

百方知库
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.2

第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响

李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 为了弄清冬季山谷风、海陆风对京津冀地区大气污染时空分布的影响, 利用2016年12月地面加密自动气象站逐时观测数据和环境监测总站发布的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度数据, 计算平均风矢量场和平均 $PM_{2.5}$ 浓度场, 分析山谷风、海陆风变化规律及其对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响。结果表明, 在山谷风日, 中午至下午谷风将位于河北太行山东部地区的污染物向北输送。傍晚以后, 在北京西部、北部, 以及河北太行山山前出现的山风与偏南风构成“人字形”辐合线, 辐合线的汇聚作用使北京地区、廊坊, 以及保定、石家庄、邢台等地大气污染加重。在海陆风日, 下午至前半夜, 河北中东部沿海地区出现东南向海风, 深入内陆到达天津东南部地区, 海风前缘区域大气污染加重; 通过对中国科学院大气物理研究所铁塔0~325 m风向风速与 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化关系分析, 以及利用Cressman法插值得到的地面风向风速和 $PM_{2.5}$ 浓度二维格点场, 分析北京地区重霾污染过程中近地层山谷风和海陆风对大气污染形成的影响: 中午至下午, 谷风将大气污染物向北京输送。傍晚以后, 大气污染物在山风与偏南风形成的辐合线附近汇聚, 在北京地区及以南地区形成 $PM_{2.5}$ 高污染区。凌晨至早晨北京被山风控制, 大气污染物被吹离北京、滞留在北京以南至天津西北地区。冬季, 山谷风的输送和汇聚作用使大气污染物以日为周期不断循环和累积, 对北京地区至北京以南地区、河北太行山东部地区的大气重污染形成起重要作用。

关键词: 山谷风(MVB); 海陆风(SLB); 辐合线; 大气污染; 污染物输送和汇聚

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0513-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803193

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region

Li Qing-chun, Li Ju, ZHENG Zuo-fang, WANG Yao-ting, YU Miao

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

Abstract: To reveal the effect of Mountain Valley Breeze (MVB) and Sea Land Breeze (SLB) in winter on the spatial-temporal distribution of air pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region, hourly data from Automatic Weather Stations (AWS) and hourly air pollutant concentration data in December 2016 from the China National Environmental Monitoring Center were used to calculate the average wind vector fields and $PM_{2.5}$ concentration fields. The change rule of MVB and SLB and its influence on the distribution of $PM_{2.5}$ concentration were analyzed. The prevailing factor for the MVB days was the southerly wind (valley wind) in the Beijing-Tianjin-Hebei region from noon to afternoon, this valley wind transports air pollutants from the eastern areas of the Taihang Mountains and southwestern areas of Beijing northward. In the evening, “herringbone” convergence lines formed between the emerging mountain breeze in the western and northern parts of Beijing, as well as in the piedmont areas of the Taihang Mountains, and the southerly wind. The $PM_{2.5}$ concentration increased in Beijing, Langfang, Baoding, Shijiazhuang, and Xingtai according to the concentration of the convergence lines. For the SLB days, the $PM_{2.5}$ concentration increased in the piedmont areas of the Taihang Mountains due to the influence of valley wind from noon to afternoon. For the MVB days, from noon until midnight, the sea breeze appeared in the eastern coastal areas and reached the southeastern part of Tianjin, the $PM_{2.5}$ concentration increased towards the front of the sea breeze. The influence of MVB and SLB on the distribution of air pollutants in the heavy pollutions process were surveyed by analyzing the temporal variation relationship between the vertical distribution of wind over 0-325 m tower (at the Institute of Atmospheric Physics) and $PM_{2.5}$ concentration of urban area, and by using the Cressman method to interpolate the 10 m wind data and $PM_{2.5}$ concentration data to 2D grid field. From noon to afternoon, the air pollutants were blown to Beijing by valley wind. In the evening, the air pollutants converged near the convergence lines, which were formed by the mountain breeze and southerly wind. The severe pollution zone formed in the plains of Beijing and south of Beijing. From midnight to early morning, the air pollutants in Beijing were gradually blown away by the mountain breeze and stayed south of Beijing and northwest of Tianjin. In the winter, the effect of MVB on the recycling and accumulation of air pollutants plays an important role in severe atmospheric pollution incidents in Beijing, south of Beijing, and the eastern areas of the Taihang Mountains.

Key words: mountain valley breeze(MVB); sea land breeze(SLB); convergence line; air pollution; transportation and aggregation of air pollutants

收稿日期: 2018-03-28; 修订日期: 2018-07-29

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(8171022); 国家自然科学基金项目(41575010, 41175014); 国家国际科技合作专项(2015DFA20870)

作者简介: 李青春(1962~), 女, 教授级高级工程师, 主要研究方向为城市气象与灾害天气, E-mail: qcli@ium.cn

近年来,随着我国经济的快速发展,工业生产、居民生活和机动车等排放大量污染物到空气中,造成以细颗粒物为主要污染物的大气重污染事件频发,京津冀地区尤为严重. 空气污染和低能见度对人体健康、交通安全和生态环境造成了极为不利的影响,成为制约我国社会经济发展难以逾越的瓶颈问题. 除污染物排放外,天气系统、局地气象条件是大气污染形成的重要因素. 污染物在大气中的输送与汇聚主要取决于大气流场特征和大气层结稳定度,其中低层大气流场对于污染物的区域性输送和扩散的影响更为重要. 郭家瑜等^[1]分析发现,北京冬季颗粒物质量浓度日变化明显、呈现出夜间高于白天的污染模式. 通常认为,在大气污染过程中 $PM_{2.5}$ 浓度和能见度的日变化主要是因混合层高度昼高夜低、湿度昼小夜大所造成^[2]. 但值得注意的是,大气污染通常发生在天气系统弱、气压梯度小的天气条件下. 在这种天气条件下,因复杂下垫面的热力差异而产生的局地环流(包括山谷风、海陆风和城市热岛环流)的影响不可忽视. 山谷风可以决定 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分布,在两者转换期所形成的气象条件对 $PM_{2.5}$ 浓度具有重要影响^[3-5]. 京津冀地区地形复杂,西部是东北-西南走向的太行山山脉,北部是东西走向的燕山山脉,二者相连组成弧形山地,南部为华北平原,东部至东南部为渤海湾的海陆交错地带. 这种特殊山形对冷空气活动起到了阻挡和削弱作用,导致山前暖区空气流动性较小、形成气流停滞区、污染物和水汽容易聚集,从而有利于霾和雾的形成^[6]. 游春华等^[7]和刘树华等^[8]的研究指出,在较弱天气系统控制下,京津冀地区因复杂地形而形成的山谷风、海陆风局地环流起主导作用,单独或耦合作用对大气污染物的输送和扩散产生影响. 杨洋等^[9]讨论了京津冀地区代表站受局地环流和强天气系统控制时大气污染的差异,得出受局地环流控制时京津冀大气中可吸入颗粒物比强天气系统时高 75%. 在山地平原风更替阶段,香河、廊坊、固安一带出现汇聚带,使该地区大气污染加重. 另一些研究也证实,京津冀地区在局地环流控制时,气溶胶可比平常情况高一个量级,是造成严重大气污染的环流条件^[10-12].

北京距西部、北部山地距离仅 30~40 km. 各季节凌晨至上午偏北风占优势、午后至前半夜偏南风占优势的风场的日变化显著,其主要原因是地形造成的山谷风^[13]. 窦晶晶等^[14]对北京城区各季节山谷风起止时间和分布特征进行统计分析,得出:冬季谷风出现在 14:00~19:00、山风出现在 20:00~次日 14:00. 董芬等^[15]对北京地区秋冬季 19 个

污染日的山谷风起止时间、持续时间,以及厚度进行统计和个例分析,得出:冬季山风前沿压到北京的南三环. 与之相对应,北京地区空气污染过渡区域位于南三环. 董群等^[16]的研究发现北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象,指出:在弱天气系统控制下北京西南部地区经常出现的小尺度辐合流场,是形成北京地区“南北两重天”现象的重要原因. 赵晨曦等^[17]的研究发现,北京冬春季颗粒物浓度从北部山区到南部地区逐渐递增,西南部高于东南部,这种空间差异是因地形条件所造成.

受到大气环境测站空间分布不均、气象观测数据和环境观测数据不匹配,以及大气垂直观测不足等因素的影响,以往研究多采用几个代表站的观测数据分析局地环流对大气污染的影响,对京津冀地区山谷风、海陆风特征及其对大气污染形成和分布影响的认识仍显不足. 另外,近年来一些预报和模式系统得到长足发展并应用于业务和科学研究^[18-20],但仍难以准确而精细地模拟局地环流及其对大气污染浓度分布的影响. 本文利用全国地面加密自动气象站(京津冀地区约 309 站)逐时观测数据和中国环境监测总站发布的大气国控点(京津冀地区 80 站)逐时细颗粒污染物 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据,计算得出山谷风日、海陆风日的平均风矢量场、平均 $PM_{2.5}$ 浓度场,分析京津冀地区地面局地风(山谷风、海陆风)日变化规律及其对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响. 另外,为揭示北京地区重霾污染形成过程中的山谷风、海陆风影响,利用中国科学院大气物理研究所铁塔的风向风速与城区 $PM_{2.5}$ 浓度的时间变化关系,分析北京近地层 0~325 m 的山谷风对城区大气污染时间变化的影响. 利用 Cressman 插值法分别将地面风向风速数据和 $PM_{2.5}$ 浓度数据差值到二维格点场,得出地面加密风场和 $PM_{2.5}$ 浓度分布叠加图,以此进行地面山谷风和海陆风对 $PM_{2.5}$ 浓度的输送和汇聚作用分析.

1 材料与方 法

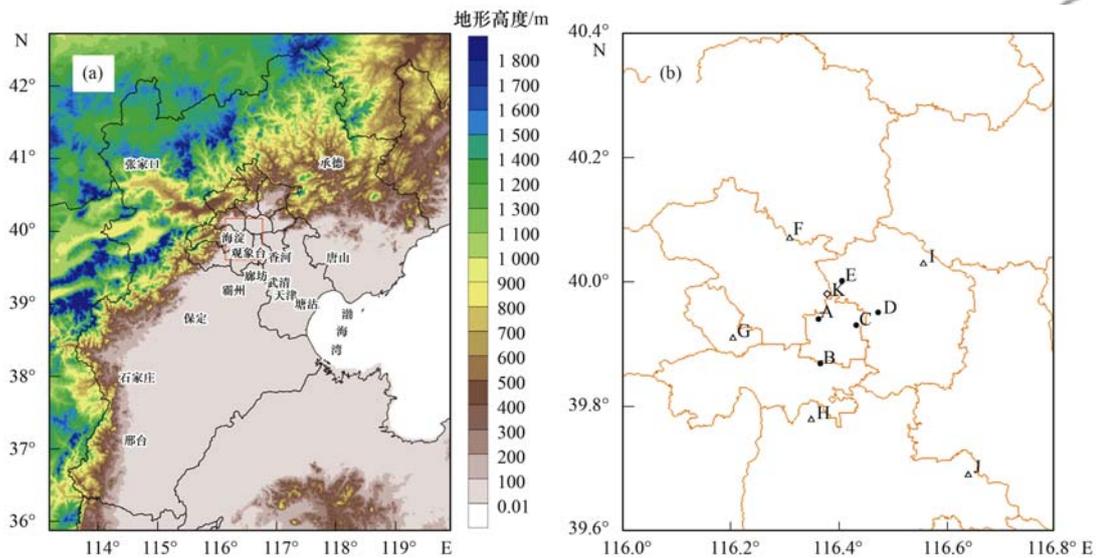
本文以京津冀地区重霾($PM_{2.5}$ 为主要污染物)污染事件频发的 2016 年 12 月为研究时段. 利用全国城市空气质量实时发布的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度观测数据(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>, 全国环境空气质量监测点 3 360 个,其中“国家级监控点”1 436 个)分析京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征. 利用北京大气环境监测中心发布的北京区域 35 个监测站的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度数据(<http://zx.bjmemc.com.cn/>)分析北京地区各站 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化和空间分布特征.

由于山谷风、海陆风比较弱, 很难观测得到. 分析山谷风、海陆风时, 首先要去掉大尺度背景风场. 采用曹渐华等^[21]和郑祚芳等^[22]所用方法, 首先将2016年12月(剔除6个大风日)全国地面加密自动气象站的逐时风向风速分解为 u 、 v 分量, 分别代表东西方向和南北方向的风. 计算各站逐时的 u 、 v 分量平均值 \bar{u} 、 \bar{v} , 视为实际风. 之后将逐时 \bar{u} 、 \bar{v} 相加求平均, 获得全日平均风 \bar{U} 和 \bar{V} , 看作是背景风. 用逐时实际风 \bar{u} 、 \bar{v} 减去背景风 \bar{U} 、 \bar{V} , 得到逐时局地风 u' 、 v' , 用于分析和定义山谷风、海陆风.

利用全国地面加密自动气象站逐时风向风速数据分别计算山谷风日、海陆风日的平均风矢量场. 步骤为: 先将各站的逐时风向风速分解成 u 和 v 分量, 计算各站的逐时 u 和 v 分量平均值, 最后逐时合成山

谷风日、海陆风日的平均风矢量场; 同样方法, 利用国控点的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度观测数据分别计算得出山谷风日、海陆风日的平均 $PM_{2.5}$ 浓度分布场.

利用布设在中国科学院大气物理研究所铁塔[位于朝阳区北三环北侧, 见图1(b)中K点]0~325 m的15层气象观测数据分析近地层风对北京地区大气污染浓度的影响, 选取5个城区环境监测站的 $PM_{2.5}$ 浓度数据分析城区大气污染浓度的时间变化特征[站点分布见图1(b)中A~E点]. 同时, 利用北京地区5个道面自动气象站的逐小时观测数据计算能见度、相对湿度平均值[站点分布见图1(b)中的F~J点], 用于分析北京平原地区的能见度、相对湿度时间变化, 确定雾和霾天气出现时段.



(a) 地形和区划, 阴影为地形高度, 单位: m; (b) 北京地区的代表性站点分布, A~E 为大气环境站: A. 官园、B. 万寿西宫、C. 东四、D. 农展馆、E. 奥体中心, F~J 为道面自动气象站: F. 回龙观、G. 八角桥、H. 西红门南桥、I. 温榆河、J. 京津塘高速路, K 为铁塔观测

图1 研究区域的地形与代表站分布

Fig. 1 Topographic-heights and site distribution in the study area

2 结果与讨论

2.1 地面风场日变化与山谷风、海陆风环流

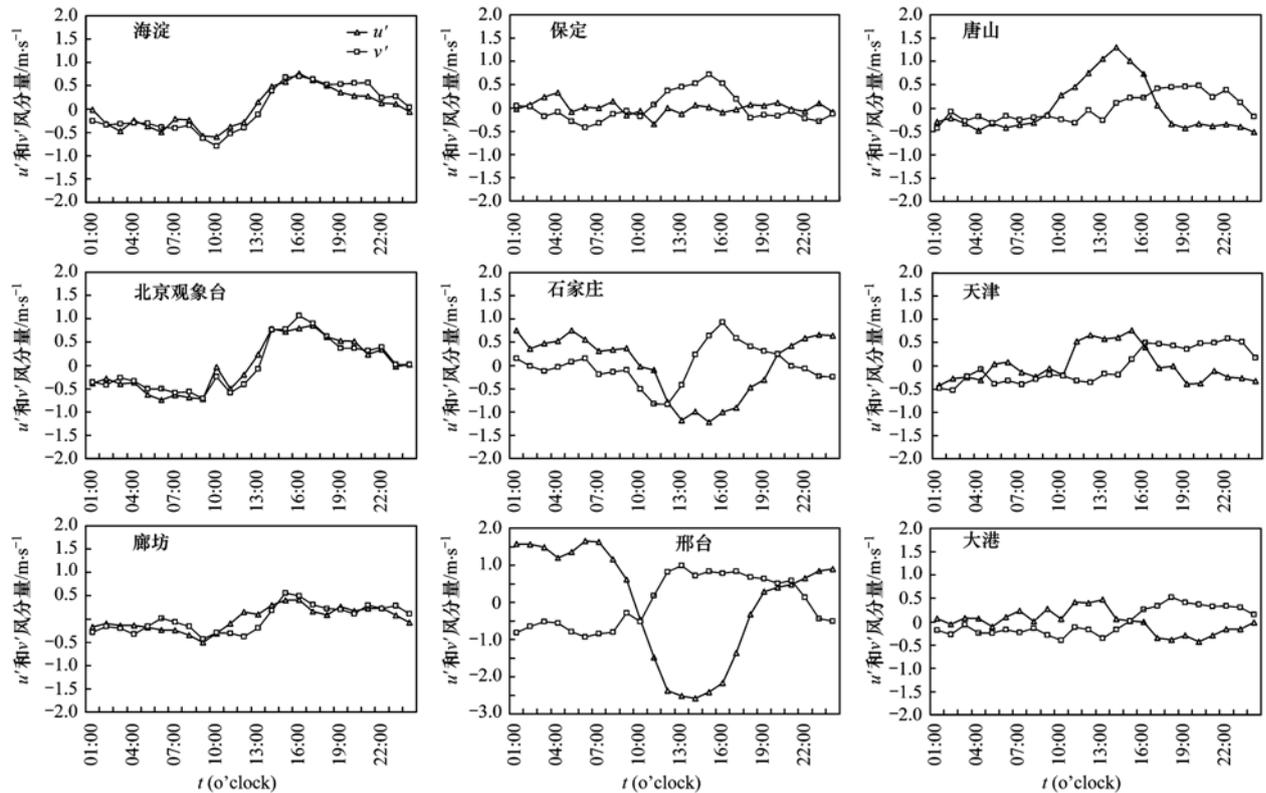
在静稳天气条件下, 京津冀地区因复杂下垫面的热力差异而产生的局地环流主要为山谷风、海陆风和城市热岛环流. 因山地平原地形而产生的局地环流称为山谷风环流, 因海陆交错而产生的局地环流称为海陆风环流. 白天, 由于太阳辐射逐渐增强, 导致山区(陆地)地面增温快, 空气柱受热膨胀、密度减小. 在水平气压梯度力的作用下, 在近地层形成由平原(海洋)吹向山区(陆地)的谷风(海风), 上层风向相反, 构成谷风(海风)环流. 夜晚, 山区(陆地)地面温度降低快、空气柱变冷压缩、密度增大, 在水平气压梯度力的作用下, 在近地层形

成由山区(陆地)流向平原(海洋)的山风(陆风)、上层风向相反, 构成山风(陆风)环流^[23]. 因城市热岛环流的影响范围远小于山谷风、海陆风环流, 本文不做单独讨论.

选取北京城区海淀、北京南郊观象台和河北廊坊为北京地区的山谷风影响代表站, 选取河北保定、石家庄、邢台为太行山东麓地区的山谷风影响代表站. 选取距渤海湾60 km以内的河北唐山、天津和塘沽为沿海地区的海陆风影响代表站, 计算2016年12月地面代表站的逐时 u 、 v 分量月平均值 \bar{u} 、 \bar{v} 和距平值 u' 、 v' , 分析代表站的局地风东-西风分量 u' 、南-北风分量 v' 的日变化, 以此揭示山谷风、海陆风特征. 由图2可以看出: 中午至前半夜, 北京观象台、海淀局地风为西南风, 午夜至次日中

午为东北风,具有明显的山谷风日变化特征.廊坊与北京观象台、海淀日变化规律相似,但因离山区距离较远,局地风 u' 、 v' 分量日变化不明显.处于太行山东麓的保定、石家庄、邢台,上午 10:00 至傍晚为东南风,傍晚至次日上午局地风为偏北风(石家庄、邢台为西北风).这与西部太行山地形有关的山谷风相对应,上午 10:00 至傍晚出现的东南风为谷风(石家庄中午转为谷风)、傍晚至次日上午的西北风则为

山风.基于以上分析规定:若一天中白天、夜间的风向出现明显转向,转向前后的风向持续 4 h 及以上.对于北京地区山谷风代表站,若下午至前半夜局地风 $u' > 0$ 和 $v' > 0$ 为西南风、午夜至次日上午 $u' < 0$ 和 $v' < 0$ 为东北风,则认定为山谷风日.对于太行山东麓代表站,若上午 10:00 至傍晚局地风 $u' < 0$ 和 $v' > 0$ 为东南风,傍晚至次日上午 $u' > 0$ 和 $v' < 0$ 为西北风,则认定为山谷风日.



代表站的局地风 u' 和 v' 分量, u' 正值为西风、负值为东风, v' 正值为南风、负值为北风

图 2 2016 年 12 月京津冀地区代表站的局地风 u' 和 v' 分量的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of the local wind u' and v' components for representative sites in the Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2016

冬季,因海面被海冰覆盖,海陆风环流很弱.唐山、天津和塘沽的局地风 u' 和 v' 分量存在日变化(见图 3),下午至前半夜 $u' < 0$ 和 $v' > 0$ 为东南风(海风),其他时间 $v' < 0$ 为弱西北和东北风,同时参照陈彬等^[24]对冬季海陆风的标准规定:若代表站下午至前半夜 $u' < 0$ 和 $v' > 0$ 为东南风且持续 4 h 以上,其他时间 $v' < 0$ 为偏北风,则被认定为海

陆风日.

除此之外,山谷风日、海陆风日的正点观测时次地面气压场上京津冀区域气压梯度小、区域内气压差 < 5 hPa(1~2 根等压线).逐日分析 3 个区域(北京地区、太行山东麓地区、沿海地区)代表站的地面局地风 u' 、 v' 分量日变化,统计得出 12 月山谷风、海陆风的出现日期(见表 1).

表 1 2016 年 12 月京津冀地区地面风场特征统计

Table 1 Surface wind field statistics in the Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2016

类型	出现日期	天数/d	比例/%
山谷风	1、2、6、7、9、10、14、16、18、19、30	11	35.5
海陆风	10、18、23	3	9.7
偏北风较大	5、8、15、22、26、28	6	19.4

2.2 山谷风、海陆风对大气污染分布的影响

2.2.1 山谷风的影响

由表 1 可知,2016 年 12 月京津冀地区出现 11

个山谷风日,占 12 月的 35.5%.分析山谷风日的地面平均风矢量场和 v 分量(南北风)分布[图 3(a)~3(c)]:早晨 09:00 以后,京津冀中至南部地区

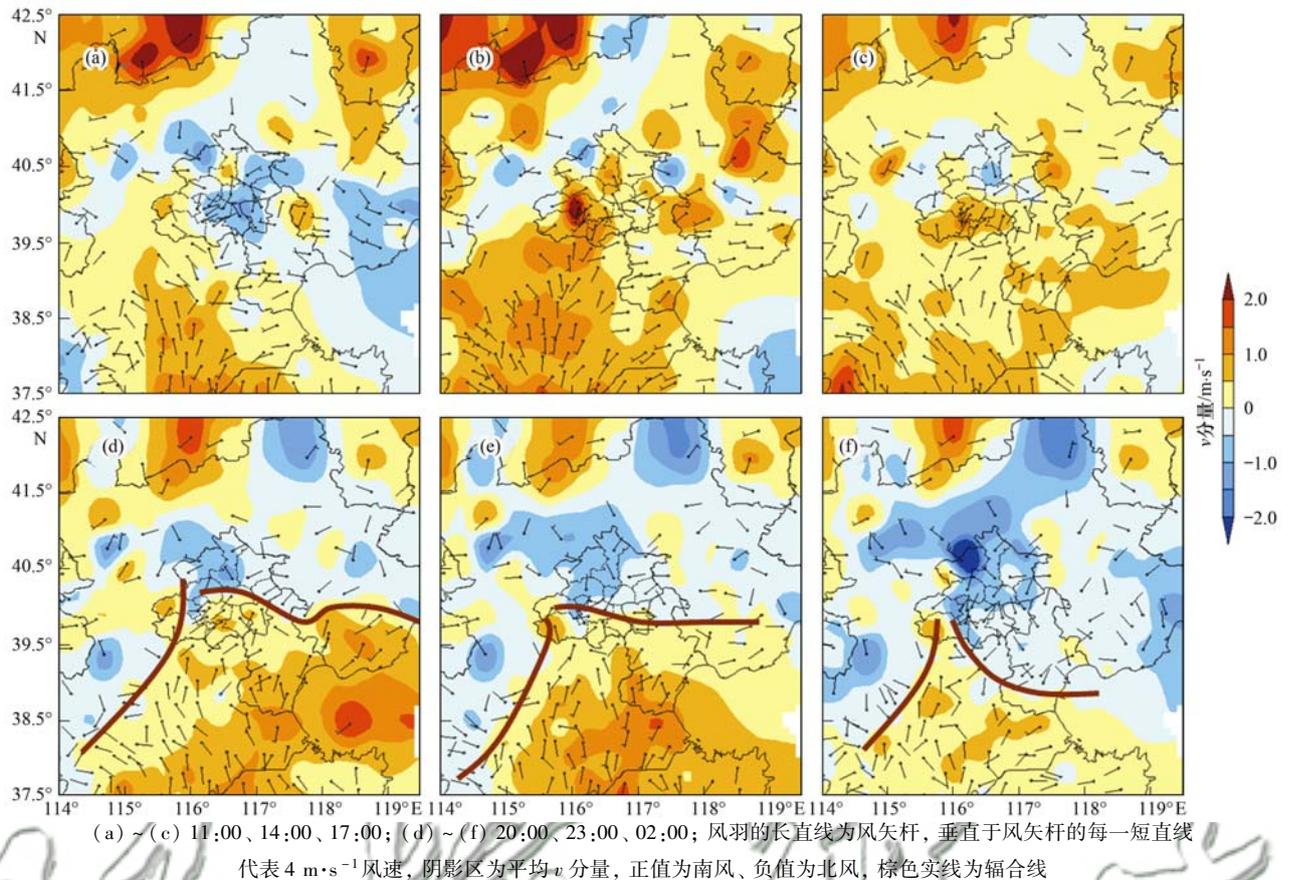


图3 2016年12月京津冀地区山谷风日的平均风和 v 分量分布

Fig. 3 Distribution of averaged wind and v component of the MVB days in the Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2016

为偏南风场控制, 北京地区为东北风控制. 上午至中午, 河北中部至南部平原地区的偏南风北上、风向逐渐转为东南风(谷风). 下午 14:00 ~ 16:00, 北京地区逐渐为西南风(谷风)控制, 除北京西北部、东北部山区和河北西北山区外, 京津冀地区为偏南风覆盖. 对应时间的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分布图上[图 4 (a) ~ 4 (c)], 上午位于太行山东部的保定、石家庄、邢台等地的污染浓度值相对较高. 下午 14:00 至傍晚, 太行山东部地区、北京西南部地区的污染浓度增大. 这与太行山山前的东南向谷风对污染物的输送和辐合作用有关.

17:00 以后, 北京的西北部山区、东北部山区, 以及河北西部山区的山风出现. 此时平原地区仍为偏南风控制. 因此, 在北京西部、西北部和东北部的山前地区, 以及河北太行山山前地区形成偏北风与偏南风的“人字形”辐合线[图 3 (d) ~ 3 (f)], 以傍晚至前半夜最为明显. “人字形”辐合线的形成使其南部区域的污染浓度值明显增大, 形成大范围污染浓度高值区[图 4 (d) ~ 4 (f)]. 这一现象进一步证实了苏福庆等^[25]提出的太行山和燕山山前有一条沿山脉走向分布的两种风向交绥汇聚带的存在. 同时揭示出, 傍

晚至午夜在北京地区、河北太行山东部地区(保定、石家庄和邢台)大气污染加重与辐合线对污染物的辐合作用有直接关系. 凌晨以后, 北京北部地区山风范围扩大、辐合线南移. 受清洁的山风控制区域污染浓度值减小, 污染浓度大值区移到北京以南地区. 早晨 05:00 ~ 08:00 山风控制范围最大、超过北京市域范围, 早晨 08:00 以后辐合线逐渐消失(图略).

2.2.2 海陆风的影响

冬季海陆风很弱, 12 月的 10、18 和 23 日为海陆风日(山谷风同日出现), 占比 9.7%. 分析海陆风日的地面平均风矢量场、 u 分量(东西风)场(图 5), 以及平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度场(图 6)得出: 上午, 河北中东部至沿海地区为西北向的陆风控制, 对应区域大气污染浓度减小(图略). 中午至下午, 河北中部、西南部为东南向的谷风控制[图 5(a) ~ 5(c)], 太行山东部地区大气污染浓度增大[图 6(a) ~ 6(c)]. 傍晚至前半夜, 河北中东部至沿海地区出现东南向海风, 海风较弱、大致呈扇形分布, 深入内陆到达天津东南部地区[图 5(d) ~ 5(f)]. 海风控制区域大气污染浓度减小、海风前缘大气污染加重[图 6(d) ~ 6(e)]. 这可能与海风湿度相对较大、

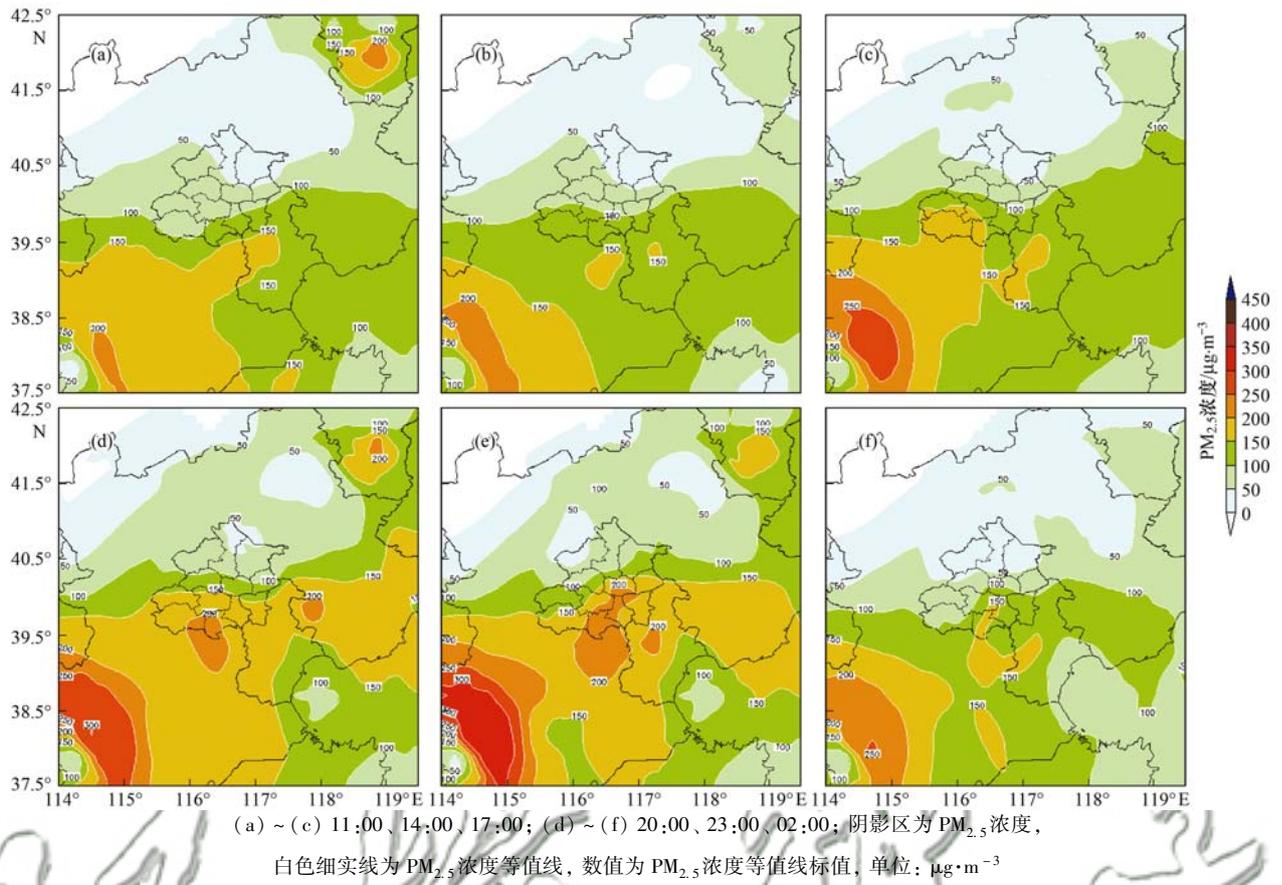


图 4 2016 年 12 月京津冀地区山谷风日的平均 $PM_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 4 Distribution of the average $PM_{2.5}$ concentration of the MVB days in the Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2016

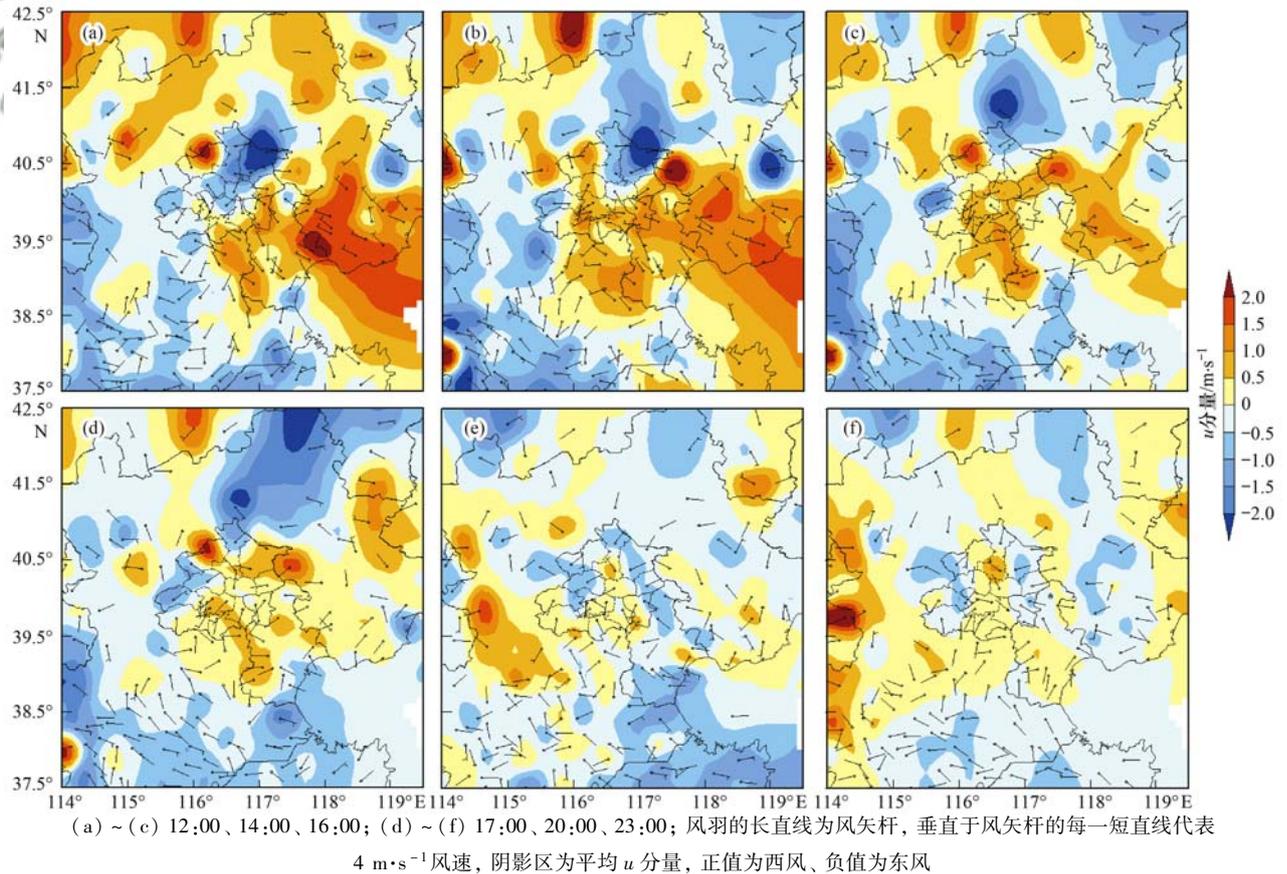
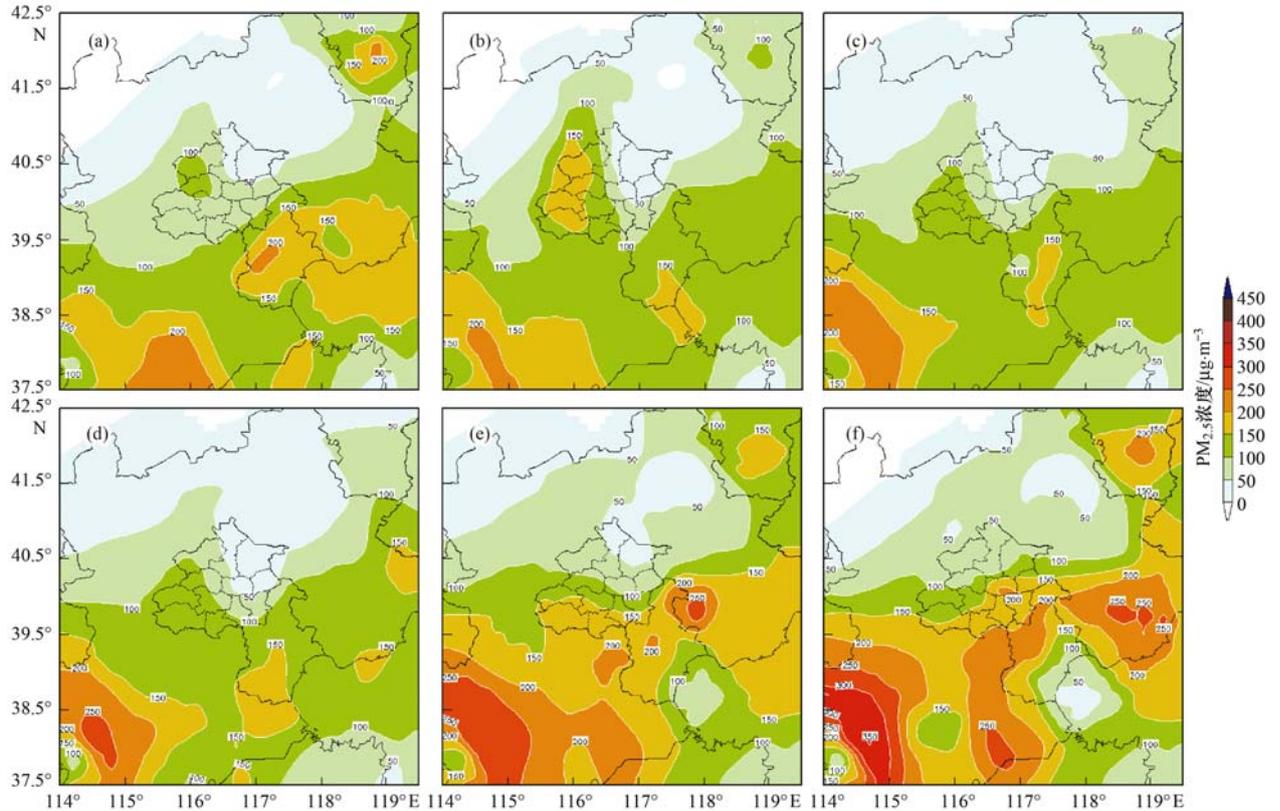


图 5 2016 年 12 月京津冀地区海陆风日的平均风和 u 分量分布

Fig. 5 Distribution of the average wind and u component of the SLB days in the Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2016

气溶胶粒子吸湿增长作用有关. 因海风较弱, 在傍晚前后与北京西北部和北部、河北西部的山风并未产生明显的辐合对峙及耦合效应. 凌晨至早晨, 北

京地区为东北向山风控制, 大气污染浓度减小, 高值区位于河北太行山东部地区, 以及北京以南的霸州、廊坊一带(图略).



(a) ~ (c) 12:00, 14:00, 16:00; (d) ~ (f) 17:00, 20:00, 23:00; 阴影区为 $PM_{2.5}$ 浓度, 白色细实线为 $PM_{2.5}$ 浓度等值线, 数值为 $PM_{2.5}$ 浓度等值线的标值, 单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 6 2016 年 12 月京津冀地区海陆风日的平均 $PM_{2.5}$ 浓度分布

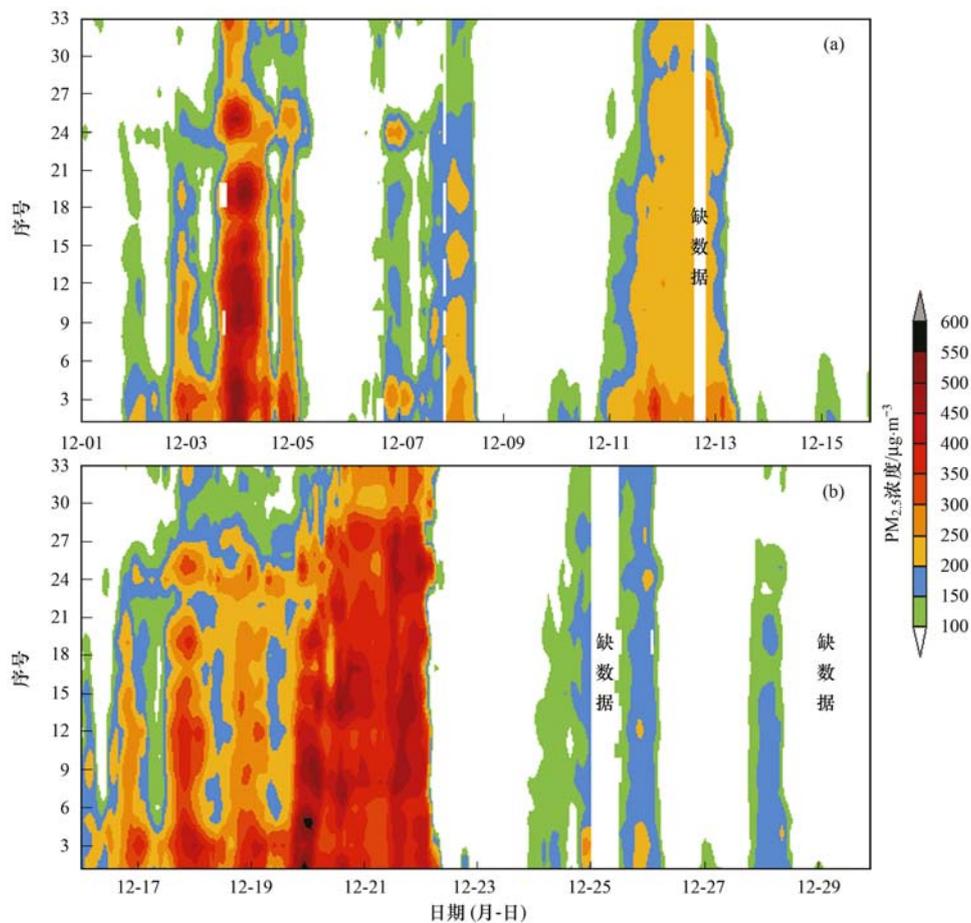
Fig. 6 Distribution of the average $PM_{2.5}$ concentration of the SLB days in the Beijing-Tianjin-Hebei region in December 2016

2.3 重霾污染形成过程中的山谷风、海陆风影响

将 2016 年 12 月北京地区 33 个大气环境监测站按照纬度从南向北向排列绘制各站 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化图可以看出[见图 7(a) ~ 7(b)], 12 月北京地区发生了 6 次大气污染过程: 1 ~ 4 日、6 ~ 8 日、11 ~ 13 日、16 ~ 22 日、24 ~ 26 日、28 日以后(29 日下午至 31 日 $PM_{2.5}$ 浓度数据缺失). 从污染强度和持续时间看, 12 月 16 ~ 22 日持续时间最长(超过 6 d), 也是最严重的一次霾污染过程($PM_{2.5}$ 为主要污染物). 其次是 12 月 1 ~ 4 日, 污染持续时间不足 4 d. 从 12 月 16 ~ 22 日重污染过程 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化可看出[图 7(b)], 各站时间变化规律一致, 南部地区污染浓度高、大气污染重、日变化小, 而北部污染浓度值低、大气污染较轻、日变化明显. 反映出各站大气污染的同源性特征, 并且南部地区距离污染源更近、或南部地区具有加重大气污染的局地气象条件. 在 12 月 16 ~ 22 日大气重污染的形成阶段(16 ~ 19 日) $PM_{2.5}$ 浓度日变化明显, 具有上午 11:00 以后至午夜 $PM_{2.5}$ 浓度明显增大、午夜至

早晨 $PM_{2.5}$ 浓度逐渐减小的日变化特征. 12 月 16 日、17 日和 19 日出现 3 次 $PM_{2.5}$ 浓度明显跃增, 于 19 日午夜达到严重大气污染水平($PM_{2.5}$ 浓度 $\geq 600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 12 月 20 ~ 22 日凌晨 $PM_{2.5}$ 浓度维持高值(日均值分别为 $505 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $377 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 日变化不明显. 12 月 22 日凌晨, $PM_{2.5}$ 浓度出现断崖式下降, 污染过程结束.

李炬等^[26]通过对京津冀地区 6 个代表站雷达测风数据进行谱分析、小波分析得出, 京津冀城市群的低层几百米高度水平风有明显的日变化周期. 利用铁塔的 0 ~ 325 m 的 15 层风向风速的垂直观测反映北京城区近地层水平风的日变化特征. 分析 12 月 16 ~ 22 日重霾污染过程的铁塔风向风速和城区站 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化图[图 8(a) ~ 8(b)]看出, 12 月的 16、18、19 日为山谷风日(其中, 12 月 18 日山谷风、海陆风同时出现, 见表 1), 0 ~ 325 m 的风向风速日变化特征较为明显, 即中午前后转为偏南风(谷风)、 $PM_{2.5}$ 浓度升高. 傍晚以后转为东北风(山风), 对应的城区站 $PM_{2.5}$ 浓度再次升高, 即转为山



(a) 12月1~15日, (b) 12月16~29日; 阴影区表示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值, 单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 横坐标为日期、纵坐标为南-北向排列的33个站点序号(站点序号为: 1. 榆堡、2. 琉璃河、3. 永乐店、4. 大兴、5. 房山、6. 亦庄、7. 云岗、8. 丰台花园、9. 永定门内、10. 万寿西宫、11. 天坛、12. 通州、13. 前门、14. 古城、15. 官园、16. 东四、17. 门头沟、18. 农展馆、19. 西直门北、20. 奥体中心、21. 万柳、22. 植物园、23. 北部新区、24. 东高村、25. 顺义、26. 平谷、27. 昌平、28. 定陵、29. 怀柔、30. 八达岭、31. 密云、32. 延庆、33. 密云水库)

图7 2016年12月北京地区各站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间变化

Fig. 7 Variations in $\text{PM}_{2.5}$ concentration at observation sites in Beijing in December 2016

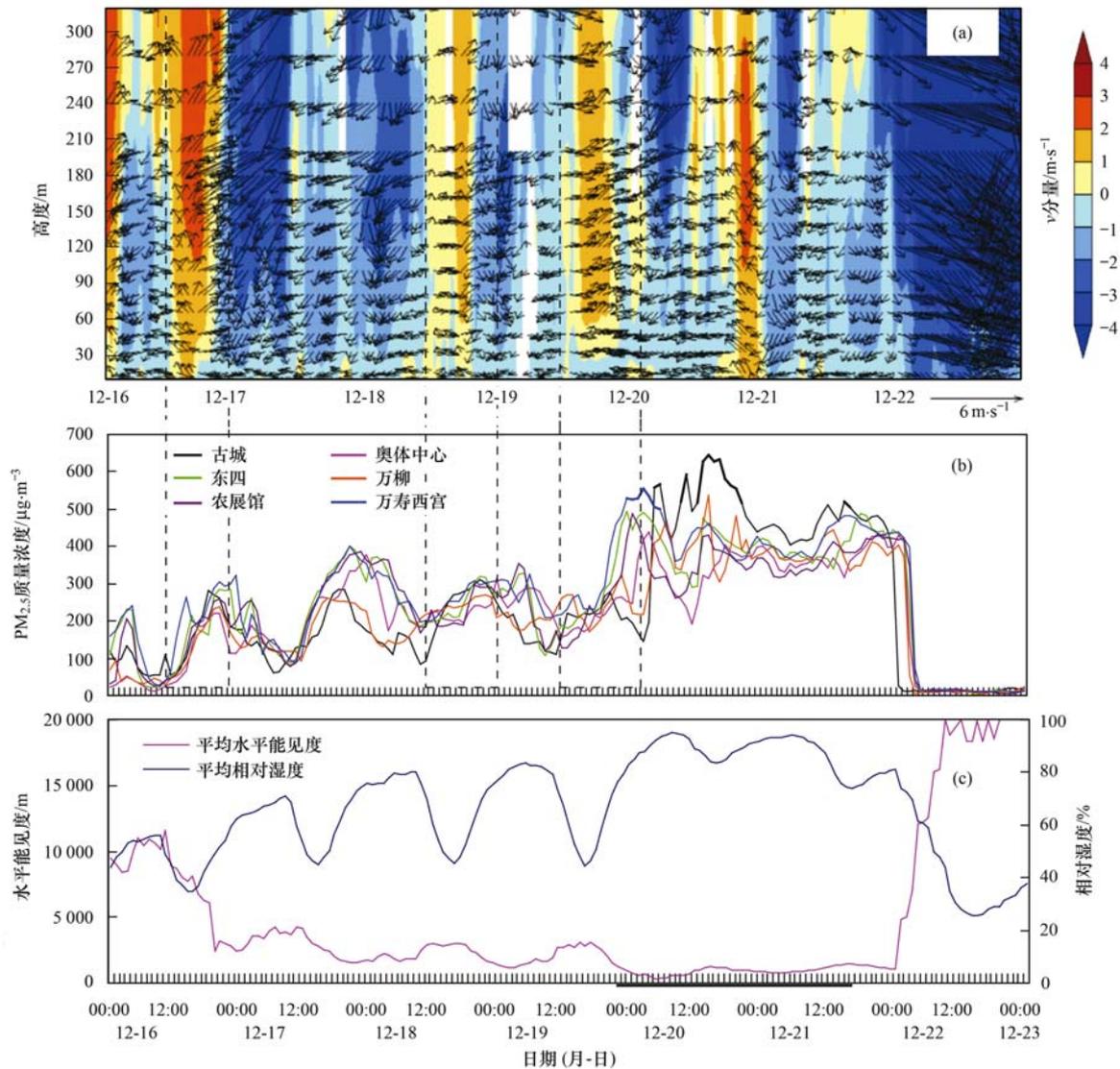
风4~5 h以后(午夜前后) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到最高, 该时段与风场辐合线影响时段相对应。凌晨02:00以后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显下降, 早晨08:00~09:00降至最低; 12月的17日与16、18、19日不同的是0~325 m为东北风控制。12月17日上午10:00~傍晚20:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显增大, 这可能与高空和地面天气系统的辐合作用有关。

另外, 从能见度和相对湿度时间变化曲线图上可看出[见图8(c)], 12月16~19日北京地区的能见度、相对湿度日变化明显。12月16日午夜开始, 能见度下降至4 km以下。12月17日~19日, 受 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度的日变化影响($\text{PM}_{2.5}$ 浓度午后至前半夜升高、凌晨以后至早晨降低, 相对湿度傍晚以后增大、早晨减小), 能见度下午至傍晚变差、早晨逐渐转好。12月19日傍晚以后, 因相对湿度猛增, 气溶胶粒子吸湿增长, 22:00以后能见度下降到1 km以下。12月20日凌晨相对湿度达到95%以上, 大雾天气形成。12月20日凌晨至12月21日上午为

雾、霾混合天气, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度维持高值、日变化不明显, 山谷风及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响消失。

在进行北京地区重霾污染形成阶段12月16~19日山谷风、海陆风对大气污染分布影响时, 为了解决气象观测数据和环境观测数据不匹配问题, 采用Cressman插值法分别将地面风向风速数据和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据差值到二维网格点场^[27], 得出地面加密风场和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布叠加(图9)。

首先分析12月16日高空、地面天气形势(图略), 京津冀地区上空500~700 hPa处于高压脊前的西北气流控制, 850~500 hPa高度上我国东部地区显著增温, 形成干暖盖, 使大气层结十分稳定。地面大陆高压南压减弱, 12月16日下午京津冀地区逐渐转为高压后部、低压前部的西南气流区。分析地面加密风场和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平分布叠加图[图9(a)], 16日凌晨至早晨北京大部分地区为偏北风, 上午10:00以后北京平原地区西南向谷风开始出现。下午[图9(b)]京津冀南部地区的西南风增强



(a)箭头为风矢量, 阴影区表示 v 分量, 正值为南风、负值为北风; (c)横坐标轴上的黑粗实线表示大雾出现时段

图8 2016年12月16~22日铁塔各层风矢量和 v 分量、 $PM_{2.5}$ 浓度、能见度和相对湿度时间变化

Fig. 8 Variations in the wind profile and v component over 0-325 m at IAP tower, $PM_{2.5}$ concentration, and relative humidity, and horizontal visibility from December 16, 2016 to December 22, 2016

北上, 将太行山东部地区(河北保定、石家庄等地)和河北中南部地区的污染大气向北输送. 傍晚以后[图9(c)]北京西北部、北部山区, 以及河北西部出现山风并向平原地区扩展, 分别在北京城区至西南部地区、河北太行山山前与偏南风相遇, 形成风场辐合线, 辐合线附近风速极小. 分别在北京城区西南、房山、大兴等地, 以及太行山东部地区形成 $PM_{2.5}$ 浓度大值区.

在12月17日地面加密风场和 $PM_{2.5}$ 浓度水平分布图上(图略), 北京为偏北风控制, 北京南部至天津西北部(河北廊坊、霸州、武清等地)为气旋性风场辐合区(东北风与东南风构成的辐合区), 山谷风不明显, 污染浓度高值区集中在该区域. 傍晚以后, 北京、河北太行山山前为弱风场辐合作用, 在北京西南地区至城区、南部地区, 以及河北太行山

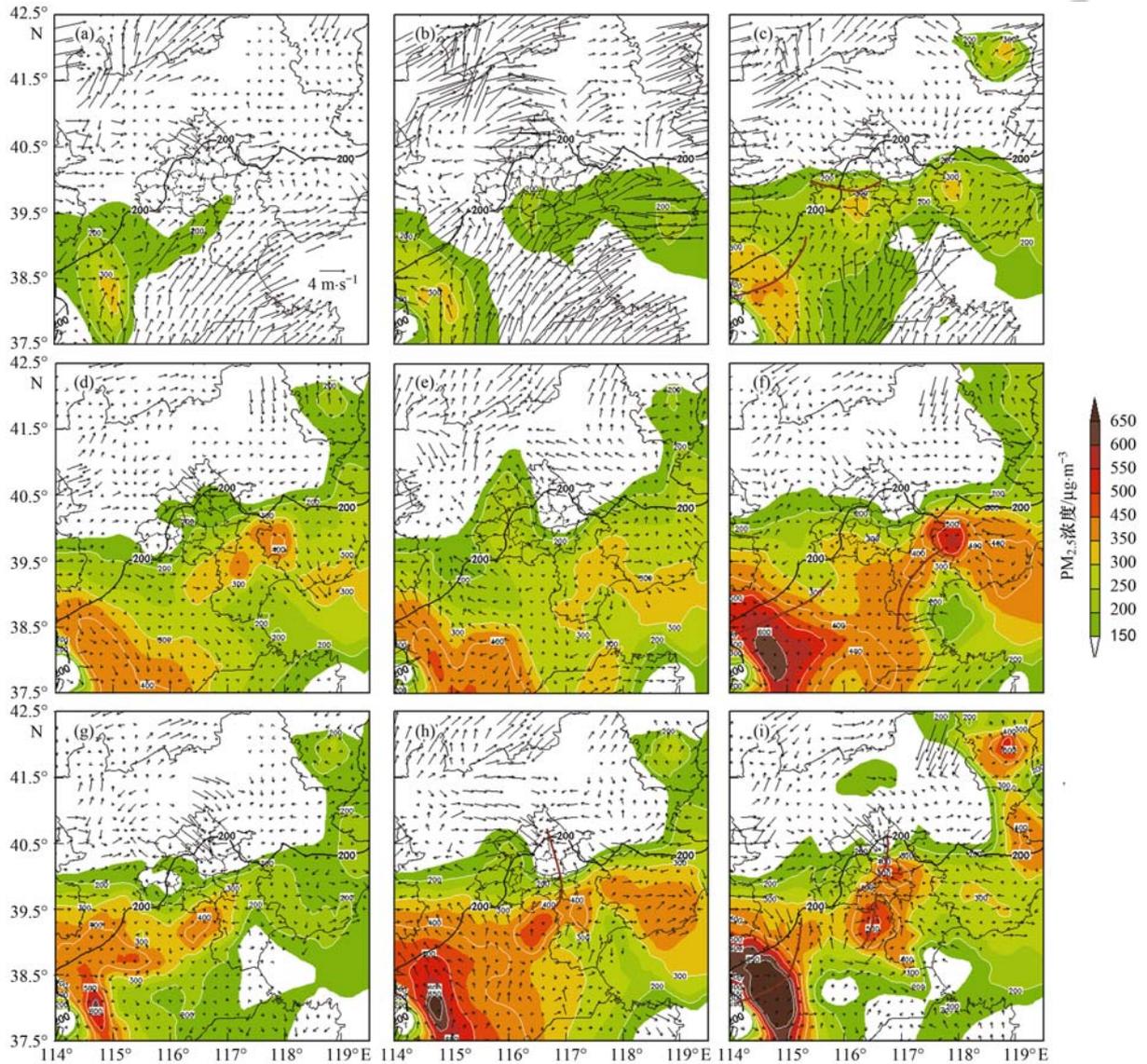
东部地区为污染浓度高值区.

12月18日, 北京高空处于高空槽前西南气流中, 地面受鞍型气压场或均压场控制. 在地面加密风场和 $PM_{2.5}$ 浓度分布图上, 12月18日早晨, 北京大部分地区为山风控制, $PM_{2.5}$ 浓度大值区位于武清、廊坊地区[图9(d)], 以及河北太行山东部地区. 下午转为西南谷风[图9(e)], 2~3 h以后渤海湾出现东南风(海风). 傍晚, 北京西北部、北部山风出现, 在山风和海风宽广过渡区域形成弱辐合区, 对应的 $PM_{2.5}$ 浓度大值区位于天津至北京南部地区[图9(f)], 22:00以后渤海湾地区东南风减弱消失. 总体看, 12月18日傍晚因山风与海陆风之间存在弱辐合作用, 使北京以南至天津的大气污染浓度增大. 同时, 太行山山风出现后与偏南风形成辐合线, 使山前地区污染浓度明显增大.

12月19日早晨开始京津冀地区上空500 hPa转为高压脊前西北气流控制,850~500 hPa高度上我国东部地区显著增温,大气层结更加稳定.在地面加密风场和 $PM_{2.5}$ 浓度水平分布上,12月19日凌晨至上午北京大部分地区为北风(山风)控制[图9(g)], $PM_{2.5}$ 浓度减小,位于北京以南的霸州、廊坊、武清一带,以及河北太行山东部地区的污染浓度较高.14:00前后北京西部和南部地区出现西南风、东南部出现东南风将污染物向北输送,北京 $PM_{2.5}$ 浓度值增大.同时,西南风与东南风形成南北向辐合线,在天津西北部、武清、廊坊一带形成 $PM_{2.5}$ 浓度大值区[图9(h)].傍晚,北京西北部、北部,以及河北西部的山风出现,与平原地区的偏南风形成辐合线.北京北部的山风逐渐南扩,辐合

线与天津东北部的辐合线结合,共同构成南北向辐合线[图9(i)].随后,污染物沿辐合线汇聚,污染浓度高值区沿辐合线北上,呈南北向分布,北京地区 $PM_{2.5}$ 浓度值再次明显增大.与此同时,河北太行山东部地区因辐合线的形成使该地区的污染浓度也进一步明显增大.12月19日午夜至12月20日凌晨,北京地区、河北西南地区大气污染达到最严重程度.

12月20~21日,500 hPa北京处于高空槽前西南气流控制.地面上河套倒槽发展东移,北京处于东南风场控制,空气湿度增大(图略).从前面对能见度、相对湿度和 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化分析的结果可知,随着空气湿度增大、大气污染严重,水平能见度很差.在这种天气条件下,太阳辐射受到影



(a) ~ (c) 12月16日 08:00、14:00、20:00; (d) ~ (f) 12月17日 08:00、14:00、20:00; (g) ~ (i) 12月19日 08:00、14:00、20:00;

图中阴影区表示 $PM_{2.5}$ 浓度,箭头为风矢量,黑色曲线为200 m海拔高度线,棕色实线代表辐合线,

白色细实线为 $PM_{2.5}$ 浓度等值线,数字为 $PM_{2.5}$ 浓度等值线标值

图9 2016年12月16、18、19日京津冀地区风场和 $PM_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 9 Distribution of surface winds and $PM_{2.5}$ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region from December 16, 18, and 19, 2016

响, 山谷风随之减弱、消失. 其对污染物的输送和汇聚作用也随之减弱、消失.

综上所述: 在静稳气象条件下, 山谷风对京津冀地区排放大气污染物的输送和汇聚作用明显. 除本地污染排放外, 在山谷风日, 中午至傍晚, 由谷风将污染物吹向北京. 傍晚至前半夜, 污染物在山风和偏南风形成的辐合线附近汇聚, 在北京地区至北京以南地区形成污染浓度高值区. 凌晨至早晨, 污染物被山风吹离北京, 滞留在北京以南至天津西北部地区、河北太行山东部地区. 若天气形势未发生变化, 则大气污染物以日为周期不断循环和累积, 直到强冷空气南下、大风将污染物彻底清除, 污染过程才得以结束. 因此, 山谷风对大气污染物的输送和汇聚作用加剧北京平原地区和北京以南地区的大气污染程度, 对北京地区严重大气重污染事件的形成起重要作用.

3 结论

(1) 2016 年 12 月出现 11 d 山谷风日, 占比 35.5%. 在山谷风日的中午至傍晚, 京津冀地区为谷风控制, 将位于河北太行山东部地区至北京西南部的污染物向北输送. 傍晚至午夜山风出现, 在北京西部和北部, 以及河北太行山山前地区出现偏北风和偏南风构成的“人字形”辐合线, 辐合线对污染物的汇聚作用使北京地区、廊坊以及保定、石家庄、邢台等地大气污染加重. 山谷风对京津冀地区大气污染物的输送和汇聚作用明显.

(2) 海陆风极少共出现了 3 d, 占比 9.7%, 且与山谷风同日出现. 凌晨至上午, 在河北东部至东南部、天津沿海地区为西北向陆风控制, 大气污染浓度减小. 下午至前半夜, 海风出现并覆盖到天津南部地区. 海风控制区域污染浓度减小, 陆风前沿大气污染浓度增大.

(3) 在北京地区重霾污染过程中, 各站 $PM_{2.5}$ 浓度的时间变化趋势具有一致性, 南部地区污染浓度高、大气污染重、日变化小, 北部污染浓度值低、大气污染较轻、日变化明显. 反映出各站大气污染变化的同源性特征, 南部地区距离污染源更近或者具有加重大气污染的局地气象条件.

(4) 在北京地区重霾污染形成过程中, 凌晨至早晨北京地区逐渐为山风控制, 污染物被山风吹离北京, 滞留在北京以南至天津西北部、河北太行山东部地区. 中午至下午, 谷风将污染物吹回北京. 傍晚以后, 污染物在山风和偏南风形成的辐合线附近汇聚, 在北京地区至北京以南地区, 以及太行山东部地区, 污染物做以日为周期的循环和累积. 另

外, 需要强调的是除污染排放外, 静稳天气条件是大气污染形成的决定性条件. 在此前提下, 山谷风对污染物的循环累积效应是北京至以南地区、太行山东部地区大气重污染形成的重要原因.

致谢: 本研究得到北京城市气象研究所赵秀娟研究员、窦军霞博士、张西雅博士提供的数据支持, 在此一并感谢!

参考文献:

- [1] 郭家瑜, 张英杰, 郑海涛, 等. 北京 2015 年大气细颗粒物的空间分布特征及变化规律[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(7): 2409-2419.
Guo J Y, Zhang Y J, Zheng H T, *et al.* Characteristics of spatial distribution and variations of atmospheric fine particles in Beijing in 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2409-2419.
- [2] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2031-2044.
Liao X N, Zhang X L, Wang Y C, *et al.* Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in summer and winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2031-2044.
- [3] Reeves H D, Stensrud D J. Synoptic-scale flow and valley cold pool evolution in the western United States [J]. *Weather and Forecasting*, 2009, **24**(6): 1625-1643.
- [4] Silcox G D, Kelly K E, Crosman E T, *et al.* Wintertime $PM_{2.5}$ concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 17-24.
- [5] Curci G, Cinque G, Tuccella P, *et al.* Modelling air quality impact of a biomass energy power plant in a mountain valley in central Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 248-255.
- [6] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 1-11.
Wu D, Liao B T, Wu M, *et al.* The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 1-11.
- [7] 游春华, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 京津地区夏季大气局地环流背景研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, **42**(6): 779-783.
You C H, Cai X H, Song Y, *et al.* Local atmospheric circulations over Beijing-Tianjin area in summer [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, **42**(6): 779-783.
- [8] 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, **39**(1): 88-98.
Liu S H, Liu Z X, Li J, *et al.* Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(3): 382-392.
- [9] 杨洋, 唐贵谦, 吉东生, 等. 夏季局地环流对京津冀区域大气污染影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2359-2367.
Yang Y, Tang G Q, Ji D S, *et al.* 2015, Effects of local circulation on atmospheric pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei

- region during summer [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(5): 2359-2367.
- [10] 朱翠娟, 叶卓佳, 段宝忠, 等. 秋冬季节京津渤地区局地环流特征及气溶胶分布规律[J]. 环境科学学报, 1982, **2**(4): 342-350.
- Zhu C J, Ye Z J, Duan B Z, *et al.* Characteristics of local circulation and aerosol distribution over Beijing-Tianjin area during autumn and winter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1982, **2**(4): 342-350.
- [11] 徐敬, 张小玲, 赵秀娟, 等. 夏季局地环流对北京下风向地区 O₃ 输送的影响[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(11): 1140-1146.
- Xu J, Zhang X L, Zhao X J, *et al.* Influence of summer local circulation on the transportation of ozone from urban to the downwind area in Beijing [J]. China Environmental Science, 2009, **29**(11): 1140-1146.
- [12] 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 173-184.
- Wang Y, Wang L L, Zhao G N, *et al.* Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM_{2.5} heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 173-184.
- [13] 北京市气象局气候资料室. 北京气候志 [M]. 北京: 北京出版社, 1987. 72-73.
- [14] 窦晶晶, 王迎春, 苗世光. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征 [J]. 应用气象学报, 2014, **25**(5): 559-569.
- Dou J J, Wang Y C, Miao S G. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, **25**(5): 559-569.
- [15] 董芬, 王喜全, 王自发, 等. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象 [J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(1): 63-70.
- Dong F, Wang X Q, Wang Z F, *et al.* A study of the north-south differences of the air quality in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2013, **18**(1): 63-70.
- [16] 董群, 赵普生, 王迎春, 等. 北京山谷风环流特征分析及其对 PM_{2.5} 浓度的影响 [J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2218-2230.
- Dong Q, Zhao P S, Wang Y C, *et al.* Impact of mountain-valley wind circulation on typical cases of air pollution in Beijing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2218-2230.
- [17] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418-427.
- Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 418-427.
- [18] 赵秀娟, 徐敬, 张自银, 等. 北京区域环境气象数值预报系统及 PM_{2.5} 预报检验 [J]. 应用气象学报, 2016, **27**(2): 160-172.
- Zhao X J, Xu J, Zhang Z Y, *et al.* Beijing regional environmental meteorology prediction system and its performance test of PM_{2.5} concentration [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, **27**(2): 160-172.
- [19] 蒋伊蓉, 朱蓉, 朱克云, 等. 京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究 [J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2681-2692.
- Jiang Y R, Zhu R, Zhu K Y, *et al.* Numerical simulation on the air pollution potential in the severe air pollution episodes in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2681-2692.
- [20] 刘慧, 饶晓琴, 张恒德, 等. 环境气象业务数值模式预报效果对比检验 [J]. 气象与环境学报, 2017, **33**(5): 17-24.
- Liu H, Rao X Q, Zhang H D, *et al.* Comparative verification and analysis of environmental meteorology operational numerical prediction models in China [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, **33**(5): 17-24.
- [21] 曹渐华, 刘熙明, 李国平, 等. 鄱阳湖地区湖陆风特征及成因分析 [J]. 高原气象, 2015, **34**(2): 426-435.
- Cao J H, Liu X M, Li G P, *et al.* Analysis of the phenomenon of lake-land breeze in Poyang Lake area [J]. Plateau Meteorology, 2015, **34**(2): 426-435.
- [22] 郑祚芳, 任国玉, 高华. 北京地区局地环流观测分析 [J]. 气象, 2018, **44**(3): 425-433.
- Zheng Z F, Ren G Y, Gao H. Analysis of the local circulation in Beijing area [J]. Meteorological Monthly, 2018, **44**(3): 425-433.
- [23] 陈佑淑, 蒋瑞宾. 气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 1989. 113-115.
- [24] 陈彬, 于洪恩. 渤海湾西部海陆风的天气气候特征 [J]. 海洋通报, 1989, **8**(1): 23-29.
- [25] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇 [J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1): 21-25, 33.
- Su F Q, Ren Z H, Gao Q X, *et al.* Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China; Transportation convergence in boundary layer [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, **17**(1): 21-25, 33.
- [26] 李炬, 曹晓彦, 程志刚, 等. 京津冀城市群地区夏季低层大气风速谱特征分析 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(5): 1553-1565.
- Li J, Cao X Y, Cheng Z G, *et al.* Analysis of spectral characteristics for wind velocity in the low layer of the atmosphere in the Beijing-Tianjin-Hebei city cluster area during summer [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, **59**(5): 1553-1565.
- [27] 张红杰, 马清云, 吴焕萍, 等. 气象降水分布图制作中的插值算法研究 [J]. 气象, 2009, **35**(11): 131-136.
- Zhang H J, Ma Q Y, Wu H P, *et al.* Research on the interpolation algorithm for meteorological precipitation choroplethic map [J]. Meteorological Monthly, 2009, **35**(11): 131-136.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)