

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氨释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励珊, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素

薛银刚^{1,2}, 刘菲¹, 孙萌³, 江晓栋¹, 耿金菊⁴, 滕加泉², 谢文理², 张皓², 陈心一²

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164; 2. 常州市环境监测中心, 江苏省环境保护水环境生物监测重点实验室, 常州 213001; 3. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114; 4. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 为研究太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构, 利用高通量测序对竺山湾 4 个采样点(雅浦港、沙塘港、竺山湖南和椒山)浮游细菌的 16S rRNA 基因进行序列测定。结果表明: 测序文库的覆盖率很高, 测序结果完全可以代表样本的真实情况; 椒山的物种丰富度最高, 但物种分布均匀度较低; 竺山湾主要优势菌门为蓝藻门(Cyanobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes), 蓝藻门平均丰度高达 64.73%, 正处于水体复苏阶段, 已有蓝藻水华暴发态势。属水平优势细菌主要有鱼腥藻属(*Anabaena*)、*hgcI* 类群、*CL500-29_marine_group*、微囊藻属(*Microcystis*)、聚球藻属(*Synechococcus*)和分枝杆菌属(*Mycobacterium*)。运用冗余分析(RDA)探讨浮游细菌与环境因子的关系, 结果表明, 水温、Chl-a、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DO 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 是影响浮游细菌群落的主要环境因子, 其中, DO 能显著影响微囊藻属, 营养盐和水温对其也有一定程度影响。

关键词: 竺山湾; 太湖; 高通量测序; 浮游细菌; 环境因子; 蓝藻门

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1151-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707164

Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu

XUE Yin-gang^{1,2}, LIU Fei¹, SUN Meng³, JIANG Xiao-dong¹, GENG Jin-ju⁴, TENG Jia-quan², XIE Wen-li², ZHANG Hao², CHEN Xin-yi²

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Key Laboratory of Environmental Protection of Water Environment Biological Monitoring of Jiangsu Province, Changzhou Environmental Monitoring Center, Changzhou 213001, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 4. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of bacterioplankton in the spring in Zhushan Bay, Lake Taihu, the 16S rRNA gene of the bacterioplankton at four sampling sites in Zhushan Bay was sequenced by high-throughput sequencing using water samples collected from Yapugang, Shatanggang, Zhushanhunan, and Jiaoshan. The results showed that the coverage of the sequencing library was very high and could accurately represent the bacterioplankton community in the samples. The species richness of Jiaoshan was the highest, but the species evenness was lower. Cyanobacteria, Actinobacteria, Proteobacteria, and Bacteroidetes were the dominant phylum in Zhushan Bay. The average abundance of Cyanobacteria was as high as 64.73%, which indicated an outbreak of cyanobacteria bloom in the water. At the genus level, *Anabaena*, *hgcI* clade, *CL500-29_marine_group*, *Microcystis*, *Synechococcus*, and *Mycobacterium* were predominant. The results of redundancy analysis (RDA) for the relationship between bacterioplankton and environmental factors showed that water temperature, chlorophyll a (Chl-a), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), dissolved oxygen (DO), and phosphate ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) were the main environmental factors affecting the bacterioplankton community. Dissolved oxygen could significantly affect *Microcystis*; nutrient and water temperature also had an effect.

Key words: Zhushan Bay; Lake Taihu; high-throughput sequencing; bacterioplankton; environmental factors; Cyanobacteria

浮游细菌是微生物食物网的关键组成部分, 在水生生态系统的生物地球化学循环和能量流入中具有关键作用^[1]。近年来, 水体富营养化和蓝藻水华暴发已经成为危害水生生态系统和人体健康的重大问题。太湖是我国第三大淡水湖, 自 2007 年无锡太湖区域蓝藻大面积暴发后, 通过控源截污、控氮降磷、调水引流、蓝藻打捞以及生态修复等治理措

施, 水质有了明显改善, 但氮磷总量居高不下, 水体富营养化仍是其目前存在的主要问题^[2]。营养物质是淡水系统中蓝藻快速生长的主要因素, 其它因

收稿日期: 2017-07-20; 修订日期: 2017-09-08

基金项目: 江苏省环境监测科研基金项目(1404, 1320)

作者简介: 薛银刚(1981~), 男, 博士, 主要研究方向为生态毒理学和生物监测, E-mail: yzxyg@126.com

素如温度和 pH 值也可能在蓝藻水华暴发中扮演重要角色^[3,4]。全球气候变暖会引起地表水温的升高,致使春季太湖水温条件满足蓝藻快速繁殖的需求,据报道,至 2017 年 5 月 15 日,相关部门已在太湖打捞蓝藻 16.8 万 t,是 2016 同期的 5.5 倍^[5]。蓝藻水华暴发后,产生有毒物质(微囊藻毒素)会改变水生生态系统的群落结构^[6]。浮游细菌在淡水湖泊营养循环中发挥重要作用,而竺山湾是太湖水质污染最严重的湖湾之一^[7],且一直以来都是太湖蓝藻水华暴发的重灾区^[8],但目前关于太湖竺山湾春季浮游细菌群落特征的研究还较少。

细菌的定量对于了解细菌在水生环境中的生态作用至关重要,以往主要集中于利用 PCR-DGGE^[9,10]和 T-RFLP^[11,12]等技术研究太湖浮游细菌群落特征。随着分子生物学技术的发展,高通量测序技术在微生物群落分析方面表现出前所未有的巨大优势^[13],并被广泛应用于湿地、土壤和生物膜等复杂环境中微生物群落结构的研究^[14-16]。为了获得细菌群落的高分辨率特征,本研究采用 16S rDNA 扩增子测序,基于 Illumina HiSeq 测序平台,利用双末端测序的方法研究太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构,并利用冗余分析(redundant analysis, RDA)对浮游细菌与环境因子的相关性进行探讨,以期对太湖春季蓝藻水华防控工作和建立优势菌群谱库提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 样品来源与采集

采样区为太湖竺山湾,采样时间为 2016 年 4 月。共选取 4 个采样点(图 1),分别为:雅浦港(120.075°E; 31.449°N)、沙塘港(120.035°E; 31.433°N)、竺山湖南(120.036°E; 31.373°N)和椒山(120.076°E; 31.340°N),其中雅浦港和沙塘港位于河口区,竺山湖南和椒山位于湖心区。文中图内分别以 YPG、STG、ZSHN 和 JS 表示雅浦港、沙塘港、竺山湖南和椒山。

使用灭菌的聚四氟乙烯塑料瓶采集水下 0.5 m 处的水样,收集的样品进行冷藏保存并运回实验室进行预处理。使用经 0.45 μm 的混合纤维素滤膜过滤的水样测定水体理化指标,待滤膜完全堵住后,记录过滤的水样体积。用于高通量测序的水样先通过 5 μm 孔径滤膜过滤去除颗粒杂质,再通过 0.22 μm 孔径滤膜过滤,保存于 -20℃ 条件下,用于后续分析测试。

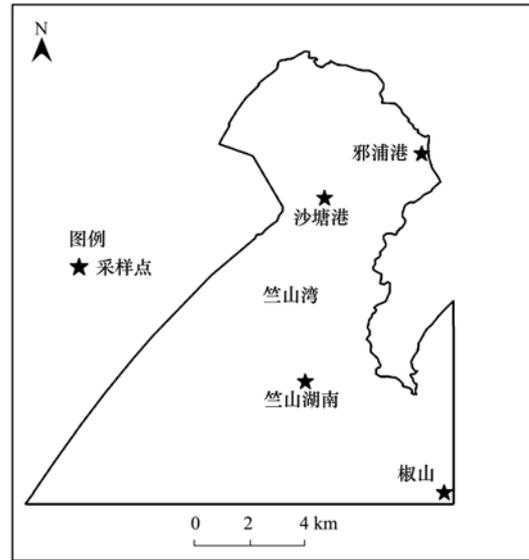


图 1 竺山湾采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Zhushan Bay

1.2 水体理化指标测定

利用 YSI 水质分析仪(美国, YSI 6600)现场测定水样的水温、pH、叶绿素 a(Chl-a)、藻密度和溶解氧(DO)。每个采样点采集 3 份水样带回实验室测定总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝氮(NO₃⁻-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)、总磷(TP)和磷酸盐(PO₄³⁻-P)指标,测定方法参照文献[17]。

1.3 DNA 提取与 PCR 扩增

使用 FastDNA Spin Kit for Soil 试剂盒(MP bio, USA),按照试剂盒说明步骤提取基因组 DNA,使用 NanoDrop2000 超微量蛋白质核酸分析仪(Thermo Fisher, USA)测定提取出的 DNA 浓度和纯度后,将 DNA 样品于 -20℃ 中保存,用于后续的 PCR 扩增等分析。

将提取好的 DNA 产物利用 16S rDNA V1-V2 区扩增引物进行 PCR 扩增^[18],引物序列(5'-3'):正向引物 AGAGTTTGATYMTGGCTCAG,反向引物 TGCTGCCTCCCGTAGGAGT。PCR 产物以等密度比混合后使用 Qiagen Gel Extraction Kit (Qiagen, Germany)纯化。

1.4 高通量测序

纯化后的产物送至江苏中宜金大分析检测有限公司使用 Illumina(USA)的 HiSeq 平台进行高通量测序和分析。使用 TruSeq[®] DNA PCR-Free 样品制备试剂盒(Illumina, USA)生成测序文库。使用 Qubit@ 2.0 荧光计(Thermo Scientific)和 Agilent Bioanalyzer 2100 系统(Agilent, USA)评估测序文库质量。最后,在 Illumina HiSeq 2500 平台(Illumina, USA)上进行

了测序, 产生了 250bp 的配对末端读数。

1.5 数据分析

为了使信息分析的结果更加准确、可靠, 首先对原始数据进行拼接、过滤, 得到有效数据。然后基于有效数据进行 OTUs (operational taxonomic units) 聚类 and 物种分类分析。序列分析由 Uparse 软件进行, 将具有 $\geq 97\%$ 相似性的序列分配给相同的 OTU, 筛选每个 OTU 的代表序列以进一步注释, 得到对应的物种信息和基于物种的丰度分布情况。对于每个代表性的序列, 使用基于 RDP 分类器算法的 GreenGene 数据库来注释分类信息^[19]。

为了研究不同 OTU 的系统发育关系, 以及不同样本中优势种的差异, 使用 MUSCLE 软件 (3.8.31 版本) 进行多序列比对; 基于 QIIME (1.9.1 版本) 计算样品香农 (Shannon) 指数、辛普森 (Simpson) 指数、Chao1 指数、文库覆盖率和 Unifrac 距离^[20]; 处理后的数据使用 Origin (8.5 版本) 绘图; 利用 SPSS (17.0 版本) 进行细菌群落多样

性与环境因子的 Pearson 相关性分析; CANOCO (4.5 版本) 用于优势细菌与水环境因子的冗余分析^[21]。

2 结果与讨论

2.1 水样水质分析

各采样点的基本理化因子见表 1。从中可以看出竺山湾水体整体呈弱碱性, 平均水温为 21.22℃。选择 TN、TP 和 Chl-a 作为评价指标, 根据文献 [22] 进行湖泊营养状态评价, 其中沙塘港、竺山湖南和椒山水体达到了中度富营养, 雅浦港水体达到了重度富营养。位于河口区的雅浦港和沙塘港的 TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、TP 和 PO_4^{3-} -P 均高于位于湖心区的竺山湖南和椒山。DO 变化范围为 8.9~12.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以雅浦港点位最低。Chl-a 与藻密度是水体中藻类的监测指标, 雅浦港的 Chl-a 最高, 且藻密度仅次于椒山, 竺山湖南的 Chl-a 和藻密度均最低。

表 1 各采样点的基本理化因子

Table 1 Physical and chemical factors for the sampling sites

点位	pH	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Chl-a / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	藻密度 / $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_2^- -N / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PO_4^{3-} -P / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水温 / $^{\circ}\text{C}$	富营养 化指数
雅浦港	8.80	8.9	62.2	1577	5.76	0.771	3.91	0.176	0.138	0.097	21.22	72
沙塘港	8.45	10.4	34.9	972	5.88	0.886	4.49	0.160	0.140	0.068	20.91	69
竺山湖南	8.46	10.5	22.6	869	4.00	0.252	3.50	0.091	0.089	0.037	21.07	63
椒山	8.98	12.3	34.2	2926	4.28	0.456	3.46	0.079	0.106	0.019	21.67	67

2.2 OTU 聚类和多样性分析

各点位的 OTU 聚类结果和多样性指数统计见表 2。4 个采样点的水库覆盖率均为 100%, 表明此次测序效果理想。稀释曲线 (图 2) 表明当 4 个采样点的测序数超过 25 000 时, 曲线渐进平缓, 测序量的增加不会引起 OTU 数目的上升^[23]。雅浦港、沙塘港、竺山湖南和椒山的样品最终得到注释信息的测序数均超过 25 000, 可用于 OTU 聚类。对所有样品的有效序列以 97% 的一致性聚类成为 OTUs, 得到的 OTUs 分别为雅浦港 (89)、沙塘港 (89)、竺山

湖南 (97) 和椒山 (144)。

选定衡量样品 OTUs 丰富度的 Chao1、Simpson 和 Shannon 指数来表征竺山湾的物种组成多样性。由 Chao1 指数反映出 OTUs 丰富度以椒山最高, 其次是竺山湖南, 位于同一湖区的沙塘港和雅浦港物种丰富度较为接近, 这表明椒山可能具有更丰富的细菌群落。由 Shannon 指数和 Simpson 指数表征物种分布的均匀度, Shannon 指数和 Simpson 指数均为竺山湖南 > 沙塘港 > 雅浦港 > 椒山, 表明物种分布均匀度以竺山湖南最高, 椒山最低。

表 2 各点位 OTU 聚类与多样性分析

Table 2 Clustering and diversity analysis of each site

采样点	有效序列	OTUs	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao1 指数	文库覆盖率/%
雅浦港	58823	89	3.375	0.772	89.000	100
沙塘港	48351	89	3.801	0.829	88.500	100
竺山湖南	44748	97	3.962	0.880	102.000	100
椒山	59846	144	2.915	0.690	141.333	100

描述点位到点位物种组成的 β -多样性对于了解各种空间尺度上物种多样性的模式至关重要^[24],

可以考察到不同点位和湖区的生境多样性, 有利于了解竺山湾的生物生产力差异。选用 Weighted

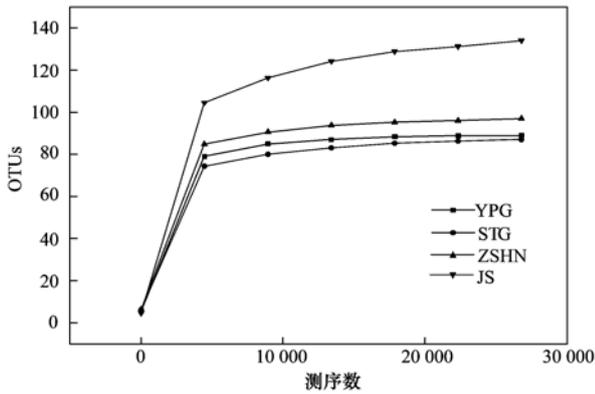


图2 稀释曲线
Fig. 2 Rarefaction curve

Unifrac 距离指标来衡量样品间的相异系数(图3). 沙塘港与雅浦港位于河口区, 相异系数为 0.297, 表明这两点物种多样性的差异较小. 沙塘港与位于湖心区的椒山相异系数较大, 但与竺山湖南的物种多样性的差异小, 可能是由于沙塘港距离竺山湖南较近, 空间差异小. β -多样性反映出物种沿环境梯度不同生境群落之间物种组成的相异程度, 相距最远的雅浦港和椒山的相异系数高达 0.611. 总体上看, 同一湖区的物种多样性差异小, 不同湖区的物种多样性差异大.

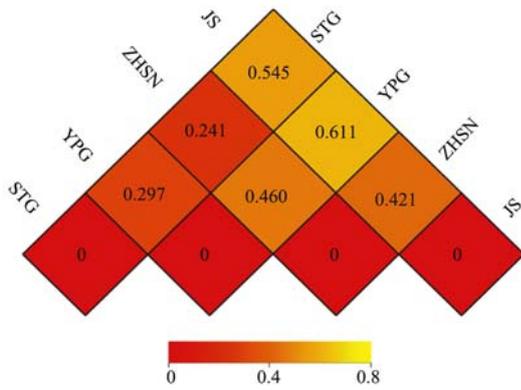


图3 β -多样性指数热图
Fig. 3 The β -diversity index heatmap

2.3 浮游细菌群落

竺山湾水样样品经高通量测序共得到 OTUs 为 419, 基于 RDP 分类器算法的 GreenGene 数据库注释分类信息, 得出竺山湾门水平细菌群落结构(图4). 结果表明竺山湾优势菌门有蓝藻门(Cyanobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)和绿菌门(Chlorobi)等.

由于采样点的环境因子, 包括营养盐、水温、pH 和食物网组成都会对浮游细菌群落结构有影

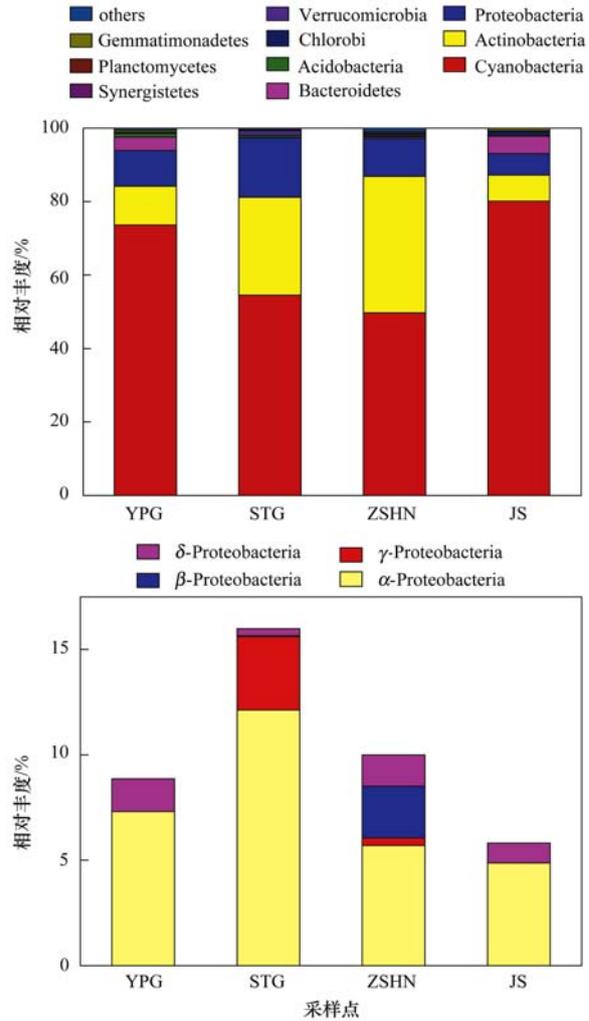


图4 门水平优势细菌丰度和变形菌亚纲

Fig. 4 Abundance of dominant bacteria at the phylum level and four classes within the Proteobacteria phylum

响^[25], 从而各个采样点的优势细菌丰度有所差异. 蓝藻门在 4 个采样点占比最大, 依次为椒山(80.10%) > 雅浦港(73.64%) > 沙塘港(54.50%) > 竺山湖南(50.68%). 椒山的蓝藻门丰度最高, 比例达到总细菌丰度的 1/4. 有害藻类增殖会进一步导致该区域的物种分布不均, 致使 4 个采样点中椒山的物种均匀度最低. 蓝藻威胁着世界范围内的湖泊, 比如维多利亚湖(非洲)、伊利湖(美国、加拿大)、奥基乔比湖(美国佛罗里达州)、太湖和霞浦湖(日本)^[26]. 蓝藻对氮磷等营养元素具有极高的竞争力, 由于温度的升高, 使其生长速度加快, 而营养元素与气候条件均可以促进有害蓝藻增殖和扩张^[27]. 此次蓝藻门在竺山湾所占比重最高, 表明此时的环境条件已适于其快速增殖. 蓝藻水华暴发往往经历 4 个阶段: 湖底休眠、水体复苏、上浮积聚和死亡分解^[28], 竺山湾水体中蓝藻门平均丰度高达 64.73%,

正处于水体复苏阶段, 已有蓝藻水华暴发态势, 为进一步防控蓝藻灾害, 必须建立蓝藻水华的灾害监测预警机制, 以完成太湖生态修复工作。

除蓝藻门外, 放线菌门、变形菌门和拟杆菌门在竺山湾一带占比丰富。各采样点放线菌门丰度依次为竺山湖南(37.23%) > 沙塘港(26.67%) > 雅浦港(10.56%) > 椒山(7.09%)。大多数的变形菌门对有机基质具有很强的代谢能力, 使其在富营养化湖泊占据主导地位。本次变形菌门以沙塘港丰度最高, 占比 16.21%。对变形菌门进行细分(图 4), 得到各变形菌纲的平均丰度依次为 α -变形菌纲(α -Proteobacteria, 7.51%) > δ -变形菌纲(δ -Proteobacteria, 1.08%) > γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria, 0.96%) > β -变形菌纲(β -Proteobacteria, 0.62%)。拟杆菌门是一个系统发育高度多样化的群体, 可以将复杂的分子加工成简单的化合物, 在生态系统中起着重要的作用^[29], 此次拟杆菌门以椒山采样点占比最高。Tang 等^[30]于春夏秋冬四季采集太湖水样研究其细菌群落组成, 结果表明放线菌门、变形菌门和拟杆菌门长期存在于太湖水体中, 平均丰度以放线菌门 > 变形菌门 > 拟杆菌门, 与本文的研究结果一致。这三类细菌也在长江^[31]和西藏纳木错湖^[32]的水体检出, 是既适合生存于淡水环境, 又可广泛存在于咸水湖的优势类群。

图 5 为细菌群落的属水平分类, 丰度较高的属水平细菌主要有鱼腥藻属(*Anabaena*, 23.98%)、

hgcl_clade (15.99%)、*CL500-29_marine_group* (6.12%)、微囊藻属(*Microcystis*, 3.07%)、聚球藻属(*Synechococcus*, 2.53%)、分枝杆菌属(*Mycobacterium*, 1.52%)、*Candidatus_Planktophila* (0.72%) 等。

鱼腥藻属、聚球藻属和微囊藻属隶属于蓝藻门; 在本次研究中, 椒山的鱼腥藻属丰度高达 48.41%, 其次为竺山湖南; 沙塘港、椒山和竺山湖南检出了少量的聚球藻属; 微囊藻属在 4 个采样点均有分布, 丰度分别为椒山(0.97%)、沙塘港(0.54%)、竺山湖南(0.37%)和雅浦港(0.11%)。微囊藻属与细菌群落之间存在物种特异性关联, 以往研究表明与微囊藻群落相关的优势细菌有 α -变形菌、 γ -变形菌、拟杆菌门以及假单胞菌属等^[33]。太湖微囊藻诱导的缺氧区细菌群落结构与水体溶解氧和离子浓度密切相关, 缺氧发生时, 梭状芽胞杆菌成为优势细菌, 整个缺氧过程中, 脱硫弧菌和丛毛单胞菌科占主导地位^[11]。本次测序结果并未发现梭状芽胞杆菌、脱硫弧菌和丛毛单胞菌科, 表明此时微囊藻属还未引起水体缺氧。

隶属于放线菌门的 *hgcl_clade*、*CL500-29_marine_group* 和分枝杆菌属也发现于太湖竺山湾一带, 这 3 类细菌属于养殖环境中的有益微生物^[34]。其中 *hgcl_clade* 和 *CL500-29_marine_group* 在竺山湖南所占比重较高, 分别为 26.80% 和 4.16%; 分枝杆菌属在 4 个采样点均有检出。

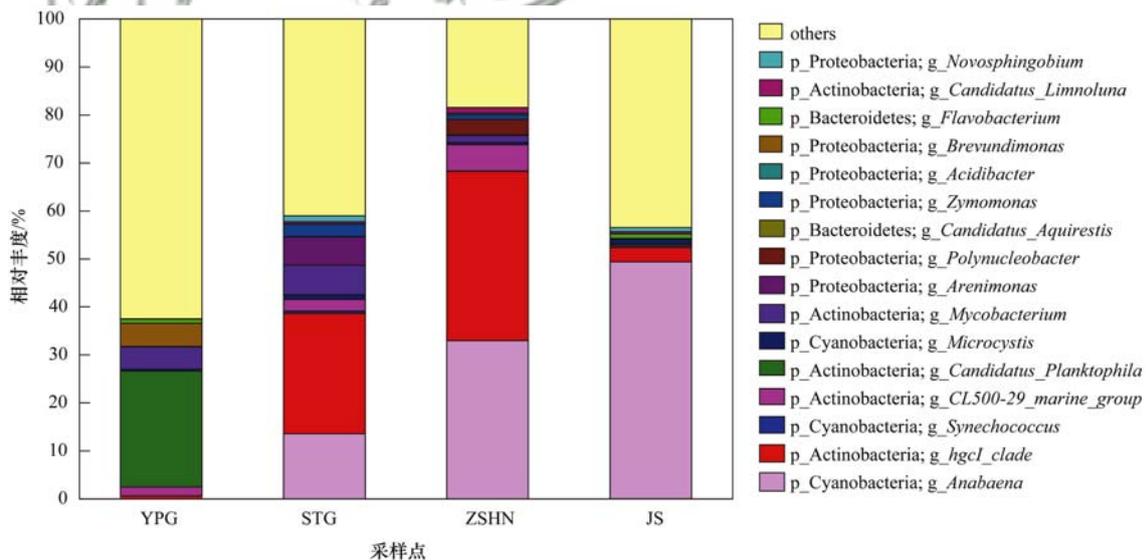


图 5 属水平优势细菌丰度

Fig. 5 Abundance of dominant bacteria at the genus level

2.4 环境因子对细菌群落的影响

将竺山湾细菌群落的 OTUs、Shannon 指数、

Simpson 指数和 Chao1 指数与水环境因子进行 Pearson 相关性分析(表 3)。结果表明, TN、

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 与 OTUs 和 Chao1 指数都呈负相关,表明随着营养盐的增加,细菌群落多样性呈下降趋势,之前已有研究报道表明营养盐水平的增加会导致细菌群落多样性显著下降^[35].藻密度与细菌群落均匀度呈显著负相关,蓝藻门在竺山湾平均丰度高达 64.73%,蓝藻疯长致

使竺山湾细菌群落多样性下降.水温和 DO 与细菌群落多样性呈正相关,与细菌群落均匀度呈负相关,表明水温和 DO 上升有利于太湖水体大多数细菌的生存,但会造成优势物种的疯长,导致水生生态系统的失衡.pH 与细菌群落均匀度显著负相关,表明太湖多数细菌较适宜生存在中性条件下.

表 3 细菌群落多样性与环境因子的关系¹⁾

Table 3 Relationship between bacterial community diversity and environmental factors

项目	pH	DO	Chl-a	藻密度	TN	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	水温
OTUs	0.733	0.883	-0.272	0.906	-0.597	-0.441	-0.622	-0.751	-0.459	-0.784	0.914
Shannon 指数	-0.979 *	-0.451	-0.375	-0.974 *	0.094	0.028	0.374	0.223	-0.065	0.235	-0.923
Simpson 指数	-0.951 *	-0.457	-0.382	-0.961 *	0.012	-0.123	0.269	0.166	-0.150	0.205	-0.882
Chao1 指数	0.688	0.892	-0.342	0.865	-0.683	-0.537	-0.689	-0.817	-0.554	-0.833	0.898

1) * 表示 $P < 0.05$

对属水平优势细菌与水环境因子进行冗余分析,图 6 表明环境因子对浮游细菌群落具有一定影响,其中, TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP、水温、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和藻密度与第一主轴呈正相关,与第二主轴呈负相关; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 DO 与第一主轴和第二主轴都呈正相关;Chl-a 和 pH 与第一主轴呈负相关,与第二主轴呈正相关.水温、Chl-a、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DO 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 对浮游细菌群落的解释量为 0.774、0.645、0.641、0.577 和 0.552,对浮游细菌群落有较大的影响,与以往研究结果一致;Su 等^[36]研究环境因子对浮游细菌群落的影响,发现含氮量和水温是浮游细菌的主要驱动因素;Wei 等^[37]根据冗余分析得出硝酸盐和 DO 是影响黄前水库细菌群落组成的主要因素,并且环境因素和细菌群落在维持水库生态平衡中扮演了重要角色;Hu 等^[38]对洱海浮游植物和浮游细菌丰度和群落特征展开研究,发现浮游细菌丰度和群落多样性与浮游植物丰度呈显著相关.

图 6 表明微囊藻属与 DO 呈显著正相关 ($P < 0.05$),相关系数为 0.973,与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP、水温、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和藻密度呈正相关关系. *hgcl_clade*、*CL500-29_marine_group* 和分枝杆菌属三类细菌与 Chl-a 呈正相关关系,与水体营养盐和水温呈负相关关系,可见营养盐和水温过高均会抑制这三类细菌的生长.聚球藻属、*Candidatus_Planktophila* 和 *Arenimonas* 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 DO 呈负相关关系.

近年来,可能由于湖泊富营养化,蓝藻细菌大量被鉴定为微囊藻属,且有研究表明产毒的微囊藻属主要存在于太湖营养充足的湖区^[39].本次微囊藻属在竺山湾 4 个采样点均有检出,通过冗余分析

找出微囊藻属的制约因子,以控制环境因子达到对有害微囊藻水华的防控.温度和营养盐在微囊藻属的有害增殖过程中起着重要的作用,是推动微囊藻水华暴发的主要因素.Liu 等^[40]发现当 TN 与 TP 之比小于 30, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之比小于 1,临界水温为 25 ~ 30℃ 等条件下,微囊藻属在夏季太湖北部湖湾占比高达总藻类的一半,成为主导优势细菌,可见控制营养盐输入对预防微囊藻水华的重要性.

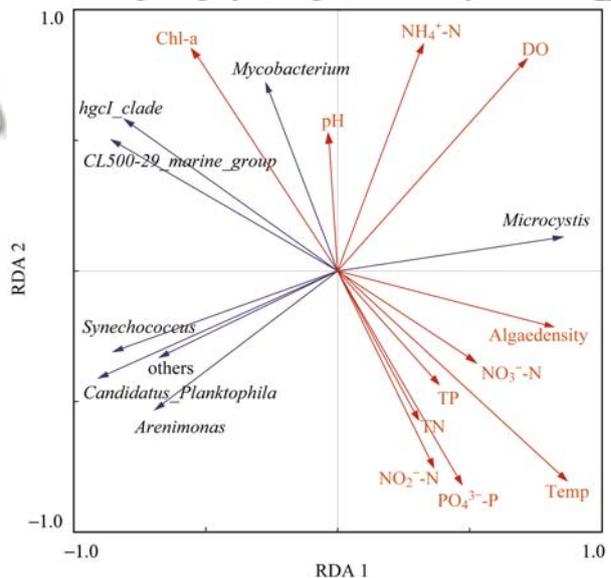


图 6 浮游细菌与环境因子的 RDA 图

Fig. 6 RDA ordination graph for the bacterioplankton and environmental factors

3 结论

(1) 本研究的测序结果能够反映太湖竺山湾浮游细菌群落结构特征.物种多样性指数表明椒山物种组成多样性最丰富,但其物种分布均匀度较低.

(2)竺山湾主要优势菌门为蓝藻门、放线菌门、变形菌门和拟杆菌门,蓝藻门的平均丰度高达64.73%,正处于水体复苏阶段,已有蓝藻水华暴发态势.属水平优势细菌主要有鱼腥藻属、*hgcl*_clade、*CL500-29_marine_group*、微囊藻属、聚球藻属和分枝杆菌属.

(3)浮游细菌与环境因子冗余分析表明,水温、Chl-a、 NH_4^+ -N、DO和 PO_4^{3-} -P是影响浮游细菌群落的主要环境因子,其中,DO能显著影响微囊藻属,营养盐和水温对其也有一定程度影响.

参考文献:

- [1] Ma L L, Mao G N, Liu J, *et al.* Spatial-temporal changes of bacterioplankton community along an exorheic River [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 250.
- [2] Qin B Q, Zhu G W, Gao G, *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management[J]. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [3] Dziallas C, Grossart H P. Increasing oxygen radicals and water temperature select for toxic *Microcystis* sp[J]. *PLoS One*, 2011, **6**(9): e25569.
- [4] Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot[J]. *Science*, 2008, **320**(5872): 57-58.
- [5] 宜兴日报. 太湖蓝藻打捞量是去年同期的5.5倍[EB/OL]. <http://www.yixing.gov.cn/zxzx/show-13593314.html>, 2017-05-16.
- [6] Li J F, Zhang J Y, Liu L Y, *et al.* Annual periodicity in planktonic bacterial and archaeal community composition of eutrophic Lake Taihu[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15488.
- [7] 王雯雯,姜霞,王书航,等.太湖竺山湾污染底泥环保疏浚深度的推算[J].*中国环境科学*, 2011, **31**(6): 1013-1018. Wang W W, Jiang X, Wang S H, *et al.* Calculation of environmental dredging depth of contaminated sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(6): 1013-1018.
- [8] 向燕,吴宇澄,刘国锋,等.太湖竺山湾沉积物中氨氧化原核生物的垂直分布与多样性[J].*生态学报*, 2010, **30**(6): 1423-1430. Xiang Y, Wu Y C, Liu G F, *et al.* Vertical distribution and diversity of ammonia-oxidizing prokaryotes in a sediment core from Zhushan Bay, Lake Taihu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(6): 1423-1430.
- [9] Niu Y, Shen H, Chen J, *et al.* Phytoplankton community succession shaping bacterioplankton community composition in Lake Taihu, China[J]. *Water Research*, 2011, **45**(14): 4169-4182.
- [10] Tian C, Tan J, Wu X, *et al.* Spatiotemporal transition of bacterioplankton diversity in a large shallow hypertrophic freshwater lake, as determined by denaturing gradient gel electrophoresis[J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**(8): 885-897.
- [11] Li H B, Xing P, Wu Q L. Characterization of the bacterial community composition in a hypoxic zone induced by *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, **79**(3): 773-784.
- [12] 顾婷婷,孔繁翔,谭啸,等.越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化[J].*生态学报*, 2011, **31**(1): 21-30. Gu T T, Kong F X, Tan X, *et al.* Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(1): 21-30.
- [13] Czechowski P, Clarke L J, Breen J, *et al.* Antarctic eukaryotic soil diversity of the Prince Charles Mountains revealed by high-throughput sequencing [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **95**: 112-121.
- [14] 魏佳明,崔丽娟,李伟,等.表流湿地细菌群落结构特征[J].*环境科学*, 2016, **37**(11): 4357-4365. Wei J M, Cui L J, Li W, *et al.* Characteristics of bacterial communities in surface-flow constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4357-4365.
- [15] 刘洋,黄懿梅,曾全超.黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究[J].*环境科学*, 2016, **37**(10): 3931-3938. Liu Y, Huang Y M, Zeng Q C. Soil bacterial communities under different vegetation types in the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3931-3938.
- [16] Chao Y Q, Mao Y P, Wang Z P, *et al.* Diversity and functions of bacterial community in drinking water biofilms revealed by high-throughput sequencing[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10044.
- [17] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.
- [18] 薛银刚,蒋聪,耿金菊,等.基于qPCR和16S rDNA高通量测序研究蓝藻暴发期间太湖竺山湾水体浮游细菌群落[J].*环境监测与预警*, 2017, **9**(3): 19-23. Xue Y G, Jiang C, Geng J J, *et al.* Profiles of bacterioplankton based on qPCR and 16S rDNA High-throughput Sequencing during a heavy cyanobacterial bloom in Zhushan bay, Taihu Lake [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2017, **9**(3): 19-23.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5) [M]. Ithaca, New York: Microcomputer Power, 2002.
- [22] 荆红卫,华蕾,孙成华,等.北京城市湖泊富营养化评价与分析[J].*湖泊科学*, 2008, **20**(3): 357-363. Jing H W, Hua L, Sun C H, *et al.* Analysis on urban lakes' eutrophication status in Beijing [J], *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(3): 357-363.
- [23] Amato K R, Yeoman C J, Kent A, *et al.* Habitat degradation impacts black howler monkey (*Alouatta pigra*) gastrointestinal microbiomes[J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(7): 1344-1353.
- [24] Zhou J Z, Jiang Y H, Deng Y, *et al.* Random sampling process leads to overestimation of β -diversity of microbial communities [J]. *mBio*, 2013, **4**(3): e00324-13.
- [25] 任丽娟,何聃,邢鹏,等.湖泊水体细菌多样性及其生态功

- 能研究进展[J]. 生物多样性, 2013, **21**(4): 421-432.
- Ren L J, He D, Xing P, *et al.* Bacterial diversity and ecological function in lake water bodies[J]. Biodiversity Science, 2013, **21**(4): 421-432.
- [26] Paerl H W, Hall N S, Calandrino E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(10): 1739-1745.
- [27] O'Neil J M, Davis T W, Burford M A, *et al.* The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change[J]. Harmful Algae, 2012, **14**: 313-334.
- [28] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 314-328.
- Kong F X, Ma R H, Gao J F, *et al.* The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(3): 314-328.
- [29] Tang X M, Gao G, Qin B Q, *et al.* Characterization of bacterial communities associated with organic aggregates in a large, shallow, eutrophic freshwater lake (Lake Taihu, China) [J]. Microbial Ecology, 2009, **58**(2): 307-322.
- [30] Tang X M, Chao J Y, Gong Y, *et al.* Spatiotemporal dynamics of bacterial community composition in large shallow eutrophic Lake Taihu: high overlap between free-living and particle-attached assemblages[J]. Limnology and Oceanography, 2017, **62**(4): 1366-1382.
- [31] Fan L M, Song C, Meng S L, *et al.* Spatial distribution of planktonic bacterial and archaeal communities in the upper section of the tidal reach in Yangtze River [J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 39147.
- [32] Liu Y Q, Yao T D, Jiao N Z, *et al.* Seasonal dynamics of the bacterial community in Lake Namco, the largest Tibetan Lake [J]. Geomicrobiology Journal, 2013, **30**(1): 17-28.
- [33] Shi L M, Cai Y F, Wang X Y, *et al.* Community structure of bacteria associated with *Microcystis* colonies from cyanobacterial blooms[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2010, **25**(2): 193-203.
- [34] 李建柱, 侯杰, 张鹏飞, 等. 空心菜浮床对鱼塘水质和微生物多样性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 3071-3080.
- Li J Z, Hou J, Zhang P F, *et al.* Influence on water quality and microbial diversity in fish pond by *Ipomoea aquatica* floating-bed [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 3071-3080.
- [35] Sand-Jensen K, Borum J. Interactions among phytoplankton, periphyton, and macrophytes in temperate freshwaters and estuaries[J]. Aquatic Botany, 1991, **41**(1-3): 137-175.
- [36] Su X M, Steinman A D, Xue Q J, *et al.* Temporal patterns of phyto-and bacterioplankton and their relationships with environmental factors in Lake Taihu, China [J]. Chemosphere, 2017, **184**: 299-308.
- [37] Wei G S, Li J, Wang N X, *et al.* Spatial abundance and diversity of bacterioplankton in a typical stream-forming ecosystem, Huangqian Reservoir, China [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2014, **24**(10): 1308-1318.
- [38] Hu M M, Li Y H, Wang Y C, *et al.* Phytoplankton and bacterioplankton abundances and community dynamics in Lake Erhai[J]. Water Science & Technology, 2013, **68**(2): 348-356.
- [39] Bouhaddada R, Nélieu S, Nasri H, *et al.* High diversity of microcystins in a *Microcystis* bloom from an Algerian lake[J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 836-844.
- [40] Liu X, Lu X H, Chen Y W. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: an 11-year investigation[J]. Harmful Algae, 2011, **10**(3): 337-343.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)