

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

Pantoea sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响

闫威卓, 王步英, Oscar Fajardo Montana, 蒋靖坤*, 郝吉明

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 生物气溶胶对大气成云过程、生态系统演化和人体健康都有着重要的影响, 目前对生物气溶胶浓度、组成和活性的变化规律认识不足. 因此, 在 2013 年 1 月和 2015 年 1 月在北京市清华大学校园内进行了采样和观测, 以分析气象条件对生物气溶胶浓度和组成的影响. 生物气溶胶浓度用生物气溶胶在线检测器 WIBS-4A (waveband integrated bioaerosol sensor) 测定, 生物气溶胶中细菌群落的组成用 16S rDNA 测序的方法来测定. 结果表明, 北京冬季生物气溶胶数浓度范围在 $2 \sim 150 \text{ L}^{-1}$. 风是影响生物气溶胶的浓度和组成的重要因素. 主导风向为北偏西 30° , 风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风天气时, 生物气溶胶的数浓度升高 1 个数量级, 生物气溶胶中细菌群落的组成也发生急剧的变化. 大风天气过后, 生物气溶胶中细菌群落的组成缓慢恢复到大风前的状态.

关键词: 生物气溶胶; 冬季; 北半球西风带; 生物气溶胶在线检测器 (WIBS-4A); 16S rDNA 测序

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2017)09-3561-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201701110

Impact of Gusty Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing

YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, JIANG Jing-kun*, HAO Ji-ming

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Biological aerosol particles play a crucial role in cloud formation and succession of ecosystems and have a large impact on human health. However, the variations in the concentration, composition, and viability of biological particles remain unclear. This study, conducted in January 2013 and January 2015 in Beijing, explores the influence of meteorological conditions on the variations in the concentration and composition of biological particles. Concentrations of biological particles were measured by an online optical detector, waveband integrated bioaerosol sensor (WIBS-4A). The composition of bacterial communities within biological particles was measured by 16S rDNA sequencing. The results showed that the number concentration of biological particles ranged from 2 L^{-1} to 150 L^{-1} during winter. The wind could largely influence the concentration and composition of biological particles. During gusty northwesterly winds, when wind speed was above $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and wind direction was from the northwest ($\sim 30^\circ$), the concentration increased by one order of magnitude, and the composition of bacterial communities sharply changed. After the passage of gusty winds, the composition gradually changed back to its prior state.

Key words: biological aerosol particles; winter; northern hemisphere westerly wind; waveband integrated bioaerosol sensor (WIBS-4A); 16S rDNA sequencing

生物气溶胶是空气中含有生物组分的颗粒物. 生物组分包括病毒、细菌、古菌和真菌等生物体, 也包括花粉、动植物的碎片等^[1-3]. 其粒径范围是 $10 \text{ nm} \sim 100 \mu\text{m}$ ^[1, 3], 其数浓度约为 $10^1 \sim 10^3 \text{ L}^{-1}$ ^[4-9]. 生物气溶胶来源于陆地或水体的生态系统^[10-15]. 大气对微生物而言是较为恶劣的环境, 因为微生物难以获得水和养分, 且大气中有较强的紫外线^[10, 16]. 某些生物气溶胶可以作为病原体或过敏原, 对人体和其它生物的健康造成威胁^[17-21]. 生物气溶胶可作为云凝结核和冰核, 在成云和降水过程中起着重要作用, 从而影响水循环和气候^[22-28]. 因此, 对生物气溶胶的研究有重要的意义. 然而, 生物气溶胶的浓度、组成等性质, 其成云、传输、代谢等活动, 及气象条件等因素对其影响, 都没有得到充

分地研究.

生物气溶胶可以随气团的移动在全球范围传输. 之前有研究表明, 生物气溶胶可以从非洲传输至美洲^[29-31]. 亚洲的生物气溶胶可以传输至太平洋、美洲, 甚至可以环球传输^[32-34]. 之前日本的研究表明, 生物气溶胶会因盛行西北风的作用, 从亚洲内陆传输至日本, 并导致日本生物气溶胶浓度急剧升高^[35, 36]. 同样位于北半球中纬度西风带的北京, 可能也会受到盛行西北风及传输作用的影响.

收稿日期: 2017-01-13; **修订日期:** 2017-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2013CB228505); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0200102)

作者简介: 闫威卓 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气生物气溶胶, E-mail: 1121231022@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

生物气溶胶浓度的检测方法包括离线和在线技术。离线技术包括光学显微镜、电子显微镜、流式细胞仪、定量 PCR 技术等^[37-39]。离线技术的缺陷在于时间分辨率低,分析过程耗时较长。在线检测技术包括质谱和光学检测系统。质谱方法既可准确识别生物气溶胶,又有高时间分辨率,但是成本较高,运行维护较为繁琐^[40]。光学的方法成本较低,时间分辨率较高。其原理是,某些生物分子,如色氨酸、NADH 等,会被紫外光激发而发射荧光,可通过荧光强度判别生物气溶胶^[41-46]。2 种典型仪器是 Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer (UVAPS; TSI, 美国明尼苏达州)和 Waveband Integrated Bioaerosol Sensor (WIBS; DMT, 美国科罗拉多州)。但是,黑炭、二次有机气溶胶(SOA)等颗粒物也会产生荧光,会对生物气溶胶的检测造成干扰^[47-49]。本研究使用 WIBS-4A 检测生物气溶胶的浓度。

基因检测多被用于分析生物气溶胶的组成,包括基因测序和基因芯片等^[10, 14, 16, 50]。其中,16S rDNA 测序的方法较为常用。16S rDNA 基因是核糖体 rRNA 的模板,其分为非可变区和可变区。每种微生物的非可变区不是特异的,可变区是特异的。通过对可变区测序,可识别微生物种类。本研究采用 16S rDNA 测序的方法,检测生物气溶胶中细菌群落的组成。

温度、湿度、风速、风向、颗粒物浓度等气象因素对生物气溶胶的影响至今没有定论。以往的对“风”这一因素的研究,也没有系统的分析风对某地区生物气溶胶浓度及组成的影响。因此,本研究的目的在于,观测“风”对北京冬季生物气溶胶浓度和组成的影响,填补生物气溶胶研究中的不足之处,也提供了关于北京生物气溶胶浓度及组成的资料。

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

用于生物气溶胶组成分析的样品的采集时间为 2013 年 1 月 8 ~ 15 日,及 2015 年 1 月 22 ~ 31 日。生物气溶胶浓度的观测时间为 2014 年 12 月 29 日 ~ 2015 年 1 月 15 日。采样点经纬度分别为 116.33° E 和 40.00° N,海拔 50 m。采样仪器架设在 8 m 高的楼顶上。采样期间,日出和日落时间(取每年 1 月 15 日)为 07:35 和 17:14 (UTC + 8)。温度为 -15 ~ 15℃。平均相对湿度为 42%。采样点位于北半球中纬度西风带,采样期间盛行西北风。

1.2 石英膜样品的采集

用 10 inch × 8 inch 的石英滤膜进行采样。采样前,将滤膜用马弗炉 550℃ 烘烤 5 h。镊子、刀等器具用高压蒸汽 120℃ 灭菌 20 min。实验在超净台进行。用大流量 PM₁₀ 采样器 (RFPS-1287-063, 赛默飞世科技公司, 美国) 进行采样,其流量为 1.13 m³·min⁻¹。采样器的切割头和膜托用 75% 酒精消毒。采样时间为 10:00 ~ 次日 09:00, 时长 23 h。样品放置在 -80℃ 冰箱存储。

1.3 DNA 的提取,目的基因的扩增及 MiSeq 测序

取 1/4 的滤膜,用刀刮下滤膜表层。将刮下的碎屑用 MO-BIO PowerSoil DNA Isolation Kit 试剂盒 (卡尔斯巴德, 美国加利福尼亚州) 提取 DNA。得到的 DNA 用 Qubit 检测其浓度,后存储于 -20℃ 冰箱中。

对提取得到的 DNA 进行 16S rDNA V3 区的扩增。上下游引物分别为 16S V3_F *aatgatacggcgaccacgagatctacactcttccctacacgacgctctccgatctNNNNCCTACGGGAGGCAGCAG*, 16S V3_1R *caagcagaagacggcatacagatCGTGATgtgactggagttcagacgtgtgctctccgatctATTACCGCGCTGCTGG*。引物两端加上了适用于 Illumina 测序平台的序列。PCR 反应体系为 25.0 μL。10 μmol·L⁻¹ 的上下游引物各 1.5 μL, *Taq* 酶 (Q5 Master Mix) 12.5 μL, DNA 模板和 ddH₂O 共 9.5 μL。PCR 反应过程为,98℃ 预变性 30 s, 98℃ 变性 10 s, 50℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s, 扩增 25 个循环, 72℃ 延伸 7 min。PCR 产物的分子量通过 1.5% 的琼脂糖凝胶电泳检测。

将 PCR 产物用磁珠纯化,用 2100 Bioanalyzer (安捷伦) 检测目的片段——16S V3 区序列。用 Illumina 的 MiSeq 测序平台对目的片段进行高通量测序。将得到的序列信息去接头,去污染,去低质量,对应到各样品。将各样品的基因序列上传至 MG-RAST 服务器,对比到 Greengenes 数据库,条件为 Max. e-value Cutoff = 10⁵, Min. % Identity Cutoff = 99%, Min. Alignmnet Length Cutoff = 32, 得到每个样品的细菌群落组成,数据精确到属水平。

1.4 生物气溶胶在线检测器 WIBS-4A 的原理及使用

生物气溶胶在线检测器 (waveband integrated bioaerosol sensor, WIBS-4A) 的总流量为 2.5 L·min⁻¹, 其中 0.3 L·min⁻¹ 为样品流量, 2.2 L·min⁻¹ 为鞘气流量。鞘气用 HEPA 过滤,再通入光学室中,使样品中的颗粒物单个通过检测区域。

WIBS 的光学元件包括,1 个持续发出波长为

635 nm 的激光的二极管, 2 个分别发射出波长为 280 nm 和 370 nm 的脉冲激光的氙灯, 1 个四象限光电倍增管用于检测颗粒物前向散射, 2 个安置在激光侧向的荧光检测器用于检测波长范围分别是 310 ~ 400 nm 和 420 ~ 650 nm 的荧光. 颗粒物先经过 635 nm 的激光, 前向散射和侧向散射被测出, 和 Mie 散射模型对比得到颗粒物的粒径, 前向散射被分为 4 个象限检测, 可得颗粒物的不对称度, 用以表征颗粒物的形状. 280 nm 和 370 nm 的激光被触发后, 由 280 nm 的激光激发, 发射的荧光被 310 ~ 400 nm 的检测器检测得到的光强为 FL1, 由 280 nm 的激光激发, 发射的荧光被 420 ~ 650 nm 的检测器检测得到的光强为 FL2, 由 370 nm 的激光激发, 发射的荧光被 420 ~ 650 nm 的检测器检测得到的光强为 FL3. 某些生物分子会受到激发而发射出荧光, 比如色氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸、NADH、FADH、纤维素、叶绿素^[48]. 但是, 某些非生物组分也可能发射荧光, 比如腐殖酸、矿物尘、黑炭、多环芳烃(PAHs)、二次有机气溶胶(SOA), 对检测造成干扰^[48].

在没有颗粒物通过的情况下开启 2 个氙灯, 检测器上也会测到荧光, 这就是背景噪声. 因此, 必须为荧光强度设置阈值, 荧光强度高于阈值的颗粒物被视为荧光颗粒物. WIBS-4A 中的 Force Trigger 模式可以用于设置阈值. 在这个模式下, 没有颗粒物通过检测区域, 2 个氙灯每秒触发 1 次, 产生的荧光强度被检测. 每次开关机的时候都必须在此模式下运行 10 min, 分别得到 FL1、FL2、FL3 背景荧光强度的平均值和标准差. 本研究用 FL1、FL2、FL3 的平均值加 3 倍的标准差作为荧光阈值, 即下限. 实际计算得到这 3 个值为 50、40、40. 以往的研究发现, 生物气溶胶的荧光强度 FL1、FL2、FL3 都不会超过 250^[49]. 本研究以此作为识别生物气溶胶的上限. 因此, 识别生物气溶胶的条件之一是, FL1、FL2、FL3 在上下限之间.

以往的研究发现, 在德国美因茨、英国曼彻斯特、中国南京等受人为活动影响较大的城市地区, UVAPS 和 WIBS 检测的荧光颗粒物粒径分布通常呈现 2 个峰. 第 1 个峰在 1 ~ 2 μm 附近, 是由黑炭、SOA 等颗粒物组成的, 第 2 个峰在 3 ~ 4 μm 附近, 是由生物气溶胶、腐殖酸、矿物尘等颗粒物组成的, 生物气溶胶占主要部分^[7, 8, 51]. 北京也有这个现象. 因此, 本研究取粒径 3.5 ~ 10 μm , FL1、FL2、FL3 在上下限之间的颗粒物代表生物气溶胶, 称为 3.5 ~ 10 μm 荧光颗粒物.

本研究以 1 h 为区间, 计算每个小时的颗粒物数浓度.

1.5 气象数据的获取

PM_{2.5} 数据是北京市环境保护监测中心公布的海淀区万柳监测站的数据, 是小时平均数据. 温度、湿度、风速和风向的数据是从美国国家海洋和大气管理局(NOAA) 获取的, 是国际交换站北京首都国际机场的数据, 是每小时的瞬时数据. 其中, 温度的单位由华氏度换算为摄氏度, 湿度由温度和露点温度计算得到, 风速由英里每小时换算为米每秒. 后向轨迹通过 NOAA 的 HYSPLIT 服务器获取. 气团距地面高度取 500 m. 气团移动时长取 24 h.

2 结果与讨论

2.1 采样期间气象条件的分析

如图 1 所示, 采样期间, 温度和相对湿度呈现显著的日变化趋势. 温度昼间高, 夜间低. 相对湿度昼间低, 夜间高. “大风天气”是指, 风速在连续 20 h 以上的时间里保持在 4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 风向约为北偏西 30°. 这种天气下, 温度和相对湿度会有所降低, PM_{2.5} 浓度急剧降低. 2013 年 1 月 8 日、2014 年 12 月 31 日、2015 年的 1 月 5 日、1 月 21 日、1 月 26 日、1 月 29 日和 1 月 30 日出现了大风天气. 在其余时段, 风速为 1 ~ 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向不定, PM_{2.5} 浓度较高, 称为“无风天气”.

2.2 生物气溶胶数浓度的变化

如图 2 所示, WIBS-4A 测得, 代表生物气溶胶的 3.5 ~ 10 μm 荧光颗粒物数浓度的变化趋势和 3.5 ~ 10 μm 总颗粒物的变化趋势基本一致. 其范围在 2 ~ 150 L^{-1} , 平均值为 18 L^{-1} , 占 3.5 ~ 10 μm 总颗粒物的 6.8%. 该结果和已有文献报道的城市生物气溶胶的浓度基本吻合^[6-8], 比热带雨林的生物气溶胶浓度低 1 个数量级^[4, 27, 52].

如图 2 所示, 3.5 ~ 10 μm 荧光颗粒物数浓度有明显的昼夜变化规律. 其在 00:00 左右达到最低值, 约 5 L^{-1} , 持续到 06:00 左右, 在 07:00 左右急剧上升, 昼间在较高的水平波动, 平均为 21 L^{-1} , 18:00 后逐渐回落. 已有的研究也发现, 城市生物气溶胶浓度在昼间较高, 夜间较低^[7, 8]. 生物气溶胶的昼夜变化是由边界层的变化和本地活动共同影响的^[53]. 自然环境中的昼夜变化是由边界层的变化主导的, 生物气溶胶浓度呈现昼间低, 夜间高的趋势^[54-56]. 而在城市环境中, 生物气溶胶浓度的昼夜变化是由人类活动主导的. 之前的研究表明, 北京

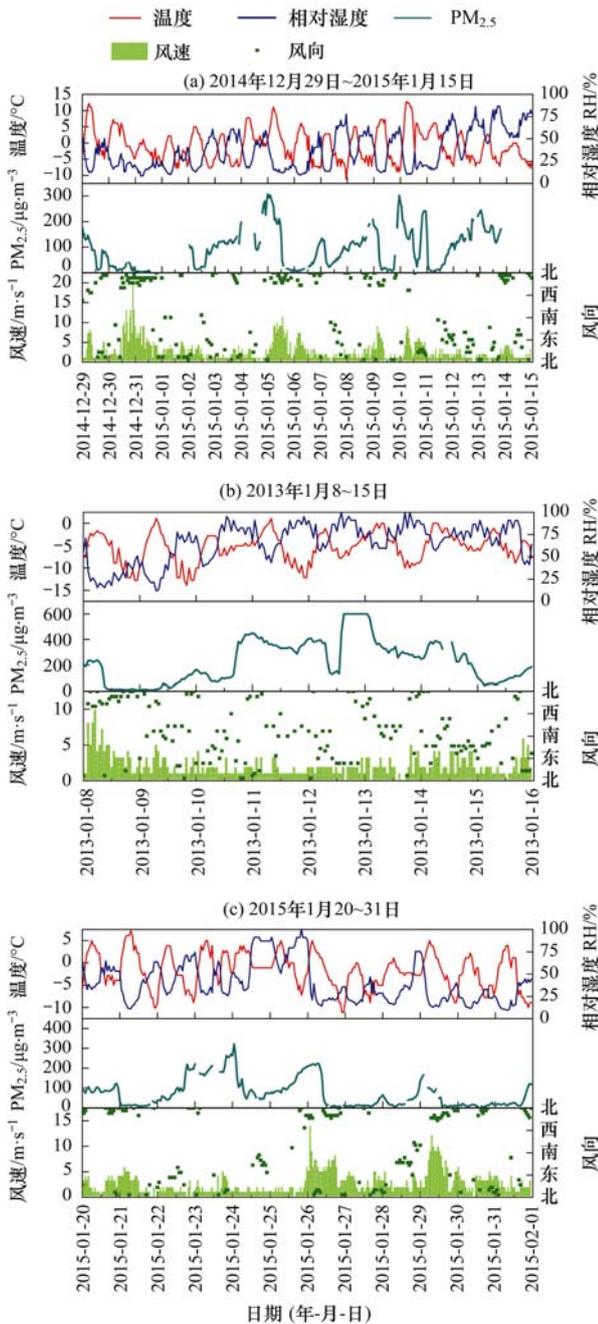


图 1 采样期间气象条件的变化

Fig. 1 Meteorological conditions during the sampling period

冬季来自土壤的生物气溶胶占到了 70%，粪便是另一大来源^[14]。诸如道路扬尘、建筑工地扬尘和人体运动等人类活动，昼间都会显著多于夜间。

如图 2 所示，风是决定 3.5 ~ 10 μm 荧光颗粒物数浓度的另一重要因素。在 2014 年的 12 月 30 日、12 月 31 日及 2015 年的 1 月 5 日、1 月 6 日，出现了主导风向为北偏西 30°，风速大于 4 m·s⁻¹ 的大风天气。在此期间，3.5 ~ 10 μm 总颗粒物和荧光颗粒物的浓度都显著升高。代表生物气溶胶的 3.5 ~ 10 μm 荧光颗粒物的数浓度在 2 ~ 5 h 的时间内可达到

50 ~ 150 L⁻¹，比无风天气时高了 1 个数量级。之前的研究表明，日本在 2010 年的 3 月和 4 月，由风向为北偏西的大风造成的 4 次沙尘天气过程中，空气中细菌细胞的浓度比无风天气时高 1 个数量级^[35]。

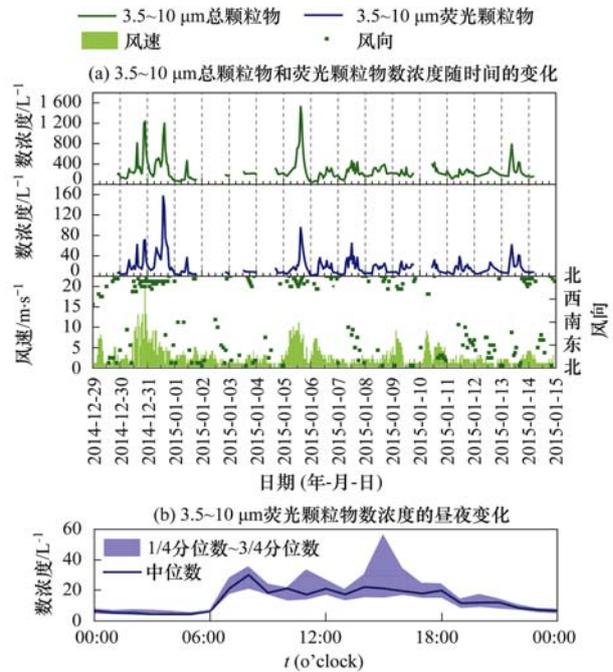


图 2 生物气溶胶数浓度的变化规律

Fig. 2 Variation in the number concentration of biological aerosol particles

2.3 空气中细菌群落组成的变化

如图 3 所示，占比最高的 3 个门的细菌为放线菌门 Actinobacteria、厚壁菌门 Firmicutes 和变形菌门 Proteobacteria，分别占全部细菌的 41.6%、25.8% 和 6.4%。约 19.8% 的细菌未能被分类。

如图 1 所示，在 2013 年 1 月 8 日及 2015 年的 1 月 21 日、1 月 26 日、1 月 29 日和 1 月 30 日，出现了主导风向为北偏西 30°，风速大于 4 m·s⁻¹ 的大风天气。2013 年 1 月 9 ~ 15 日，2015 年 1 月 22 ~ 25 日，和 2015 年 1 月 27 ~ 28 日是大风天气过后的无风天气。如图 3 所示，2015 年的 1 月 26 日、1 月 29 日和 1 月 30 日的大风天气时，空气中细菌群落的组成相比于 2015 年 1 月 25 日无风天气时，发生了急剧的变化。而在 2013 年的 1 月 9 日、1 月 11 ~ 14 日，2015 年的 1 月 22 日、1 月 25 日，以及 2015 年 1 月 27 日大风过后的无风天气时，空气中的细菌群落的组成发生缓慢的变化，由 2013 年 1 月 9 日，2015 年的 1 月 22 日和 1 月 26 日大风天气或大风刚过时的状态，逐渐向 2013 年 1 月 14 日和 2015 年 1 月 25 日的状态演变，即无风天气持续约 5 d 时的状态。

如图 3 所示，某些类的细菌，其占比在每次大风

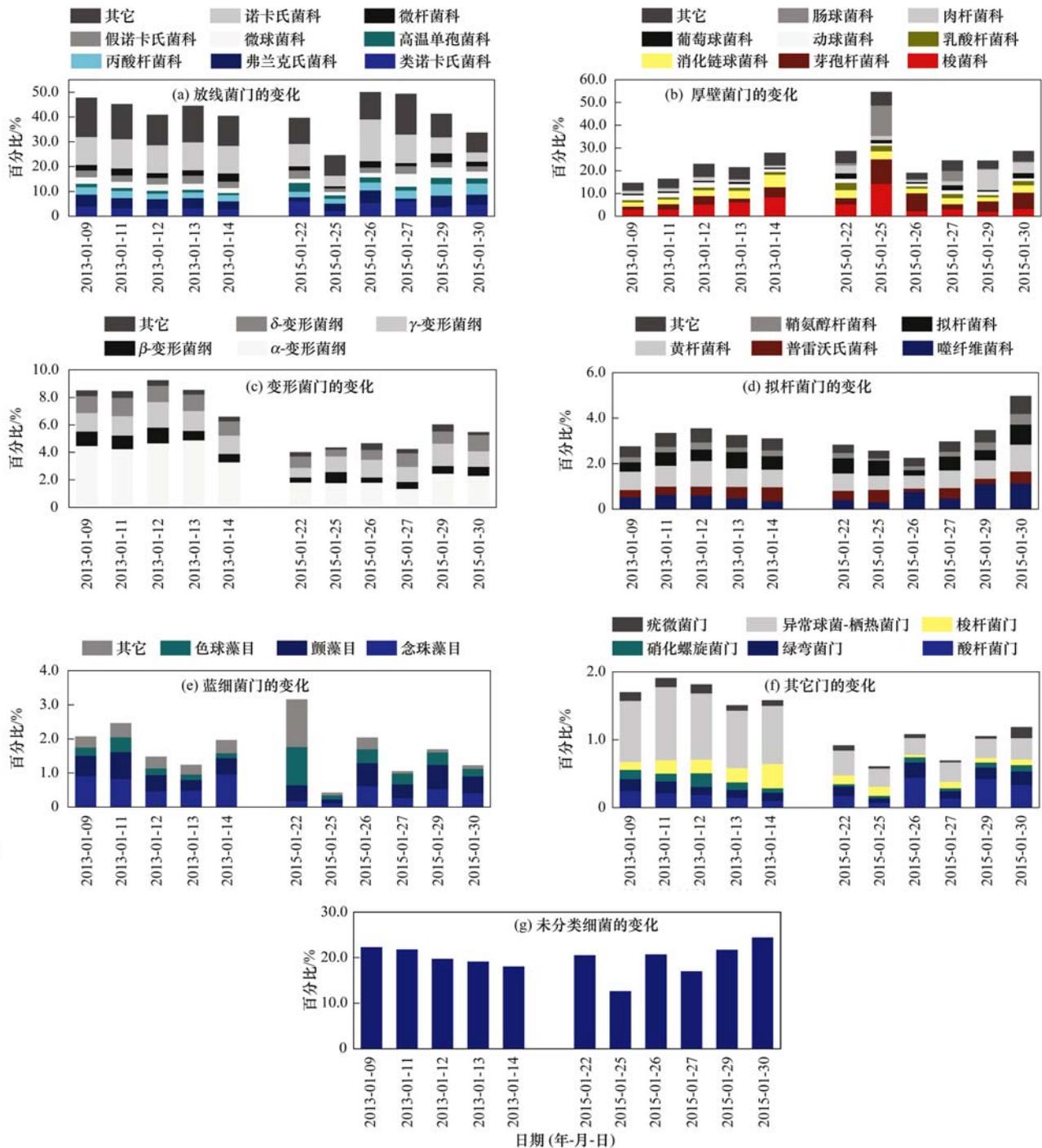


图3 空气中细菌群落组成的变化

Fig. 3 Variation in the composition of airborne bacterial communities

天气时都会升高,在每次无风天气时都会降低,比如,放线菌门 Actinobacteria 中的类诺卡氏菌科 Nocardioideae、弗兰克氏菌科 Frankiaceae、丙酸杆菌科 Propionibacteriaceae、高温单孢菌科 Thermomonosporaceae 等(放线菌门作为整体,在大风天气时增加),拟杆菌门 Bacteroidetes 中的噬纤维菌科 Cytophagaceae(拟杆菌门作为整体,其变化不与大风显著相关),以及蓝细菌门 Cyanobacteria、酸

杆菌门 Acidobacteria、绿弯菌门 Chloroflexi、硝化螺旋菌门 Nitrospirae 等. 以上细菌的总占比为 14.8%. 此外,19.8% 未分类的细菌也有上述的变化规律.

如图 3 所示,某些类的细菌,其占比在每次大风天气时都会升高,在每次无风天气时都会降低,比如,厚壁菌门 Firmicutes 中的梭菌科 Clostridiaceae、芽孢杆菌科 Bacillaceae、消化链球菌科

Peptostreptococcaceae、乳酸杆菌科 Lactobacillaceae 等(厚壁菌门作为整体,在大风天气时减少),拟杆菌门 Bacteroidetes 中的普雷沃氏菌科 Prevotellaceae,以及梭杆菌门 Fusobacteria. 以上细菌的总占比为 16.9%.

此外,有 48.5% 的细菌的变化不与大风显著相关. 其中,29.3% 属于放线菌门,9.4% 属于厚壁菌门,还有全部 6.4% 的变形菌门. 这表明,仍有其它复杂的因素影响空气中细菌群落的组成.

2.4 风影响生物气溶胶浓度及组成的原因

主导风向为北偏西 30° , 风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风天气时,生物气溶胶浓度急剧升高,组成也急剧变化. 这说明,大风天气时,有大量的生物气溶胶进入北京的大气中. 这些生物气溶胶的来源不同于无风天气时生物气溶胶的来源. 以往的研究表明,美国的飓风,亚洲的沙尘等天气,都会使当地生物气溶胶的浓度、组成和活性发生极大的变化^[16, 35, 36]. 其变化的幅度超过了北京冬季大风天气时的变化幅度.

对于北京冬季大风天气时,生物气溶胶浓度和

组成的变化,一个可能的原因是,本地扬尘增加,另一个可能的原因是,存在生物气溶胶的长距离传输. 对于前一个猜想,一个证据是,类诺卡氏菌科 Nocardioideae 这类在大风时占比显著升高的菌,是典型的土壤中含量较高的菌;而梭菌科 Clostridiaceae 这类在大风时占比显著降低的菌,是典型的粪便中含量较高的菌. 大风可能导致土壤来源的生物气溶胶大量增加,但粪便来源的生物气溶胶的增量可能相对较小.

对于后一个猜想,已有的研究表明,生物气溶胶可以在亚洲,美洲,非洲之间传输^[29, 30, 32, 33]. 而日本的研究也表明,生物气溶胶会从亚洲内陆传输到日本及太平洋^[35, 36]. 因此,在北京冬季大风天气时,也可能发生了生物气溶胶的长距离传输. 后向轨迹分析提供了一个证据. 如图 4 所示,在 2013 年 1 月 8 日和 2015 年 1 月 26 日的大风天气时,气团移动较快,24 h 从蒙古和俄罗斯边境移动至北京. 而在无风天气时,气团移动较慢.

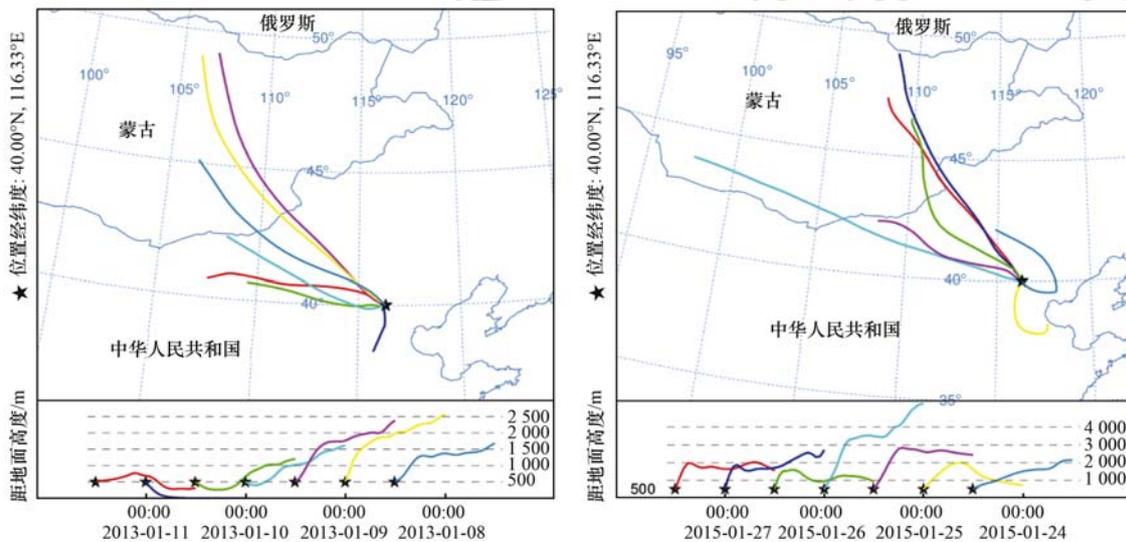


图 4 北京冬季 500 m 高度气团 24 h 后向轨迹

Fig. 4 The 24 h back trajectories at 500 m above ground level in winter in Beijing

3 结论

(1) 2015 年 1 月的北京,生物气溶胶数浓度范围在 $2 \sim 150 \text{ L}^{-1}$, 平均值为 18 L^{-1} , 呈现显著的昼夜变化,昼间高,夜间低.

(2) 风是影响生物气溶胶浓度的重要因素. 北京冬季,主导风向为北偏西 30° , 风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风天气时,生物气溶胶数浓度急剧升高 1 个数量级.

(3) 风是影响生物气溶胶组成的重要因素. 北

京冬季,主导风向为北偏西 30° , 风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风天气时,生物气溶胶中的细菌群落组成会发生急剧的变化,大风过后,细菌群落缓慢演变回大风前的状态.

参考文献:

- [1] Andreae M O, Crutzen P J. Atmospheric aerosols: biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry[J]. Science, 1997, 276(5315): 1052-1058.
- [2] Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations-a review[J]. Science of the Total Environment, 2004, 326(1-3): 151-180.
- [3] Jaenicke R. Abundance of cellular material and proteins in the

- atmosphere[J]. *Science*, 2005, **308**(5718): 73.
- [4] Matthias-Maser S, Obolkin V, Khodzer T, *et al.* Seasonal variation of primary biological aerosol particles in the remote continental region of Lake Baikal/Siberia [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(22): 3805-3811.
- [5] Bauer H, Kasper-Giebl A, Löflund M, *et al.* The contribution of bacteria and fungal spores to the organic carbon content of cloud water, precipitation and aerosols [J]. *Atmospheric Research*, 2002, **64**(1-4): 109-119.
- [6] Harrison R M, Jones A M, Biggins P D E, *et al.* Climate factors influencing bacterial count in background air samples [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005, **49**(3): 167-178.
- [7] Huffman J A, Treutlein B, Pöschl U. Fluorescent biological aerosol particle concentrations and size distributions measured with an ultraviolet aerodynamic particle sizer (UV-APS) in Central Europe [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**: 3215-3233.
- [8] Gabey A M, Stanley W R, Gallagher M W, *et al.* The fluorescence properties of aerosol larger than 0.8 μm in urban and tropical rainforest locations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(11): 5491-5504.
- [9] Perring A E, Schwarz J P, Baumgardner D, *et al.* Airborne observations of regional variation in fluorescent aerosol across the United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(3): 1153-1170.
- [10] Brodie E L, DeSantis T Z, Parker J P M, *et al.* Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**(1): 299-304.
- [11] Bowers R M, McLetchie S, Knight R, *et al.* Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(4): 601-612.
- [12] Bertolini V, Gandolfi I, Ambrosini R, *et al.* Temporal variability and effect of environmental variables on airborne bacterial communities in an urban area of Northern Italy [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(14): 6561-6570.
- [13] Robertson C E, Baumgartner L K, Harris J K, *et al.* Culture-independent analysis of aerosol microbiology in a metropolitan subway system [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(11): 3485-3493.
- [14] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [15] 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 等. 青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 801-809.
- Qi J H, Wu L J, Gao D M, *et al.* Concentration and community diversity of microbes in bioaerosols in the Qingdao coastal region [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 801-809.
- [16] DeLeon-Rodriguez N, Latham T L, Rodriguez-R L M, *et al.* Microbiome of the upper troposphere: species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(7): 2575-2580.
- [17] Lacey J, Dutkiewicz J. Bioaerosols and occupational lung disease [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1994, **25**(8): 1371-1404.
- [18] Brown J K M, Hovmøller M S. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease [J]. *Science*, 2002, **297**(5581): 537-541.
- [19] Pöschl U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects [J]. *Angewandte Chemie: International Edition*, 2005, **44**(46): 7520-7540.
- [20] Elbert W, Taylor P E, Andreae M O, *et al.* Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(17): 4569-4588.
- [21] Shiraiwa M, Selzle K, Pöschl U. Hazardous components and health effects of atmospheric aerosol particles: reactive oxygen species, soot, polycyclic aromatic compounds and allergenic proteins [J]. *Free Radical Research*, 2012, **46**(8): 927-939.
- [22] Dingle A N. Pollen as condensation nuclei [J]. *Journal de Recherches Atmosphériques*, 1966, **2**: 231-237.
- [23] Schnell R C, Vali G. Atmospheric ice nuclei from decomposing vegetation [J]. *Nature*, 1972, **236**(5343): 163-165.
- [24] Christner B C, Morris C E, Foreman C M, *et al.* Ubiquity of biological ice nucleators in snowfall [J]. *Science*, 2008, **319**(5867): 1214.
- [25] Pratt K A, DeMott P J, French J R, *et al.* *In situ* detection of biological particles in cloud ice-crystals [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(6): 398-401.
- [26] Prenni A J, Petters M D, Kreidenweis S M, *et al.* Relative roles of biogenic emissions and Saharan dust as ice nuclei in the Amazon basin [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(6): 402-405.
- [27] Pöschl U, Martin S T, Sinha B, *et al.* Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon [J]. *Science*, 2010, **329**(5998): 1513-1516.
- [28] Vaitilingom M, Deguillaume L, Vinatier V, *et al.* Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(2): 559-564.
- [29] Shinn E A, Smith G W, Prospero J M, *et al.* African dust and the demise of Caribbean coral reefs [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(19): 3029-3032.
- [30] Shinn E A, Griffin D W, Seba D B. Atmospheric transport of mold spores in clouds of desert dust [J]. *Archives of Environmental Health*, 2003, **58**(8): 498-504.
- [31] Gyan K, Henry W, Lacaille S, *et al.* African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005, **49**(6): 371-376.
- [32] Jacob D J, Crawford J H, Kleb M M, *et al.* Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: design, execution, and first results [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D20): 9000.
- [33] Uno I, Eguchi K, Yumimoto K, *et al.* Asian dust transported one full circuit around the globe [J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(8): 557-560.
- [34] Smith D J, Jaffe D A, Birmele M N, *et al.* Free tropospheric

- transport of microorganisms from Asia to North America [J]. *Microbial Ecology*, 2012, **64**(4): 973-985.
- [35] Hara K, Zhang D Z. Bacterial abundance and viability in long-range transported dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **47**: 20-25.
- [36] Murata K, Zhang D Z. Transport of bacterial cells toward the Pacific in Northern Hemisphere westerly winds [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **87**: 138-145.
- [37] Després V R, Nowoisky J F, Klose M, *et al.* Characterization of primary biogenic aerosol particles in urban, rural, and high-alpine air by DNA sequence and restriction fragment analysis of ribosomal RNA genes [J]. *Biogeosciences*, 2007, **4**(6): 1127-1141.
- [38] Fröhlich-Nowoisky J, Pickersgill D A, Després V R, *et al.* High diversity of fungi in air particulate matter [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(31): 12814-12819.
- [39] Georgakopoulos D G, Després V, Fröhlich-Nowoisky J, *et al.* Microbiology and atmospheric processes: biological, physical and chemical characterization of aerosol particles [J]. *Biogeosciences*, 2009, **6**(4): 721-737.
- [40] Ferguson D P, Pitesky M E, Tobias H J, *et al.* Reagentless detection and classification of individual bioaerosol particles in seconds [J]. *Analytical Chemistry*, 2004, **76**(2): 373-378.
- [41] Pinnick R G, Hill S C, Nachman P, *et al.* Fluorescence particle counter for detecting airborne bacteria and other biological particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, **23**(4): 653-664.
- [42] Hairston P P, Ho J, Quant F R. Design of an instrument for real-time detection of bioaerosols using simultaneous measurement of particle aerodynamic size and intrinsic fluorescence [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, **28**(3): 471-482.
- [43] Brosseau L M, Vesley D, Rice N, *et al.* Differences in detected fluorescence among several bacterial species measured with a direct-reading particle sizer and fluorescence detector [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2000, **32**(6): 545-558.
- [44] Agranovski V, Ristovski Z D, Ayoko G A, *et al.* Performance evaluation of the UVAPS in measuring biological aerosols: fluorescence spectra from NAD(P)H coenzymes and riboflavin [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(4): 354-364.
- [45] Sivaprakasam V, Huston A L, Scotto C, *et al.* Multiple UV wavelength excitation and fluorescence of bioaerosols [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(19): 4457-4466.
- [46] Kaye P H, Stanley W R, Hirst E, *et al.* Single particle multichannel bio-aerosol fluorescence sensor [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(10): 3583-3593.
- [47] Pan Y L, Pinnick R G, Hill S C, *et al.* Single-particle laser-induced-fluorescence spectra of biological and other organic-carbon aerosols in the atmosphere: measurements at New Haven, Connecticut, and Las Cruces, New Mexico [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112** (D24): D24S19.
- [48] Pöhlker C, Huffman J A, Pöschl U. Autofluorescence of atmospheric bioaerosols-fluorescent biomolecules and potential interferences [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5**(1): 37-71.
- [49] Toprak E, Schnaiter M. Fluorescent biological aerosol particles measured with the Waveband Integrated Bioaerosol Sensor WIBS-4: laboratory tests combined with a one year field study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(1): 225-243.
- [50] 王步英, 郎继东, 张丽娜, 等. 基于 16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2727-2734.
- Wang B Y, Lang J D, Zhang L N, *et al.* Characterizing Beijing's airborne bacterial communities in PM_{2.5} and PM₁₀ samples during haze pollution episodes using 16S rRNA gene analysis method [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2727-2734.
- [51] Yu X W, Wang Z B, Zhang M H, *et al.* Ambient measurement of fluorescent aerosol particles with a WIBS in the Yangtze River Delta of China: potential impacts of combustion-related aerosol particles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(17): 11337-11348.
- [52] Gabey A M, Gallagher M W, Whitehead J, *et al.* Measurements and comparison of primary biological aerosol above and below a tropical forest canopy using a dual channel fluorescence spectrometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(10): 4453-4466.
- [53] Garland R M, Yang H, Schmid O, *et al.* Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: implications for regional air pollution, radiative forcing and remote sensing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(17): 5161-5186.
- [54] Gabey A M, Vaitilingom M, Freney E, *et al.* Observations of fluorescent and biological aerosol at a high-altitude site in central France [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(15): 7415-7428.
- [55] Healy D A, Huffman J A, O'Connor D J, *et al.* Ambient measurements of biological aerosol particles near Killarney, Ireland: a comparison between real-time fluorescence and microscopy techniques [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(15): 8055-8069.
- [56] Valsan A E, Ravikrishna R, Biju C V, *et al.* Fluorescent biological aerosol particle measurements at a tropical high-altitude site in southern India during the southwest monsoon season [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(15): 9805-9830.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)