

 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.3  
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估.....尹晓梅,李梓铭,熊亚军,乔林,邱雨露,孙兆彬,寇星霞(1011)

利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响.....李颖若,汪君霞,韩婷婷,王焱,何迪,权维俊,马志强(1024)

京津冀郊区站点秋冬季大气PM<sub>2.5</sub>来源解析.....王彤,华阳,许庆成,王书肖(1035)

四川省典型工业行业PM<sub>2.5</sub>成分谱分析.....冯小琼,陈军辉,熊文朋,梅林德,徐雪梅,尹寒梅,范武波,姜涛,钱骏,叶宏(1043)

典型物流城市2016年冬季2次污染过程PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析.....赵雪艳,杨文,王静,刘盈盈,白雯宇,徐艳萍,王歆华,白志鹏(1052)

沈阳市采暖期与非采暖期空气PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源分析.....张显,田莎莎,刘盈盈,赵雪艳,余浩,张辉,陈莉,王歆华(1062)

新乡冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析.....闫广轩,雷豪杰,张靖雯,唐明双,张佳羽,曹治国,李云蓓,王跃思,樊静,李虎(1071)

烟台市环境受体PM<sub>2.5</sub>四季污染特征与来源解析.....刘童,王晓军,陈倩,温杰,黄渤,朱红霞,田瑛泽,冯银厂(1082)

常州市冬季PM<sub>2.5</sub>中类腐殖质昼夜特征分析.....顾远,李清,黄雯倩,赵竹子,马帅帅,叶招莲(1091)

西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险.....曹红梅,赵留元,穆熙,李尧捷,毛潇萱,黄韬,马建民,高宏(1101)

京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析.....邱昀,李令军,姜磊,王新辉,赵文慧,张立坤,鹿海峰(1111)

中国城市O<sub>3</sub>浓度时空变化特征及驱动因素.....黄小刚,赵景波,曹军骥,宋永永(1120)

基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征.....张倩倩,张兴赢(1132)

舟山市臭氧污染分布特征及来源解析.....王俏丽,董敏丽,李素静,吴成志,王刚,陈必新,李伟,高翔,叶荣民(1143)

中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立.....高美平,邵霞,聂磊,王海林,安小栓(1152)

异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化.....黄亚娟,曹罡,朱荣淑,欧阳峰(1163)

兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征.....栗世学,郭文凯,何昕,朱玉凡,陈强(1172)

成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析.....胡月,刘国东,孟玉川,张文江,夏成城(1179)

基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO<sub>2</sub>扩散通量估算.....张逸飞,杨平,赵光辉,李玲,谭立山,全川(1188)

渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化.....刘兆冰,梁文健,秦礼萍,唐建辉(1198)

思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学.....劳心宇,原杰,刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)

厦门湾海滩微塑料污染特征.....刘启明,梁海涛,锡桂莉,胡欣,葛健(1217)

高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析.....王奇岗,肖琼,赵海娟,王健力,郭永丽,张清华(1222)

鲜水河断裂带拉花盆地地下水化学特征及控制因素.....何锦,张幼宽,赵雨晴,韩双宝,刘元晴,张涛(1236)

成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征.....吴迪,印红玲,李世平,王增武,邓旭,罗怡,罗林(1245)

丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUS1功能预测分析.....张菲,田伟,孙峰,陈彦,丁传雨,庞发虎,姚伦广,李玉英,陈兆进(1252)

蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响.....刘志迎,许海,詹旭,朱广伟,秦伯强,张运林(1261)

基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价.....苏瑛,许育新,安文浩,王云龙,何振超,楼颖雯,沈阿林(1270)

生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响.....黄磊,梁根坤,梁岩,罗星,陈玉成(1280)

城市不同材料屋面径流的污染负荷特性.....何湖滨,陈诚,林育青,严晗璐,董建玮,陈求稳(1287)

BiOCl-(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制.....张文海,吉庆华,兰华春,李静(1295)

微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除.....吴乃瑾,宋云,魏文侠,王海见,孙仲平(1302)

鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除.....邓曼君,王学江,成雪君,景焕平,赵建夫(1310)

Ca/Mg负载改性渣渣生物炭对水中磷的吸附特性.....易蔓,李婷婷,李海红,黄巧,杨金娥,陈玉成,杨志敏(1318)

两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素.....程扬,沈启斌,刘子丹,杨小莹,张太平,廖志钟(1328)

静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响.....俞阳,林建伟,詹艳慧,何思琪,吴小龙,王艳,赵钰颖,林莹,刘鹏茜(1337)

4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制.....王大鹏,张烟,颜昌宙(1347)

以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析.....徐婷,李勇,朱怡嘉,薛梦婷,汤同欢(1353)

进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响.....李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰(1360)

除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复.....李海玲,李冬,张杰,刘博(1367)

CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能.....马娟,杨蕊春,俞小军,周猛,陈永志(1375)

不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能.....袁梦飞,于德爽,巩秀珍,王晓霞,陈光辉,杜世明,甄建园(1382)

ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水.....李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)

室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性.....谢璐琳,王建芳,钱飞跃,张泽宇,沈耀良,齐泽坤(1396)

不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征.....任君怡,陈林艺,李慧春,秦玉洁,姜雁,王桐屿,周少奇(1405)

降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征.....付昆明,廖敏辉,周厚田,付巢,姜婍,仇付国,曹秀芳(1412)

IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析.....刘子奇,张岩,马翔山,张博康,曹孟京,陈昌明(1419)

温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响.....于雪,孙洪伟,李维维,祁国平,马娟,陈永志,吕心涛(1426)

零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化.....牛雨彤,刘吉宝,马爽,李亚明,解立平,魏源送,孟晓山(1431)

牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响.....彭磊,王科,谷月,王爱杰(1439)

环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响.....张彦军,郭胜利(1446)

三峡库区典型微生物土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的反应.....李一凡,王玉杰,王彬,王云琦(1457)

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响.....王甜,黄志霖,曾立雄,肖文发,宋文梅(1468)

长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征.....宁赵,程爱武,唐海明,葛体达,邓扬悟,苏以荣,陈香碧(1475)

不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征.....童瑶瑶,王季斐,祝贞科,邓扬悟,陈珊,葛体达,袁红朝,吴金水(1483)

桂林市仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征.....徐广平,李艳琼,沈育伊,张德楠,孙英杰,张中峰,周龙武,段春燕(1491)

缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征.....王富华,吕盛,黄容,高明,王子芳,徐畅(1504)

大气污染对居民健康影响研究进展.....秦耀辰,谢志祥,李阳(1512)

《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

# 京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析

邱昀, 李令军\*, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰

(北京市环境保护监测中心, 北京 100048)

**摘要:** 京津冀地区大气污染监管逐渐走向区域联防联控模式, 卫星遥感可实现大范围实时动态监测, 地基监测能够获取精细的网点信息. 结合卫星和地基数据, 可对区域污染的生消过程进行三维立体的跟踪. 本文通过综合分析卫星遥感数据、地面PM<sub>2.5</sub>浓度数据、激光雷达垂直污染监测数据以及气象数据, 分析了2018年3月8~10日京津冀区域污染的形成过程、传输路径、影响范围以及气象因子变化. 结果发现, 本次污染覆盖范围面积达20万km<sup>2</sup>左右, 区域内以四级中度污染为主, 区域间的污染传输过程非常典型. 3月8~9日北京-保定偏南风频率为50%左右, 冀南部分地区到达100%, 在持续偏南风作用下, 北京-保定一带空气质量由一级优迅速升至四级轻度污染, 气溶胶光学厚度高值区由京津冀南部的邯郸-邢台西部山前推至北部燕山前. 3月10日该区域转以弱偏北风为主, 湿度明显升高, 京津冀南部形成污染辐合, 污染重心南移至邯郸-邢台东部; 午后, 北京转偏东风, 空气质量由东向西递次转好. 从激光雷达垂直观测结果看, 重污染期间北京地区污染层主要出现在1000 m以下. 近地面800 m以下, 1200~1500 m多次出现双逆温层, 且逆温强度高达4~7℃, 非常不利于污染物垂直扩散. 由此可见, 在区域能源消耗和污染排放量依旧很大的背景下, 一旦气象条件转差, 很容易形成区域性重污染.

**关键词:** 气象特征; 区域传输; 卫星遥感; 联防联控; 京津冀

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1111-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201806177

## Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations

QIU Yun, LI Ling-jun\*, JIANG Lei, WANG Xin-hui, ZHAO Wen-hui, ZHANG Li-kun, LU Hai-feng

(Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The air pollution control of the Beijing-Tianjin-Hebei region (BTH region) is gradually moving toward regional joint mode. Remote sensing technology can be used to realize real-time dynamic monitoring over a wide range of space and ground-based monitoring can obtain accurate point information. Combining satellite with ground-based data, the formation and dissipation of pollution can be traced in three dimensions. For this paper, we analyzed the formation process, transmission path, coverage area, and the meteorological characteristics of the pollution process over the BTH region during March 8-10, 2018, using satellite remote sensing data, surface PM<sub>2.5</sub> concentration data, meteorological data, and lidar data. The results showed that an area of 200 000 km<sup>2</sup> was affected by this pollution process and that the grade of the pollution reached the fourth level (moderate pollution level). The regional transmission process was very typical in this process. During 8-9 March, the occurrence frequency of the southward wind was about 50% in the Beijing-Baoding region and 100% over the southern part of Hebei. With the help of continuous southward wind, the air quality of the Beijing-Baoding area rises from the first level to the fourth level. The high value area of aerosol optical thickness moved from the western part of the Handan-Xingtai region to the front of Yanshan Mountain. On 10 March, the weak north wind affected the region and the humidity increased obviously. A pollution convergence formed in the southern part of the BTH region. The center of pollution moved southward to the east part of the Handan-Xingtai Region. In the afternoon, with the help of the eastern wind, the air quality of Beijing got better from East to West. The vertical lidar observation results showed the pollution layer above Beijing was mainly below 1 000 m. There were two inversion layers below 800 m and 1 200-1 500 m, respectively. The inversion temperature was as high as 4-7℃, which is unfavorable for vertical diffusion of pollutants. Thus, under the high intensity of regional energy consumption and pollution emissions background, the regional heavy pollution form easily once the weather conditions are bad.

**Key words:** pollution meteorological characteristics; regional transmission; remote sensing; regional joint mode; BTH region

据统计<sup>[1-3]</sup>, 2014年我国人均能源消耗量为3121 kg标准煤, 为2000年的2.7倍, 其中工业消耗可占80%左右. 2014年废气中主要污染物排放情况统计显示, 我国烟(粉)尘排放量前三的省份皆在我国华北地区, 为河北、山西、山东, 分别占全国总排放量的10.3%、8.7%和6.9%. 随着社会经济快速发展, 能源大量消耗的区域也时常发生着大气重污染过程<sup>[4-6]</sup>. 且京津冀地区西、北方向受太行山、燕山山脉围档影响, 在高排放量的背景下, 天气条件一旦不利于污染物的扩散, 极易形成大气

污染物的积累<sup>[7]</sup>. 目前仅靠一城一地的努力很难彻底改观. 因此, 近年来京津冀大气污染治理逐渐走向区域联防联控模式<sup>[8]</sup>. 通过地面环境监测网点获取气象数据, 颗粒物的消光特性以及激光雷达数据分析大气重污染特征和形成机制的传统监测分析方

收稿日期: 2018-06-21; 修订日期: 2018-09-02

基金项目: 市委、市政府重点工作及县政府应急项目(Z161100001116013); 国家重点研发计划项目(2018YFC0706000, 2018YFC0706004)

作者简介: 邱昀(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星遥感在环境中的应用, E-mail: qiuyun1992@sina.com

\* 通信作者, E-mail: lilj2000@126.com

法<sup>[9-15]</sup>,已不能满足大范围空间连续的监测需求<sup>[16]</sup>.卫星遥感技术可以弥补空间覆盖不足的缺陷,上世纪末期基于 MODIS 等卫星数据的区域乃至全球大气气溶胶的遥感研究不断深入<sup>[17-19]</sup>,国内也有不少学者将气溶胶卫星遥感产品应用在大气污染监测研究中<sup>[20-22]</sup>.随着卫星数据的丰富与遥感技术的进步,卫星遥感在区域大气环境监测中的研究乃至业务应用越来越广泛,开始用于获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布情况和整层大气污染情况的评价<sup>[23-25]</sup>.本文将先进、科学的卫星遥感技术延伸到区域污染过程的动态监测中.结合卫星和地基监测数据对京津冀地区一次污染过程进行了三维立体的实时动态监测,弥补了传统监测方法空间连续性差的不足.从地、空、垂直这3个方向分析了2018年3月8~10日京津冀地区污染过程的生消过程、区域影响以及气象特征,以期为实现区域间大气污染联防联控治理提供了有利的技术支持.

## 1 材料与分析

### 1.1 遥感监测数据

本研究使用了 Himawari8 卫星 AHI 传感器数据和 NPP 卫星 VIIRS 传感器 550 nm 波段 750 m 分辨率 AOD(气溶胶光学厚度)实时动态追踪 2018 年 3 月 8~10 日京津冀地区的污染过程. AHI 时间分辨率可达 10 min,合成的真彩色遥感图空间分辨率可达 500 m,能够实时反映污染起源、形成过程、传输路径、影响范围. AOD 描述的是沿辐射传输路径,单位截面上气溶胶吸收和散射产生的总损失<sup>[26]</sup>,AOD 产品可定量反映气溶胶整层垂直污染

积累程度,是评价大气环境的重要指标,结合激光雷达数据可立体地、定量地反映污染层的空间分布情况.本文采用监测中心自行接收的 NPP VIIRS 卫星数据,使用官方成熟的暗像元法反演获得气溶胶光学厚度产品,这是目前应用较为广泛的方法.该方法通过归一化植被指数(NDVI)进行暗像元识别,再通过辐射传输计算构建查找表,利用 VIIRS 数据从查找表中插值得到 AOD<sup>[27]</sup>.Levy 等<sup>[28]</sup>曾从全球尺度上验证过该官方算法的准确性,国内也有学者<sup>[20]</sup>在北京及周边地区应用并验证过该方法的准确性.不少研究通过使用 AOD 空间分布信息对大气污染进行评估<sup>[29-33]</sup>.但在植被稀少的季节或地区,通常暗像元法反演 AOD 的结果并不理想<sup>[34]</sup>,并且云的存在也会影响反演的结果,因此本文结合了激光雷达数据来辅助评估整层大气污染情况.

### 1.2 地基观测与气象数据

为实现对污染过程天地同步监测,本研究使用地面 PM<sub>2.5</sub>浓度监测数据绘制时间序列曲线,并对实时气象数据(气压、风向、风速、湿度、温度)进行统计,分析了 3 月 8~10 日污染过程中地面 PM<sub>2.5</sub>浓度变化,探讨了气象条件对污染生消过程的影响. PM<sub>2.5</sub>浓度采用自动监测国控站点小时数据,监测方法采用微振荡天平法<sup>[35]</sup>.定陵站为北京地区的背景点,奥体中心站、万寿西宫站、顺义新城站、分别代表北京城区北部、南部以及东北部 PM<sub>2.5</sub>浓度变化情况.选取保定、石家庄、邢台邯郸城市站监测污染物在京津冀地区的传输过程,监测站点位置如图 1 所示.为研究污染在垂直方向上的特征,本研究使用来自于美国怀俄明大学网站垂直探测数据,数据来自 <http://weather.uwyo.edu/>

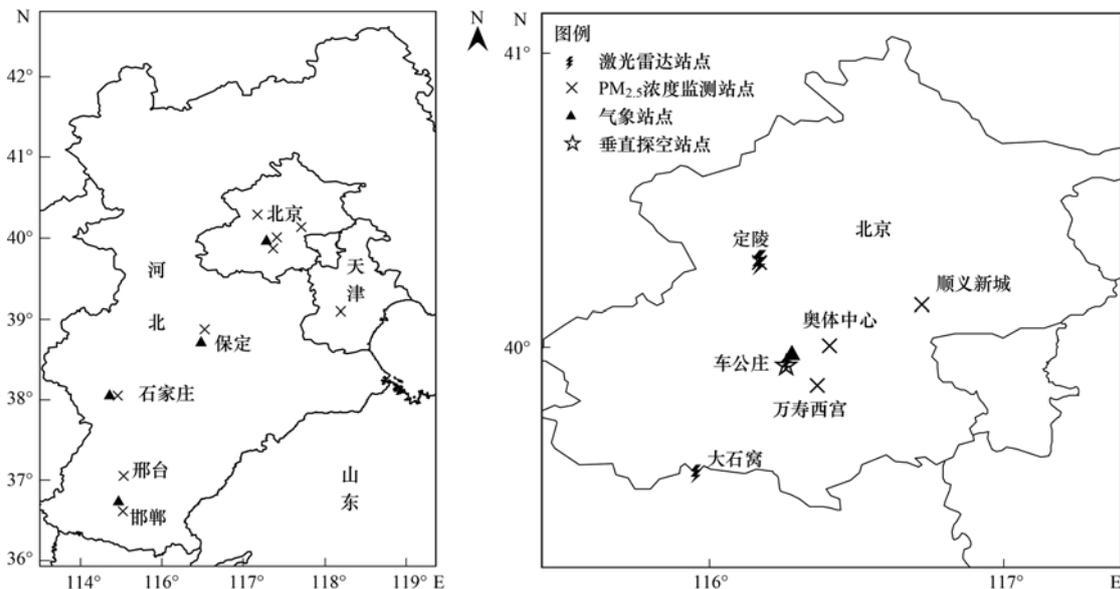


图 1 监测点位分布示意

Fig. 1 Monitoring point distribution map

upperair/sounding. html. 通过绘制不同高度大气温度变化曲线, 分析污染过程中垂直方向上的特点, 北京市的气象站点编码为 54511, 坐标为 116.28° E, 39.93° N. 此外, 还使用了微脉冲激光雷达数据监测垂直方向上气溶胶相关系数的变化情况, 大气气溶胶垂直探测数据来自于北京怡孚和融科技有限公司生产的 EV-LIDAR 微脉冲激光雷达. 分别使用了安装于定陵、车公庄站和大石窝的激光雷达的数据, 相关位置分布如图 1 所示. 本研究中探测工作使用波长为 532 nm, 空间垂直分辨率为 15 m, 单脉冲输出能量 10 μJ, 数据分析时采用观测的 10 min 平均数据, 激光雷达接受回波盲区

设定为 100 m, 100 m 以下的数据不进行分析. 石琳琳等<sup>[36]</sup> 据此分析过 2016 年北京市春节期间大气颗粒物污染特征.

## 2 结果与讨论

### 2.1 气象条件与地面形势概况

韩国天气网<sup>[37]</sup> 提供的天气形势实况图显示(图 2), 3 月 8 日京津冀高压逐渐减弱消退, 蒙古低压开始东移南伸. 3 月 9 日转受高压后部西南气流影响, 区域污染开始积累并出现输送迹象. 3 月 10 日华北中部形成低压辐合区, 扩散条件不利, 但午后东北高压南压、京津冀由北向南空气质量有所好转.

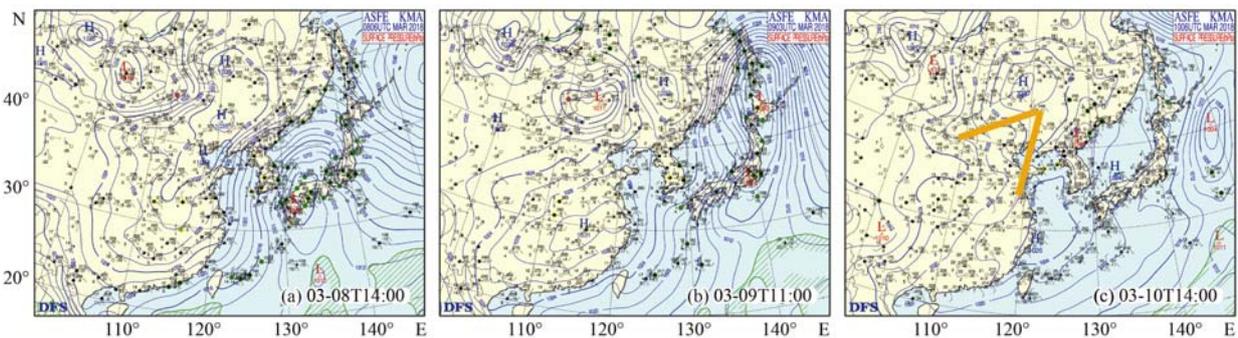
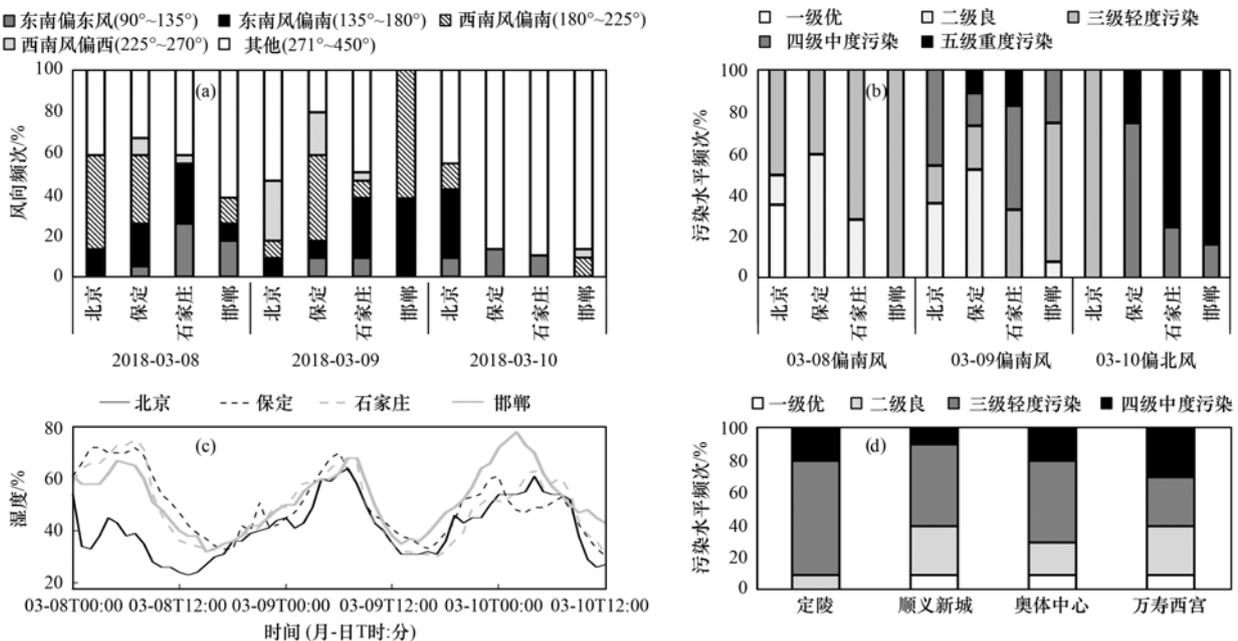


图 2 3 月 8 ~ 10 日地面气象形势

Fig. 2 Meteorology and ground observation map during 8-10 March, 2018

分别对北京、保定、石家庄和邯郸的风向进行统计发现[图 3(a)], 3 月 8 日京津冀地区偏南风频率在 50% 左右, 中午前后各地风向依次由北风转为南风. 在南风作用下, 区域整体以三级轻度污染水平为主, 其中石家庄, 邯郸达到轻度污染水平的时

刻分别占到 70% 和 100%. 3 月 9 日区域偏北风频率明显降低, 区域各污染水平时间上分布较为平均, 说明偏南风作用下污染水平在持续增长变化, 具体变化将通过地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间序列分析. 3 月 10 日京津冀地区北风频率高达 70% ~ 80%, 在偏



(a) 风向统计; (b) 区域主导风下污染水平统计; (c) 湿度统计; (d) 3 月 10 日北京偏北风作用下污染水平统计

图 3 3 月 8 ~ 10 日京津冀地区气象条件及污染水平统计

Fig. 3 Statistics of meteorological condition and pollution level over the BTH region

北风作用下, 区域南部的石家庄和邯郸达到五级重度污染水平的时刻占到 80% 左右. 且从 3 月 10 日凌晨起, 邯郸地区相对湿度逐渐升高至 80% [图 3 (c)], 明显高于其他城市, 非常有利于颗粒物的吸湿增长, 这也是 3 月 10 日区域南部明显变差的原因之一. 午后北京地区为东南风为主, 从各污染水平统计看, 各站点污染水平都有所下降, 其中西北定陵站污染水平下降较慢, 全天 70% 维持在三级轻度污染水平, 而其他站点都下降到一级优水平, 说明在东南风作用下, 污染有向山前压缩现象.

## 2.2 地面站点数据时间序列分析

本次污染的首要污染物为  $PM_{2.5}$ , 按照环境空气质量评价技术规范, 可将  $PM_{2.5}$  浓度划分为 6 个等级,  $0 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为一级优,  $36 \sim 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为二级良,  $76 \sim 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为三级轻度污染,  $116 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为四级中度污染,  $151 \sim 250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为五级重度污染, 大于  $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为严重污染. 区域上选取北京、保定、石家庄、邯郸和天津这 5 个站点, 北京

地区分别选取定陵、顺义新城、奥体中心和万寿西宫这 4 个站点绘制各站  $PM_{2.5}$  浓度时间序列, 分析各站点污染水平逐时的变化情况 (图 4), 从而分析京津冀地区污染的生消过程. 3 d 的  $PM_{2.5}$  样本中, 一级优水平有效样本 51 个, 二级良样本 75 个, 三级轻度 73 个, 四级中度 106 个, 五级重度 52 个.

3 月 8 日北京地区全天 46% 都是受  $180^\circ \sim 225^\circ$  方向风作用, 非常有利于南部区域污染物的向北传输, 簸箕状的地形也起到了汇聚作用. 9:00 起, 北京地区近地面转受南风控制, 平均风速为  $2.72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 地面  $PM_{2.5}$  浓度开始升高, 12:00 由一级优水平升至二级良, 17:00 继续升为三级轻度污染. 与此同时, 保定 12:00 起污染水平由三级降为二级, 并持续维持在二级良的水平. 从北京  $PM_{2.5}$  浓度时间变化曲线中可以看出 (图 4), 12:00 起京南万寿西宫站率先升高, 之后其他站依次升高. 由此可见, 受污染传输影响, 北京近地面污染呈现由西南至东北方向漫延趋势.

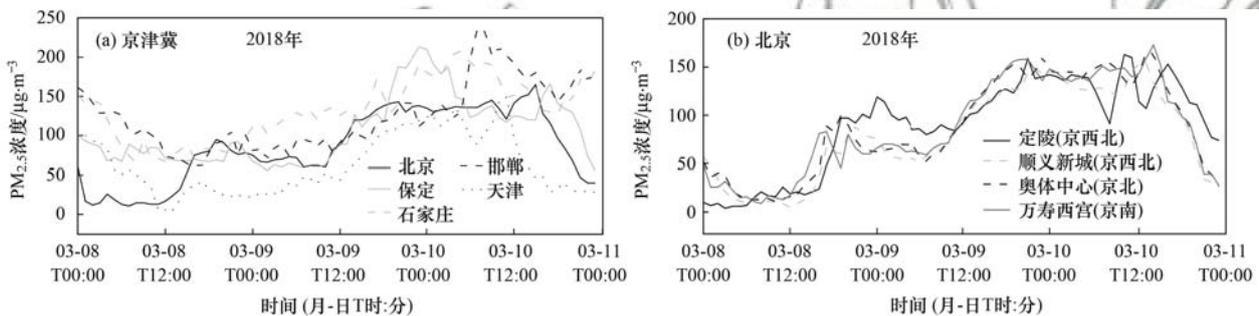


图 4 京津冀及北京地区  $PM_{2.5}$  浓度时间变化曲线

Fig. 4  $PM_{2.5}$  concentration time series of the BTH region and Beijing

3 月 9 日京津冀持续受偏南风影响. 邯郸地区全天受偏南风作用, 平均风速高达  $4.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 其下风向石家庄地区污染水平于凌晨 04:00 由三级升为四级, 平均  $PM_{2.5}$  浓度为  $132 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 逐步高于邯郸地区污染水平 (平均  $PM_{2.5}$  浓度为  $99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 石家庄 12:00 也开始出现转为偏南风作用, 午后保定、北京  $PM_{2.5}$  浓度先后迅速上升, 至 23:00 北京最高升至  $138 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (四级污染水平), 保定升至  $213 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (五级污染水平). 整体来看, 偏南风作用下, 区域污染重心持续向北移动.

3 月 10 日京津冀地区主导风向转为偏北风. 保定地区风速较高, 平均风速为  $3.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 04:00 保定空气质量由五级重度污染降至四级中度污染, 然而石家庄由于之前南来的污染还没有缓解, 偏北风又输送来新一轮的污染, 污染水平仍保持在五级重度污染, 小时  $PM_{2.5}$  浓度最高升至  $208 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 邯郸地区相对湿度较高加之偏北风作用, 06:00 起,

污染水平升高至五级并持续在重度污染水平. 北京地区的时间序列展现出污染逐步消散的过程, 08:00 定陵和顺义新城曾有短时好转, 但随后又有所转差, 整体空气质量的好转是在 12:00 东北高压南压后, 东北部顺义新城站  $PM_{2.5}$  浓度首先下降, 奥体中心、万寿西宫站也从五级重度污染先后降至一级, 西北定陵站污染缓解较为缓慢, 呈现污染向山前的倒灌之势.

## 2.3 卫星数据分析

由于  $PM_{2.5}$  监测子站空间上的离散性, 代表性受到一定限制, 因此本研究同时利用遥感数据分析污染在空间上的连续变化. 10min 分辨率的 AHI 真彩图展现了污染在空间上动态的生消过程, 气溶胶光学厚度遥感图展现了整层大气空间上污染程度的分布特征.

结果显示, 3 月 8 日白天, 冀中南豫北污染相对突出, 沿太行山前邯郸-保定一线大气透明度较低, 形成明显污染辐合带 [图 5(a)], 带内气溶胶

光学厚度值偏高. 08:00 保定转偏南风, 污染带有向北扩展趋势, 但由于风速较低( $1.76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 污染气团移动较为缓慢; 11:00 起冀南各地风向依次转为偏南风, 且风速增强到  $3.2 \sim 3.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 污染传输作用明显加强, 午后污染带延伸至北京南部边界. 12:00 气溶胶光学厚度遥感图显示, 冀南邯郸至京南出现污染带, 带内 AOD 为 0.9 左右[图 5(b)], 其中邯郸附近部分地区污染较为严重, AOD

超过 1.1.

3月9日, 华北平原区污染进一步加重扩张, 太行山-燕山山前形成宽约 200 ~ 300 km, 长约 800 km 的污染带, 由豫北延伸至冀北[图 5(d)], 京津冀大部污染超标. 平原区持续偏南风, 南部平均风速高达  $4.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 在此形势下燕山山前污染汇聚加重, 气溶胶光学厚度增至大于 1.1[图 5(e)], 区域南部污染下降并不显著, 污染重心北移.

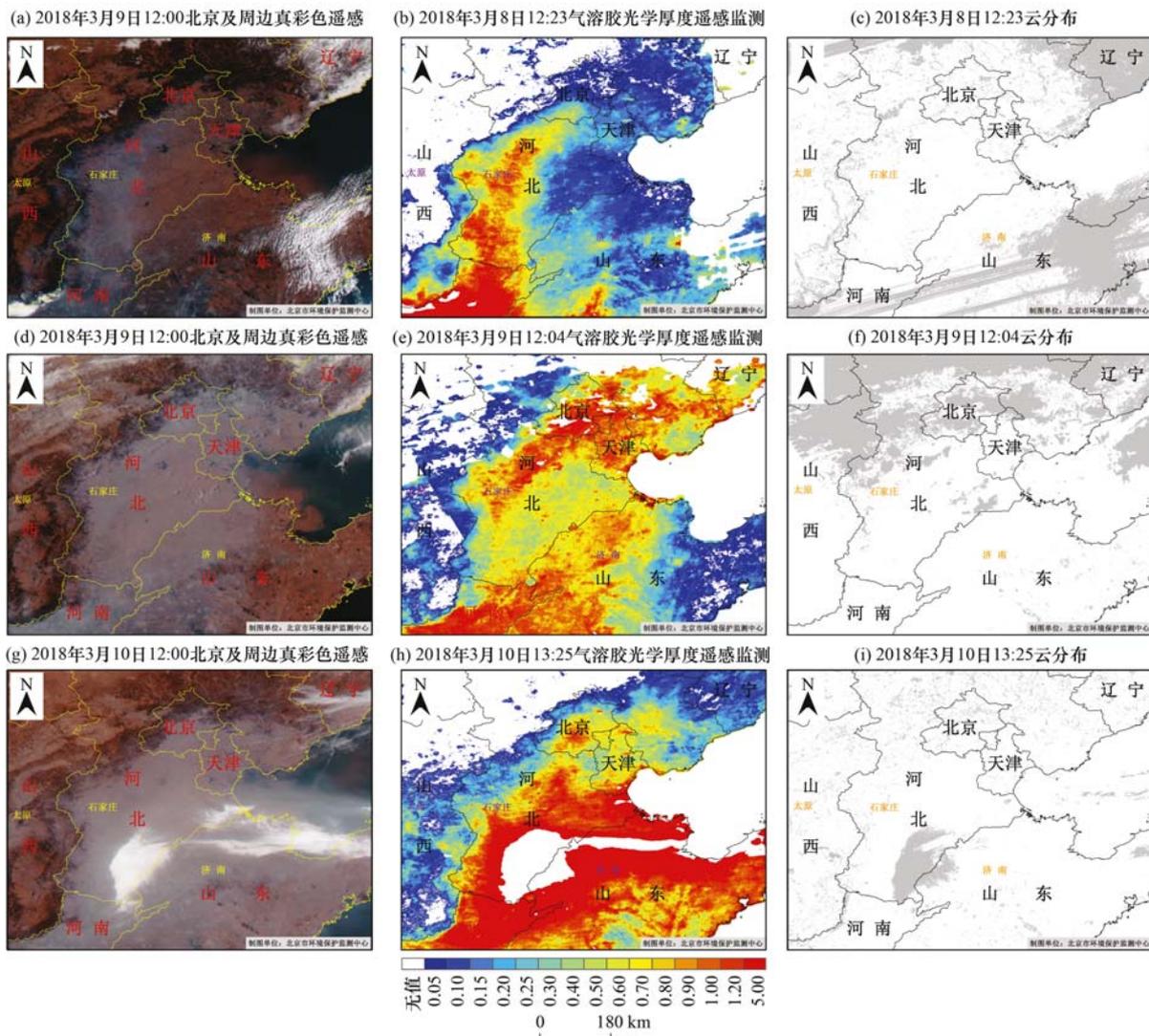


图 5 北方地区遥感影像

Fig. 5 Remote sensing map of the northern part of China

3月10日08:00 冀南鲁西出现一条高湿污染辐合带[图 5(f)], 辐合中心相对湿度增至 100%. 由于相对湿度的增加会促进颗粒物表面二次无机组分(如硫酸盐、硝酸盐和铵盐)的积累<sup>[38,39]</sup>, 从而导致颗粒物浓度的升高, 因此辐合带内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度也随之增至  $140 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右. 冀南鲁西再一次成为区域污染中心[图 5(g)]. 与此同时, 00:00 起京津冀北部开始受高压控制, 地面转为偏东风作用, 水平扩散条件好转. 04:00 起, 保定空气质量

量开始改善; 13:00 起, 京津两地空气质量由东向西依次改善. 遥感结果与地面数据呈现的趋势较为一致, 对比云识别中间产品发现[图 5(c)、5(f)、5(i)], 有薄云存在时, 云及其附近气溶胶光学厚度值会有些高估, 主要因为云是大气中水蒸气液化而形成, 本身具有一定的光学厚度. 因此在利用卫星遥感数据分析被云覆盖区域的空气质量时, 应结合地面监测数据和地基雷达数据综合分析.

## 2.4 垂直方向分析

为实时监测北京垂直方向上污染传输的过程, 本文通过激光雷达数据分析气溶胶高值区垂直方向各个高度的污染分布及传输情况. 通过垂直探空数据分析了污染形成时垂直方向上的气象特征. 结果显示(图6), 3月8日上午北京上空整层大气较为通透; 午后, 北京西南方向大石窝站1 200 m出现外来污染传输, 1 000 m以下形成污染层, 其中600~800 m高度消光系数较高达到 $1.0 \text{ km}^{-1}$ 左右. 14:00起车公庄、定陵, 近地面也出现污染层, 1 200 m和1 500 m高度处都出现了污染传输, 污染呈现由南向北大幅升高现象. 3月9日00:00北京上空800 m以下以及1 200~1 500 m处分别出现逆温层(图7), 导致两个逆温层间出现消光系数较高的污染带; 12:00起, 800 m以下逆温层有所缓解, 污染带出现明显向下扩散趋势, 但车公庄和大石窝站500 m和700 m高度仍存在外来污染传输, 垂直扩散并没有使污染有所缓解, 并且

1 000~1 500 m处仍存在逆温层(图7), 且逆温层强度大, 1 500 m处比1 000 m高度处高出 $4.4^\circ\text{C}$ , 这种强逆温较难破坏, 污染物很难扩散到逆温层外, 造成污染物的快速积累, 因此北京1 000 m以下空气质量持续较差. 3月10日凌晨, 1 000 m左右的逆温层消失, 高层污染物得到扩散, 但500 m以下仍存在贴地逆温层, 逆温强度高达 $7^\circ\text{C}$ (图7), 近地面污染难以在垂直方向上扩散. 08:00~09:00在北风作用下, 北京由北向南空气质量有短暂的改善; 中午前后, 1 000~1 500 m高空再次形成逆温层, 并在偏南气流与东北气流辐合作用下, 北京空气质量再次变差, 在300~1 500 m处形成高污染层; 夜间, 偏东风再次加强, 垂直扩散条件转好, 污染层抬升, 近地面空气质量得到缓解. 激光雷达的结果与地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间序列和遥感结果相一致, 分析结果说明区域间的污染传输和逆温层形成导致的垂直扩散条件变差是形成此次区域污染的主要原因.

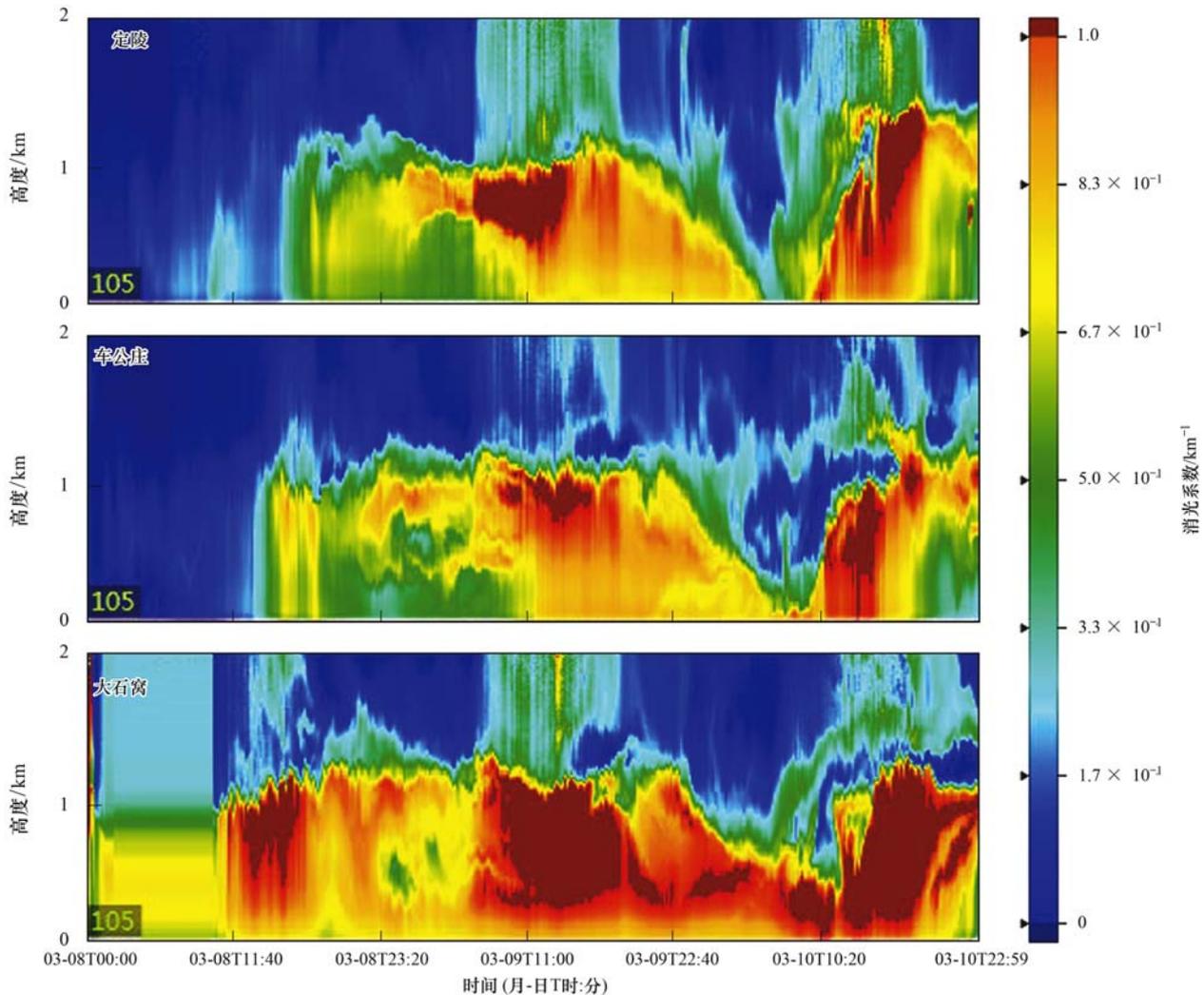


图6 3月8~10日北京地区激光雷达消光系数

Fig. 6 Lidar extinction coefficient over Beijing area during 8-10 March

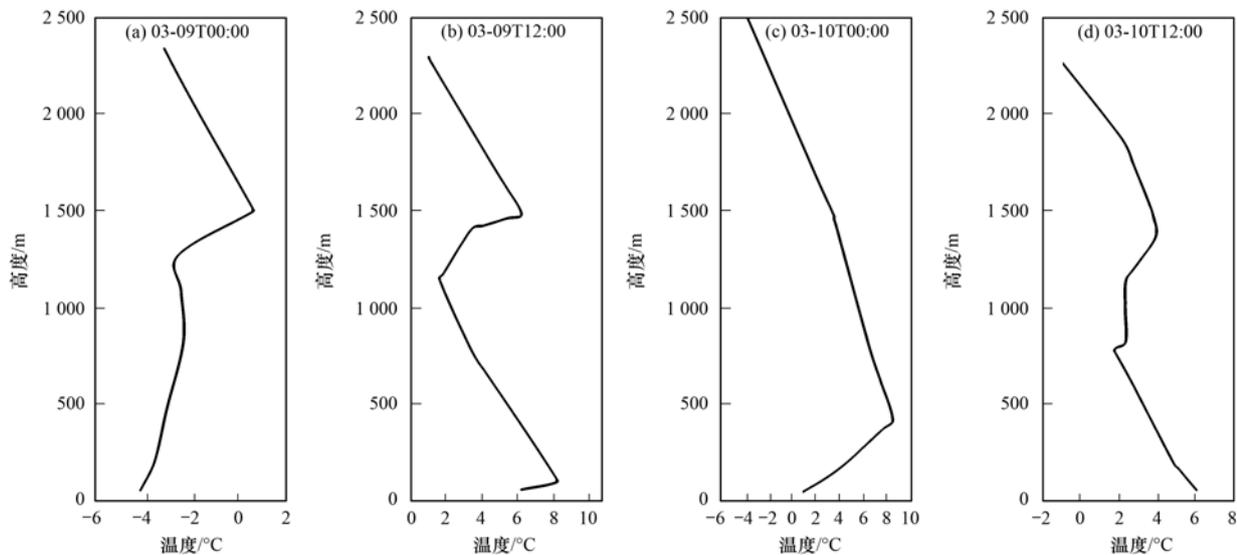


图7 3月9~10日北京地区不同高度处温度变化

Fig. 7 Temperature variation at different height over Beijing during 9-10 March

### 3 结论

(1) 地基监测数据能够获取精细的网点信息, 遥感数据可实现大范围的实时动态监测. 结合两者可从天、地、垂直方向立体地分析3月8~10日污染的动态生消过程, 区域传输情况和影像范围, 为实现京津冀地区大气污染区域联防联控监管模式提供了技术支撑.

(2) 结果发现此次污染过程区域积累和传输较为典型, 3月8~9日冀南气溶胶光学厚度高值污染带范围逐渐向北延伸扩大, 污染重心逐步从冀南移至燕山前, 北京-保定一带空气质量由一级优迅速升至四级轻度污染, 3月10日京津冀南部形成污染辐合, 污染重心南移至邯郸-邢台东部, 京津冀北部则是污染的逐步消散过程.

(3) 污染期间京津冀地区气象条件整体不利, 3月8~9日区域以偏南风为主, 北京-保定偏南风发生频率到达50%左右, 冀南部分地区到达100%, 非常有利于污染的向北传输. 3月10日冀南湿度增至接近100%易于颗粒物的吸湿增长, 导致区域南部污染水平的升高. 同时, 垂直方向上的扩散条件也非常不利, 近地面800 m以下, 1200~1500 m多次出现双逆温层, 且逆温强度在4~7°C, 由于逆温层的出现污染物在垂直方向上无法扩散, 导致区域出现持续的污染情况.

(4) 本次污染过程影响范围广, 影响面积达20万 km<sup>2</sup>左右, 污染气团在京津冀地区来回移动并加强, 影响地区污染程度最高至五级重度污染水平. 当前, 京津冀地区污染物排放水平总量仍然高于大气的环境容量, 在不利气象条件下, 很容易形成区

域型重污染天气, 应继续加强区域间的联防联控工作.

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.  
Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2015 [M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2015.
- [2] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.  
National Bureau of Statistics, Ministry of Environmental Protection. China statistical yearbook on environment 2013 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [3] 河北省人民政府. 河北经济年鉴2012[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.  
Hebei People's Government. Hebei economic yearbook 2012 [M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2012.
- [4] 高健, 王淑兰, 柴发合. 我国大气灰霾污染特征及污染控制建议——以2013年1月大气灰霾污染过程为例[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(4): 14-16.  
Gao J, Wang S L, Chai F H. Study on the pollution characteristic and the control suggestions about atmospheric haze in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2013, 38(4): 14-16.
- [5] 刘庆阳, 刘艳菊, 杨峥, 等. 北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 12-18.  
Liu Q Y, Liu Y J, Yang Z, et al. Daily variations of chemical properties in airborne particulate matter during a high pollution winter episode in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(1): 12-18.
- [6] 高愈霄, 霍晓芹, 闫慧, 等. 京津冀区域大气重污染过程特征初步分析[J]. 中国环境监测, 2016, 32(6): 26-35.  
Gao Y X, Huo X Q, Yan H, et al. Preliminary analysis on the characteristics of heavy air pollution events in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(6): 26-35.
- [7] 阎育梅. 京津冀及周边地区大气污染防治协作机制建设[J]. 中国机构改革与管理, 2018, (1): 51-53.

- [ 8 ] Li W J, Zhang D Z, Shao L Y, *et al.* Individual particle analysis of aerosols collected under haze and non-haze conditions at a high-elevation mountain site in the North China plain [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** ( 22 ): 11733-11744.
- [ 9 ] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013 ~ 2014 年北京大气重污染特征研究 [ J ]. *中国环境科学*, 2016, **36** ( 1 ): 27-35.  
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013 ~ 2014 [ J ]. *China Environmental Science*, 2016, **36** ( 1 ): 27-35.
- [ 10 ] 李令军, 王英, 李金香, 等. 2000 ~ 2010 年北京大气重污染研究 [ J ]. *中国环境科学*, 2012, **32** ( 1 ): 23-30.  
Li L J, Wang Y, Li J X, *et al.* The analysis of heavy air pollution in Beijing during 2000 ~ 2010 [ J ]. *China Environmental Science*, 2012, **32** ( 1 ): 23-30.
- [ 11 ] 孙峰, 张大伟, 孙瑞雯, 等. 北京地区冬季典型 PM<sub>2.5</sub> 重污染案例分析 [ J ]. *中国环境监测*, 2014, **30** ( 6 ): 1-12.  
Sun F, Zhang D W, Sun R W, *et al.* Typical heavy pollution episode analysis on PM<sub>2.5</sub> in winter of Beijing [ J ]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30** ( 6 ): 1-12.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 李令军, 王英, 李金香, 等. 北京市冬春季大气颗粒物的粒径分布及消光作用 [ J ]. *环境科学研究*, 2008, **21** ( 2 ): 90-94.  
Li L J, Wang Y, Li J X, *et al.* The characteristic of atmospheric particle size distribution and their light extinction effect in Beijing during winter and spring time [ J ]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21** ( 2 ): 90-94.
- [ 14 ] 毛节泰, 王强, 赵柏林. 大气透明度光谱和浑浊度的观测 [ J ]. *气象学报*, 1983, **41** ( 3 ): 322-332.  
Mao J T, Wang Q, Zhao B L. The observation of the atmospheric transparency spectrum and the turbidity [ J ]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1983, **41** ( 3 ): 322-332.
- [ 15 ] 韩永清, 孙兴池, 李静, 等. 雾霾天气个例气象条件对比分析 [ J ]. *气象科技*, 2017, **45** ( 1 ): 172-178.  
Han Y Q, Sun X C, Li J, *et al.* Comparative analysis of meteorological conditions for fog and haze cases [ J ]. *Meteorological Science and Technology*, 2017, **45** ( 1 ): 172-178.
- [ 16 ] 谭衢霖, 邵芸. 遥感技术在环境污染监测中的应用 [ J ]. *遥感技术与应用*, 2000, **15** ( 4 ): 246-251.  
Tan Q L, Shao Y. Application of remote sensing technology to environmental pollution monitoring [ J ]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2000, **15** ( 4 ): 246-251.
- [ 17 ] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, *et al.* Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer ( MODIS ) [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30** ( 1 ): 2-27.
- [ 18 ] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, *et al.* The MODIS 2.1  $\mu\text{m}$  channel—correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35** ( 5 ): 1286-1298.
- [ 19 ] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, *et al.* Passive remote sensing of tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102** ( D14 ): 16815-16830.
- [ 20 ] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用 [ J ]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2005, **35** ( S1 ): 177-186.  
Li C C, Mao J T, Liu Q H, *et al.* Application of MODIS satellite products to the air pollution research in Beijing [ J ]. *Science in China ( Ser. D: Terrae )*, 2005, **48** ( S2 ): 209-219.
- [ 21 ] 汤玉明, 邓孺孺, 刘永明, 等. 大气气溶胶遥感反演研究综述 [ J ]. *遥感技术与应用*, 2018, **33** ( 1 ): 25-34.  
Tang Y M, Deng R R, Liu Y M, *et al.* Research review of remote sensing for atmospheric aerosol retrieval [ J ]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, **33** ( 1 ): 25-34.
- [ 22 ] 王新辉, 苏林, 陶明辉, 等. 基于星地同步观测的华北平原中部背景地区冬季霾污染过程 [ J ]. *中国环境科学*, 2016, **36** ( 6 ): 1610-1620.  
Wang X H, Su L, Tao M H, *et al.* A study of winter haze pollution over a rural area of central Northern China Plain based on satellite and surface observations [ J ]. *China Environmental Science*, 2016, **36** ( 6 ): 1610-1620.
- [ 23 ] 陈焯鑫, 朱彬, 尹聪, 等. 基于卫星遥感和地面观测资料分析苏皖两省一次空气污染过程 [ J ]. *中国环境科学*, 2014, **34** ( 4 ): 827-836.  
Chen Y X, Zhu B, Yin C, *et al.* A continuous air pollution event in Jiangsu and Anhui provinces based on satellite remote sensing and field observations [ J ]. *China Environmental Science*, 2014, **34** ( 4 ): 827-836.
- [ 24 ] 李倩, 李令军, 张大伟, 等. 北京大气 PM<sub>2.5</sub> 遥感监测业务化方法探讨 [ J ]. *环境科学研究*, 2016, **29** ( 10 ): 1417-1425.  
Li Q, Li L J, Zhang D W, *et al.* Routine operational algorithm for remote sensing of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Beijing [ J ]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29** ( 10 ): 1417-1425.
- [ 25 ] 李倩, 李成才, 王焯芳, 等. 利用激光雷达和卫星遥感获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布 [ J ]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2013, **49** ( 4 ): 673-682.  
Li Q, Li C C, Wang Y F, *et al.* Retrieval on mass concentration of urban surface suspended particulate matter with LIDAR and satellite remotesensing [ J ]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, **49** ( 4 ): 673-682.
- [ 26 ] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学* [ M ]. ( 第二版 ). 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [ 27 ] 苏城林, 苏林, 陈良富, 等. NPP VIIRS 数据反演气溶胶光学厚度 [ J ]. *遥感学报*, 2015, **19** ( 6 ): 977-982.  
Su C L, Su L, Chen L F, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth using NPP VIIRS data [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, **19** ( 6 ): 977-982.
- [ 28 ] Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, *et al.* Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** ( 21 ): 10399-10420.
- [ 29 ] Tao M H, Chen L F, Wang Z F, *et al.* A study of urban pollution and haze clouds over northern China during the dusty season based on satellite and surface observations [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2014, **82**: 183-192.
- [ 30 ] 张世乔, 江洪, 王祎鑫, 等. 京津唐地区 PM<sub>2.5</sub> 遥感估算与区域传输 [ J ]. *遥感信息*, 2017, **32** ( 4 ): 11-23.  
Zhang S Q, Jiang H, Wang Y X, *et al.* Ground-level PM<sub>2.5</sub> estimation and regional transport in Beijing-Tianjin-Tangshan region using satellite remote sensing technique [ J ]. *Remote Sensing Information*, 2017, **32** ( 4 ): 11-23.
- [ 31 ] 张璐. 基于国产遥感卫星数据的北京市气溶胶光学厚度反演

- 研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- Zhang L. Retrieval of aerosol optical depth using domestic remote sensing data over Beijing [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.
- [32] 亢红霞, 那晓东, 臧淑英. 基于卫星遥感数据(AOD)估算 $PM_{2.5}$ 的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(2): 30-34.
- Kang H X, Na X D, Zang S Y. Advance in ground-level  $PM_{2.5}$  prediction using remote sensing data(AOD) [J]. Environmental Science and Management, 2016, **41**(2): 30-34.
- [33] 刘安伟. 基于高光谱遥感影像的AOD反演[J]. 矿山测量, 2017, **45**(4): 38-43.
- Liu A W. AOD inversion based on hyperspectral remote sensing image [J]. Mine Surveying, 2017, **45**(4): 38-43.
- [34] 曾令建. 基于HJ-1卫星的气溶胶光学厚度反演[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- Zeng L J. Retrieval of aerosol optical depth based on HJ-1 satellite [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.
- [35] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 2014年春节期间北京市空气质量分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 371-378.
- Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Analysis of air quality in Beijing city during Spring Festival period of 2014 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(2): 371-378.
- [36] 石琳琳, 李令军, 李倩, 等. 2016年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4092-4099.
- Shi L L, Li L J, Li Q, *et al.* Analysis of atmospheric particulate matter pollution characteristics by LIDAR in Beijing during Spring Festival, 2016 [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4092-4099.
- [37] 韩国气象局. 天气图[DB/OL]. <http://web.kma.go.kr/chn/weather/images/analysischart.jsp>, 2018-03-08.
- [38] 刘凡, 谭钦文, 江霞, 等. 成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1466-1472.
- Liu F, Tan Q W, Jiang X, *et al.* Effect of relative humidity on particulate matter concentration and visibility during winter in Chengdu [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1466-1472.
- [39] Quan J N, Liu Q, Li X, *et al.* Effect of heterogeneous aqueous reactions on the secondary formation of inorganic aerosols during haze events [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 306-312.



## CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-roo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ling, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Xixiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM <sub>2.5</sub> During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO <sub>2</sub> Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)