

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                        |                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM <sub>2.5</sub> 和 PM <sub>10</sub> 细菌群落特征 | 王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)                                                         |
| 北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析                                                  | 熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)                                                                |
| 北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征                                                 | 程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)                                                                        |
| 基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征                                                 | 樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)                                                                                |
| 夏季珠江三角洲地区 PM <sub>2.5</sub> 化学组分特征及其对大气能见度的影响                          | 杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)                                                                        |
| 隧道工人的 PM <sub>10</sub> 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价                              | 向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)                                                                      |
| 基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征                                          | 张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)                                                                     |
| 柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源                                                  | 朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)                                                                                     |
| 长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义                                                | 李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)                                                                             |
| “引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究                                            | 潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)                                                                                |
| 重庆市典型城镇区地表径流污染特征                                                       | 王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)                                                                          |
| 调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响                                                    | 张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)                                                                   |
| 青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究                                                   | 严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)                                                                 |
| 岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素                                            | 李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)                                                      |
| 室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响                                                   | 赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)                                                                                    |
| 新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价                                       | 冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)                                                                           |
| 青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究                                               | 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)                                                                  |
| 三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征                                                  | 白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)                                                                            |
| 燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响                                           | 梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 郭芳, 高雪飞, 何杉杉 (2870)                                                                       |
| 运用硫同位素、氮同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源                                           | 李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)                                                                          |
| 藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响                                             | 刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)                                                                                |
| DOM 对被动采样技术的影响与应用                                                      | 于尚云, 周岩梅 (2895)                                                                                         |
| 蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析                                            | 王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)                                                                       |
| 水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响                                                     | 汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)                                                                         |
| $\beta$ -In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> 的制备及其太阳光下降解土霉素                 | 艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)                                                                          |
| 排水管道沉淀物氮释放特性的研究                                                        | 陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)                                                                           |
| 生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析                                              | 付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)                                                                               |
| ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究                                                | 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)                                                                            |
| 两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究                                         | 高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)                                                                  |
| ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究                                    | 巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)                                                                           |
| 珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价                                                | 窦磊, 杨国义 (2954)                                                                                          |
| 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价                                                     | 吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)                                                                    |
| 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险                                                    | 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)                                                                          |
| 我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 <sup>15</sup> N 自然丰度对长期氮施加的响应                       | 刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)                                                                             |
| 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征                                            | 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)                                                                                  |
| 开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应                                               | 陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)                                                                           |
| 接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响                                                     | 郑文君, 王明元 (3004)                                                                                         |
| 水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响                                                | 赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)                                                                           |
| 固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苊解吸的影响                                              | 全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)                                                                |
| 零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究                                                  | 陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)                                                                         |
| Fe <sup>3+</sup> 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究                | 杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)                                                                       |
| 原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性                                                  | 焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)                                                                      |
| 镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力                                            | 张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)                                                                                     |
| 不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响                                                   | 刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)                                                                           |
| 磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化                                                    | 汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)                                                                            |
| 洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性                                                    | 邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)                                                                      |
| 3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价                                          | 杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)                                                                                 |
| 石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应                                            | 孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)                                                                            |
| Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究                                  | 虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)                                                                               |
| 热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响                                                   | 胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)                                                                      |
| 磷石膏对麦田 CO <sub>2</sub> 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析                            | 李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099) |
| 全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析                                        | 郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)                                                                             |
| 《环境科学》征订启事 (2757)                                                      |                                                                                                         |
| 《环境科学》征稿简则 (2767)                                                      |                                                                                                         |
| 信息 (2734, 2783, 3073, 3079)                                            |                                                                                                         |

# 基于 16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 细菌群落特征

王步英<sup>1</sup>, 郎继东<sup>2</sup>, 张丽娜<sup>2</sup>, 方剑火<sup>2</sup>, 曹晨<sup>3</sup>, 郝吉明<sup>1</sup>, 朱昕<sup>3</sup>, 田埂<sup>2\*</sup>, 蒋靖坤<sup>1\*</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华大学测序平台, 北京 100084; 3. 清华大学生命学院, 北京 100084)

**摘要:** 2013年1月8~14日, 北京出现了严重的霾污染。霾污染时高浓度的大气颗粒物增加了暴露人群的健康风险, 而大气中的微生物也可能带来一些风险, 但目前对霾污染时大气中微生物组成了解较少。本研究选取了2013年1月8~14日北京7 d的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>采样样本, 通过对细菌16S rRNA基因V3区扩增和MiSeq测序, 得到PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中的细菌群落结构特征, 并将结果与相同采样样本的宏基因组测序结果及三项国外基于16S rRNA基因测序方法的大气中细菌研究结果进行了比较。研究发现7 d连续采样条件下, PM<sub>2.5</sub>中细菌群落结构在门和属的水平上均差别不大。在属级别上, 节杆菌属(*Arthrobacter*)和弗兰克氏菌属(*Frankia*)是北京冬季大气中细菌群落的主要类群。16S rRNA基因测序与宏基因组测序结果对比分析发现, 在属级别上, 两种分析方法中有39个相同的属类群(两种分析方法丰度前50的细菌类群合并所得), 弗兰克氏菌属(*Frankia*)和副球菌属(*Paracoccus*)在16S rRNA基因测序分析结果中相对含量较多, 而考克氏菌属(*Kocuria*)和地嗜皮菌属(*Geodermatophilus*)在宏基因组测序结果中相对含量较高。在门和属的水平上, PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中细菌群落结构特征呈现出相似的规律。在门水平上, 放线菌门(*Actinobacteria*)在PM<sub>2.5</sub>中的相对百分比较大, 而厚壁菌门(*Firmicutes*)在PM<sub>10</sub>中的相对百分比较大。在属水平上, 梭菌属(*Clostridium*)在PM<sub>10</sub>中的相对百分比较大。与三项国外基于16S rRNA基因测序研究结果对比发现, 尽管在采样地点和采样时间上有较大差异, 大气中普遍存在一些相同的细菌类群, 且近地面大气细菌群落结构特征相似度较高, 区别于高空对流层中细菌群落结构特征。

**关键词:** 北京; 霾污染; PM<sub>2.5</sub>; 16S rRNA 基因; 细菌群落

中图分类号: X172; X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2727-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.001

## Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method

WANG Bu-ying<sup>1</sup>, LANG Ji-dong<sup>2</sup>, ZHANG Li-na<sup>2</sup>, FANG Jian-huo<sup>2</sup>, CAO Chen<sup>3</sup>, HAO Ji-ming<sup>1</sup>, ZHU Ting<sup>3</sup>, TIAN Geng<sup>2\*</sup>, JIANG Jing-kun<sup>1\*</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Sequence Platform of Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Life Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** During 8<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> Jan., 2013, severe particulate matter (PM) pollution episodes happened in Beijing. These air pollution events lead to high risks for public health. In addition to various PM chemical compositions, biological components in the air may also impose threaten. Little is known about airborne microbial community in such severe air pollution conditions. PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> samples were collected during that 7-day pollution period. The 16S rRNA gene V3 amplification and the MiSeq sequencing were performed for analyzing these samples. It is found that there is no significant difference at phylum level for PM<sub>2.5</sub> bacterial communities during that 7-day pollution period both at phylum and at genus level. At genus level, *Arthrobacter* and *Frankia* are the major airborne microbes presented in Beijing winter samples. At genus level, there are 39 common genera (combined by first 50 genera bacterial of the two analysis) between the 16S rRNA gene analysis and those are found by Metagenomic analysis on the same PM samples. *Frankia* and *Paracoccus* are relatively more abundant in 16S rRNA gene data, while *Kocuria* and *Geodermatophilus* are relatively more abundant in Meta data. PM<sub>10</sub> bacterial communities are similar to those of PM<sub>2.5</sub> with some noticeable differences, i. e., at phylum level, more Firmicutes and less Actinobacteria present in PM<sub>10</sub> samples than in PM<sub>2.5</sub> samples, while at genus level, more *Clostridium* presents in PM<sub>10</sub> samples. The findings in Beijing were compared with three 16S rRNA gene studies in other countries. Although the sampling locations and times are different from each other, compositions of bacterial community are similar for those sampled at the ground atmosphere. Airborne microbial communities near the ground surface are different from those sampled in the upper troposphere.

**Key words:** Beijing; haze pollution; PM<sub>2.5</sub>; 16S rRNA gene; bacterial community

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-03-25

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(21221004); 国家自然科学基金重大项目(21190054)

作者简介: 王步英(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物中微生物, E-mail: wangbuying6666@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: tiangeng@biomed.tsinghua.edu.cn; jiangjk@tsinghua.edu.cn

2013 年 1 月我国中东部地区(包括北京)发生了多次严重的霾污染事件,北京最严重的一次霾污染过程发生在 1 月 8~14 日. 其中,1 月 12 日北京  $\text{PM}_{2.5}$  日均值浓度值超过  $500 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[1]</sup>. 霾污染导致一系列健康风险,但已有研究多关注大气颗粒物理化特性的健康影响<sup>[2,3]</sup>,对大气中微生物的群落特征以及其致病性了解甚少. 而细菌和真菌在近地面大气中普遍存在<sup>[4]</sup>,数量能达到  $10^3 \sim 10^6 \text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[5]</sup>. 一些动物和植物的致病菌会引起人类的过敏和哮喘<sup>[6]</sup>,致病菌及病毒的大范围传播会引起全球性的疾病<sup>[7]</sup>.

传统对大气中细菌群落结构特征的认识多基于培养的方法<sup>[8~11]</sup>,但可培养的细菌仅占总微生物量的一小部分( $0.1\% \sim 10\%$ )<sup>[12,13]</sup>,且大气中细菌菌属对营养以及生长因子的需求比较多样,这就导致了培养基选择上的困难<sup>[14]</sup>. 从公众健康的角度来看,基于培养方法获得的微生物信息可能会遗漏一些重要的致病菌或过敏源<sup>[15]</sup>.

16S rRNA 基因(16S)是细菌染色体上编码 16S rRNA 相对应的 DNA 序列,存在于所有细菌染色体基因中,遗传信息丰富,既有反映物种间亲缘关系的保守区,也存在可判定种间变异的可变区,适合于进行种群分类和系统发育研究. 16S 测序分析方法通过提取样品中的基因组 DNA,扩增 16S rRNA 基因,并对其进行测序分析,以得到大气中细菌群落组成、结构和多样性特征. 16S 分析作为细菌系统分类的主要依据已得到了广泛的应用,已成为大气中细菌的一种有效分析技术<sup>[16]</sup>.

而宏基因组(metagenomics, Meta)分析测序方法,是直接获取环境样品中全部微生物的所有 DNA 序列信息,可以在种的水平上确定致病菌. 本研究小组首次采用宏基因组分析测序的方法分析了北京 2013 年 1 月 8~14 日连续 7 d 的采样样本,在种的水平上确定了致病菌的存在,并且发现一些致病菌的相对丰度会随着霾污染浓度的增加而增加<sup>[17]</sup>. 但该方法尚未得到广泛应用,目前已有的关于大气细菌群落结构特征的研究多使用 16S 分析的方法<sup>[18~23]</sup>. 对北京地区而言,使用 16S 测序分析方法对大气细菌群落特征的研究较少<sup>[24]</sup>,更没有专门针对北京冬季霾污染时大气中细菌群落结构特征的 16S 研究. 并且由于气象因子、土地利用类型等的不同,不同时间地点的细菌群落结构特征会有所不同<sup>[18,22]</sup>. 不同粒径范围内细菌群落结构特征也存在差别<sup>[6,23]</sup>.

因此,本研究使用基于 16S 的测序分析方法获得了北京 2013 年 1 月 8~14 日连续 7 d 采样条件下大气中细菌群落结构特征,对比了  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  中细菌群落结构特征的异同. 同时,将此结果与相同采样样本的宏基因组测序结果<sup>[17]</sup>进行了对比分析. 最后,将北京霾污染时细菌群落特征与三项国外基于 16S 分析的大气中细菌研究[分别为意大利米兰城市空气中(米兰)<sup>[18]</sup>、美国纽约地铁空气中(纽约)<sup>[19]</sup>和大西洋中西部上层对流层大气中(对流层)<sup>[20]</sup>采样样本]数据上传至同一数据库进行分析比较,以探究国内外大气颗粒物中细菌群落结构的异同.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

$\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  样品采样点位于清华大学环境科学实验室楼顶( $40^\circ 00' 17'' \text{ N}$ ,  $116^\circ 19' 34'' \text{ E}$ , 采样口距地面 10 m),采样点距最近的河流和医院的距离分别约为 20 m 和 690 m. 样品采集于 2013 年 1 月 8~14 日,采样持续时间为 23 h(上午 10:00~次日上午 09:00),采样仪器为两台  $\text{PM}_{2.5}$  大流量采样器,一台  $\text{PM}_{10}$  大流量采样器(RFPS-1287-063、赛默飞世尔科技公司、美国麻省),流量均为  $1.13 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ . 采样前后分别记录每个滤膜的质量,滤膜采样前后的质量差除以 23 h 采样体积得到采样地点  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度估值(为防止微生物污染,并未将滤膜恒温恒湿处理). 采样所用石英滤膜(10 inch  $\times$  8 inch)使用前在  $500^\circ\text{C}$  马弗炉烘烤 5 h. 为了避免微生物污染,所有的实验用具,如膜托、切割头、镊子、剪刀等用 75% 酒精消毒或者进行高压蒸汽灭菌. 在进行 16S 分析前,采集样品后的滤膜放置于  $-80^\circ\text{C}$  冰箱存储. 样品采集地点及采样具体信息可参见文献<sup>[17]</sup>.

### 1.2 DNA 提取

DNA 提取的具体步骤如文献<sup>[17]</sup>所述. 将 1/4  $\text{PM}_{10}$  滤膜以及 7/4  $\text{PM}_{2.5}$  滤膜分别剪碎并放入 50 mL 离心管中,之后向管内注满  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的磷酸盐缓冲盐溶液( $1\times\text{PBS}$ ,  $\text{pH } 7.4$ ),在 200 g 下离心 2 h. 上清液用  $0.2 \mu\text{m}$  孔径的聚醚砜(PES)滤膜(PALL, 美国纽约)过滤,将过滤膜剪碎,用 MO-BIO PowerSoil DNA 试剂盒提取(卡尔斯巴德,美国加州),相关的步骤依照该试剂盒的说明书进行. 其中,为提高 DNA 提取效率,将柱纯化改为磁珠纯化. 用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳和 Qubit 分别测定所提取 DNA 的质量和浓度. 空白膜采用相同的提取方法进

行操作,未检测到 DNA. 提取后所得 DNA 样品,均放在 -80℃ 条件下存储.

1.3 16S rRNA 基因 V3 区 PCR 扩增

将 14 个滤膜样本(7 个 PM<sub>2.5</sub> 样本,7 个 PM<sub>10</sub> 样本)所提取 DNA 样品分别作为 PCR 反应的模板,对 16S rRNA 基因的 V3 区进行扩增,上下游引物的序列(引物两侧加上适用于 Illumina 平台测序的序

列)<sup>[25]</sup>如表 1 所示. PCR 反应采用 25 μL 体系[10 μmol·L<sup>-1</sup> 的上下游引物各 1.5 μL, Taq 酶 (Q5 Master Mix) 12.5 μL, DNA 模板和 ddH<sub>2</sub>O 共 9.5 μL,每个样品的 DNA 总量约为 5 ng]. PCR 反应程序为:98℃ 预变性 30 s, 98℃ 10 s,50℃ 30 s, 72℃ 30 s 扩增 25 个循环,72℃ 延伸 7 min. PCR 产物分子量通过 1.5% 的琼脂糖凝胶电泳检测.

表 1 16S V3 区 PCR 扩增引物序列组成

| Table 1 Primers sequence of 16S V3 area's PCR amplification |                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 16S V3 区上下游引物                                               | 引物名称                                                                            |
| 16S V3_F(上游)                                                | aatgatacggcgaccacgcagatctacactcttccctacacgacgtcttccgatctNNNNCCTACGGGAGGCAGCAG   |
| 16S V3_1R(下游)                                               | caagcagaagacggcatacagatCGTGATgtgactggaggttcagacgtgtgtcttccgatctATTACGCGGCTGCTGG |

1.4 MiSeq 测序分析

将磁珠纯化后的 PCR 产物用 2100 Bioanalyzer (安捷伦,加利福尼亚州)检测目的片段(16S V3 区)的存在. 采用 Illumina 的 MiSeq 测序平台,对细菌 16S 的 V3 区序列进行高通量测序,得到的数据量如表 2 所示. 测序由清华大学测序中心完成,从原始下机数据去接头、去污染、去低质量,得到可信数据,根据索引号对比至各个样品,得到每个样品

完整的基因序列. 将序列上传至 MG-RAST (Metagenomics analysis server <http://metagenomics.anl.gov/>)服务器<sup>[26]</sup>. 在一定的限定条件下 (Max. e-value Cutoff = 1e-5, Min. % Identity Cutoff = 99%, Min. Alignmnet Length Cutoff = 32) 对比至 Greengenes 数据库<sup>[27]</sup>,得到每个样品的细菌群落结构特征. 有研究表明,16S 可以提供足够大的信息量捕获细菌群落结构的差异<sup>[28~30]</sup>.

表 2 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 样本的 MiSeq 测序数据量

| Table 2 MiSeq sequence data of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> |           |           |        |             |             |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|--------|-------------|-------------|
| 样品号                                                                   | 原始序列数     | 可信序列数     | 序列平均长度 | 原始_Q20 比例/% | 可信_Q20 比例/% |
| 1 月 8 日 PM <sub>2.5</sub>                                             | 1,767,564 | 1,762,628 | 151 bp | 97.07       | 97.00       |
| 1 月 8 日 PM <sub>10</sub>                                              | 263,136   | 245,654   | 151 bp | 97.08       | 95.38       |
| 1 月 9 日 PM <sub>2.5</sub>                                             | 1,685,934 | 1,682,682 | 151 bp | 97.42       | 97.37       |
| 1 月 9 日 PM <sub>10</sub>                                              | 2,699,848 | 2,692,162 | 151 bp | 96.98       | 96.91       |
| 1 月 10 日 PM <sub>2.5</sub>                                            | 2,521,080 | 2,518,256 | 151 bp | 97.10       | 97.08       |
| 1 月 10 日 PM <sub>10</sub>                                             | 235,704   | 228,808   | 151 bp | 97.15       | 96.39       |
| 1 月 11 日 PM <sub>2.5</sub>                                            | 2,422,746 | 2,419,230 | 151 bp | 97.01       | 96.98       |
| 1 月 11 日 PM <sub>10</sub>                                             | 1,792,590 | 1,790,000 | 151 bp | 97.13       | 97.09       |
| 1 月 12 日 PM <sub>2.5</sub>                                            | 3,626,056 | 3,623,310 | 151 bp | 97.12       | 97.10       |
| 1 月 12 日 PM <sub>10</sub>                                             | 2,567,524 | 2,564,554 | 151 bp | 96.95       | 96.92       |
| 1 月 13 日 PM <sub>2.5</sub>                                            | 171,026   | 170,412   | 151 bp | 96.71       | 96.62       |
| 1 月 13 日 PM <sub>10</sub>                                             | 1,929,542 | 1,927,476 | 151 bp | 97.10       | 97.07       |
| 1 月 14 日 PM <sub>2.5</sub>                                            | 2,083,254 | 2,078,400 | 151 bp | 97.14       | 97.08       |
| 1 月 14 日 PM <sub>10</sub>                                             | 2,132,346 | 2,125,166 | 151 bp | 97.35       | 97.26       |

2 结果与讨论

2.1 北京霾污染时 PM<sub>2.5</sub> 中细菌群落组成

2013 年 1 月 8~14 日,采样点膜称重所获得的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度估值如图 1 所示. 其中,1 月 8 日颗粒物浓度最低,而 1 月 12 日颗粒物浓度最高.

在门水平上,7 d PM<sub>2.5</sub> 样品中,放线菌门、厚壁菌门、变形菌门 (Proteobacteria)、蓝藻门

(Cyanobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 的相对百分比相差不大,且其相对百分比之和均达到 97% 以上. 将 7 d PM<sub>2.5</sub> 细菌数据汇总,得到放线菌门所占比例达到 62.34%,其次是厚壁菌门 (14.64%)、变细菌门 (11.47%)、蓝藻门 (5.45%) 和拟杆菌门 (3.46%),剩余的其他 16 种细菌,包括梭杆菌门 (Fusobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、硝化螺旋菌门 (Nitrospirae) 等,相对百分比总和为

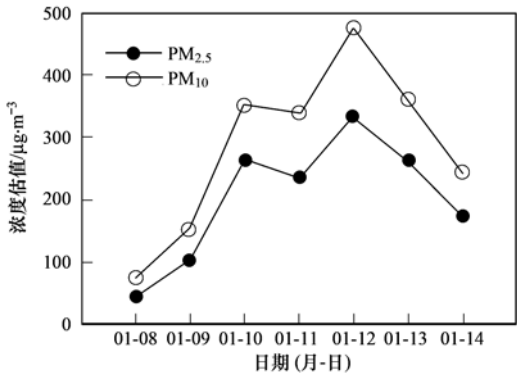


图1 2013年1月8~14日PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度估值  
Fig. 1 Mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> during 8<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> January, 2013

2.63%.

而在属水平上,取7 d PM<sub>2.5</sub>样品中丰度排在前10的细菌类群进行合并分析,共得到17个菌属,其相对百分比如表3. 从中可知,在连续7 d 采样条件下,PM<sub>2.5</sub>中所含细菌菌属的相对百分比差别不大,7 d 样品的主要菌属均为节杆菌属,其次为弗兰克氏菌属. 这与本研究小组用 Meta 测序分析方法分析同一批样本所得的结果<sup>[17]</sup>相同,即大多数细菌菌属在连续7 d 采样时间内相对百分比变化不明显. 但1月13日中,乳球菌属(*Lactococcus*)和束村氏菌属(*Tsukamurella*)的相对百分比含量与其余6 d 相比较高.

表3 7 d PM<sub>2.5</sub>样本前10丰度的细菌菌属的相对百分比/%

Table 3 Relative abundance of top 10 bacterial genera of PM<sub>2.5</sub> during 7 sampling days/%

| 细菌类群                              | 日期(月-日) |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                   | 01-08   | 01-09 | 01-10 | 01-11 | 01-12 | 01-13 | 01-14 |
| 节杆菌属                              | 24.10   | 29.75 | 29.13 | 31.75 | 31.14 | 17.20 | 25.93 |
| 弗兰克氏菌属                            | 13.64   | 13.06 | 11.04 | 13.68 | 10.23 | 9.10  | 10.17 |
| 地嗜皮菌属                             | 12.73   | 9.20  | 8.76  | 8.87  | 7.28  | 7.69  | 5.97  |
| 丙酸杆菌属( <i>Propionibacterium</i> ) | 8.20    | 6.73  | 6.92  | 6.33  | 5.74  | 5.00  | 6.98  |
| 类诺卡氏菌属( <i>Nocardioide</i> s)     | 7.23    | 6.29  | 6.41  | 6.11  | 6.14  | 6.09  | 5.12  |
| 副球菌属                              | 4.98    | 5.35  | 6.92  | 6.53  | 7.34  | 7.57  | 6.98  |
| 红球菌属( <i>Rhodococcus</i> )        | 4.53    | 5.53  | 5.57  | 4.72  | 5.33  | 2.51  | 3.44  |
| <i>Dolichospermum</i>             | 4.04    | 1.69  | 1.81  | 1.24  | 0.91  | 2.51  | 2.13  |
| 假诺卡氏菌属( <i>Pseudonocardia</i> )   | 3.97    | 3.65  | 2.71  | 3.87  | 2.56  | 5.40  | 3.30  |
| 链霉菌属( <i>Streptomyces</i> )       | 3.74    | 1.87  | 2.86  | 2.46  | 1.89  | 2.10  | 2.72  |
| 梭菌属( <i>Clostridium</i> )         | 1.49    | 3.95  | 4.24  | 4.43  | 7.34  | 4.25  | 6.57  |
| 动性杆菌属( <i>Planomicrobium</i> )    | 2.05    | 3.86  | 2.77  | 1.88  | 2.35  | 1.71  | 1.32  |
| 杆菌属( <i>Brachybacterium</i> )     | 3.24    | 1.58  | 4.14  | 1.38  | 2.05  | 3.69  | 4.02  |
| 微杆菌属( <i>Microbacterium</i> )     | 2.77    | 3.16  | 2.92  | 3.07  | 2.84  | 2.06  | 2.70  |
| 芽孢杆菌属( <i>Bacillus</i> )          | 0.73    | 1.75  | 2.09  | 1.41  | 3.31  | 2.75  | 4.59  |
| 乳球菌属                              | 0.00    | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.85  | 11.65 | 3.58  |
| 束村氏菌属                             | 2.54    | 2.58  | 1.72  | 2.27  | 2.70  | 8.72  | 4.47  |

2.2 16S 与 Meta 结果对比

将16S 与 Meta 测序所得序列上传至 MG-RAST,在属水平上对比至 Greengenes 数据库,对每天的数据选择丰度排在前50 的细菌类群,然后将7 d 的数据合并,分别得到16S PM<sub>2.5</sub>、16S PM<sub>10</sub> 的数据及 Meta PM<sub>2.5</sub>、Meta PM<sub>10</sub> 的数据. 将这四者(16S PM<sub>2.5</sub>、16S PM<sub>10</sub>、Meta PM<sub>2.5</sub>、Meta PM<sub>10</sub>)再次合并,在属的级别上,得到39 个16S 与 Meta 共有的细菌类群,对丰度排在前10 属的共有类群作出其相对百分比柱状图,如图2.

共有类群中的前10 属在16S 与 Meta 中的相对百分比有所不同. 弗兰克氏菌属和副球菌属在16S 的结果中相对百分比比较高,而考克氏菌属和地嗜皮菌属在 Meta 中相对含量较高. Yooseph 等<sup>[31]</sup>在其

研究中指出,基于16S 分析的细菌菌属的数量不同于 Meta 分析的结果. 这可能是一些特定的群落导致了基于16S 分析与 Meta 分析的不同. 16S 分析可以在属及属以上的水平鉴定微生物,且个别菌属的扩增效率在16S 分析和 Meta 分析中的差别比较大. 而 Meta 分析是对从环境中提取出的 DNA 直接进行建库、测序和分析,可以在种的水平上测定微生物,以提供更多的致病菌信息. 本研究小组基于同一批样品采用宏基因组的分析方法在种的水平上识别出颗粒物中大部分微生物类群是不致病的,但是一些呼吸道病原体微生物(肺炎链球菌)的序列也出现在 Meta 分析结果中,且其丰度随着颗粒物污染浓度的增加而增加. 本研究基于16S 测序的方法在属的水平上也发现了肺炎链球菌所在属类别上链球菌属

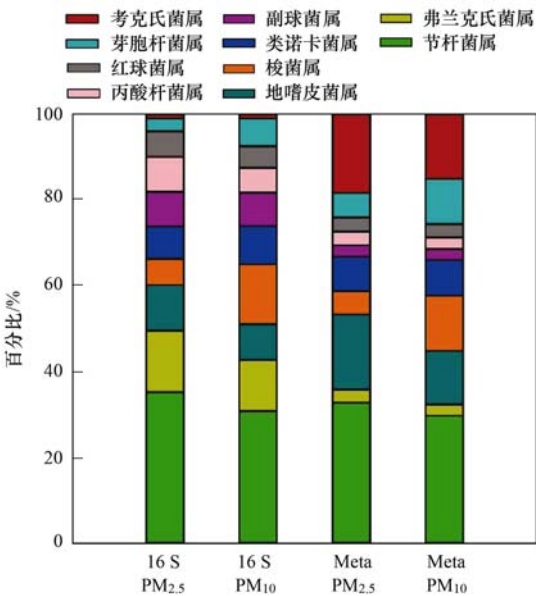


图2 16S 与 Meta 分析结果中前 10 属共有类群的相对百分比

Fig. 2 Relative percentage of bacterial community based on 16S and Meta analysis (the top ten genus)

的存在.

2.3 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的细菌群落特征对比

为比较 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中细菌群落结构特征的差异,将 7 d PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 样品分别汇总后在门和属的水平上进行对比分析. 在门水平上,放线菌门、厚壁菌门、变形菌门、蓝藻门、拟杆菌门的相对百分比含量在两种粒径范围内差别不大,如图 3 所示. 但放线菌门在 PM<sub>2.5</sub> 中相对百分比含量大于 PM<sub>10</sub>, 而厚壁菌门在 PM<sub>10</sub> 中的相对含量大于 PM<sub>2.5</sub>. 可能原因是放线菌主要以孢子状态存在于大气颗粒物中,这也使得其在细颗粒物中相对量较多,而厚壁菌门在大气中更倾向以细菌聚合物形式存在,因而与大颗粒更相关<sup>[23]</sup>.

在属水平上,各取 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中丰度前 10 的菌属合并后,作相对百分比图如图 2 所示. 从中可以看出,节杆菌属、弗兰克氏菌属、地嗜皮菌属等在 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中的相对百分比含量差别不大,而梭菌属在 PM<sub>10</sub> 中的相对百分比含量较大,可能原因是梭菌属本身粒径比较大,因此在 PM<sub>2.5</sub> 中的相对含量比较少<sup>[6]</sup>. 由此可知,霾污染时 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 样品中细菌群落结构差别不大,这也与其他研究结果相一致. Franzetti 等<sup>[23]</sup> 研究了米兰冬夏两季大气 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中细菌群落结构特征,发现不同粒径间的细菌类群差异小于不同季节间细菌群落结构的差异,即同一季节不同粒径范围细菌类群有较大的相似性. Bowers 等<sup>[6]</sup> 分析了美国科罗拉多州近地面城

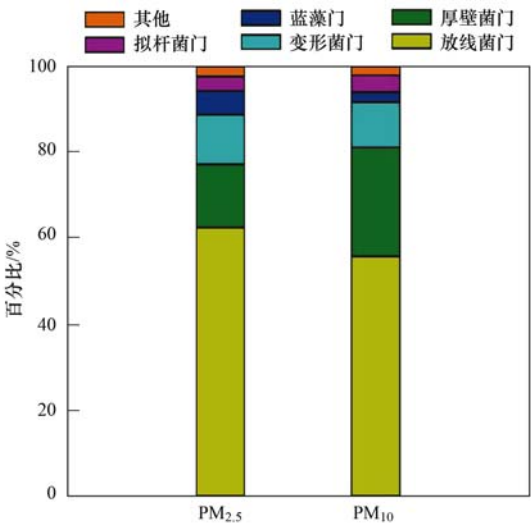


图3 门水平上 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中细菌群落相对百分比

Fig. 3 Relative percentage of bacterial community in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at phylum level

市和农村地区大气中粗颗粒物和细颗粒物中细菌的多样性,结果表明不同地区的细菌群落相对丰度的差异大于不同粒径段间的细菌类群的差异.

2.4 北京与国外其他三项研究结果的对比

为更好地对国内外大气颗粒物中细菌进行对比分析,特将米兰、纽约和对流层采样样本测序分析的原始数据上传到 MG-RAST,设置相同的限定条件 (Max. e-value Cutoff = 1e-5, Min. % Identity Cutoff = 99%, Min. Alignmnet Length Cutoff = 32),得出其细菌类群的丰度. 米兰的研究采用 250 L·min<sup>-1</sup> 的大流量采样器,于 2010 年春夏秋冬 4 个季节每个季节连续采集 10 d 的样品,每次采样持续 24 h,共得到 40 个采样滤膜样品<sup>[18]</sup>. 纽约的研究采用液体撞击器,采样流量为 250 ~ 300 L·min<sup>-1</sup>,每次采样体积为 5 ~ 6 m<sup>3</sup>,于 2007 年 3 月、8 月及 2008 年 8 月这 3 个时间段在 7 个地铁站和 3 个临近公园进行采样,得到共 26 个采样样品<sup>[19]</sup>. 对流层的研究,于 2010 年 8 月至 9 月,平均每次采集 3 h,采样体积约 6 m<sup>3</sup>,采集了距海平面 10 km 高海拔处的 9 个空气样品<sup>[20]</sup>.

在门级别上,对四项研究的细菌群落结构作相对百分比,结果如图 4 所示. 北京、米兰和纽约细菌群落结构比较相似,细菌类群依照相对百分比含量从大到小排列依次为:放线菌门、厚壁菌门、变形菌门、拟杆菌门等. 而对流层所发现的细菌类群依照相对百分比含量从大到小排列依次为:变形菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、放线菌门.

在属级别上,各个地点呈现出特有的细菌群落

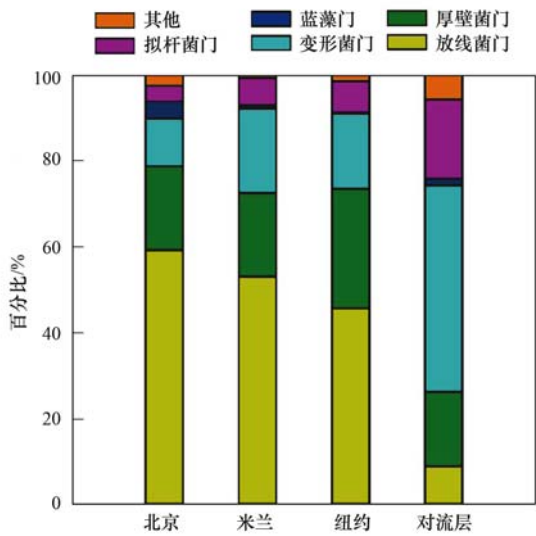


图4 门级别上北京与米兰、纽约、对流层的细菌群落相对百分比

Fig. 4 Relative percentage of bacterial community in Beijing, Milan, New York and troposphere at phylum level

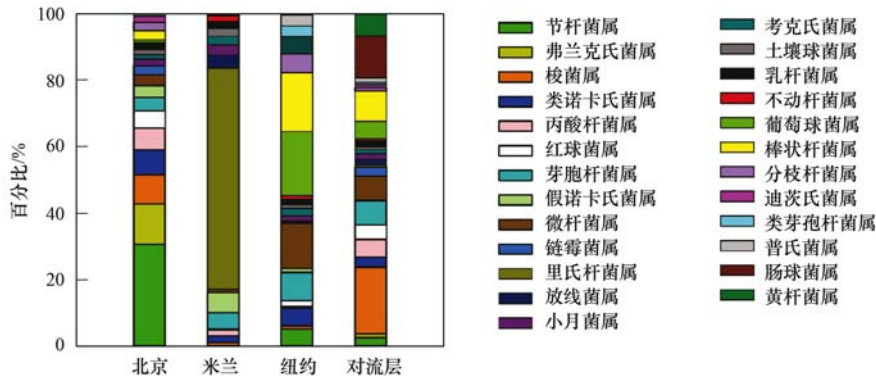


图5 北京、米兰、纽约与对流层共有类群的相对百分比(前10属合并)

Fig. 5 Relative percentage of bacterial community of Beijing, Milan, New York and troposphere (merge of top 10 genus)

相似的结论,即尽管在属级别上各采样地点存在特有的群落结构特征,在门级别上的群落结构有很高的相似性,即一些细菌菌属在不同大气环境中普遍存在. 这可能是由于这些特定的细菌菌属比较容易气溶胶化,并能在一些相对不利的环境中生存,另外大气输运过程也有助于微生物的长距离传输.

3 结论

(1)北京霾污染时7 d连续采样条件下,细菌群落结构特征在门和属的水平上均变化不大.

(2)16S 序列与 Meta 基因组两种分子生物学分析结果比较表明,丰度前 50 的细菌类群中有 39 个相同的属类群,部分细菌类群在两种测序结果中的相对百分比有所差别,弗兰克氏菌属和副球菌属在 16S 结果中相对含量较高,而考克氏菌属和地嗜皮

结构特征. 分别取 4 个城市丰度为前 10 的菌属合并分析,得到相对百分比的柱状图,如图 5 所示. 节杆菌属、里氏杆菌属 (*Riemerella*)、葡萄球菌属 (*Staphylococcus*)、梭菌属分别为北京、米兰、纽约和对流层最主要的细菌类群. 除了采样地点的差异,这可能也受到采样季节等因素的影响.

北京霾污染时采集的 14 个样品 ( $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  汇总所得) 16S 测序分析的细菌多样性较高, Alpha 多样性为: 67 ~ 164, 而对流层测序分析得到的细菌群落的多样性最低, Alpha 多样性为: 5 ~ 26. 导致多样性差别的可能影响因素之一是各研究的测序深度不同.

Fierer 等<sup>[32]</sup>发现尽管他们的大气微生物样品的采样地点和采样气象条件同其他地点所采集的样品不尽相同,但是当采用相同分析方法时各样品的微生物群落结构之间存在很好的相似性. 本研究结果与米兰、纽约、对流层的测序结果对比分析也得出

菌属在 Meta 结果中相对含量较高. 并且在 16S 测序分析中发现了宏基因组测序分析结果中识别出的肺炎链球菌所在属: 链球菌属.

(3)  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  之间细菌群落结构在门和属水平上均差别不大,部分类群在不同粒径中的相对百分比有所差别. 如在门水平上,放线菌门在  $PM_{2.5}$  中的相对百分比比较大,而厚壁菌门在  $PM_{10}$  中的相对百分比比较大. 而在属水平上,梭菌属在  $PM_{10}$  中的相对百分比比较大.

(4)与国外三项基于 16S 的研究结果相比,北京大气中检测出的细菌多样性最高. 四项研究尽管有着不同的采样地点、时间和采样条件,其细菌群落中都存在放线菌门、变形菌门、厚壁菌门等类群. 其中,对流层呈现出变形菌门和拟杆菌门占主导的细菌群落结构特征. 节杆菌属、里氏杆菌属、

葡萄球菌属和梭菌属分别为北京、米兰、纽约和对流层最主要的细菌类群。

#### 参考文献:

- [1] Jiang J K, Zhou W, Cheng Z, *et al.* Particulate matter distributions in China during a winter period with frequent pollution episodes (January 2013) [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(2): 494-503.
- [2] Li Z, Gu X, Wang L, *et al.* Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**: 10171-10183.
- [3] Bi J R, Huang J P, Hu Z Y, *et al.* Investigating the aerosol optical and radiative characteristics of heavy haze episodes in Beijing during January of 2013 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(16): 9884-9900.
- [4] Jaenicke R. Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere [J]. *Science*, 2005, **308**(5718): 73-73.
- [5] Lighthart B. Mini-review of the concentration variations found in the al fresco atmospheric bacterial populations [J]. *Aerobiologia*, 2000, **16**(1): 7-16.
- [6] Bowers R M, Clements N, Emerson J B, *et al.* Seasonal variability in bacterial and fungal diversity of the near-surface atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(21): 12097-12106.
- [7] Bowers R M, Sullivan A P, Costello E K, *et al.* Sources of bacteria in outdoor air across cities in the midwestern United States [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(18): 6350-6356.
- [8] Lighthart B, Shaffer B T, Frisch A S, *et al.* Atmospheric culturable bacteria associated with meteorological conditions at a summer-time site in the mid-willamette valley, oregon [J]. *Aerobiologia*, 2009, **25**(4): 285-295.
- [9] Lighthart B, Shaffer B T. Airborne bacteria in the atmospheric surface layer: temporal distribution above a grass seed field [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(4): 1492-1496.
- [10] 方治国, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 北京城市空气细菌群落结构与动态变化特征 [J]. *微生物学报*, 2006, **46**(4): 618-623.
- [11] 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.
- [12] Amann R I, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation [J]. *Microbiological Reviews*, 1995, **59**(1): 143-169.
- [13] Maron P A, Lejon D P H, Carvalho E, *et al.* Assessing genetic structure and diversity of airborne bacterial communities by DNA fingerprinting and 16S rDNA clone library [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3687-3695.
- [14] Bovallius A, Bucht B, Roffey R, *et al.* Three-year investigation of the natural airborne bacterial flora at four localities in sweden [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **35**(5): 847-852.
- [15] Peccia J, Hernandez M. Incorporating polymerase chain reaction-based identification, population characterization, and quantification of microorganisms into aerosol science: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(21): 3941-3961.
- [16] 周煜, 陈梅玲, 姜黎, 等. 16S rRNA 序列分析法在大气微生物检测中的应用 [J]. *生物技术通讯*, 2000, **11**(2): 111-114.
- [17] Cao C, Jiang W J, Wang B Y, *et al.* Inhalable microorganisms in Beijing's PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> pollutants during a severe smog event [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1499-1507.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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*, 2013, **110**(7): 2575-2580.
- [21] 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*, 2007, **104**(1): 299-304.
- [22] 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*, 2010, **5**(4): 601-612.
- [23] Franzetti A, Gandolfi I, Gaspari E, *et al.* Seasonal variability of bacteria in fine and coarse urban air particulate matter [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(2): 745-753.
- [24] Han Y P, Li L, Liu J X. Characterization of the airborne bacteria community at different distances from the rotating brushes in a wastewater treatment plant by 16S rRNA gene clone libraries [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(1): 5-15.
- [25] Bartram A K, Lynch M D J, Stearns J C, *et al.* Generation of multimillion-sequence 16S rRNA gene libraries from complex microbial communities by assembling paired-end Illumina reads [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(11): 3846-3852.
- [26] Meyer F, Paarmann D, D'Souza M, *et al.* The metagenomics RAST server-a public resource for the automatic phylogenetic and functional analysis of metagenomes [J]. *BMC Bioinformatics*, 2008, **9**: 386.
- [27] DeSantis T Z, Hugenholtz P, Larsen N, *et al.* Greengenes, a

- chimera-checked 16S rRNA gene database and workbench compatible with ARB [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(7): 5069-5072.
- [28] Caporaso J G, Lauber C L, Walters W A, *et al.* Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(8): 1621-1624.
- [29] Claesson M J, O'Sullivan O, Wang Q, *et al.* Comparative analysis of pyrosequencing and a phylogenetic microarray for exploring microbial community structures in the human distal intestine[J]. *PloS One*, 2009, **4**(8): e6669.
- [30] Jeraldo P, Chia N, Goldenfeld N. On the suitability of short reads of 16S rRNA for phylogeny-based analyses in environmental surveys[J]. *Environmental Microbiology*, 2011, **13**(11): 3000-3009.
- [31] Yooseph S, Andrews-Pfannkoch C, Tenney A, *et al.* A metagenomic framework for the study of airborne microbial communities[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(12): e81862.
- [32] Fierer N, Liu Z Z, Rodriguez-Hernandez M, *et al.* Short-term temporal variability in airborne bacterial and fungal populations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(1): 200-207.

## 《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:[hjcx@rcees.ac.cn](mailto:hjcx@rcees.ac.cn)

网 址:[www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                            |                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method .....                                         | WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)       |
| Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing .....                                                                                                                 | XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)       |
| Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants .....                                                                                                           | CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)        |
| Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information .....                                                                                                                      | FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)     |
| Chemical Compositions in PM <sub>2.5</sub> and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China .....                                                                                                        | YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)             |
| Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM <sub>10</sub> .....                                                                                        | XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)         |
| Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data .....                                              | ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)     |
| Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin .....                                                                                                       | ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)                          |
| Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications .....                                                                                                | LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)                   |
| Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River" .....                                                                              | PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)        |
| Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City .....                                                                                                                                        | WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809) |
| Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River .....                                                                                                     | ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)      |
| Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau .....                                                                                                                              | YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)  |
| Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China .....                                                                                 | LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)      |
| Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory .....                                                                                                                              | ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)                         |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang .....                                                                                                     | FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)            |
| Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System .....                                                                                                                      | LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)     |
| Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region .....                                                                                   | BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)         |
| Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment .....                                                                                                  | LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)       |
| Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ , $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China ..... | Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)                   |
| Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth .....                                                                                                       | LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)           |
| Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application .....                                                                                                                  | YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)                                   |
| Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope .....                                                                                                            | WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)       |
| Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment .....                                                                                                                                             | WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)              |
| Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation .....                                                                                              | AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)    |
| Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline .....                                                                                                                                                       | CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)     |
| Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal .....                                                                                                                      | FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)      |
| Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process .....                                                                                                                                               | WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)          |
| Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems .....                                                                                 | GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)         |
| Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor .....                                                                                                               | WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)           |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone .....                                                                                     | DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)                                         |
| Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China .....                                                                                  | WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)             |
| Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China .....                                                                                                                | DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)  |
| Responses of Soil and Plant $^{15}\text{N}$ Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China .....                                                            | LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)       |
| Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau .....                                                                                                                          | LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)             |
| Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere .....                                                                     | CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)    |
| Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus .....                                                                                                                         | ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)                                |
| Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation .....                                                                                                        | ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)      |
| Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil .....                                                                                                                  | TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)  |
| Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag .....                                                                | CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)  |
| Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism .....                                                                               | YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)           |
| Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation .....                                                                                                  | JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)     |
| Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L. ....                                                                                                                    | ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)                         |
| Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L. ....                                                                                              | LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)      |
| Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil .....                                                                                                        | TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)          |
| Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable .....                                                                                                                                                 | SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)       |
| Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms .....                                                                                                                    | YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)              |
| Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation .....                                                                                            | MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)         |
| Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature .....                                                                                                         | HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)        |
| Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure .....                                                                                                           | HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)            |
| Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO <sub>2</sub> Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit .....                                                                                    | LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)             |
| Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs .....                                                                                                                             | HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)                  |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                            | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行