

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的藜袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

九龙江流域潜在病原菌污染分析

侯丽媛^{1,2}, 胡安谊^{1*}, 马英³, 于昌平¹

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 集美大学水产学院, 厦门 361021)

摘要: 近年来, 由于流域经济快速发展和城镇化进程加快等原因, 九龙江水污染问题日趋严重. 为全面认识九龙江流域病原菌的分布状况, 应用 16S rRNA 基因-454 焦磷酸测序技术测定九龙江支流西溪、北溪水体和沉积物中细菌 16S rRNA 基因 V1 ~ V3 高变区, 共获得 204 216 条高质量序列. 通过与病原菌参考数据库对比分析发现, 九龙江分布有 68 个潜在病原菌属, 占序列总量的 6.1%. 其中梭菌属 (*Clostridium*)、分支杆菌属 (*Mycobacterium*) 和鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*) 在所有样品中都有检出, 且丰度最高, 分别占病原菌属序列总量的 54.5%、5.9% 和 5.6%. 在种水平上, 九龙江分布有 48 种病原菌, 占序列总量的 0.76%. 其中 *Afipia felis*、*Mycobacterium asiaticum*、*Clostridium baratii*、*Brucella melitensis* 和 *Delftia tsuruhatensis* 是丰度最高的 5 种病原菌, 分别占病原菌种序列总量的 48.9%、20.3%、8%、2.7% 和 1.7%. 统计分析表明, 九龙江水体中分布的病原菌种类数 (属或种) 显著高于沉积物中, 且西溪水体检出的病原菌种类 (属或种) 和丰度最高, 说明九龙江水体, 尤其是西溪水体受病原菌污染的风险较高. 此外, 相关分析表明, 九龙江水体中病原菌的种类数 (属或种) 和丰度与营养盐 (氮、磷) 有着显著的正相关关系, 说明九龙江水体中分布的病原菌与沿岸的人类活动, 如养殖业、污水排放等密切相关. 因此, 为保证流域的公共卫生安全, 需进一步加强污染源清理整顿工作, 开展水环境病原菌的实时监测.

关键词: 九龙江流域; 潜在病原菌; 16S rRNA 基因; 454 焦磷酸测序; 生物信息分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1742-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.015

Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed

HOU Li-yuan^{1,2}, HU An-yi¹, MA Ying³, YU Chang-ping¹

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Recently, the human activities including economic growth and urbanization posed serious environmental health risks to the Jiulong River Watershed (JRW). In order to gain a full understanding of the distribution of potential pathogenic bacteria (PPB) in this area, we used 16S rRNA amplicon pyrosequencing technology to investigate planktonic and benthic bacterial community in two main tributaries (North River, NR, and West River, WR) of the Jiulong River (JR). At the genus level, a total of 68 genera of PPB were identified in JR, which accounted for 6.1% of total gene sequences. *Clostridium*, *Mycobacterium* and *Sphingomonas* were three most dominant genera, which accounted for 54.5%, 5.9% and 5.6% of the total gene sequences respectively, and occurred in all samples. At the species level, a total of 48 species of PPB were identified in JR, which accounted for 0.76% of total gene sequences. *Afipia felis*, *Mycobacterium asiaticum*, *Clostridium baratii*, *Brucella melitensis* and *Delftia tsuruhatensis* were the five most dominant species, and accounted for 48.9%, 20.3%, 8%, 2.7% and 1.7%, respectively. Statistical analysis indicated that the number of taxa (species or genera) of PPB in JR water samples were significantly more than those from JR sediment samples. Moreover, WR water samples harbored the most abundant and diverse of PPB, suggesting that WR water might have a high potential risk for pathogen contamination. In addition, statistical analysis indicated that the diversity and abundance of PPB (species or genera) are significantly positively correlated with nutrient (nitrogen and phosphorus) concentrations, suggesting that human activities in the JRW such as sewage discharge from livestock and wastewater treatment facilities play important roles on affecting the distribution of PPB in JR. Therefore, in order to protect the public health, more efforts are needed to prevent water contamination, and conduct the real-time monitoring of PPB in JR.

Key words: Jiulong River watershed; potential pathogenic bacteria; 16S rRNA gene; 454 pyrosequencing; bioinformatic analysis

水是人们赖以生存的珍贵资源, 同时也是微生物或病原菌的传播载体. 水体中的病原菌主要来自

收稿日期: 2013-09-03; 修订日期: 2013-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41106096); 福建省自然科学基金项目 (2013J05057); 宁波市科技计划项目 (2013A610174); 厦门市科技计划项目 (3502Z20120012); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目 (IUEQN201307); 中国科学院城市与环境健康重点实验室开放项目 (KLUEH201105)

作者简介: 侯丽媛 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: lyhou@iue.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: ayhu@iue.ac.cn

于人畜粪便、垃圾、医疗污水、生活污水以及工业废水等^[1]。病原菌随着污水排放进入自然水体中,其中大量病原体能够长期存活,对水生生物及人类健康产生潜在的危险,从而引发水域生态环境质量问题。时至今日,水环境污染及水传播造成的病原体感染依旧是备受关注的全球性环境污染问题之一^[2,3]。因此,水域病原菌污染一直是环境污染防治的重要议题。虽然,现有污水处理设施可去除污水中含有的部分病原菌,但仍有相当数量的病原菌被排放到自然水体^[4~6]。而污水厂二级出水未经过深度处理直接回用于城市绿化和道路冲洗或降尘,也会导致病原体的污染和传播,对公众健康产生潜在威胁^[7]。此外,由于我国国情限制,乡镇农村的污水处理设施建设尚未全面完成,水域生态环境监测和污染防治工作形势严峻。当前,我国水域病原菌污染状况调查工作也相对较少,还未把健康风险评价列入常规环境评价工作中^[8~10],水环境病原体污染风险评价方面的研究已成为当下的热点课题之一。

早期的病原菌鉴定和检测主要借助显微镜和分离培养技术,然而由于这些方法自身的局限性和偏好性,极大的限制了人们对环境微生物包括病原菌的认识^[1]。因此,开发快速、准确的病原菌检测手段,防治病原菌污染传播,是保障生态环境健康和公共卫生安全的重要基础。近 20 年来,分子生物学技术的应用,如聚合酶链式反应(PCR)、克隆文库(clone library)、定量 PCR(quantitative PCR, qPCR)和微点阵列(microarray)等,极大促进了人们对环境病原菌污染的认知^[1,4]。然而这些“传统”分子生物学技术仅揭开了冰山一角——它们只能分析环境中分布的优势菌群(dominant species, 相对丰度高于总生物量的 1%)^[11]。近年来,高通量测序技术(high-throughout sequencing)的应用为人们进一步深入认识环境中的微生物提供了重要契机^[1,11~13]。与以往的分子生物学技术相比,高通量测序技术可获得海量数据,偏好性和单位运行成本较低,并且理论上可检测出环境中所有的微生物。目前,多位学者应用该技术成功检出了空气、活性污泥、人体以及医院中分布的病原菌^[14~17]。相对于以往检测病原菌常用的 qPCR 和 microarray 技术,高通量测序技术的优势在于不仅能够提供具体的序列信息,还可同时检测多种病原菌,并具有检测、发现新型病原菌的潜力。然而此项技术尚未在国内应用,且当前文献中的病原菌数据库尚不全面。

九龙江是福建省的第二大河流,主要由西溪、

北溪两大支流组成,流域面积 14 000 km²,是龙岩、漳州和厦门三市的主要饮用水源地^[12](图 1)。由于人类活动和城市化进程影响,九龙江水质富营养化程度加剧,生态环境问题日益严峻^[18~20]。一方面陆源性污染可能会促进潜在病原菌的传播和繁殖^[21,22],另一方面也会导致抗生素抗性基因(antibiotic resistance genes, ARGs)的大量输入^[22,23]。但当前九龙江流域的微生物相关研究还较为缺乏。本文应用 16S rRNA 基因-454 焦磷酸测序技术,对北溪、西溪的浮游和底栖细菌群落开展研究,测定细菌 16S rRNA 基因 V1~V3 高变区序列,并与病原菌参考数据库对比分析,获得了九龙江流域潜在病原菌污染状况的初步数据。考虑到营养盐的浓度高低及形态组成可在一定程度上反映九龙江地区的人类活动强度与类型^[18~20],因此进一步分析了病原菌丰度与营养盐浓度之间的潜在相关关系,以期后续九龙江流域的病原微生物污染来源及公共安全风险评估提供资料。

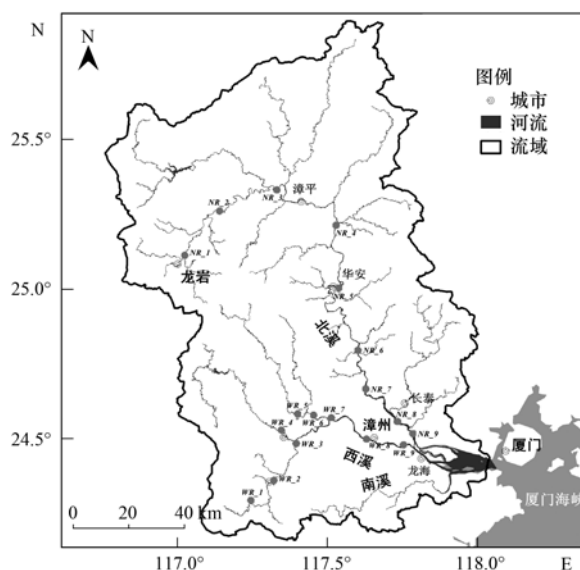


图 1 九龙江采样站位示意

Fig. 1 Location of sampling stations in Jiulong River

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

2011 年 10 月,于九龙江(Jiulong River, JR)两大支流西溪(West River, WR)和北溪(North River, NR)采集样品^[12]。图 1 展示了采样点的地理位置(北溪和西溪各设置 9 个采样点),共采集了 17 个表层水体样品和 18 个沉积物样品(NR_8 站位水样瓶在搬运过程中破裂,因此未进行后续分子生物

学分析). 水样用 0.22 μm 聚碳酸酯滤膜 (Millipore 公司) 过滤收集浮游细菌; 沉积物置于 50 mL 无菌离心管. 样品带回实验室后置于 -80°C 冰箱保存. 同时, 采集水样用于测定营养盐 ($\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 和 SRP).

1.2 环境参数测定

表层水体的温度、电导、pH 和 DO 用 WTW 水质分析仪 (WTW 公司) 现场测定. 用于测定营养盐的水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后, 用 AA3 Auto-Analyzer 营养盐自动分析仪 (Bran + Luebbe Co., 德国) 测定. 环境参数的测定方法和数据参见文献[12].

1.3 DNA 提取、16S rRNA 基因片段 PCR 扩增和 454 焦磷酸测序

水样 DNA 提取方法修改自文献[24]. 沉积物 DNA 用 FastDNA Spin kit for Soil 试剂盒 (MP Biomedicals 公司) 提取. DNA 片段大小和质量用 0.8% 的琼脂糖凝胶电泳和 Nanodrop 分光光度计 (Thermo Fisher 公司) 测定.

细菌 16S rRNA 基因 V1 ~ V3 高变区用 27F/534R 引物对扩增, 27F 引物 5' 端带有 10 bp 的序列标签用于样品区分[12]. PCR 反应程序如下: 94°C 预变性 5 min; 94°C 变性 30 s, 55°C 退火 30 s, 72°C 延伸 90 s, 共 25 个循环; 最终 72°C 延伸 7 min. PCR 产物用胶纯化试剂盒 (Qiagen 公司) 纯化. 回收产物浓度用 Qubit® dsDNA BR Assay Kit (Life Technologies 公司) 进行精确定量并等量混合, 送至深圳华大基因科技公司完成 454 焦磷酸测序. 序列数据递交至 NCBI SRA 数据库 (序列号: SRX193676).

1.4 序列分析

454 测序数据用 QIIME V1.4.0 软件进行分析[25]. 为保证生物信息学分析质量, 对原始数据进行多步质控[12], 包括: ①去除序列长度小于 150 bp 的序列; ②去除含有模糊碱基 N 的序列; ③去除平均测序准确度低于 99.7% 的序列; ④去除 PCR 引物和识别标签中含有模糊碱基的序列; ⑤去除含有超过 6 个连续同聚体 (相同碱基) 的序列; ⑥用 Acacia V1.52 软件进行序列校正[26]. 操作分类单元 (operational taxonomic unit, OTU) 以 97% 序列相似度划分, 计算多样性指数. 序列用 RDP Classifier 算法进行种属分类[12].

1.5 病原菌数据库构建及九龙江流域潜在病原菌检测

1.5.1 病原菌 16S rRNA 基因数据库构建

综合文献[14, 17, 27 ~ 29], 从 Greengenes (2011 版)[30] 和 Silva SSURef108 database[31] 中共收集了 283 个代表性病原细菌的 16S rRNA 基因序列 (图 2).

1.5.2 九龙江流域潜在病原菌检测

①基于 Taylor 等[32] 总结的病原微生物名录, 本研究首先从属 (Genus) 级别分析了九龙江细菌群落中的潜在病原菌属 (即该属中曾有纯系菌株被认定为病原菌); ②通过序列比对分析 (BLASTn, $e \text{ value} \leq 1\text{e}-10$; $\geq 90\%$ coverage), 从九龙江 454 焦磷酸序列数据中选取与数据库中病原菌 16S rRNA 基因序列相似度大于 97% (种) 和 99% (亚种) 的序列.

1.6 统计分析

应用 PAST 软件[33] 中的 Spearman correlation 和 Mann-Whitney 模块分别进行相关分析和显著性检验; 应用 Clustering 模块 (Spearman 相关系数) 分析九龙江潜在病原菌种群结构的分布趋势, 同时用相似性百分比分析 (SIMPER) 模块 (Bray-Curtis 指数) 分析水体和沉积物中潜在病原菌的分布差异.

2 结果与讨论

2.1 九龙江细菌群落的 RDP 分类分析

454 焦磷酸测序数据经质控分析后, 共获得 204 216 条高质量细菌 16S rRNA 基因序列 (每样本 $5\,835 \pm 1\,797$ 条序列), 平均长度约为 360 bp. 图 3 展示了 RDP Classifier 的种属分类结果. 总体上, 约 90.8% 的序列可归入 34 个门 (phylum) (图 3). 但随着分类等级降低, 可归类的序列数就减少: 约 87.6%、79.3%、59.2% 和 40.2% 的序列可划分到确定的纲、目、科和属 (图 3). 水体样品中可分类序列所占比重显著高于沉积物中的 (Mann-Whitney test, $P < 0.001$). 这说明, 九龙江细菌群落的多样性较高, 而当前微生物分类数据库的种种不足 (序列数量和分类认识) 也是导致以上分类结果的主要因素之一[12, 34].

2.2 属级别潜在病原菌多样性分析

与 Taylor 等[32] 总结的病原菌数据库对比分析发现, 九龙江细菌群落共含有 68 个潜在病原菌属 (以下简称“病原菌属”), 分别隶属于变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、螺旋体门 (Spirochaetes)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、梭杆菌门 (Fusobacteria)、柔膜菌门 (Tenericutes) 和纤维杆菌门 (Fibrobacteres), 占序列总量的 6.1% (图 4). 其中, Firmicutes、

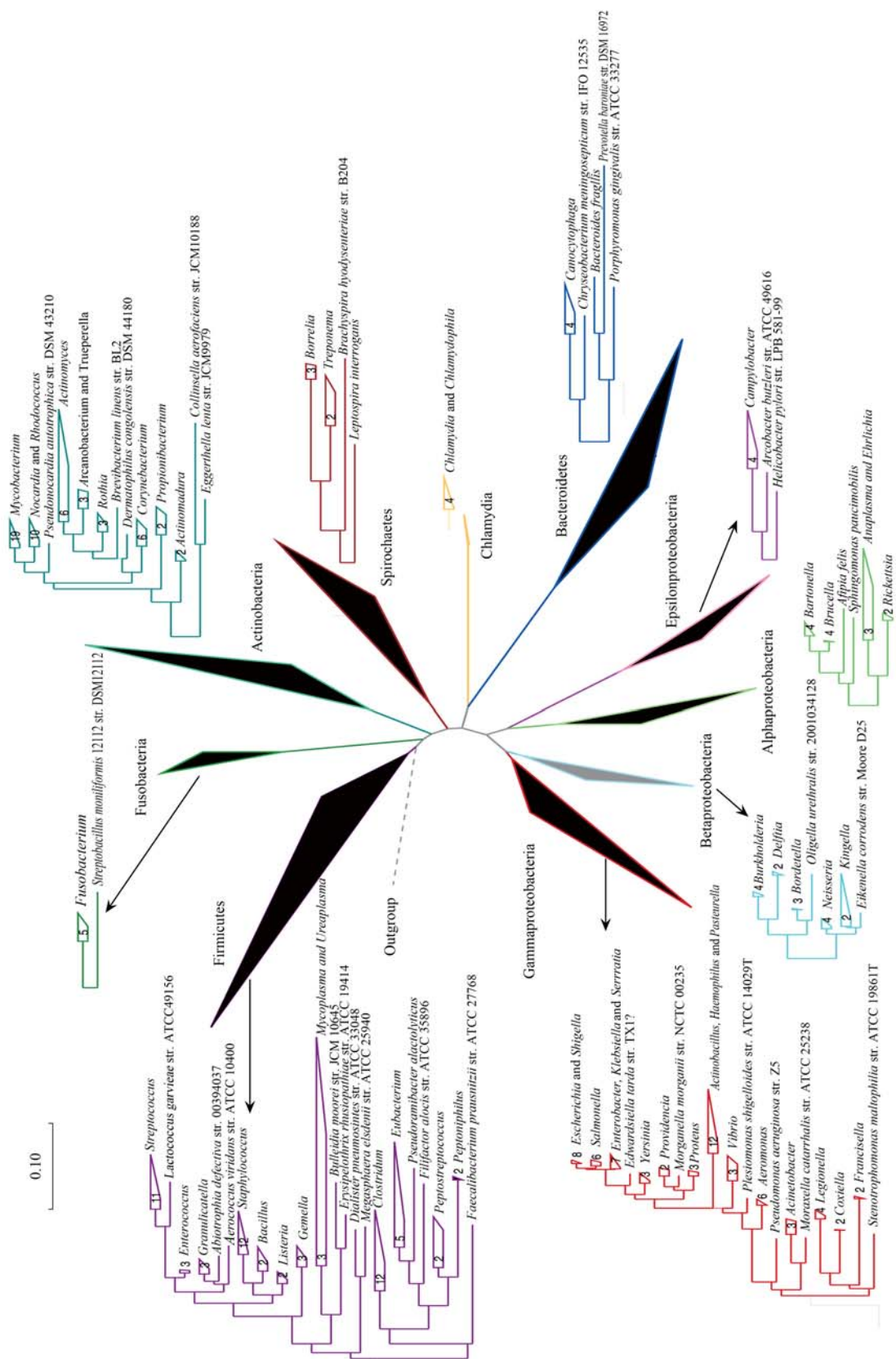


图2 病原菌 16S rRNA 基因系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree of 16S rRNA genes of pathogenic bacteria

Proteobacteria 和 Actinobacteria 是丰度最高的 3 个门,分别占病原菌属序列总量的 65.9%、20% 和 10.4%。总体上,68 个病原菌属在九龙江水样中均有检出,而沉积物中仅分布有 53 个属:北溪水体、

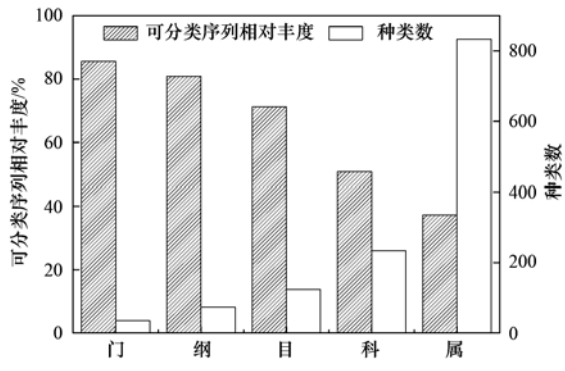


图3 九龙江浮游和底栖细菌群落的 RDP 分类结果
Fig. 3 RDP classification results of JR planktonic and benthic bacterial communities

北溪沉积物、西溪水体和东溪沉积物分别分布有 49、44、63 和 47 个病原菌属[图 4(b)]. 进一步深入分析发现,梭菌属(*Clostridium*)、分支杆菌属(*Mycobacterium*)和鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)是分布最广泛的病原菌属,在所有样品中都有检出,

同时也是丰度最高的 3 个属,分别占病原菌属序列总量的 54.5%、5.9% 和 5.6%. 而产碱杆菌属(*Alcaligenes*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)、邻单胞菌属(*Plesiomonas*)、束村氏菌属(*Tsukamurella*)、塞巴鲁德氏菌属(*Sealdella*)、支原体(*Mycoplasma*)仅在单个样本中检出,其丰度较低($<0.01\%$)[图 4(b)]. 此外,需要注意的是,约有 59.8% 的序列不能划分到确定的属,其中可能包含对人和动植物有致病性的潜在病原菌.

统计分析表明,九龙江水体中的病原菌属种类(每样本平均 28 ± 10 个属)显著高于沉积物含有的病原菌属种类(每样本平均 18 ± 6 个属)(Mann-Whitney test, $P < 0.001$). 西溪水体中的病原菌属种类最多(Kruskal-Wallis test, $P < 0.05$),丰度最高(Friedman test, $P < 0.001$),说明西溪水体受病原菌污染的风险较高,对公共卫生安全可能具有较大的潜在危害. 图[4(a)]展示了九龙江流域病原菌属

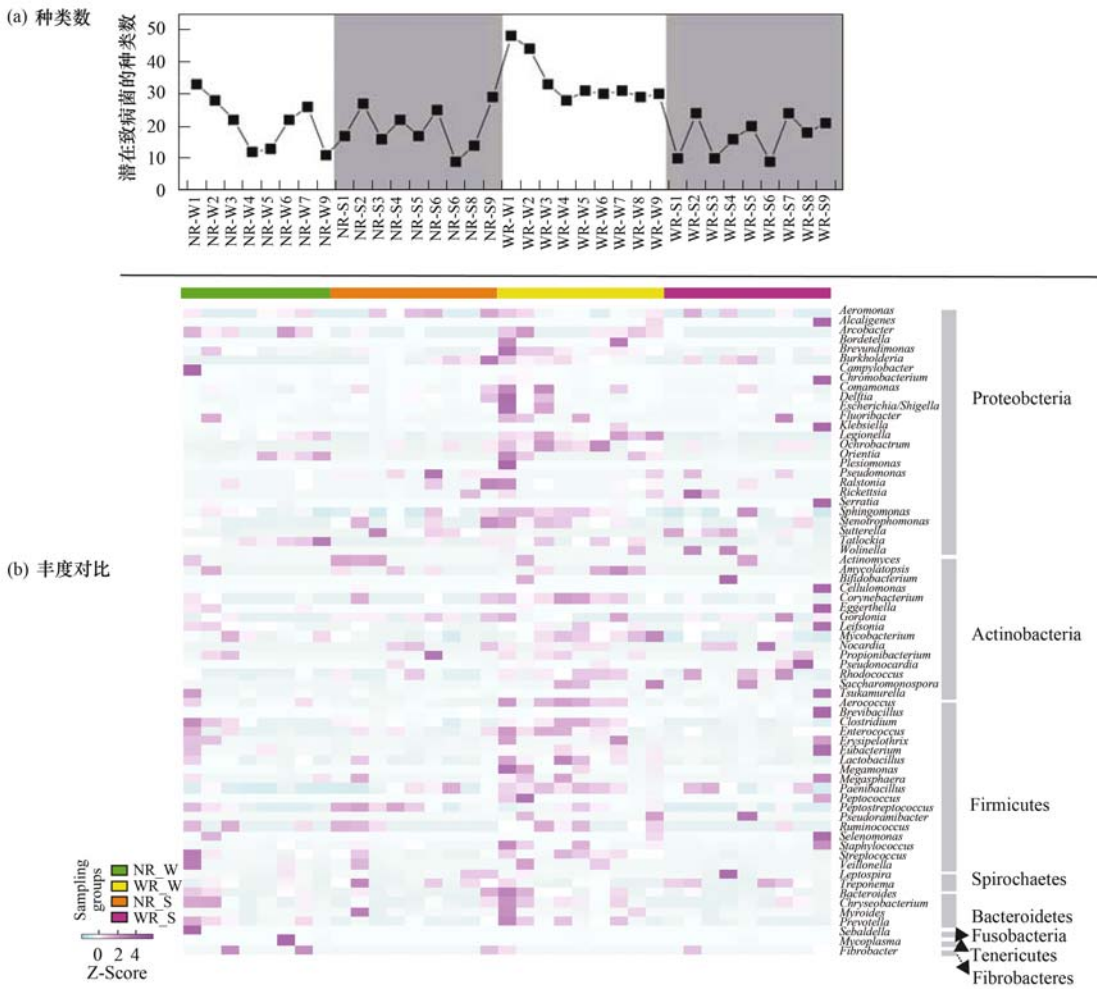


图4 属级别上九龙江潜在病原菌的种类数和丰度对比
Fig. 4 Taxonomic number and relative abundance of potential pathogenic bacterial genus in the Jiulong River

的分布情况: 西、北溪水体中的病原菌属的种类数沿河流流向递减(北溪下游略有增加), 而沉积物中的病原菌属分布则无明显规律. 此外, 分布有较多病原菌属的站位(或样本), 其病原菌属的丰度也较高(spearman correlation, $r = 0.84$, $P < 0.001$) (图4). 结合环境因子分析发现, 九龙江水体中病原菌属的种类数与总无机氮浓度呈显著正相关(spearman correlation, $r = 0.55$, $P < 0.05$), 病原菌属的丰度与无机磷浓度呈显著正相关(spearman correlation, $r = 0.62$, $P < 0.01$). 由于九龙江流域的营养盐输入多来源于城镇建设、养殖业和农业生产, 其浓度和形态组成可以间接反映沿岸人类活动的强度与类型^[18~20], 因此病原菌多样性、丰度与营养盐之间的阳性相关说明沿岸人类活动可能是病原菌的重要来源^[35]. 然而, 这些相关关系也有可能是由高浓度营养盐促进病原菌繁殖造成的^[21,22,36]. 而其他环境因子如温度等, 也可能是影响病原菌分布的重要因素^[36].

2.3 种水平上潜在病原菌多样性分析

Chakravorty 等^[27]比较 110 种病原菌 16S rRNA 基因的 V1 ~ V8 高变区序列发现, V1 ~ V3 高变区是分辨病原菌种的最佳区域. 因此, 为了进一步从种级别上明确九龙江流域潜在病原菌的分布特征, 本研究采用 27F/534R 引物对扩增九龙江细菌群落 V1 ~ V3 区序列, 并进行 454 焦磷酸测序. 此外, 本研究总结文献[14, 17, 27, 28]中所列的病原菌种, 并进一步结合我国卫生部颁发的病原菌名录^[29], 构建了包含 283 个病原菌种 16S rRNA 基因序列的本地数据库(分别隶属于 7 个门、91 个属)(图2).

BLASTn 序列比对分析表明, 在 97% (种) 和 99% (亚种) 水平, 九龙江样品中分别检出 48 和 8 种潜在病原菌(以下简称“病原菌种”). 在亚种水平, 检出的病原菌种是 *Staphylococcus saprophyticus*、*Escherichia coli*、*Streptococcus bovis*、*Enterobacter aerogenes*、*Staphylococcus epidermidis*、*Acinetobacter baumannii*、*Aerococcus viridans* 和 *Delftia tsuruhatensis*, 其中 *Aerococcus viridans* 的丰度最高. 在种水平, 共有 1 554 条九龙江细菌 16S rRNA 基因序列与参考病原菌序列的相似度高于 97%, 占序列总量的 0.76% [最高为 1.7% (WR_S4), 最低为 0.12% (NR_W5)]; 九龙江水样中共检出 46 个病原菌种, 而沉积物中分布有 30 个病原菌种. 北溪水体、北溪沉积物、西溪水体和西溪沉积物中分别检测到 22、21、43 和 22 个病原菌种. 进一步深入分

析发现, *Afipia felis*、*Mycobacterium asiaticum*、*Clostridium baratii*、*Brucella melitensis* 和 *Delftia tsuruhatensis* 是丰度最高的 5 个病原菌种(种水平), 分别占病原菌种序列总量的 48.9%、20.3%、8%、2.7% 和 1.7%. 此外, *Brucella melitensis* 和 *Rickettsia rickettsii* (在水体中的相对丰度为 0.53%) 是危害程度为第二类的潜在病原菌^[29].

统计分析表明, 九龙江水体分布的病原菌种的种类(每样本平均 11 ± 7 种)显著高于沉积物含有的病原菌种类(每样本平均 6 ± 3 种)(Mann-Whitney test, $P < 0.01$). 西溪水体中含有的病原菌种的种类最多(Kruskal-Wallis test, $P < 0.05$), 且丰度最高(Friedman test, $P < 0.001$). 此外, 线性回归分析表明, 九龙江分布的病原菌属与病原菌种的种类数呈显著正相关($R^2 = 0.79$, $P < 0.01$), 说明属级别的病原菌检测可为后续的九龙江病原菌污染风险评估提供一定的参考依据. 然而, 与属级别分析结果不同的是, 仅水体中的病原菌种类数与丰度呈显著正相关(spearman correlation, $r = 0.63$, $P < 0.01$), 但将沉积物样品纳入后, 则无显著相关(spearman correlation, $P > 0.1$). 结合环境因子分析发现, 九龙江水体分布的病原菌种类数量与总无机氮浓度呈显著正相关(spearman correlation, $r = 0.54$, $P < 0.05$); 病原菌种的丰度与亚硝态氮浓度呈显著负相关(spearman correlation, $r = -0.60$, $P < 0.05$), 进一步验证了属级别的分析结果, 说明九龙江潜在病原菌的分布与沿岸人类活动存在紧密联系.

图5展示了基于种水平的九龙江潜在病原菌分布的聚类分析. 分析结果表明, 九龙江水体和沉积物的病原菌种的种群结构存在明显差异: 所有沉积物样品和西溪水样 WR_W1、WR_W2 和 WR_W6 聚为一大分支, 其他水体样品聚为另一分支; 但水样或沉积物样品没有按支流(样本来源)的聚类趋势. SIMPER 分析表明, 造成水体和沉积物病原菌群落结构差异的主要种是 *Mycobacterium asiaticum*、*Delftia tsuruhatensis*、*Staphylococcus caprae*、*Afipia felis* 和 *Clostridium baratii*. 前 3 种多分布于水体中, 后两种在沉积物中的丰度较高. 然而, 这一趋势尚有待于进一步调查研究来验证. 以往的病原菌调查多采用传统的增菌培养和细菌分离法^[9,21,37,38], 然而培养法存在局限性, 不能全面反映环境中病原菌的分布与构成^[1,6]. 本研究采用 16S rRNA 基因-454 焦磷酸测序技术获得大量序列信息, 较为全面地反

映了九龙江潜在病原菌的分布状况. 由于该流域的 ARGs 污染状况也较为严重^[22,23], 因此了解病原菌的分布状况, 可为后续的生态风险评估提供重要资料.

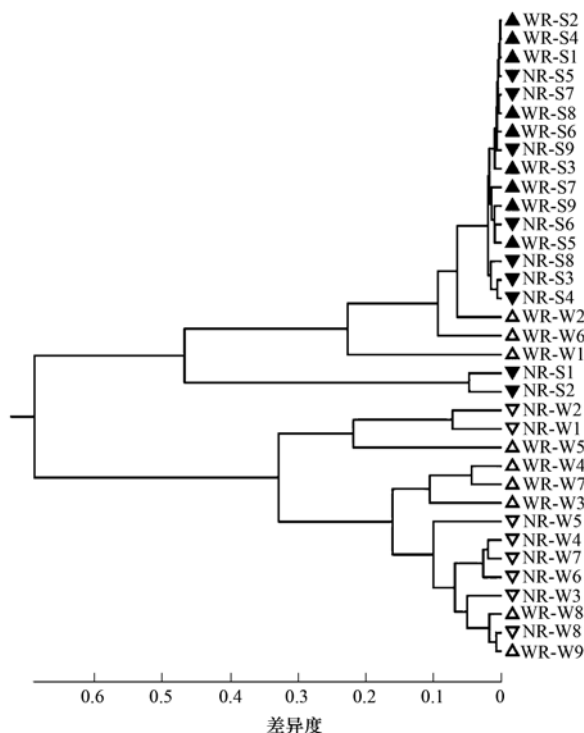


图5 基于种水平的九龙江病原菌群落结构聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of community structures of potential pathogenic bacterial species in the Jiulong River

3 结论

(1) 基于细菌 16S rRNA 基因-454 焦磷酸测序技术, 初步探明了该流域潜在病原菌的污染状况, 九龙江流域分布有 68 个潜在病原菌属. 水体中病原菌属的种类数要多于沉积物中, 其中西溪水体分布的病原菌属的种类和丰度最高. 水体中病原菌属的种类数目和丰度随河流流向有衰减趋势, 且分别与无机氮和无机磷呈显著正相关, 说明九龙江水体中的病原菌可能主要来源于沿岸的人类活动, 如养殖业和污水排放等.

(2) 构建了包含 283 种病原菌 16S rRNA 基因序列的本地数据库. 与数据库对比分析表明, 九龙江流域分布有 48 个病原菌种 (与参考序列相似性大于 97%). 与属级别的分析结果相似, 水体中病原菌种的种类要显著高于沉积物中, 其中西溪水体中分布的病原菌种的种类和丰度最高, 说明九龙江水体尤其是西溪水体受病原菌污染的风险较高. 水体中病原菌种的种类数与无机氮呈显著正相关, 验

证了属级别的分析结果. 因此需要进一步开展九龙江流域病原菌污染的风险评估工作.

致谢: 感谢厦门大学环境与生态学院环境管理课题组在样品采集及水样理化性质测定方面的大力支持. 感谢厦门大学陈能汪博士提供九龙江流域图.

参考文献:

- [1] Aw T G, Rose J B. Detection of pathogens in water: from phylochips to qPCR to pyrosequencing [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, **23**(3): 422-430.
- [2] Letterman R D. Water quality and treatment: a handbook of community water supplies [M]. New York: McGraw-Hill, 1999. 1-10.
- [3] WHO. Emerging Issues in Water and Infectious Disease [R]. Geneva, Switzerland: WHO, 2003. 1-15.
- [4] Guzmán C, Jofre J, Montemayor M, et al. Occurrence and levels of indicators and selected pathogens in different sludges and biosolids [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2007, **103**(6): 2420-2429.
- [5] Wéry N, Lhoutellier C, Ducray F, et al. Behaviour of pathogenic and indicator bacteria during urban wastewater treatment and sludge composting, as revealed by quantitative PCR [J]. *Water Research*, 2008, **42**(1-2): 53-62.
- [6] 王燕, 符波, 陈燕, 等. 城市污泥厌氧消化和脱水工艺对肠道病原菌的杀灭效应 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 683-688.
- [7] 陈卫平, 张炜铃, 潘能, 等. 再生水灌溉利用的生态风险研究进展 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4070-4080.
- [8] Zhang J F, Mauzerall D L, Zhu T, et al. Environmental health in China: progress towards clean air and safe water [J]. *The Lancet*, 2010, **375**(9720): 1110-1119.
- [9] 孙傅, 沙婧, 刘彦华. 南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3778-3786.
- [10] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2012. 4-16.
- [11] Sogin M L, Morrison H G, Huber J A, et al. Microbial diversity in the deep sea and the underexplored "rare biosphere" [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, 2006, **103**(32): 12115-12120.
- [12] Hu A Y, Yang X Y, Chen N W, et al. Response of bacterial communities to environmental changes in a mesoscale subtropical watershed, Southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 746-756.
- [13] Caporaso J G, Lauber C L, Walters W A, et al. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, 2011, **108**(Supplement 1): 4516-4522.
- [14] Bibby K, Viau E, Peccia J. Pyrosequencing of the 16S rRNA gene to reveal bacterial pathogen diversity in biosolids [J]. *Water*

- Research, 2010, **44**(14): 4252-4260.
- [15] Dowd S, Sun Y, Secor P, *et al.* Survey of bacterial diversity in chronic wounds using pyrosequencing, DGGE, and full ribosome shotgun sequencing[J]. BMC Microbiology, 2008, **8**(1): 43.
- [16] Kembel S W, Jones E, Kline J, *et al.* Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(8): 1469-1479.
- [17] Ye L, Zhang T. Pathogenic bacteria in sewage treatment plants as revealed by 454 pyrosequencing[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7173-7179.
- [18] Chen N W, Peng B R, Hong H S, *et al.* Nutrient enrichment and N: P ratio decline in a coastal bay-river system in southeast China: The need for a dual nutrient (N and P) management strategy[J]. Ocean & Coastal Management, 2012, **81**(7): 7-13.
- [19] Huang J L, Li Q S, Pontius R G Jr, *et al.* Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, southeast China [J]. Environmental Management, 2013, **51**(1): 32-44.
- [20] Li Y, Cao W Z, Su C X, *et al.* Nutrient sources and composition of recent algal blooms and eutrophication in the northern Jiulong River, Southeast China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **63**(5): 249-254.
- [21] 陈明霞, 李和阳, 马云飞, 等. 九龙江口沉积物 TCBS (Thiosulfate Citrate Bile Salts Sucrose) 菌群的分布[J]. 微生物学报, 2012, **52**(5): 637-644.
- [22] 王青, 林惠荣, 张舒婷, 等. 九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2685-2690.
- [23] 何基兵, 胡安谊, 陈猛, 等. 九龙江河口及厦门污水处理设施抗生素抗性基因污染分析[J]. 微生物学通报, 2012, **39**(5): 683-695.
- [24] Urakawa H, Martens-Habben W, Stahl D A. High abundance of ammonia-oxidizing Archaea in coastal waters, determined using a modified DNA extraction method [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, **76**(7): 2129-2135.
- [25] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. Nature Methods, 2010, **7**(5): 335-336.
- [26] Bragg L, Stone G, Imelfort M, *et al.* Fast, accurate error-correction of amplicon pyrosequences using Acacia[J]. Nature Methods, 2012, **9**(5): 425-426.
- [27] Chakravorty S, Helb D, Burday M, *et al.* A detailed analysis of 16S ribosomal RNA gene segments for the diagnosis of pathogenic bacteria[J]. Journal of Microbiological Methods, 2007, **69**(2): 330-339.
- [28] Ecker D J, Sampath R, Willett P, *et al.* The Microbial Rosetta Stone Database: a compilation of global and emerging infectious microorganisms and bioterrorist threat agents [J]. BMC Microbiology, 2005, **5**(1): 19.
- [29] 中华人民共和国卫生部. 常见人类病原微生物[R]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2006. 1-14.
- [30] 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.
- [31] Pruesse E, Quast C, Knittel K, *et al.* SILVA: a comprehensive online resource for quality checked and aligned ribosomal RNA sequence data compatible with ARB [J]. Nucleic Acids Research, 2007, **35**(21): 7188-7196.
- [32] Taylor L H, Latham S M, Woolhouse M E J. Risk factors for human disease emergence[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 2001, **356**(1411): 983-989.
- [33] Hammer Ø, Harper D A T, Ryan P D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis[J]. Palaeontologia Electronica, 2001, **4**(1): 1-9.
- [34] Werner J J, Koren O, Hugenholtz P, *et al.* Impact of training sets on classification of high-throughput bacterial 16S rRNA gene surveys[J]. The ISME Journal, 2011, **6**(1): 94-103.
- [35] Peeler K A, Opsahl S P, Chanton J P. Tracking anthropogenic inputs using caffeine, indicator bacteria, and nutrients in rural freshwater and urban marine systems[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(24): 7616-7622.
- [36] Winfield M D, Groisman E A. Role of nonhost environments in the lifestyles of *Salmonella* and *Escherichia coli*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(7): 3687-3694.
- [37] 陈明霞, 李和阳, 李刚, 等. 深圳海域弧菌种类组成、数量分布及其与环境因子的关系研究[J]. 海洋学报, 2010, **32**(5): 117-126.
- [38] 韩善桥, 虞积耀, 姜涛, 等. 九龙江细菌分布情况调查分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2008, **18**(5): 899-900.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection 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 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行