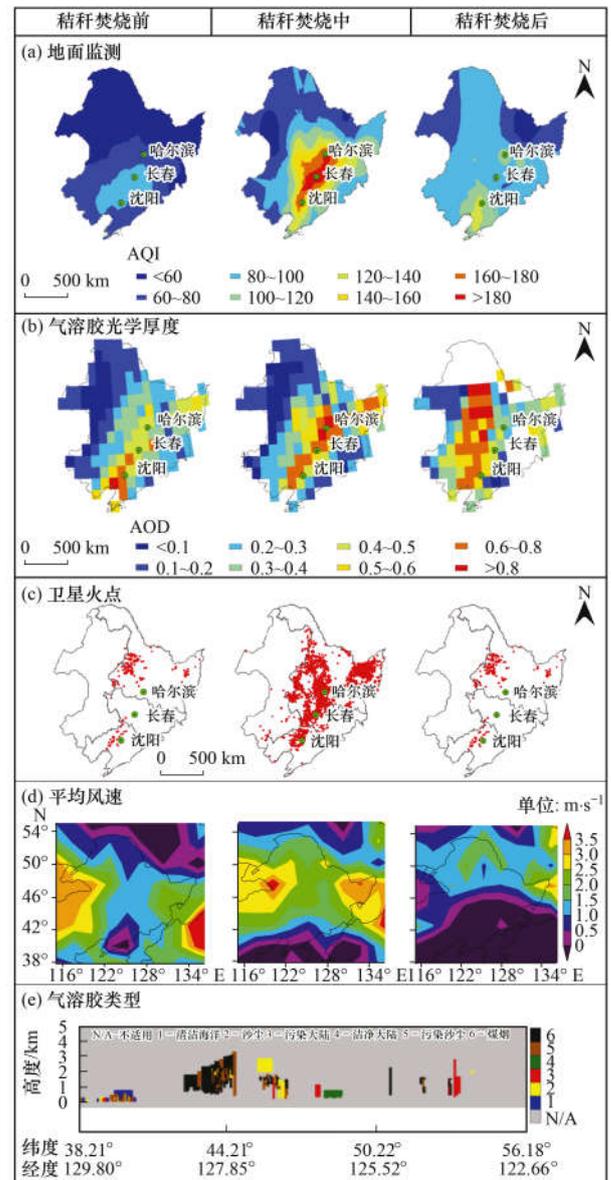
图 5 2014~2017 年东北 11 个重点城市空气质量指数 (AQI) 旬变化时间分布

Fig. 5 Temporal changes in air quality index (AQI) in 11 key cities in Northeast China from 2014 to 2017

放和二次形成)和气象条件(例如:大气扩散条件和大气边界高度等)密切相关^[16~20]. 本地排放是造成霾事件的内部原因,包括常规排放(例如:工业、交通、住宅和发电厂等)、特定时期排放(例如:农业活动和冬季供暖等),以及突发排放(例如自然喷发和爆炸等). 2015 年,辽宁、吉林和黑龙江等省城镇汽车数量、工业产值和城镇人口与 2008 年相比平均增长 $198\% \pm 19\%$ 、 $100\% \pm 37\%$ 和 $12\% \pm 6\%$. 这种迅速增长表明,交通、工业和居民来源的排放潜力在过去几年间得到了大幅度提高. 因此,大气污染物的背景浓度可能显著增加,大气容纳能力可能接近饱和,这是全年大量霾事件发生的基础.

在第一个时期(秋末冬初),以下原因共同作用导致了大量重度霾事件频发. 首先,农作物残茬焚烧会释放大量的大气颗粒物和气态污染物^[21]. 从 2008~2015 年,黑龙江省、吉林省、辽宁省的作物秸秆产量分别增长了 58% 、 33% 和 26% ,说明作物秸秆焚烧量也会相应增加. 火点数据表明,秸秆焚烧期间的火点数占秋季全部农业活动火点数的 86% 以上,几乎覆盖了三江平原、松嫩平原和辽河平原.

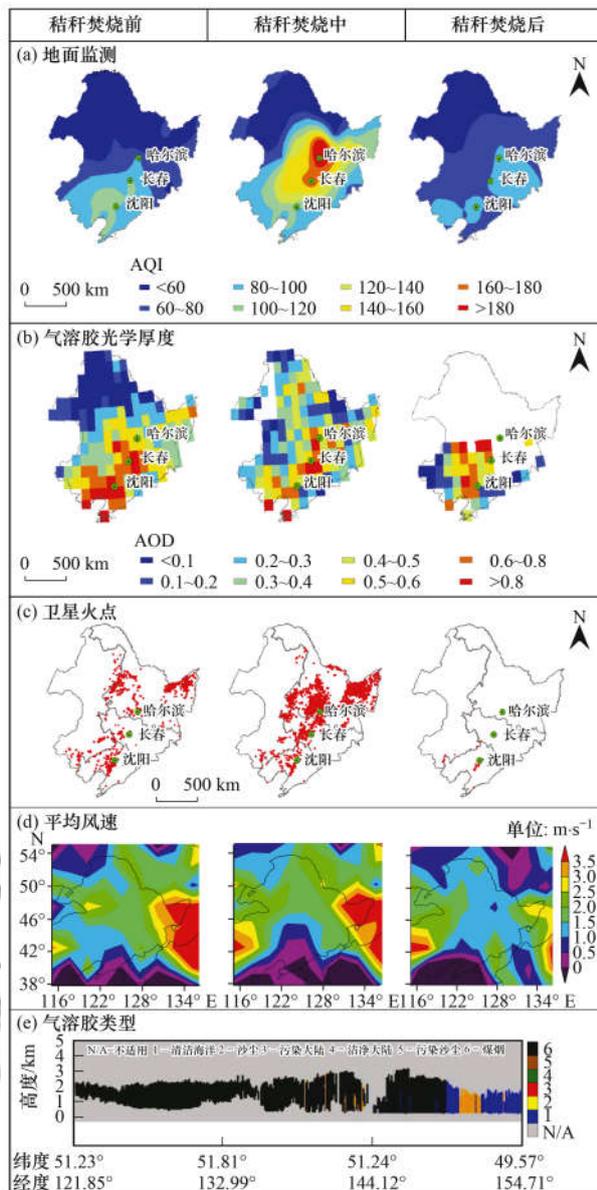
CALIPSO 数据也表明,秸秆燃烧时期,卫星过境该地区的气溶胶类型是烟. 当作物残茬开始焚烧时, $PM_{2.5}$ 和 CO 浓度显著增加,尤其是在降雨前. 作物收获过程中,农业机械会干扰土壤和植物,燃料消耗增多,从而使大气颗粒物排放量增加^[22]. 悬浮土壤粉尘的增加极可能在城市或农村形成二次道路扬尘^[23]. 燃煤供暖是冬季 $PM_{2.5}$ 和气体污染物(例如 SO_2 和 CO)的另一个重要排放源. 作为燃煤源大气污染物排放的指标,采暖期 SO_2 的浓度为非采暖



2015 年数据分别对应时间段为秸秆焚烧前期(2015-10-06~2015-10-20)、秸秆焚烧中期(2015-10-21~2015-11-10)、秸秆焚烧后期(2015-11-11~2015-11-20), 2015 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2015-11-04

图 6 2015 年秋末冬初空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、卫星火点数据、平均风速和垂直气溶胶类型
Fig. 6 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), satellite-based fire-spots number, average wind speed, and vertical aerosol subtypes during pre-burning, burning and post burning periods in late autumn and early winter of 2015

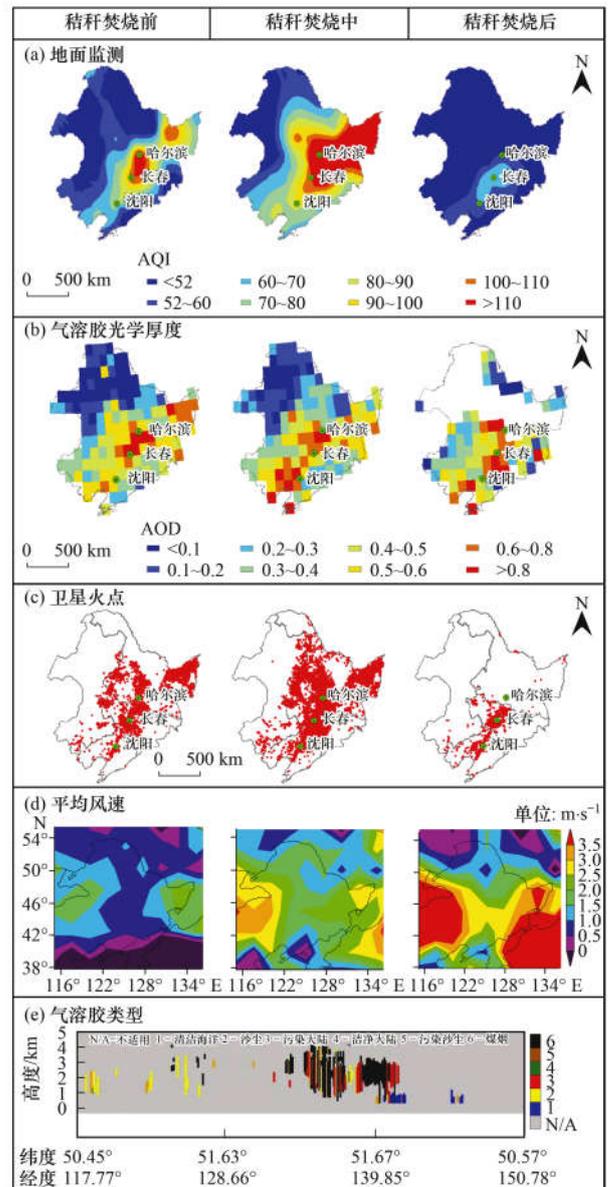
期 SO_2 浓度的 1.5~2.8 倍^[24~26]. 东北地区冬季供暖的主要类型是集中式城市供暖,城市和郊区地区(如平房和小工厂)的散煤,以及农村室内秸秆燃烧. 根据初步估计,再加上人口密度和不同的供暖方式, $PM_{2.5}$ 排放量主要分布在沈阳、长春和哈尔滨市. 冬季储存煤堆和施工过程释放的散逸性粉尘也有所增加. 因此,虽然这一时期的燃煤强度在一年中不是



2016 年数据分别对应时间段为秸秆焚烧前期(2016-10-06 ~ 2016-10-20)、秸秆焚烧中期(2016-10-21 ~ 2016-11-10)、秸秆焚烧后期(2016-11-11 ~ 2016-11-20), 2016 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2016-09-28

图 7 2016 年秋末冬初空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、卫星火点数据、平均风速和垂直气溶胶类型
Fig. 7 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), satellite-based fire-spots number, average wind speed, and vertical aerosol subtypes during pre-burning, burning and post burning periods in late autumn and early winter of 2016

最大,但是因作物残茬焚烧、燃煤和其它排放的共同作用导致该时期的排放总量最大.此外,东北地区冬季逆温发生频率高,强度大,且大气边界层在秋冬季节比较低,因此普遍存在的静稳天气阻碍了重霾时期大气污染物的扩散^[27~29].作物残茬焚烧阶段的区域平均风速略高于其他两个阶段,这说明了焚烧时期的扩散条件较好,也间接说明了焚烧时期的大气



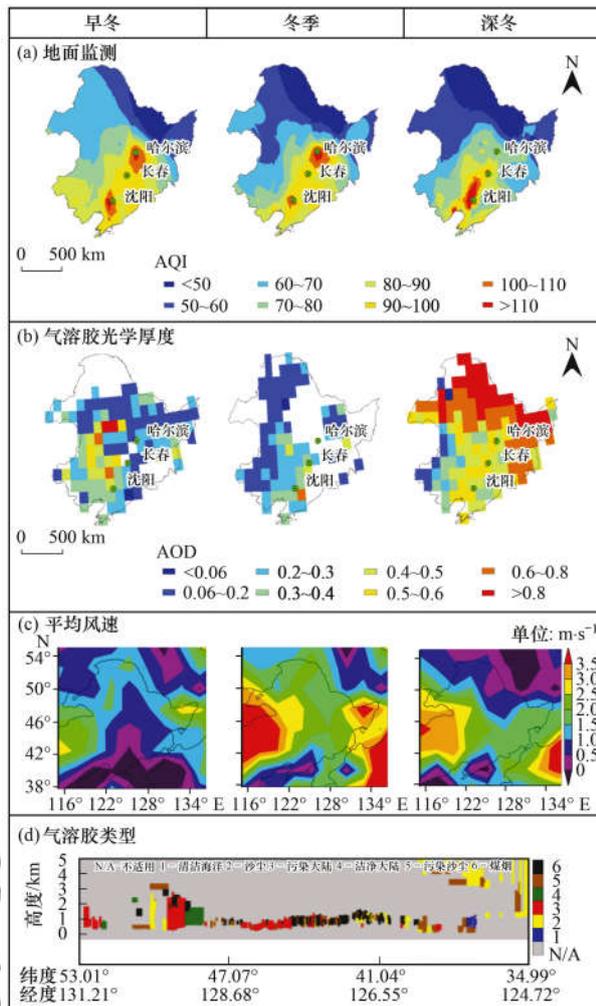
2017 年数据分别对应时间段为秸秆焚烧前期(2017-10-06 ~ 2017-10-20)、秸秆焚烧中期(2017-10-21 ~ 2017-11-10)、秸秆焚烧后期(2017-11-11 ~ 2017-11-20), 2017 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2017-09-17

图 8 2017 年秋末冬初空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、卫星火点数据、平均风速和垂直气溶胶类型
Fig. 8 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), satellite-based fire-spots number, average wind speed, and vertical aerosol subtypes during pre-burning, burning and post burning periods in late autumn and early winter of 2017

污染排放量大.

2.3.2 冬季中期(时期二)

由图 9~11 可知,在东北地区,冬季可分为 3 个时期,即冬初(11 月 11 ~ 12 月 15 日)、冬中(12 月 16 至次年 2 月 28 日)和冬末(3 月 1 ~ 31 日).在区域尺度上,地面数据表明平均气温为冬初 > 冬中 > 冬末.然而,东北地区的降雪导致 11 月到次年 3

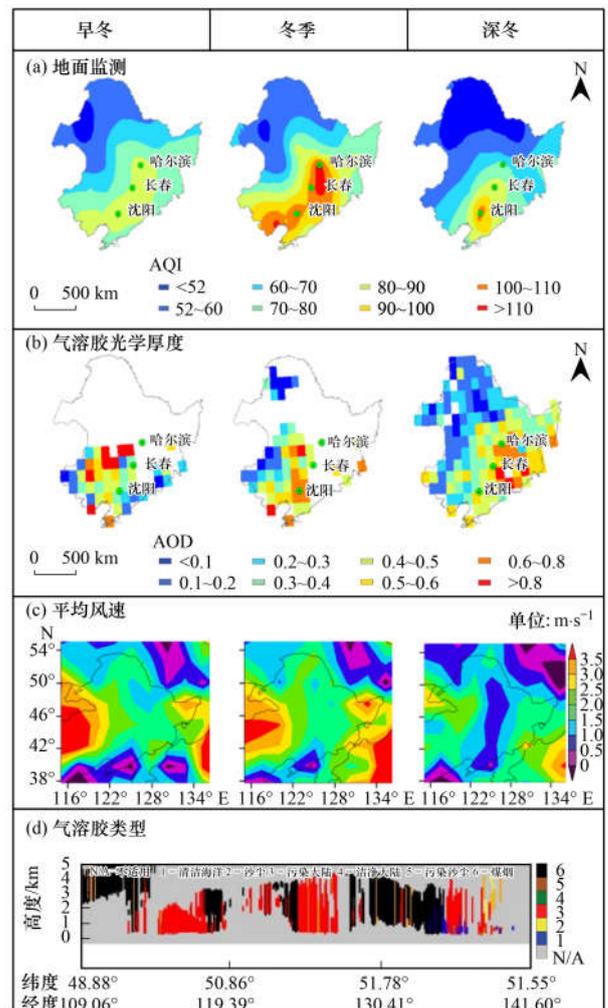


2015 年数据分别对应时间段为早冬 (2015-11-11 ~ 2015-12-15) 冬季 (2015-12-16 ~ 2016-02-29) 深冬 (2016-03-01 ~ 2016-03-31), 2015 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2016-01-20

图 9 2015 年冬季空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、平均风速和垂直气溶胶类型

Fig. 9 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), average wind speed and vertical aerosol subtypes in winter of 2015

月 MODIS 数据出现了大量缺失, 因此冬季的平均 AOD 在积雪覆盖区域可能不准确. 在初冬, 虽然大部分农田活动已经完成, 但仍有一些作物残茬燃烧活动和秋季的准备工作、农业运输、搬运和加工仍在继续. 由于冬季燃煤强度与环境空气温度之间的密切联系, 大气污染物排放量一般在冬季中期最高, 其次是冬初和冬末. 在整个冬初期间, 重霾事件频发, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比率为 29% ~ 91% (平均: $70\% \pm 11\%$), 表明细颗粒物是主要排放源. 在冬季后期, 一些地方燃烧煤的排放量减少, 风尘事件增加, 而 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 比率较低, 为 16% ~ 81% (平均: $49\% \pm 15\%$). 气象数据表明, 与冬初相比, 冬中和冬末的风速更高. 因此, 冬初空气质量差的主要原因是大气污染物排放量大, 扩散条件差; 而排放量



2016 年数据分别对应时间段为早冬 (2016-11-11 ~ 2016-12-15) 冬季 (2016-12-16 ~ 2017-02-28) 深冬 (2017-03-01 ~ 2017-03-31), 2016 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2017-03-28

图 10 2016 年冬季空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、平均风速和垂直气溶胶类型

Fig. 10 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), average wind speed, and vertical aerosol subtypes in winter of 2016

低, 扩散条件好, 有利于冬末空气质量的改善.

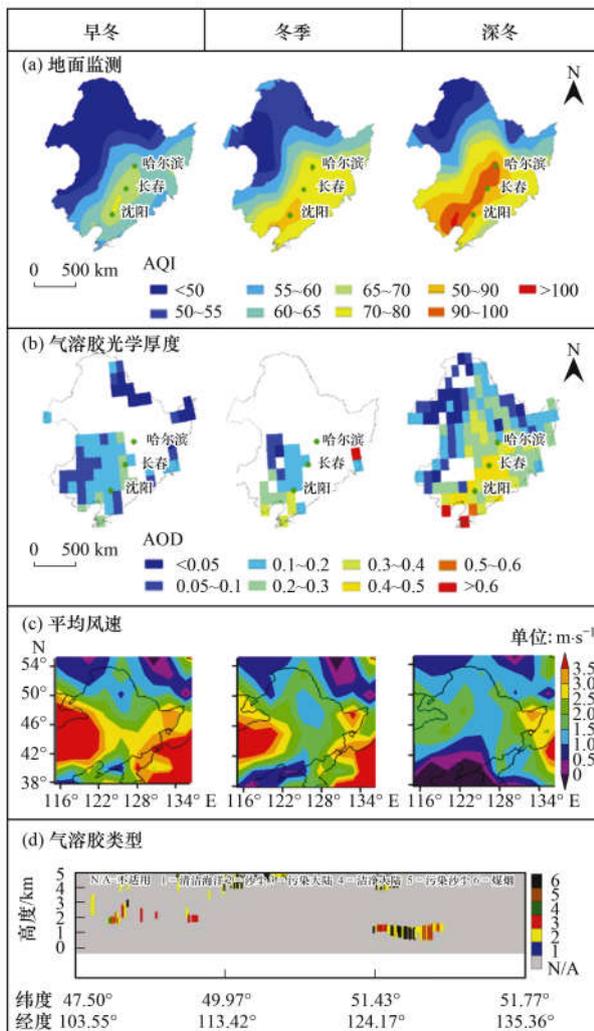
我国东北部冬季寒冷, 这意味着燃煤会排放大量的大气污染物, 并且下雪天和雾天的相对湿度较高. CALIPSO 数据显示, 在冬季中期, 主要的气溶胶亚型是烟和 1.5 km 高度以下的污染型大陆尘埃, 地面监测数据显示这一时期的 SO_2 和 CO 浓度最高. 这些指标表明, 燃煤是最强的季节性排放源. 随着城市化进程的加快, 人们对冬季供暖的需求迅速增加, 这在人口规模和东北城镇地区中可以反映出来. 例如, 2008 ~ 2015 年, 辽宁省城镇人口分别增长了 33% 和 17%. 城市中的燃煤源可分为大型发电厂、工业生产、小型供热锅炉和散烧煤四个类型. 在冬季中旬, 大型发电厂和工业生产会高强度连续运行, 区域空气质量排放与它们有密切关系.

尤其是在郊区, 小型供暖锅炉和零星的燃煤燃烧, 可直接影响当地的空气质量. 在农村的大部分地区, 农业秸秆被储存起来, 并被燃烧以供取暖和烹饪, 也会释放一些大气污染物. 汽车尾气排放是大气污染物的另一个重要排放源, 尽管它对重霾事件的贡献仍有争议. 在冬季中期, 车辆的耗油量较其他时期高, 原因是车辆内需要循环热空气, 汽油柴油引擎效率较低, 车辆引擎热身所需的运行时间较长, 以及冰雪轮胎的使用. 此外, 汽车尾气在地面附近排放, 可能不能很好地扩散, 因为地面附近存在不利的扩散条件和街道峡谷效应. 如果风速低, 且街头峡谷效应盛行, 汽车尾气排放会在市区造成局部大气污染. 东北区域冬季日照时间较短, 太阳

辐射较弱, 湍流运动较弱, 大气边界层较低, 特别是在冬季中期最寒冷的时间段最低, 假定排放强度不变, 该时期的大气污染物聚集和累积要高于其他时期^[27-29]. 此外, 雾或雪天气相对湿度较高, 有利于微粒吸湿性地生长. 大部分重霾事件发生在冬季中旬逆温和低风速的条件下. 这些不利的扩散条件阻碍了大气污染物在垂直和水平方向的扩散, 从而使大气污染物不断积累, 达到高浓度.

2.3.3 春季(时期三)

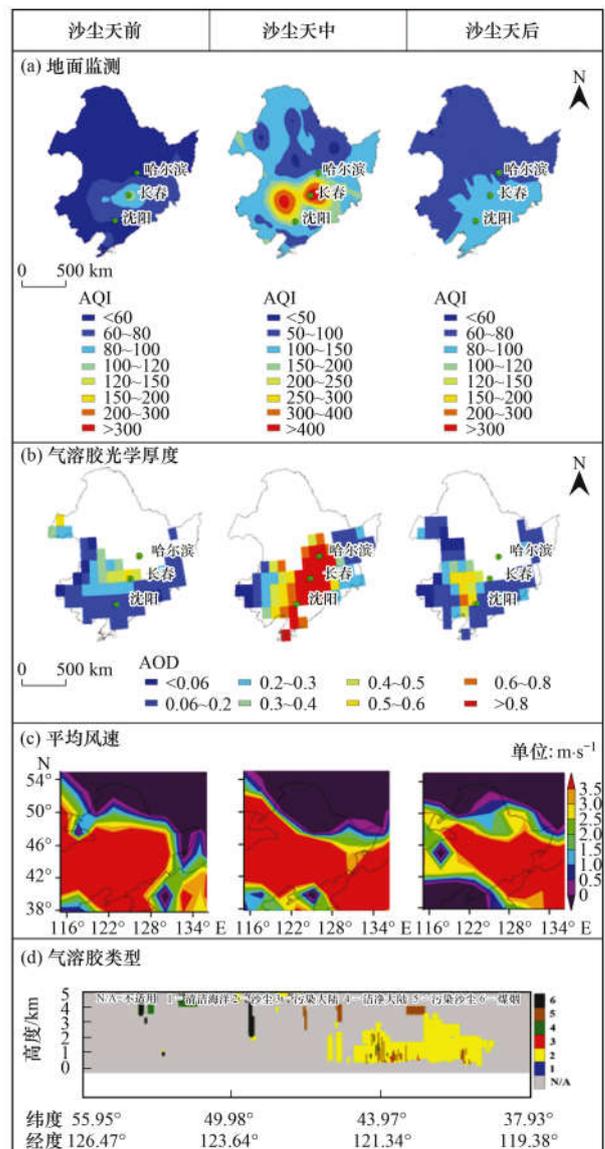
由图 12~14 可知, 中国东北部的春季沙尘期一般从 3 月末或 4 月初积雪融化后开始, 到 5 月或



2017 年数据分别对应时间段为早冬 (2017-11-11 ~ 2017-12-15) 冬季 (2017-12-16 ~ 2018-02-28) 深冬 (2018-03-01 ~ 2018-03-31), 2017 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2017-10-27

图 11 2017 年冬季空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、平均风速和垂直气溶胶类型

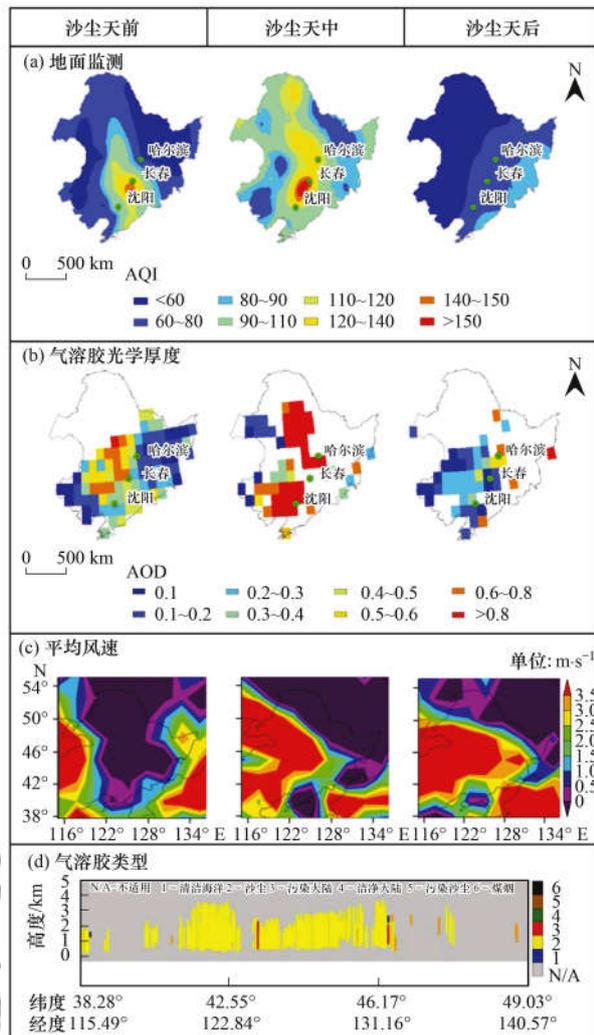
Fig. 11 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), average wind speed, and vertical aerosol subtypes in winter of 2017



2015 年数据分别对应时间段为沙尘天前 (2015-05-04) 沙尘天中期 (2015-05-05) 沙尘天后期 (2015-05-06), 2015 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2015-05-05

图 12 2015 年春季空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、平均风速和垂直气溶胶类型

Fig. 12 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), average wind speed, and vertical aerosol subtypes in spring of 2015

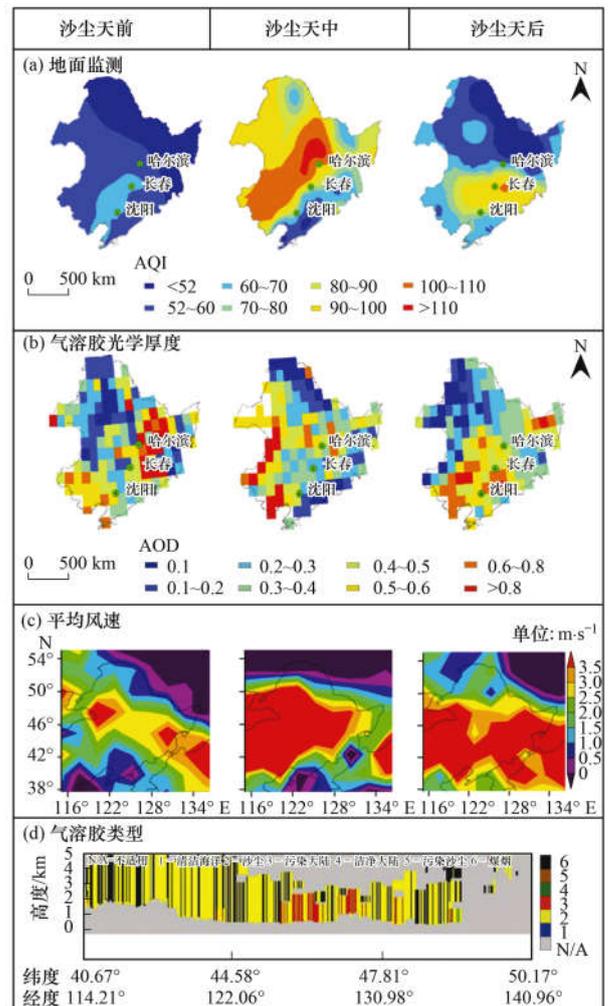


2016 年数据分别对应时间段为沙尘天前期(2016-03-27) 沙尘天中期(2016-03-28) 沙尘天后期(2016-03-29), 2016 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2016-04-03

图 13 2016 年春季空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、平均风速和垂直气溶胶类型

Fig. 13 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), average wind speed, and vertical aerosol subtypes in spring of 2016

6 月植物开始生长时结束. 以 2015 年 5 月 5 日发生的强烈风沙事件来分析霾的成因. 2015 年沙尘暴可分为沙尘暴前日(5 月 4 日)、沙尘暴中日(5 月 5 日)和沙尘暴后日(5 月 6 日). 根据地面监测数据确定了两个受严重影响的地区, AQI 高于 300. 一个位于内蒙古东部和吉林省西部, 那里有面积退化的草地和盐碱土农田, 另一个位于黑龙江省南部和吉林省北部, 松嫩平原上有大片农田. 在类似的区域中, AOD 值也非常高. 在这种情况下, 风速在沙尘时期前日逐渐升高, 在沙尘日最高 ($> 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 表示最大沙尘发生的时间. CALIPSO 数据清楚地显示, 尘是 2015 年 5 月 5 日该地区的主要气溶胶亚型.



2017 年数据分别对应时间段为沙尘天前期(2017-04-28 ~ 2017-05-01) 沙尘天中期(2017-05-02 ~ 2017-05-05) 沙尘天后期(2017-05-03 ~ 2017-05-09), 2017 年垂直气溶胶类型所用数据日期为 2017-05-01

图 14 2017 年春季空气质量指数 (AQI)、气溶胶光学厚度 (AOD)、平均风速和垂直气溶胶类型

Fig. 14 Spatial distribution of air quality index (AQI), aerosol optical depth (AOD), average wind speed, and vertical aerosol subtypes in spring of 2017

作为春季沙尘事件的主要驱动因素, 高风速可以增加农田、河滩、道路和建筑工地的局部尘埃排放, 同时也驱动长距离的区域性沙漠沙尘输送. 在这些时期内, 高 PM_{10} 浓度和粗颗粒比例 [即 $(\text{PM}_{2.5} - \text{PM}_{10})/\text{PM}_{10}$] 的出现反映了明显的粗颗粒物沙尘排放. 在东北地区, 自然粉尘的来源主要是内蒙古退化的草原或沙丘, 以及吉林省西部盐碱土壤. 与黑土相比, 沙漠和含盐碱土壤地区的临界摩擦速度明显较低, 导致了高频率的灰尘天气. 农业活动对土壤的干扰 (例如耕作、土地整理) 是人为尘的一个重要来源. 研究表明, 尽管农业活动只在几天或几周内发生, 但其产生的灰尘总量远高于土壤风蚀的排放量^[30]. 此外, 在低风速下, 来自裸土的尘埃很

容易悬浮。因此,春季自然风尘和人为农业活动尘的排放,将增加中国东北地区扬尘天气的频率和强度。

2.4 区域典型重度污染减控措施分析

大气污染物的大量排放和不利的扩散条件是重霾发生的两个因素^[31~33]。车辆、道路、扬尘和工业的一般排放导致大气污染物浓度的背景值增加。然而,从地区范围来看,中国东北地区的主要排放源是季节性的,与秋末冬初的作物残茬燃烧、冬季的煤炭燃烧和春季的春季沙尘有关,所有这些都可能导致极端的霾事件。因此,迫切需要制定一套全面的污染控制政策,在一定的气象条件下限制燃煤、农作物残茬焚烧和扬尘排放,以减少东北地区重度霾发生。

在东北地区,煤炭最常见的用途是作为热能、工业生产和供暖以及住宅消费的直接燃烧。它几乎全年都在发生,冬季取暖用的煤燃烧加剧了空气污染。近年来,城市地区的大多数家庭开始使用煤气灶,但火力发电厂、工业和民用供暖锅炉仍存在低效燃煤现象。随着经济的快速发展和工业的复苏,燃煤造成的空气污染也在增加^[34]。因此,提高燃煤燃烧效率,减少燃煤污染物排放,解决东北地区严重的空气污染问题,煤炭清洁技术的应用势在必行。应广泛开发和应用旨在减少污染和提高煤炭加工、燃烧、转化和污染控制技术效率的洁净煤技术,与煤的加工技术,也用于减少燃烧前的硫含量^[35]。采用先进的燃烧技术提高燃烧效率和脱硫效率。此外,气体净化技术可用于燃烧后的脱硫,并将减少污染物排放以控制大气污染。需要实施几项综合保护措施,如局部燃煤控制规划和能源结构调整^[36]。需要进行研究和开发,以生产新的清洁能源,取代煤炭。开发清洁和可再生能源,如太阳能、生物质能和风能。在冬季供暖方面,增加使用中央供暖系统以及民用燃料生产中液化和气化的程度,也将减少燃烧污染物的排放^[23]。概括地说,技术改进的4个方面应该集中在:①进一步研究和开发洁净煤技术和先进的煤炭加工工艺,以实现煤炭高效洁净燃烧;②增加民用燃料生产的液化和气化量,改进中央供暖系统;③提高煤炭脱硫除尘的效率、经济性和实用性;④锅炉改造提高燃烧设备的热效率。

对于作物残茬焚烧,全面禁止是长期减少排放的最有效方法。根据笔者评估,黑龙江、吉林和辽宁等省的农作物秸秆产量约为 1.9×10^8 t,占2012年全国产量的21%。东北地区的种植采用单一种植模式,在全国范围内产生大量的作物秸秆。虽然东

北地区政府禁止农业露天焚烧,但禁令的效果有限。因此,全面禁止的关键问题是如何用燃烧替代处置方法或增加使用途径来管理大量的作物残茬。在许多地区试验了几种解决办法,包括发电、动物饲料供应、生物乙醇生产、将稻草还田以及规划燃烧。四川省城市采用了区域秸秆综合利用技术,利用秸秆生产化肥、燃料和饲料,秸秆利用率达到94%^[37]。从短期来看,有必要在区域和城市两级考虑空气质量和气象模型模拟,适当地确定作物残茬燃烧的时间,从而避免污染物排放同时燃烧和累积。在考虑天气预报时,还应考虑到区域交通,以便能够调整城市迎风地区的燃烧时间,减少污染物对交通的影响。

我国东北地区的春季扬尘主要来源于西部自然沙尘的长距离传输和当地人产生的扬尘。内蒙古草原沙漠化造成的自然风尘输送在短期内难以避免,需要采取综合措施防止土壤荒漠化和退化。道路扬尘排放和土壤耕作引起的灰尘排放是最重要的人为来源。对于当地道路粉尘,应实施频繁的道路湿处理,并应使用旋转刷真空车清除道路上的粉尘^[38]。另外,应限制施工卡车的运行时间,并对施工现场进行清理和覆盖^[39]。在城市周围的农田中,保护性耕作技术是减少粉尘排放的有效和必要的方法,具有提高土壤表面覆盖率、节约用水、减少土壤/水蚀和保持土壤生产力的优点^[40]。在大风日重新安排耕作时间表和减少农田活动(例如土壤耕作和平整)将减少悬浮在大气中的灰尘。种植机械中的污染控制技术,如土壤除尘袋或洒水装置,也应具备。此外,地方政府还需要清理其他地方的粉尘来源(如建筑工地、裸露土地和材料储存场),并采取污染控制管理措施^[41]。

3 结论

在中国东北,“沈阳-长春-哈尔滨”城市带是每年空气污染最严重的地区。该区域主要有3个典型的霾事件发生时期,即10月下旬至11月上旬(时期一)、12月下旬至次年1月(时期二)和4~5月中旬(时期三)。由于季节性作物残茬燃烧和冬季取暖用的燃煤产生大量的PM_{2.5},第一时期的大气污染程度最为严重(AQI > 300)。由于燃煤和汽车燃料消耗使PM_{2.5}排放量增加,加上大气边界层较低,大气扩散条件不利,导致冬季中期的霾日数比其他时期要多。春季沙尘天气主要受内蒙古退化草地沙尘和吉林省西部裸土的区域性传输以及当地农业耕作土壤粉尘排放的影响。要解决东北地区重度霾问题,迫切需要制定全面控制冬季和秋季煤炭燃烧、

燃料消耗和农作物残茬燃烧的政策.

致谢:中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布系统为本研究提供了 PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO₂ 和 CO 多年的小时浓度监测数据; NASA 为本研究提供了 MODIS AOD 和 FIRMS 产品下载服务; 中国气象局共享服务系统提供东北城市尺度气象数据; 美国国家环境预报中心的区域尺度气象数据下载服务, 在此一并致谢.

参考文献:

- [1] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960~2013 年我国霾污染的时空变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3237-3248.
Fu C B, Tang J X, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variation of haze pollution over China from 1960 to 2013 [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3237-3248.
- [2] 王立平, 陈俊. 中国雾霾污染的社会经济影响因素——基于空间面板数据 EBA 模型实证研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3833-3839.
Wang L P, Chen J. Socio-economic influential factors of haze Pollution in China: empirical study by EBA model using spatial panel data[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3833-3839.
- [3] 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 大气污染对居民健康影响研究进展[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1512-1520.
Qin Y C, Xie Z X, Li Y. Review of research on the impacts of atmospheric pollution on the health of residents [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1512-1520.
- [4] 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 大气污染光学遥感技术及发展趋势[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(2): 1-9.
Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, *et al.* Atmospheric stereoscopic monitoring technology and development trend in China [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(2): 1-9.
- [5] 刘文清, 刘建国, 谢品华, 等. 区域大气复合污染立体监测技术系统与应用[J]. 大气与环境光学学报, 2009, **4**(4): 243-255.
Liu W Q, Liu J G, Xie P H, *et al.* Spatio-temporal monitoring system and its application in regional complex air pollution study [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, **4**(4): 243-255.
- [6] 白春礼. 中国科学院大气灰霾研究进展及展望[J]. 中国科学院院刊, 2014, **29**(3): 275-281.
- [7] 环境保护部. 2016 年中国环境状况公报[J]. 环境保护, 2017, (11): 37-38.
- [8] 国家发展改革委. 东北振兴“十二五”规划[Z]. 2012.
- [9] 吴兑. 吴兑: 一种新的灾害性天气——灰霾[J]. 环境, 2008, (7): 38-39.
- [10] Li M N, Zhang L L. Haze in China: current and future challenges[J]. Environmental Pollution, 2014, **189**: 85-86.
- [11] 何月欣, 张学磊, 陈卫卫, 等. 基于多卫星遥感的东北地区霾污染时空特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 607-617.
He Y X, Zhang X L, Chen W W, *et al.* Spatial-temporal characteristics of regional air quality in Northeastern China based on multi-satellites aerosol products [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 607-617.
- [12] 张潇月, 付煜, 杨帅, 等. 浅谈以东北地区为典型的全国雾霾问题的防治[J]. 法制与社会, 2016, (27): 154-155.
- [13] 崔妍, 赵春雨, 周晓宇, 等. 东北地区近 50 年来霾天气气候特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(6): 1630-1637.
Cui Y, Zhao C Y, Zhou X Y, *et al.* Climatic characteristics of haze days in Northeast of China over the past 50 years[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(6): 1630-1637.
- [14] 王菊, 刘禹彤, 赵秀敏, 等. 长春市大气环境中 PM₁₀ 二重源解析研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 288-292.
Wang J, Liu Y T, Zhao X M, *et al.* Improved source apportionment of PM₁₀ in atmosphere of Changchun [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(2): 288-292.
- [15] 国家发展改革委. 东北振兴“十三五”规划[Z]. 2016.
- [16] Marcazzan G M, Vaccaro S, Valli G, *et al.* Characterisation of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter in the ambient air of Milan (Italy)[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(27): 4639-4650.
- [17] Shen G F, Yuan Si Y, Xie Yu N, *et al.* Ambient levels and temporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ at a residential site in the mega-city, Nanjing, in the western Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2014, **49**(2): 171-178.
- [18] 周勤迁, 张世春, 陈卫卫, 等. 长春市大气 SO₂、O₃ 和 NO_x 的变化特征及来源[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(7): 768-774.
Zhou Q Q, Zhang S C, Chen W W, *et al.* Pollution characteristics and sources of SO₂, O₃ and NO_x in Changchun [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(7): 768-774.
- [19] 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 等. 太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2512-2520.
Yang S Y, Yu X Y, Zhao X Y, *et al.* Characteristics of key size spectrum of PM_{2.5} affecting winter haze pollution in Taiyuan [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2512-2520.
- [20] 沈利娟, 王红磊, 李莉, 等. 嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2871-2880.
Shen L J, Wang H L, Li L, *et al.* Observation analysis on the characteristics of meteorological elements and pollutants during a continuous fog and haze episode in spring in Jiaxing city [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2871-2880.
- [21] Zhao H M, Zhang X L, Zhang S C, *et al.* Effects of agricultural biomass burning on regional haze in China: a review [J]. Atmosphere, 2017, **8**(5): 88.
- [22] Li J, Bo Y, Xie S D. Estimating emissions from crop residue open burning in China based on statistics and MODIS fire products [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **44**: 158-170.
- [23] Chen W W, Tong D Q, Dan M, *et al.* Typical atmospheric haze during crop harvest season in northeastern China: a case in the Changchun region [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **54**: 101-113.
- [24] 沈振兴, 霍宗权, 韩月梅, 等. 采暖期和非采暖期西安大气颗粒物中水溶性组分的化学特征[J]. 高原气象, 2009, **28**(1): 151-158.
Shen Z X, Huo Z Q, Han Y M, *et al.* Chemical composition of water-soluble ions in aerosols over Xi'an in heating and non-heating seasons [J]. Plateau Meteorology, 2009, **28**(1): 151-158.
- [25] 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 等. 沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM_{2.5} 污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1062-1070.
Zhang X, Tian S S, Liu Y Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in heating and Non-heating periods

- in Shenyang[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1062-1070.
- [26] 周瑞, 辛金元, 邢立亭, 等. 唐山工业新区冬季采暖期大气污染变化特征研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1874-1880.
- Zhou R, Xin J Y, Xing L T, *et al.* Variation of air pollution in new Tangshan industrial area during winter heating period[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 1874-1880.
- [27] 钟鑫. 基于 GIS 的污染天气下大气边界层高度特征研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016. 62-72.
- Zhong X. Studying atmospheric boundary layer height characteristics of polluted weather based on GIS[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016. 62-72.
- [28] 杨莹. 基于中尺度耦合模型哈尔滨市辖区空气污染特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016. 50-54.
- Yang Y. Study of air pollution characteristics in Harbin municipal district based on mesoscale coupling model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. 50-54.
- [29] 肖同玉, 任红玉, 张兴文. 哈尔滨冬季逆温规律分析及预报[J]. *东北农业大学学报*, 2001, **32**(2): 139-145.
- Xiao T Y, Ren H Y, Zhang X W. Analysis and prediction of the winter inversion in Harbin[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2001, **32**(2): 139-145.
- [30] Goossens D, Gross J, Spaan W. Aeolian dust dynamics in agricultural land areas in Lower Saxony, Germany[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, **26**(7): 701-720.
- [31] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and $PM_{2.5}$ mass: implications for air quality studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(21): 2095.
- [32] Xu P, Chen Y F, Ye X J. Haze, air pollution, and health in China[J]. *The Lancet*, 2013, **382**(9910): 2067.
- [33] Wang H L, Qiao L P, Lou S R *et al.* $PM_{2.5}$ pollution episode and its contributors from 2011 to 2013 in urban Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 298-305.
- [34] Zhou J B, Wang T G, Huang Y B, *et al.* Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and suburban sites of Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(6): 792-799.
- [35] 朱法华, 王圣, 孟令媛. 燃煤超低排放的减排潜力及其实施的必要性分析[J]. *环境保护*, 2016, **44**(7): 42-46.
- Zhu F H, Wang S, Meng L Y. Emission reduction potential and the necessity of implementation about ultra-low emission in coal-fired sector[J]. *Environmental Protection*, 2016, **44**(7): 42-46.
- [36] He K B, Huo H, Zhang Q. Urban air pollution in China: current status, characteristics, and progress [J]. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2002, **27**: 397-431.
- [37] Shen L, Liu L T, Yao Z J, *et al.* Development potentials and policy options of biomass in China [J]. *Environmental Management*, 2010, **46**(4): 539-554.
- [38] Chalvatzaki E, Glytsos T, Lazaridis M, *et al.* A methodology for the determination of fugitive dust emissions from landfill sites [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2015, **25**(5): 551-569.
- [39] 杨俊超, 周祖环, 张国军, 等. 百色市道路和建筑施工扬尘大气颗粒物排放量估算及防治措施研究[J]. *大众科技*, 2016, **18**(8): 29-31.
- Yang J C, Zhou Z H, Zhang G J, *et al.* Atmospheric particulate matter emissions of road and building construction dust estimation and prevention measures in Baise [J]. *Popular Science & Technology*, 2016, **18**(8): 29-31.
- [40] Zhang X L, Zhou Q Q, Chen W W, *et al.* Observation and modeling of black soil wind-blown erosion from cropland in Northeastern China [J]. *Aeolian Research*, 2015, **19**: 153-162.
- [41] 朱法华, 王圣, 郑有飞. 火电 NO_x 排放现状与预测及控制对策[J]. *能源环境保护*, 2004, **18**(1): 1-5.
- Zhu F H, Wang S, Zheng Y F. NO_x emitting current situation and forecast from thermal power plants and countermeasures[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, **18**(1): 1-5.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)