

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

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

西宁近郊大气氮干湿沉降研究 许稳,金鑫,罗少辉,冯兆忠,张霖,潘月鹏,刘学军(1279)

兰州春夏季 PM₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析 马丽,余晔,王博,赵素平,李刚(1289)

海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征 王璐,刘子锐,温天雪,苗红妍,王跃思(1298)

2015年北京城区大气 PM_{2.5} 中 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 及前体气体的污染特征 丁萌萌,周健楠,刘保献,王焱,张博韬,石爱军,杨懂艳,常森(1307)

北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险 齐丽,任玥,刘爱民,黄业茹,赵震,王江,李泓(1317)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征 胡亚东,马安周,吕鹏翼,张扬,庄国强(1327)

基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析 李笑语,吴琳,邹超,张意,毛洪钧,荆博宇(1340)

过渡金属掺杂对镉锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响 李曦峰,孙宇琦,王仲鹏,牟宗刚,崔兆杰(1348)

南水北调中线北京段水质状况分析 徐华山,赵磊,孙昊苏,任玉芬,丁涛,常帅,王海东,李森,果钊(1357)

三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征 杨兵,何丙辉,王德宝(1366)

基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应 李琳琳,张依章,唐常源,郑磊,孟伟,卢少勇,敦宇(1376)

抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元(1384)

千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素 俞焰,刘德富,杨正健,张佳磊,徐雅倩,刘晋高,严广寒(1393)

高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征 王靖淇,王书平,张远,林佳宁,高欣,臧小苗,赵茜(1403)

三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响 戴文芳,郭永豪,郁维娜,熊金波(1414)

沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,金漫彤,李非里(1423)

广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征 丁洋,黄焕芳,李绘,罗杰,郑煌,孙焰,杨丹,张原,祁士华(1431)

太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价 边博,周燕,张琴(1442)

锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果 朱广伟,李静,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军,张运林,秦伯强(1451)

超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除 杨海燕,王灿,鄢忠森,李冬平,赵焱,瞿芳术,梁恒,徐叶琴,李圭白(1460)

UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学 李青松,李学艳,姚宁波,骆靖宇,李国新,陈国元,高乃云(1467)

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素 韩慧丽,王宏杰,董文艺(1477)

g-C₃N₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸 李莉莉,陈翠柏,兰华春,刘菲,安晓强(1483)

锆改性硅藻土吸附水中磷的研究 范艺,王哲,赵连勤,吴德意(1490)

3种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较 郑吉,周振超,陈芳,陈涛,魏媛媛,韩玥,陈红(1497)

典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除 张秋亚,马晓妍,王晓昌,游猛(1506)

SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响 吕文洲,张树林,乔宇祥,刘英(1513)

分散染料 neocron black(NB) 的生物降解特性 杨波,丁凤友,徐辉,李方,田晴,马春燕(1520)

多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能 南亚萍,周国田,苏雪莹,袁林江(1529)

生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 付昆明,周厚田,苏雪莹,王会芳(1536)

厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析 曹雁,王桐屿,秦玉洁,韩彬,任君怡(1544)

内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响 何正坤,宋博宇,朱南文,董军(1551)

矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH₄ 厌氧去除特性 王立立,何婷,龙焰,刘常宝(1558)

应用铅铋同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析 孙境蔚,于瑞莲,胡恭任,苏光明,王晓明(1566)

畜禽粪有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异 何梦媛,董同喜,茹淑华,苏德纯(1576)

山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 葛蔚,程琪琪,柴超,曾路生,吴娟,陈清华,朱祥伟,马东(1587)

江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素 王建伟,张彩香,潘真真,廖小平,刘媛,吕幽,汤蜜(1597)

基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析 蔡观,胡亚军,王婷婷,袁红朝,王久荣,李巧云,葛体达,吴金水(1606)

秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响 陈珊,丁成庆,祝贞科,王娟,彭佩钦,葛体达,吴金水(1613)

生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响 张阳阳,胡学玉,邹娟,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬(1622)

淹水水稻土消耗 N₂O 能力及机制 王玲,邢肖毅,秦红灵,刘毅,魏文学(1633)

不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放 李惠娟,彭党聪,刘文博,姚倩,卓杨(1640)

施用不同污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响 杨雨滢,易建婷,张成,陈宏,木志坚(1647)

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响 迟苏琳,徐卫红,熊仕娟,王卫中,秦余丽,赵婉伊,张春来,李彦华,李桃,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(1654)

不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制 彭琴,李哲,梁东丽,王梦柯,郭璐(1667)

褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用 刘仕翔,黄益宗,罗泽娇,黄永春,蒋航(1675)

不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价 金彩霞,司晓薇,王万峰,王春峰,王子英,张琴文,王婉(1683)

三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响 孙松,李楚娴,张成,王永敏,王定勇(1689)

重庆市居民头发重金属富集特征及其相关性分析 何明靖,李琦,王登祥,赵佳渊,杨婷(1697)

16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性 杨浩,张国珍,杨晓妮,武福平,赵炜,张洪伟,张翔(1704)

石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能 黄力华,李秀芬,任月萍,王新华(1717)

美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定 容跃(1726)

《环境科学》征稿简则(1505) 《环境科学》征订启事(1682) 信息(1339, 1459, 1612)

北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征

胡亚东^{1,2}, 马安周¹, 吕鹏翼^{1,3}, 张扬¹, 庄国强^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心中国科学院环境生物技术重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 在北京城区和河北省保定郊区(望都), 于 2015 年 1 月 10~17 日雾-霾时期, 使用大气颗粒物采样器收集大气细颗粒物($PM_{2.5}$), 比较了两地雾-霾时期 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌的种群结构特征异同; 使用场发射扫描电镜 (FESEM) 观察 $PM_{2.5}$ 颗粒形态, 利用后向轨迹模型 NOAA/ARL HYSPLIT-4 分析北京城区和保定郊区气团输送来源, 采用离子色谱仪、流动分析仪和 ICP-MS 仪器监测 $PM_{2.5}$ 中主要水溶性离子和重金属元素含量. 结果表明, 北京城区和保定郊区分离得到的 $PM_{2.5}$ 可培养细菌为厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门 (Actinobacteria) 和 α -变形菌门 (α -Proteobacteria) 三大菌门, 其中厚壁菌门 (Firmicutes) 为优势菌门; 分离纯化鉴定出 17 种细菌, 革兰氏阳性菌占 90% 以上; 优势菌属为产芽孢的芽孢杆菌属 (*Bacillus*), 分别占北京城区 (RCEES) 和保定郊区 (WD) $PM_{2.5}$ 样品中可培养细菌百分比的 68.15% 和 75%. 北京城区和保定郊区 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构特征可能受到 $PM_{2.5}$ 理化性质和气团传输的影响.

关键词: 大气细颗粒物; 可培养细菌; 孢子; 气团输送; 相关性

中图分类号: X172; X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1327-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201603224

Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles ($PM_{2.5}$) of Beijing and Baoding

HU Ya-dong^{1,2}, MA An-zhou¹, LÜ Peng-yi^{1,3}, ZHANG Yang¹, ZHUANG Guo-qiang^{1*}

(1. Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Fine particles ($PM_{2.5}$) collected by two middle volume air samplers in the suburbs of Baoding and the urban area of Beijing during Jan 10th to 17th, 2015, were used to compare the community characteristics of cultivable bacteria in the two sites. In this study, we observed the particle morphology of $PM_{2.5}$ using a field emission scanning electron microscope (FESEM), analyzed the air mass transportation source of the two sampling sites by the NOAA/ARL HYSPLIT-4 backward trajectory model, and measured the concentrations of the major water-soluble ions and heavy metal elements in the $PM_{2.5}$ samples using ion chromatography, continuous flow analyzer and ICP-MS. The results indicated that, the cultivable bacteria of $PM_{2.5}$ contained three phyla, which were Firmicutes, Actinobacteria and α -Proteobacteria. Nine genera and 17 species of cultivable airborne bacteria were isolated and identified. The most abundant phylum was Firmicutes. The Gram-positive bacteria accounted for more than 90%. The spore-forming *Bacillus* which was the dominant species contributed 68.15% and 75% to the total bacteria in urban Beijing and the suburbs of Baoding, respectively. The difference in the community structure of $PM_{2.5}$'s cultivable bacteria in the two sampling areas may be affected by $PM_{2.5}$'s physical and chemical properties and air mass transportation.

Key words: $PM_{2.5}$; cultivable bacteria; spore; air mass transportation; correlation

近年来,我国中东部地区雾-霾天气频发,2015 年共发生 11 次大范围、持续性雾-霾过程,主要集中在 1 月和 11~12 月,京津冀城市经济区尤为明显,是雾-霾影响最大且最典型的地区. 环境保护部发布的《2015 年 1 月 74 个城市空气质量状况报告》显示,京津冀地区空气质量最差,1 月平均达标天数比例为 38.0%, 低于其他城市平均达标天数比例 10.2 个百分点. 雾-霾是一种大气污染状态,不仅表现为能见度降低,影响正常出行;同时雾-霾所携带的有害物质对人体健康的影响深远. 北京作为国际大都市,大气污染问题受到国内外的广泛关注. 细

颗粒物 ($PM_{2.5}$, 空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu m$) 是近年来国内大中城市频发雾-霾天气的主导因素^[1-5]. $PM_{2.5}$ 又称为可入肺颗粒,能够进入支气管沉积于人体肺泡甚至血液系统中; $PM_{2.5}$ 的比表面积大,吸湿性强,容易吸附有毒有害重金属元素和病菌,病菌易在 $PM_{2.5}$ 的迁移过程中得到传播. 流行病学研究显

收稿日期: 2016-03-30; 修订日期: 2016-11-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB14020206)

作者简介: 胡亚东 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向环境生物技术, E-mail: carol_207@163.com

* 通信作者, E-mail: gqzhuang@rcees.ac.cn

示^[6-10],长期暴露于 PM_{2.5}中能够增加心血管和呼吸系统等疾病的发病率和死亡率,甚至减少寿命。

京津冀地区工业化和城市化建设快速发展,机动车保有量持续增长,雾-霾污染近 90% 来自人为排放。PM_{2.5}来源以机动车、燃煤、工业生产、扬尘等本地排放和区域传输为主。有研究表明^[1,5],北京地区年平均 PM_{2.5}排放中机动车贡献最大、其次是燃煤和外来输送。河北地区年平均 PM_{2.5}排放中燃煤占主要地位,同时也受到外来输送的影响。载气尘埃在堆积之前可以顺风传输数以万公里,PM_{2.5}质轻,能够在大气中停留 7~30 d,并可以长距离传输^[4,11-14]。细菌在空气中传播而引起呼吸道疾病的能力主要依赖于细菌附着的空气中固体颗粒大小^[15,16],PM_{2.5}颗粒物大小在一定程度上影响了空气细菌污染情况。因此,研究 PM_{2.5}中细菌传输效应以及与 PM_{2.5}颗粒物的依附关系具有重要意义。本研究在北京城区和保定郊区(望都)采集 PM_{2.5}颗粒并进行细菌培养,系统分析了北京城区和保定郊区 PM_{2.5}中可培养细菌种群结构特征和活性状态,以期对环境管理与决策和健康风险评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2015年1月10~17日,在北京城区和保定郊区布设2个采样站点:①中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站(RCEES,40°00'51"N,116°21'3"E,距离地面垂直距离约12 m,距离最近的河流1.2 km),周边为城市居民区及大学教育区,西侧约150 m及南侧约100 m处分别为城市道路,周围无主要污染源,能够表征华北地区城市站点 PM_{2.5}的污染情况。②中国科学院生态环境研究中心望都试验站(WD,38°40'23"N,115°15'15"E,距离地面垂直距离约4 m),望都县位于河北省保定市,采样站点周边为农田,西侧约140 m为村庄居民区,西北侧约730 m为京珠高速公路,无明显工业污染源,能够表征华北地区郊区站点 PM_{2.5}的污染情况。北京城区和保定郊区两采样站点地理距离为176.1 km。采样仪器为崂应2034型中流量空气重金属采样仪(装有 PM_{2.5}切割头,青岛崂山应用技术研究,中国),流速为100 L·min⁻¹。两采样站点同步采样,单日采样时间为下午15:00至次日下午14:30(23.5 h)。采样膜为90 mm MK360石英纤维滤膜(Munktell Filter AB公司,瑞典),采样前将滤膜放在马弗炉中500℃煅烧6 h起到灭菌作用,每张煅烧后

的滤膜用无菌铝箔包裹并存放于自封袋中备用。每日更换新滤膜使用的工具均需用75%医用酒精或高压蒸汽灭菌。采样前后将采样滤膜称重(勿将样品置于温度20℃、相对湿度<45%的环境中以避免微生物污染^[8]),根据HJ 618-2011《环境空气 PM₁₀和 PM_{2.5}的测定 重量法》,计算 PM_{2.5}浓度。将 PM_{2.5}滤膜于-4℃下密封保存备用。

1.2 细菌培养与鉴定

在无菌条件下,以中心对称形式裁剪3/8 PM_{2.5}滤膜样品两份,用于细菌培养。将两滤膜采样面向内分别放入50 mL离心管内,加入40 mL 1×PBS缓冲液,在4℃、200 r·min⁻¹下离心1 h,取出离心管于超声清洗机内在10℃、功率40%下超声15 min,超声后样品在相同条件下离心1 h^[8,17,18]。取出离心管弃去滤膜,振荡使颗粒物悬浮,将悬浮液涂布于无菌LB培养基上,在37℃培养箱内培养48 h,分别在各培养皿上对细菌菌落数进行计数、分离和纯化。空白组将无菌石英纤维滤膜置于采样器内,不进行采样在相同时间段内放置23.5 h,按照上述进行操作,培养基内未长出菌落。

在RCEES和WD采样站点各选取该采样时期雾-霾最严重的3 d(1月13日15:00~16日14:30) PM_{2.5}样品为平行样对两地雾-霾时期 PM_{2.5}中可培养细菌进行研究。3 d共6个培养基(每天2个培养基)进行细菌单菌落挑取、分离和纯化,采用细菌16S rRNA基因通用引物(27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3', 1492R: 5'-GGTTACCTTGTACGACTT-3')进行PCR扩增、测序,并与NCBI数据库比对进行细菌鉴定。

1.3 系统发育树的构建

利用NCBI数据库的核酸比对功能,对 PM_{2.5}可培养细菌16S rRNA基因测序结果进行两两比对,将相似度大于97%的序列归为一个OTU,一个OTU代表一种细菌。从每一个OTU单元中选择一株细菌的16S rRNA基因序列与NCBI数据库中的相似菌种(相似度>97%)序列建立fasta文件,利用MEGA 6.0建立系统发育树。

1.4 场发射扫描电镜分析

本研究选取RCEES采样站点 PM_{2.5}样品进行场发射扫描电镜(field emission scanning electron microscopy, FESEM)观察,观察样品均为前日15:00至当日14:30所收集样品。选择1月11日和1月17日的采样滤膜,用打孔器分别在每张采样滤膜上截取直径D=1 cm的滤膜2份,喷金进行FESEM

观察.

1.5 后向轨迹-聚类分析

综合考虑精确度以及污染因素(二次气溶胶、微生物等)在大气中的生存时间^[19, 20], 利用后向轨迹模型 NOAA/ARL HYSPLIT-4 (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php) 对 RCEES 和 WD 两地细菌培养时期的气团输送来源进行分析. 选取 48 h 作为后向轨迹-轨迹聚类分析的追溯时间, 选择 1 月 15 日两地近地面高度 100 m 处气团作后向轨迹聚类分析, 判断颗粒物的潜在源区^[21~23]. 气象数据源自全球资料同化系统(GDAS), 使用 UTC 时间.

1.6 可溶性离子与金属元素的测定

剪取 1/8 滤膜样品以 $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ (6:2) 消解体系对样品进行微波消解^[24, 25], 将冷却后的消解液转移至 25 mL 容量瓶中定容, 用 0.45 μm 微孔滤膜过滤得到待测滤液, 采用 ICP-MS 仪器 (Optima 8300, PerkinElmer 公司, 美国) 测定 $\text{PM}_{2.5}$ 中 Al、Zn、Fe、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、As、Cd 和 Pb 共 12 种元素. 剪取 1/8 滤膜样品置于 15 mL 离心管内, 加入 10 mL 超纯水, 在室温超声 1 h, 用 0.45 μm 微孔滤膜过滤得到待测滤液^[26, 27], 采用离子色谱仪 (ICS-1000, DIONEX 公司, 美国) 测定 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- , 连续流动分析仪 (AA3, SEAL Analytical 公司, 德国) 测定 NH_4^+ . 按相同步骤制备并测定滤膜空白.

2 结果与分析

2.1 北京城区和保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构特征

在北京城区 (RCEES) 和保定郊区 (WD) 两采样点 (图 1), 于 2015 年 1 月 10 日 15:00 ~ 17 日 14:30, 采用大气细颗粒物采样仪收集得到 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 选取 1 月 13 日 15:00 ~ 16 日 14:30 雾-霾严重时期 (图 2), 对 $\text{PM}_{2.5}$ 样品进行细菌培养、分离与鉴定, 得到 76 株共 17 种空气细菌, 分别归类于厚壁菌门 (Firmicutes)、放线菌门 (Actinobacteria) 和 α -变形菌门 (α -Proteobacteria) 三大菌门的细菌菌株. 从鉴定结果中细菌的出现频率 (表 1) 来看, 优势菌门为厚壁菌门 (Firmicutes), 分别占 RCEES 和 WD 采样站点 $\text{PM}_{2.5}$ 样品中可培养细菌种类的 72.7% 和 87.5%. 在优势菌门中, 两地区芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 占比均达到优势菌门的 90% 以上. $\text{PM}_{2.5}$ 样品中可培养细菌大部分为革兰氏阳性菌 (G^+), 这与文献 [28 ~ 30] 对可培养空气细菌研究结果一

致^[28~30]. 本研究仅培养得到 *P. provencensis* 和 *S. dokdonensis* 两种属为革兰氏阴性菌 (G^-), 分别属于类芽孢杆菌属 (*Paenibacillus*) 和鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*). $\text{PM}_{2.5}$ 中获得的可培养细菌大部分来自于土壤, 本研究结果与 Cao 等^[8] 对北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物中微生物种群结构研究一致.



图 1 北京城区 (RCEES) 和保定郊区 (WD) 采样站点分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites in RCEES and WD

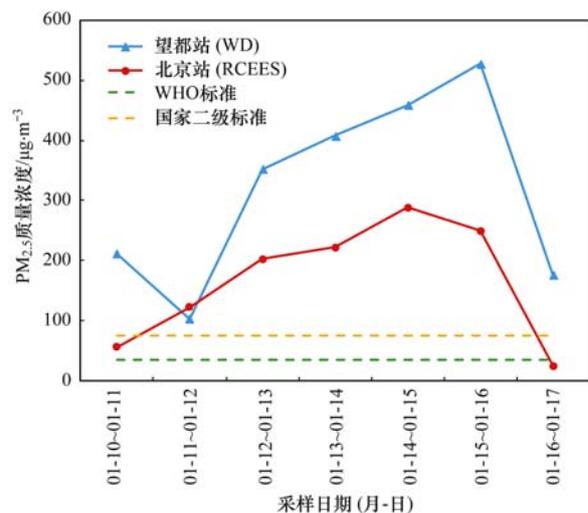


图 2 北京城区 (RCEES) 和保定郊区 (WD) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化

Fig. 2 Variation of concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in RCEES and WD

从鉴定菌种出现频率来看 (表 1), 北京城区 (RCEES) 和保定郊区 (WD) 在优势菌属上存在差异. 北京城区 (RCEES) $\text{PM}_{2.5}$ 样品培养得到的优势细菌依次为枯草芽孢杆菌 (*B. subtilis*)、巨大芽孢杆菌 (*B. megaterium*) 和蜡样芽孢杆菌 (*B. cereus*), 分别占 31.82%、13.64% 和 9.09%. 保定郊区 (WD) $\text{PM}_{2.5}$ 样品培养得到的优势细菌依次为巨大芽孢杆菌 (*B. megaterium*)、蜡样芽孢杆菌 (*B.*

表 1 $PM_{2.5}$ 样品中可培养细菌种群结构特征Table 1 Community characteristics of cultivable bacteria in $PM_{2.5}$ samples

种群	RCEES 站点 /%	WD 站点/%	革兰氏阳性(+)/ 革兰氏阴性(-)	是(+)/否(-)产孢子
Firmicutes	72.70	87.50	+	
<i>Bacillus atrophaeus</i>	4.55	6.25	+	+
<i>Bacillus cereus</i>	9.09	18.75	+	+
<i>Bacillus endophyticus</i>	—	6.25	+	+
<i>Bacillus kochii</i>	4.55	—	+	+
<i>Bacillus licheniformis</i>	4.55	12.50	+	+
<i>Bacillus megaterium</i>	13.64	18.75	+	+
<i>Bacillus niabensis</i>	—	6.25	+	+
<i>Bacillus subtilis</i>	31.82	6.25	+	+
<i>Lysinibacillus manganicus</i>	4.55	—	+	+
<i>Paenibacillus xylanilyticus</i>	—	6.25	+	+
<i>Paenibacillus provencensis</i>	—	6.25	-	+
Actinobacteria	22.75	12.50	+	
<i>Arthrobacter oxydans</i>	4.55	—	+	-
<i>Brevibacterium frigoritolerans</i>	4.55	12.50	+	-
<i>Microbacterium sediminis</i>	4.55	—	+	-
<i>Streptomyces kurssanovii</i>	4.55	—	+	+
<i>Streptomyces silaceus</i>	4.55	—	+	+
α -Proteobacteria	4.55	—	-	
<i>Sphingomonas dokdonensis</i>	4.55	—	-	+

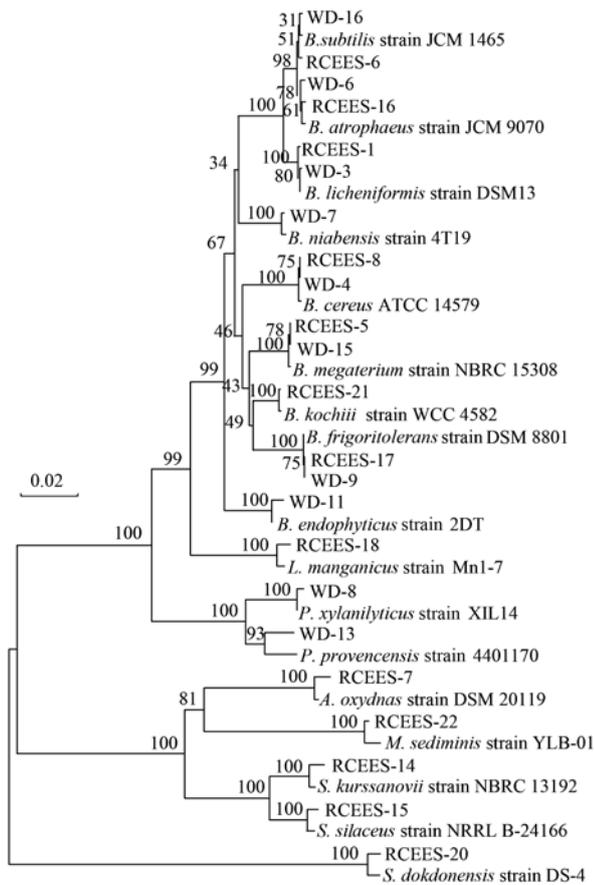
cerus)、地衣芽孢杆菌(*B. licheniformis*)和耐寒短杆菌(*B. frigoritolerans*),分别占 18.75%、18.75%、12.50%和 12.50%。有研究发现^[31, 32],枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)能够污染食物。蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)是土壤、沉积物、灰尘、植物中最普遍的需氧孢子携带者。保定郊区裸露土壤层及植被覆盖率高,为蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)在空气中的分布创造了条件,同时由于其芽孢的黏附性,经常在各种食物生产环境中出现;在许多临床样本中也发现了它的存在,表现出食物中毒、呼吸道疾病、眼部感染等临床症状;蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)与炭疽杆菌(*B. anthracis*)的亲缘关系和临床表现,使其被认为很可能是一种潜在的人类病原体^[33]。

与保定郊区(WD)相比,北京城区(RCEES) $PM_{2.5}$ 中得到的可培养细菌种类较多,细菌种类差异主要表现在放线菌门(Actinobacteria)和 α -变形菌门(α -Proteobacteria)。北京城区(RCEES) $PM_{2.5}$ 中分离得到 α -变形菌门 1 属:鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*);放线菌门 4 属:链霉菌属(*Streptomyces*)、微杆菌属(*Microbacterium*)、短杆菌属(*Brevibacterium*)和节杆菌属(*Arthrobacter*)。其中氧化节杆菌(*A. oxydans*)最早是在空气中分离得到的,也曾在人类临床病例中分离得到过,可以视为潜在的病原菌^[34]。保定郊区(WD) $PM_{2.5}$ 中仅分离得

到放线菌门 1 属:短杆菌属(*Brevibacterium*)。从北京城区(RCEES)和保定郊区(WD) $PM_{2.5}$ 中分离得到的细菌进化关系(图 3)中可知,北京城区(RCEES)和保定郊区(WD) $PM_{2.5}$ 中获得的同种属可培养细菌之间表现出很近的亲缘关系。在同其他放线菌门中的细菌属相比,分离得到的短杆菌属(*Brevibacterium*)与芽孢杆菌属(*Bacillus*)的亲缘关系更近。耐寒短杆菌(*B. frigoritolerans*)多来自于土壤,耐低温,抗逆性较强,而保定郊区(WD)采样站点周边为裸露的农田土壤,土壤扬尘作为 $PM_{2.5}$ 的重要来源之一,使保定郊区(WD) $PM_{2.5}$ 中耐寒短杆菌含量较高成为可能。已有报道表明耐寒短杆菌是一种昆虫病原菌,对作物产生有害作用^[35]。

2.2 细颗粒形态特征对 $PM_{2.5}$ 可培养细菌种群结构影响

本研究选取北京城区(RCEES)采样站点 $PM_{2.5}$ 样品进行 FESEM 观察(如图 4),研究发现 $PM_{2.5}$ 颗粒呈分散或聚簇状态分布在采样石英滤膜纤维表面或间隙,颗粒呈现不规则形状。矿物颗粒[图 4(a)~4(b)]是北京城区大气中常见颗粒物质,具有不规则的形状。其中棒状粒子和细长粒子[图 4(a)]容易发生二次大气化学反应。通过能谱仪(EDS)分析棒状粒子(图 5B)发现,颗粒中除含大量的 $CaSO_4$ 外,还含有大量的 K 和 Al 元素。这表明这些晶体可



邻接系统发育树由细菌16S rRNA基因序列构建, 进化距离的计算采用 Kimura 双参数法, 各分支点显示引导值(1 000次重复的百分比); 并以碱基转换总数为单位; 该分析涉及 40 个核苷酸序列, 去除空白和缺失碱基, 最终包含 1 311 个碱基位点; 进化分析均在 MEGA 6 中进行

图 3 北京城区(RCEES)和保定郊区(WD)两采样站点 $PM_{2.5}$ 分离纯化鉴定获得细菌的邻接进化树

Fig. 3 Neighbour-joining phylogenetic tree of $PM_{2.5}$'s cultivable bacteria in Beijing urban(RCEES) and Baoding suburbs(WD)

能由二价或复合硫酸盐或硫酸盐组成, 反映了 $PM_{2.5}$ 的二次污染来源。在北京城区冬季 $PM_{2.5}$ 样品中观察到大量的球状颗粒[图 4(e)~4(h)], 通过 EDS 分析(图 5A)发现球状颗粒(红色箭头所指)表面 C 和 O 元素含量较高, 颗粒表面各元素含量及形貌均与国内外对粉煤灰颗粒的研究结果一致^[36, 37], 反映了燃煤对 $PM_{2.5}$ 的贡献。

图 4(c)~4(d)中颗粒与其他颗粒区别明显, 分别以“簇团”和单独存在形式分布于采样滤膜上, 对其做 EDS 分析(图 6)发现, 与矿物颗粒相比, 此类颗粒中 C 元素含量极高, 达到了 71.49%, C 和 O 元素是该颗粒的主要组分, 总含量达到 96.17%, 疑似为生物颗粒。Shi 等^[36]对大气颗粒物颗粒形态研究中也报道过相似生物颗粒。因为空气中缺乏微

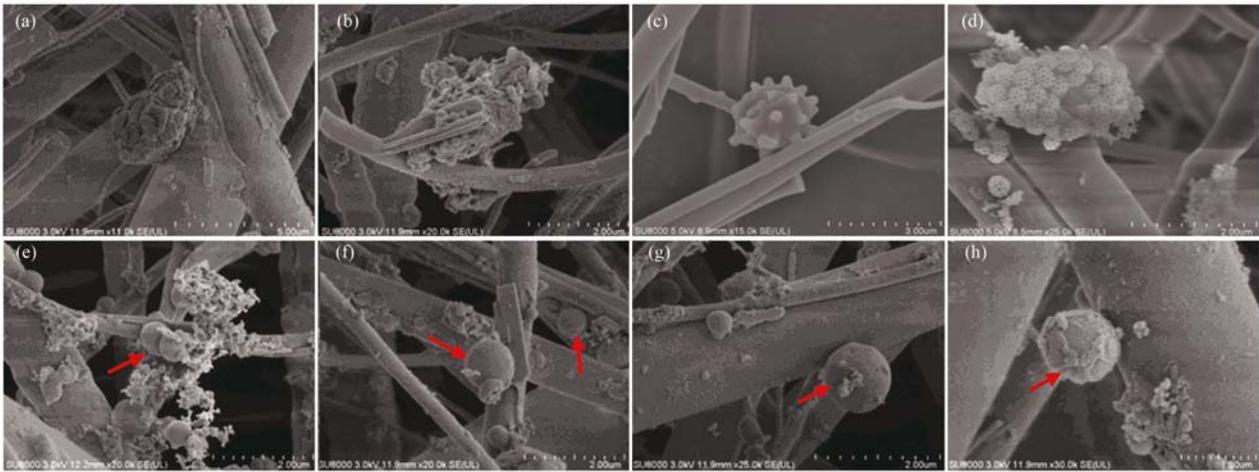
生物可以直接利用的养分, 所以微生物不能在空气中长时间停留并存活; 空气中没有固有的微生物群, 微生物一般以“簇团”形式(多细胞团)或附着在非活性颗粒上暂时悬浮于空气中^[15, 16, 38, 39]。图 4(c)反映了微生物在大气中可能的“簇团”形式。

$PM_{2.5}$ 的 FESEM 观察和 EDS 分析表明, $PM_{2.5}$ 具有形状不规则、缺乏营养成分等不利于微生物生长繁殖的特点。如表 1 所示, 北京城区(RCEES)和保定郊区(WD) $PM_{2.5}$ 中分离得到的可培养细菌, 除氧化秸秆菌(*A. oxydans*)、耐寒短杆菌(*B. frigorigerans*)、沉积微杆菌(*M. sediminis*)外, 均可产生孢子/芽孢, 其中优势细菌属为产芽孢的芽孢杆菌属。Sella 等^[40]对典型芽孢杆菌(*B. atrophaeus*)的芽孢形成生命周期及其抗逆性的研究表明, 当营养缺乏、高矿物质含量、pH 中性、特定温度或细胞密度高时, 可以触发营养细胞分化产生芽孢。空气中缺少微生物直接利用的养分^[15, 16, 38, 39], 不利于微生物的生长和繁殖。 $PM_{2.5}$ 颗粒寡营养和高矿物质含量的特点(图 4~5 和表 4~5), 为触发营养细胞分化产生芽孢提供了机会。同时, 发芽孢子可以保持较长的休眠状态, 对高温、干燥、辐射和化学药物有强大的抵抗力, 增加了微生物在大气环境中的生存机会。本研究发现除不产孢子/芽孢的细菌^[34, 41~43]外, 得到的产孢子/芽孢细菌多呈杆状, 且菌体大小(菌体长度 $> 2.5 \mu\text{m}$, 宽度 $< 2 \mu\text{m}$)均大于 $PM_{2.5}$ 颗粒(空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)^[31~33, 40, 44~48]。以上表明, 获得的可培养产孢子/芽孢细菌可能是以孢子/芽孢形态存在于大气中的。

2.3 区域环境对 $PM_{2.5}$ 可培养细菌种群结构影响

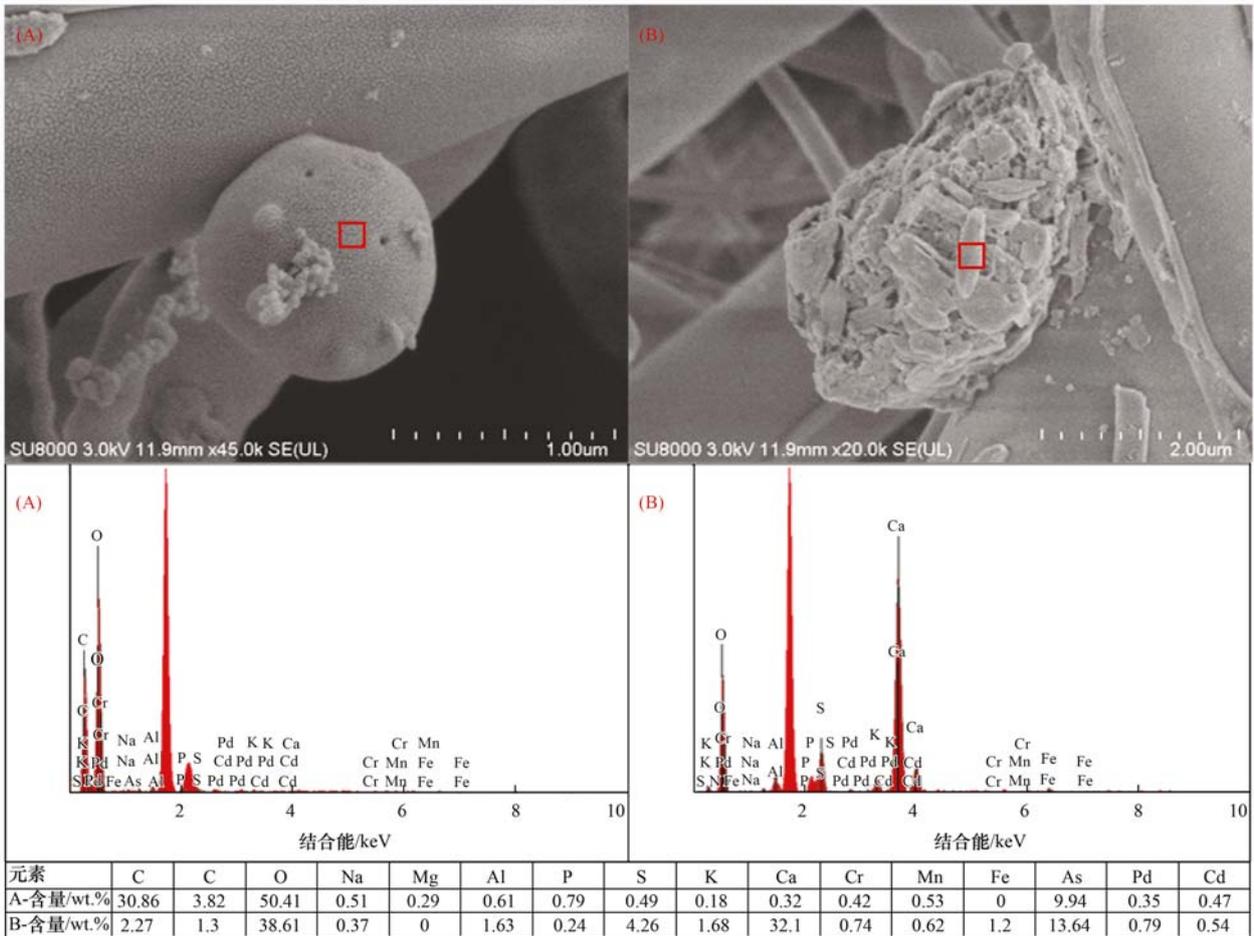
北京城区(RCEES)和保定郊区(WD)两采样站点地处的自然环境条件不同。北京城区(RCEES)采样站点位于北京市北部中国科学院生态环境研究中心科研实验楼顶, 邻接城市居民区及教育园区, 临近交通要道具备较大的机动车流量。保定郊区(WD)采样站点位于河北省保定市南部郊区, 周围多为农田与植被, 远临农户住宅区, 机动车流量很小。综合本研究监测元素及离子, 并参考其他学者研究成果^[1, 49~51], 表 2 列出了北京及周边地区 $PM_{2.5}$ 主要来源及特征识别元素, 其中二次转化源与其他排放源有关, 二次转化 $PM_{2.5}$ 前体物 SO_2 和 NO_x 分别来自燃煤和机动车排放。

北京城区和保定郊区两采样站点 $PM_{2.5}$ 样品中的水溶性离子及金属元素分析如表 3~表 6 所示。



(a) ~ (b) 不规则矿物颗粒, (c) ~ (d) 生物颗粒, (e) ~ (h) 红箭头所指为粉煤灰颗粒; 比例尺: (a) 5 μm , (c) 3 μm , (h) 1 μm , 其余 2 μm
 图 4 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的场发射扫描电镜 (FESEM) 图

Fig. 4 FESEM images of $\text{PM}_{2.5}$ samples



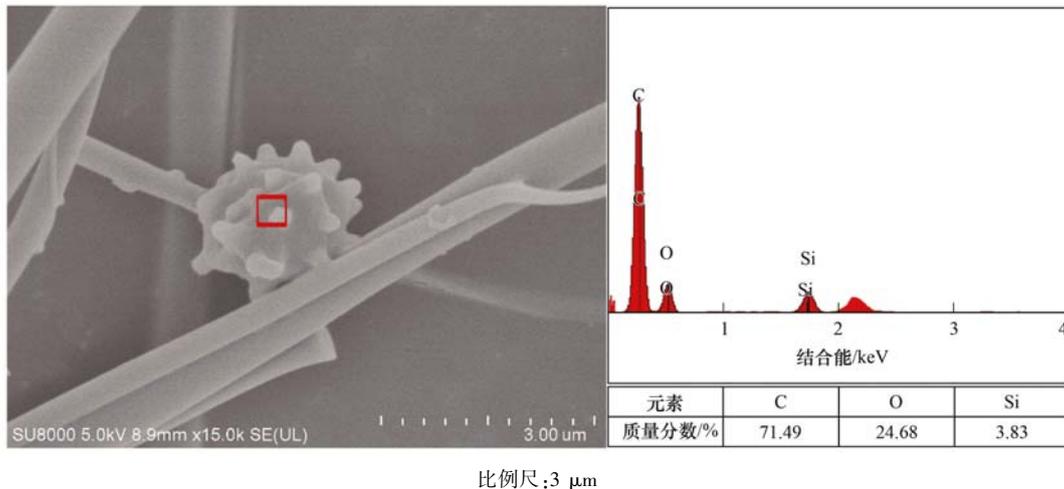
(A) 粉煤灰颗粒 (比例尺: 1 μm), (B) 膜上 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒 (比例尺: 2 μm)

图 5 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒能谱分析 (EDS) 图

Fig. 5 EDS images of $\text{PM}_{2.5}$ samples

表 3 ~ 4 显示, 在 2015 年 1 月 10 ~ 17 日雾-霾期间, 保定郊区大气细颗粒物中各水溶性离子及元素浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 除 Fe、Cr 和 Mn 元素外, 其他组分浓度均

高于北京城区, 或与之相近. 而该雾-霾时期, 保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体高于北京城区 (图 2). 表 7 给出了北京城区和保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 与主

比例尺: 3 μm 图 6 $\text{PM}_{2.5}$ 生物颗粒能谱分析 (EDS) 图Fig. 6 EDS images of $\text{PM}_{2.5}$ samples表 2 $\text{PM}_{2.5}$ 排放源的特征标识物Table 2 Characteristic markers of $\text{PM}_{2.5}$ emission sources

排放源类型	特征标识物
机动车排放	NO_x 、Zn、Cu、Pb
燃煤	SO_2 、As、Cu、Cd
生物质、垃圾焚烧	Cl
化石燃料	Ni
冶金化工	Fe、Mn、Zn、Cd、Cu、Pb、Cr
土壤风沙尘	Al、Fe、Mn
二次转化源	NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}

要元素和水溶性离子浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 之间的 Spearman 相关系数。北京城区水溶性离子和主要人为源金属元素与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现正相关性, 其中二次转化源组分 (NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}) 与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现出极强的正相关性 ($r=0.964, P<0.01$), 且三组分之间也表现出强相关性 (r 为 $0.893\sim 1, P<0.01$); 保定郊区仅 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现正相关性 (r 为 $0.786\sim 0.821, P<0.05$)。这表明该雾-霾时期北京城区和保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 源主要为二次转化源。北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次转化源组分 (NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 所占比重明显高于保定郊区, 北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 来源受到二次转化源的影响更大; 通过比较相关系数及水溶性离子质量比 (表 5), 发现北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染呈现燃煤和机动车尾气排放双高的复合性污染, 保定地区燃煤为主要来源。北京城区人类活动产生的各金属元素之间相关系数更高, 如: Zn 与 Cu、As、Cd、Pb 相关系数 r 为 $0.964\sim 0.991 (P<0.01)$, Mn 与 Fe 的相关系数 $r=0.893 (P<0.01)$, Pb 与 NH_4^+ 、 NO_3^- 的相关系数 r 为 $0.893\sim 0.964 (P<0.01)$, 表明北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 源受到来自冶金工业

和机动车排放源等的多重因素影响。保定郊区元素和离子之间的相关性明显低于北京城区, Cl^- 与 Al、Zn (r 为 $0.893\sim 0.964, P<0.01$), 以及 Cu、Cd、Pb (r 为 $0.847\sim 0.857, P<0.05$) 的相关性表明保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 同时受到生物质垃圾焚烧和土壤风沙尘来源的影响。以上结果反映出北京城区和保定郊区的区域环境存在较大差距, 北京地区复杂的环境条件使 $\text{PM}_{2.5}$ 来源更复杂多样, 保定郊区单一的环境条件使 $\text{PM}_{2.5}$ 来源较单一, 这表明 $\text{PM}_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构差异可能受到两地区环境 (理化因子) 差异的影响。

2.4 气团传输对 $\text{PM}_{2.5}$ 可培养细菌种群结构影响

有研究表明^[1, 11~14], 气载尘埃可以顺风传输数万公里, 气团输送也是 $\text{PM}_{2.5}$ 来源之一。因此选取 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的一天 (1 月 15 日) 对北京城区和保定郊区在 100 m 上空做 48 h 气团后向轨迹-聚类分析, 如图 7 所示。从中可以明显看出北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 的气团输送源主要来自两个方向, 轨迹 1 源自东南方向天津及河北东部渤海沿岸的短距离输送, 轨迹 2 源自西北方向蒙古国地区的较长距离输送, 两轨迹所占比例分别 46% 和 54%。保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 的气团输送源较为复杂, 受到源自 5 个方向气团输送的影响。轨迹 1 源自西北方向蒙古国地区, 且该轨迹气团途径北京城区上空, 占比为 21%; 轨迹 2 源自东南方向天津及河北东部渤海沿岸, 与北京城区气团输送轨迹 1 方向一致, 占比为 46%。轨迹 1 和 2 总比例为 67%, 是保定郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要气团输送源, 且气团在到达保定郊区前的 18 h 内轨迹高度贴近地面, 受到途径城市污染源的影响明显。轨

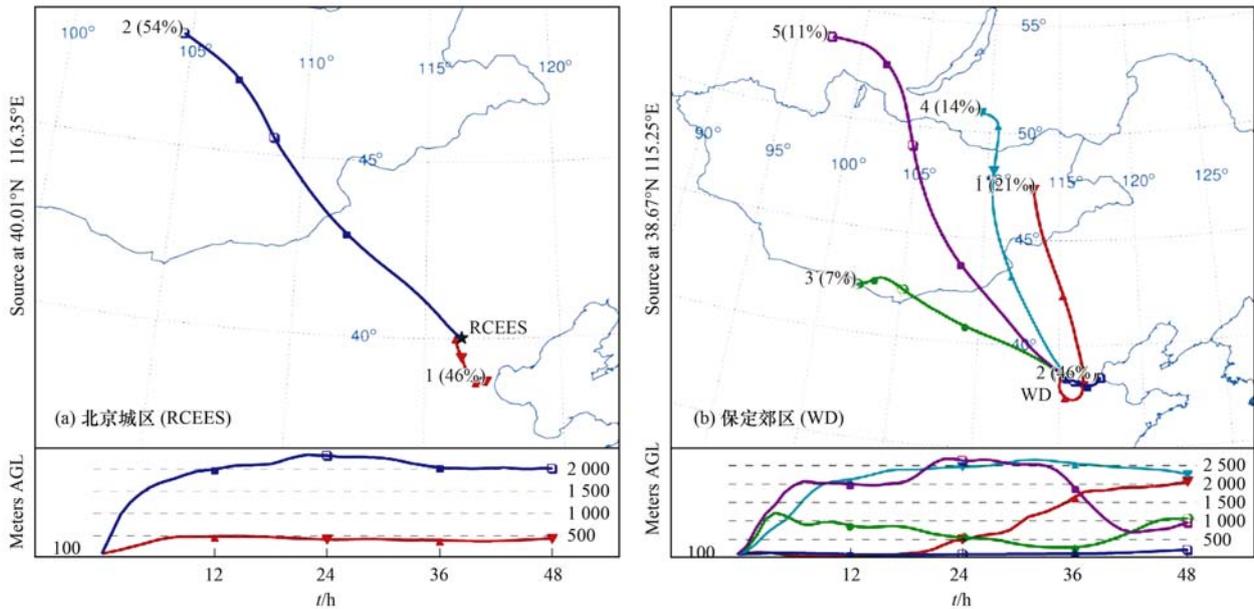


图 7 北京城区和保定郊区气团后向轨迹聚类分析结果

Fig. 7 Backward trajectories and cluster means of air mass transport derived from urban Beijing and suburban Baoding

表 3 $PM_{2.5}$ 样品中阴阳离子浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Concentrations of anions and cations measured in $PM_{2.5}$ samplers/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

元素	01-10 ~ 01-11		01-11 ~ 01-12		01-12 ~ 01-13		01-13 ~ 01-14		01-14 ~ 01-15		01-15 ~ 01-16		01-16 ~ 01-17	
	RCEES	WD												
SO_4^{2-}	7.910	12.547	12.372	13.641	20.271	15.937	27.373	22.919	31.891	22.681	32.442	24.734	7.369	12.700
NH_4^+	3.149	8.983	9.068	9.167	12.916	12.627	13.688	15.698	15.732	13.070	13.066	12.942	2.178	8.301
NO_3^-	5.370	15.553	12.542	10.986	20.735	13.672	32.489	24.949	39.132	17.740	25.560	16.799	3.149	10.593
Cl^-	1.938	7.562	7.016	8.545	8.745	17.643	8.089	13.922	10.469	7.114	6.419	4.885	0.990	7.889

表 4 $PM_{2.5}$ 样品中元素浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Concentrations of elements measured in $PM_{2.5}$ samples/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

元素	01-10 ~ 01-11		01-11 ~ 01-12		01-12 ~ 01-13		01-13 ~ 01-14		01-14 ~ 01-15		01-15 ~ 01-16		01-16 ~ 01-17	
	RCEES	WD												
Al	0.398	0.366	0.527	0.659	0.593	0.878	0.519	0.784	0.498	0.294	1.253	0.391	0.582	0.499
Zn	0.168	0.401	0.307	0.736	0.531	0.740	0.395	1.144	0.513	0.386	0.382	0.283	0.154	0.582
Fe	0.862	0.777	1.049	1.116	1.586	0.761	1.424	1.366	1.252	0.751	1.752	0.711	0.579	0.872
V	0.001	0.001	0.003	0.006	0.003	0.001	0.005	0.003	0.004	0.002	0.004	0.002	0.001	0.001
Cr	0.073	0.033	0.090	0.070	0.052	0.039	0.060	0.048	0.044	0.070	0.070	0.051	0.069	0.034
Mn	0.022	0.035	0.044	0.035	0.053	0.045	0.059	0.049	0.055	0.040	0.069	0.030	0.019	0.025
Co	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
Ni	0.056	0.008	0.011	0.014	0.009	0.006	0.012	0.011	0.010	0.009	0.011	0.011	0.007	0.141
Cu	0.021	0.023	0.035	0.035	0.076	0.080	0.045	0.123	0.049	0.021	0.033	0.011	0.014	0.013
As	0.007	0.018	0.012	0.011	0.018	0.015	0.013	0.029	0.014	0.012	0.013	0.006	0.003	0.013
Cd	0.001	0.003	0.003	0.012	0.006	0.006	0.003	0.009	0.004	0.003	0.003	0.002	0.000	0.004
Pb	0.053	0.104	0.093	0.109	0.134	0.164	0.121	0.219	0.148	0.097	0.110	0.069	0.035	0.095

表 5 $PM_{2.5}$ 中阴阳离子质量分数/%

Table 5 Mass fractions of anions and cations in $PM_{2.5}$ /%

项目	SO_4^{2-}	NH_4^+	NO_3^-	Cl^-
RCEES	14.298 ± 6.895	6.420 ± 1.247	11.581 ± 2.005	3.898 ± 0.960
WD	6.589 ± 3.045	4.367 ± 2.125	5.865 ± 2.580	3.889 ± 2.422

迹 3~5 源自西北方向的内蒙古西部及俄罗斯地区的远距离输送,分别占 7%、14% 和 11%。以上结果显示,北京城区和保定郊区 $PM_{2.5}$ 的气团主要输送源相近,但保定地区 $PM_{2.5}$ 的气团输送源更为复杂,气团输送作为 $PM_{2.5}$ 来源之一,可能是影响北京城区和保定郊区 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌组成结构相近但各组分比例存在差异的原因。

3 讨论

大气细颗粒物($PM_{2.5}$)已成为导致雾-霾天气频发的主导因素,其质轻、比表面积大、吸湿性强等特点,能够携带有毒有害物质及病菌在空气中停留并传播很长时间;同时大气细颗粒物的可入肺性,对人体健康构成了严重的威胁。大气中的微生物因大气中没有可以直接利用的养分,故其无法单独生长和繁殖,所以大气微生物需要依赖大气中的颗粒物才得以暂时悬浮于大气中。微生物气溶胶能引起感染病、过敏性疾病和中毒等人类疾病。有研究表明^[15, 16],大气微生物与大气细颗粒物具有一定的相关性。本研究于 2015 年 1 月 10~17 日雾-霾时期在北京城区和保定郊区进行 $PM_{2.5}$ 收集,考察了 $PM_{2.5}$ 的依存形态,分析了 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构特征及主要理化因子,并且分析了 $PM_{2.5}$ 的理化因子和区域传输源对 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构特征的影响。

本研究结果表明北京城区和保定郊区大气细颗粒物中可培养细菌优势菌门为厚壁菌门,优势菌属为产芽孢的芽孢杆菌属,细菌类型 G^+ 多于 G^- ,这与国内外对大气微生物的研究结果基本一致^[8, 12, 52]。廖旭等^[52]应用 T-RFLP、克隆文库和测序方法研究厦门市冬季大气细颗粒物中细菌和真核微生物群落组成时发现优势菌门为放线菌门、变形菌门、厚壁菌门和拟杆菌门,其中变形菌门相对丰度占 41.75%。Fang 等^[29]研究北京室外可培养空气细菌特征时发现芽孢杆菌属为优势菌属之一。同时,本研究结果显示两地分离得到的 $PM_{2.5}$ 可培养细菌种类及数量均较少。方治国等^[53]研究北京市夏季空气微生物粒径分布特征时发现空气细菌呈偏态分布,80% 的细菌粒子分布于前四级 ($>2.0\mu m$);分析原因可能是空气细菌大多需要附着于颗粒尘埃上,所以粒径较大。大气细颗粒物粒径小 ($\leq 2.5\mu m$)、寡营养且成分复杂、空气中停留时间较长,不利于微生物的养分利用。孢子/芽孢直径小、抗逆性强、易于生存等特点可增加微生物在空气中的

停留时间;而微生物可以依附非活性颗粒扩大传播范围^[16], $PM_{2.5}$ 多样的存在形式(图 4),微生物也可能如[图 4(e)~4(h)]展示的粉煤灰颗粒一样,以:①无机颗粒为主体附着微生物,②微生物体独立作为颗粒物,③微生物体表面附着其无机颗粒,④微生物体为核心外包无机颗粒等形式存在,为微生物在大气细颗粒物环境中的生存提供更多可能。

但两地 $PM_{2.5}$ 的可培养细菌种属结构和比例存在差异。 $PM_{2.5}$ 与其水溶性离子和金属元素组分的相关性,以及 $PM_{2.5}$ 的 FESEM 和 EDS 分析,表明北京城区 $PM_{2.5}$ 污染表现为燃煤和机动车尾气排放双高的复合型污染;保定郊区 $PM_{2.5}$ 污染主要来自燃煤,同时受到生物质垃圾焚烧和土壤风沙尘来源的影响。这与两地区的环境差异特征相符。北京城区冬季取暖燃煤加重,高机动车保有量和周边复杂的冶金工业区是 $PM_{2.5}$ 复合型污染的环境条件。保定郊区冬季农户散煤燃烧为主,伴有其他生物质燃烧,多数农户采用劣质煤和传统炉具,全部低空直接排放,伴随大量的烟尘和颗粒;且保定郊区多裸露土壤,干燥多风沙气候特征能够增加土壤扬尘来源。北京城区和保定郊区气团后向轨迹-聚类分析反映了两地区 $PM_{2.5}$ 的区域输送源既有重叠区域,又有差异源。 $PM_{2.5}$ 的来源差异性影响 $PM_{2.5}$ 各组分的组成结构。因此北京城区和保定郊区 $PM_{2.5}$ 的可培养细菌种属差异性可能与 $PM_{2.5}$ 的来源差异性相关。目前关于大气细颗粒物中可培养细菌种群结构尚没有系统的研究,可建立的 $PM_{2.5}$ 可培养细菌 OTU 数少,尚没有可培养细菌种群结构和环境因素之间建立有效统计学意义的相关性联系的方法,因此只能通过其他环境因素之间的相关性进行推断。要建立可培养细菌种群结构与环境因素的关联,还需要进行大量的培养调查研究。

通过以上分析可知,大气细颗粒物可培养细菌群落结构受到多种因素的影响,本研究通过分析不同环境因子对 $PM_{2.5}$ 可培养细菌种群结构特征的影响,为环境管理与决策和健康风险评估提供参考。要更详细准确地了解不同环境因子对大气细颗粒物可培养细菌的影响,还需要优化采样条件,进行长期大量的监测与分析。

4 结论

(1) 通过对北京城区(RCEES)和保定郊区(WD) $PM_{2.5}$ 中可培养细菌的培养、分离与鉴定,得到厚壁菌门、放线菌门和 α -变形菌门三大菌门,其

中厚壁菌门为优势菌门;分离的 17 种细菌中共得到 9 属细菌,优势菌属为芽孢杆菌属。

(2)北京城区和保定郊区 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构存在差异,北京城区分离得到的细菌种属更丰富,差异主要表现为:北京城区分离得到 α -变形菌门 1 属,放线菌门 4 属;保定郊区未分离得到变形菌门,分离得到放线菌门仅 1 属。

(3)北京城区和保定郊区 $PM_{2.5}$ 中可培养细菌种群结构受到区域环境差异和 $PM_{2.5}$ 污染来源差异性的影响。

参考文献:

- [1] 王跃思,姚利,刘子锐,等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 353-363.
Wang Y S, Yao L, Liu Z C, *et al.* Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, **28**(3): 353-363.
- [2] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报,2013,**58**(13):1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [3] 许秦坤,陈海焱. 可吸入颗粒物研究现状及发展趋势[J]. 有色金属科学与工程, 2010, **1**(1): 45-48.
Xu Q K, Chen H Y. On the research status and tendency of inhalable air particulate [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2010, **1**(1): 45-48.
- [4] 杨洪斌,邹旭东,汪宏宇,等. 大气环境中 $PM_{2.5}$ 的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 2012, **28**(3): 77-82.
Yang H B, Zou X D, Wang H Y, *et al.* Study progress on $PM_{2.5}$ in atmospheric environment [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, **28**(3): 77-82.
- [5] 王玮,汤大钢,刘红杰,等. 中国 $PM_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, **13**(1): 1-5.
Wang W, Tang D G, Liu H J, *et al.* Research on current pollution status and pollution characteristics of $PM_{2.5}$ in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, **13**(1): 1-5.
- [6] Pope III C A, Ezzati M, Dockery D W. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States [J]. New England Journal of Medicine, 2009, **360**(4): 376-386.
- [7] Brook R D, Franklin B, Cascio W, *et al.* Air pollution and cardiovascular disease; a statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American heart association[J]. Circulation, 2004, **109**(21): 2655-2671.
- [8] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollutants during a severe smog event [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [9] 丁飞红,白春学. 细颗粒物对呼吸系统疾病的影响[J]. 微生物与感染, 2014, **9**(1): 2-5.
Ding F H, Bai C X. Effect of fine particulate matters on respiratory diseases [J]. Journal of Microbes and Infections, 2014, **9**(1): 2-5.
- [10] Hunt A, Abraham J L, Judson B, *et al.* Toxicologic and epidemiologic clues from the characterization of the 1952 London smog fine particulate matter in archival autopsy lung tissues [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, **111**(9): 1209-1214.
- [11] Smith D J, Timonen H J, Jaffe D A, *et al.* Intercontinental dispersal of bacteria and archaea by transpacific winds [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, **79**(4): 1134-1139.
- [12] An S, Sin H H, DuBow M S. Modification of atmospheric sand-associated bacterial communities during Asian sandstorms in China and South Korea [J]. Heredity, 2015, **114**(5): 460-467.
- [13] Lv B L, Liu Y, Yu P, *et al.* Characterizations of $PM_{2.5}$ pollution pathways and sources analysis in four large cities in China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, **15**(5): 1836-1843.
- [14] Katra I, Arotsker L, Krasnov H, *et al.* Richness and diversity in dust stormborne biomes at the southeast Mediterranean [J]. Scientific Reports, 2014, **4**: 5265.
- [15] 张波,孟紫强. 大气生物污染与健康的研究[J]. 城市环境与城市生态, 1995, **8**(4): 15-18.
Zhang B, Meng Z Q. Research on air viable pollutants and human diseases [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 1995, **8**(4): 15-18.
- [16] 陈锴,万东,褚可成,等. 空气微生物污染的监测及研究进展[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(4): 171-178.
Chen E, Wan D, Chu K C, *et al.* The monitoring and research of airborne microbe pollution [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(4): 171-178.
- [17] 周育,乔雄梧,王静,等. 植物叶际微生物提取方法研究[J]. 植物研究, 2006, **26**(2): 233-237.
Zhou Y, Qiao X W, Wang J, *et al.* Extraction methods of microorganisms from phyllosphere [J]. Bulletin of Botanical Research, 2006, **26**(2): 233-237.
- [18] Jiang W J, Liang P, Wang B Y, *et al.* Optimized DNA extraction and metagenomic sequencing of airborne microbial communities [J]. Nature Protocols, 2015, **10**(5): 768-779.
- [19] Stohl A. Computation, accuracy and applications of trajectories—a review and bibliography [J]. Atmospheric Environment, 1998, **32**(6): 947-966.
- [20] Wojcik G S, Chang J S. A re-evaluation of sulfur budgets, lifetimes, and scavenging ratios for eastern North America [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1997, **26**(2): 109-145.
- [21] Guinot B, Roger J C, Cachier H, *et al.* Impact of vertical atmospheric structure on Beijing aerosol distribution [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(27): 5167-5180.
- [22] Xu X D, Zhou X J, Shi X H. Spatial structure and scale feature of the atmospheric pollution source impact of city agglomeration [J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2005, **48**(S2): 1-24.
- [23] 王欣,卞林根,逯昌贵. 北京市秋季城区和郊区大气边界层参数观测分析[J]. 气候与环境研究, 2003, **8**(4): 475-484.
Wang X, Bian L G, Lu C G. A study of characteristic parameters of atmosphere boundary layer over Beijing in urban and suburban area in autumn [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, **8**(4): 475-484.
- [24] 王强,戴玄吏,巢文军,等. 常州市春季大气 $PM_{2.5}$ 中金属元

- 素的分析及污染特征[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 323-330.
- Wang Q, Dai X L, Chao W J, *et al.* Analysis and pollution characteristics of metal elements in PM_{2.5} in Changzhou during spring [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(1): 323-330.
- [25] 郭晓爽. 北京市东北部典型区域 PM_{2.5} 中重金属消解方法及污染特征研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014. 13-20.
- Guo X S. Digestion method and pollution characteristics of heavy metals of the PM_{2.5} in typical northeast Beijing[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014. 13-20.
- [26] 张贞理, 唐冠宁, 蔡俊峰, 等. 离子色谱法同时测定大气可吸入颗粒物 PM₁₀ 中 14 种水溶性离子[J]. 分析试验室, 2014, **33**(1): 39-42.
- Zhang Z L, Tang G N, Cai J F, *et al.* Simultaneous determination of water soluble ions in PM₁₀ by ion chromatography [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2014, **33**(1): 39-42.
- [27] 苏彬彬, 张智胜, 陶俊, 等. 春季华东高山背景区域 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 中水溶性无机离子特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1195-1201.
- Su B B, Zhang Z S, Tao J, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in mountain background region of east China in spring [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1195-1201.
- [28] 方治国, 孙平, 欧阳志云, 等. 北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2526-2532.
- Fang Z G, Sun P, Ouyang Z Y, *et al.* Studies on the size distribution of airborne microbes at home in Beijing [J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2526-2532.
- [29] Fang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, *et al.* Culturable airborne bacteria in outdoor environments in Beijing, China [J]. Microbial Ecology, 2007, **54**(3): 487-496.
- [30] 方治国, 欧阳志云, 刘芑, 等. 城市居家环境空气细菌群落结构特征[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2669-2675.
- Fang Z G, Ouyang Z Y, Liu P, *et al.* Airborne bacterial community composition in family homes in Beijing [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(10): 2669-2675.
- [31] Seiler H, Schmidt V, Wenning M, *et al.* *Bacillus kochii* sp. nov., isolated from foods and a pharmaceuticals manufacturing site [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2012, **62**(5): 1092-1097.
- [32] Tam N K M, Uyen N Q, Hong H A, *et al.* The intestinal life cycle of *Bacillus subtilis* and close relatives [J]. Journal of Bacteriology, 2006, **188**(7): 2692-2700.
- [33] Bottone E J. *Bacillus cereus*, a volatile human pathogen [J]. Clinical Microbiology Reviews, 2010, **23**(2): 382-398.
- [34] Kodama Y, Yamamoto H, Amano N, *et al.* Reclassification of two strains of *Arthrobacter oxydans* and proposal of *Arthrobacter nicotinovorans* sp. nov. [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 1992, **42**(2): 234-239.
- [35] 段佳丽, 薛泉宏, 舒志明, 等. 放线菌 Act12 与腐植酸钾配施对丹参生长及其根域微生态的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(6): 1807-1819.
- Duan J L, Xue Q H, Shu Z M, *et al.* Effects of combined application of actinomycetes Act12 bio-control agents and potassium humate on growth and microbial flora in rooting zone of *Salvia miltiorrhiza* Bge [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(6): 1807-1819.
- [36] Shi Z B, Shao L Y, Jones T P, *et al.* Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air area in Beijing, 2001 [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(29): 4097-4108.
- [37] 彭敏. 粉煤灰的形貌、组成分析及其应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2004. 19-29.
- Peng M. Studies on micro-structure, chemical composition of fly ash and its application [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2004. 19-29.
- [38] 杜睿. 大气生物气溶胶的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(4): 546-552.
- Du R. The progress of atmospheric bio aerosol research [J]. Climatic and Environmental Research, 2006, **11**(4): 546-552.
- [39] Henningson E W, Ahlberg M S. Evaluation of microbiological aerosol samplers: a review [J]. Journal of Aerosol Science, 1994, **25**(8): 1459-1492.
- [40] Sella S R B R, Vandenberghe L P S, Soccol C R. Life cycle and spore resistance of spore-forming *Bacillus atrophaeus* [J]. Microbiological Research, 2014, **169**(12): 931-939.
- [41] Madhaiyan M, Poonguzhali S, Lee J S, *et al.* *Microbacterium azadirachtae* sp. nov., a plant-growth-promoting actinobacterium isolated from the rhizosphere of neem seedlings [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, **60**(7): 1687-1692.
- [42] Raza F A, Amin A, Faisal M. Desiccation-tolerant rhizobacteria from cholistan desert, pakistan, and their impact on *Zea mays* L. [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, **24**(4): 1773-1781.
- [43] Yu L B, Lai Q L, Yi Z W, *et al.* *Microbacterium sediminis* sp. nov., a psychrotolerant, thermotolerant, halotolerant and alkalitolerant actinomycete isolated from deep-sea sediment [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, **63**(1): 25-30.
- [44] Gatson J W, Benz B F, Chandrasekaran C, *et al.* *Bacillus tequilensis* sp. nov., isolated from a 2000-year-old Mexican shaft-tomb, is closely related to *Bacillus subtilis* [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, **56**(7): 1475-1484.
- [45] Labeda D P, Price N P, Kroppenstedt R M, *et al.* *Streptomyces atriruber* sp. nov. and *Streptomyces silaceus* sp. nov., two novel species of equine origin [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2009, **59**(11): 2899-2903.
- [46] Rivas R, Mateos P F, Martínez-Molina E, *et al.* *Paenibacillus xylanilyticus* sp. nov., an airborne xylanolytic bacterium [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, **55**(1): 405-408.
- [47] Roux V, Fenner L, Raoult D. *Paenibacillus provencensis* sp. nov., isolated from human cerebrospinal fluid, and *Paenibacillus urinalis* sp. nov., isolated from human urine [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2008, **58**(3): 682-687.
- [48] Yoon J H, Lee M H, Kang S J, *et al.* *Sphingomonas dokdonensis* sp. nov., isolated from soil [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2006, **56**(9): 2165-

- 2169.
- [49] 刘浪, 张文杰, 杜世勇, 等. 利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1609-1618.
- Liu L, Zhang W J, Du S Y, *et al.* Seasonal variation characteristics and potential source contribution of sulfate, nitrate and ammonium in Beijing by using single particle aerosol mass spectrometry[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1609-1618.
- [50] Watson J G, Coulter T C, Lewis C W. Protocol for applying and validating the CMB model for PM_{2.5} and VOC [M]. US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning & Standards, Emissions, Monitoring & Analysis Division, Air Quality Modeling Group, 2004.
- [51] 高申. 中国五城市大气可吸入颗粒物和细颗粒物源解析 [D]. 天津: 天津医科大学, 2012. 4-6.
- Gao S. Sources apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in five cities in China [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2012. 4-6.
- [52] 廖旭, 胡安谊, 杨晓永, 等. 厦门冬季 PM_{2.5} 颗粒物中细菌和真核微生物群落组成及其来源分析[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(8): 1395-1400.
- Liao X, Hu A Y, Yang X Y, *et al.* Community composition and environmental sources of bacteria and eukaryotic microorganisms in fine air particulate (PM_{2.5}) of Xiamen in winter[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(8): 1395-1400.
- [53] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 等. 北京市夏季空气微生物粒度分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 1-5.
- Fang Z G, Ouyang Z Y, Hu L F, *et al.* Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(6): 1-5.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016年10月12日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续15次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaohé River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₂ ⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)