

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估 李晓晓,张强,邓建国,蒋靖坤,郝吉明(3095)

钢铁工业排放颗粒物中碳组成的特征 张进生,吴建会,马威,冯银厂(3102)

常州市大气 PM_{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析 顾爱军,刘佳澍,罗世鹏,毕承路,苏亚兰,叶招莲,盖鑫磊(3110)

兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源 尉媛丽,刘攀亮,于周锁,高宏,毛潇萱,马建民,黄韬(3120)

株洲市大气降尘中元素特征及来源分析 王世豪,张凯,柴发合,钟学才,周广柱,杨晴,柯馨姝(3130)

传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征 徐敏,何万清,聂磊,韩力慧,潘涛,石爱军(3139)

基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征 史纯珍,郝雪薇,申现宝,曹鑫悦,张伟,吴辉,姚志良(3146)

基于 wavelet-SVM 的 PM₁₀ 浓度时序数据预测 王平,张红,秦作栋,姚清晨,耿红(3153)

广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算 黄学良,张洲,杨威强,李晟,朱明,方华,何俊杰,陈俊文,万承浩,张艳利,刘国光,黄祖照,王宇骏,王新明(3162)

沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响 李鸿涛,祁建华,董立杰,高冬梅(3169)

典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价 李会杰(3178)

杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,陈金汉,余波,周姗,张伟(3185)

黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征 聂明华,晏彩霞,杨毅,周俊良,刘敏(3192)

漓江地表水体有机碳来源 赵海娟,肖琼,吴夏,刘凡,苗迎,蒋勇军(3200)

夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响 吴飞红,蒲俊兵,李建鸿,张陶,李丽,黄思宇(3209)

城市不同功能区地表水重金属污染特性比较:以宁波为例 徐美娟,童桂华,孙丹,李建新,虞效益(3218)

地下水主要组分水化学异常识别方法对比:以柳江盆地为例 张小文,何江涛,彭聪,张昌延,倪泽华(3225)

人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析 李如忠,叶舟,高苏蒂,郑悦(3235)

长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 刘军,臧家业,冉祥滨,赵晨英,刘季花,王小静(3243)

三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系 陈成龙,高明,木志坚,倪九派,祁乐(3254)

黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估:以羊圈沟坝系流域为例 鄂馨卉,汪亚峰,高扬,陈利顶,陈世博,陈维梁(3264)

新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制 李欢,李正魁,李爱民,周庆,王莹,潘咏(3273)

藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响 张大为,徐慧,王希,门彬,王东升,段晋明(3281)

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析 向蓉,李巧玉,喻毅,张洪波,董聪聪,施军琼,吴忠兴(3290)

石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析 宋云龙,张金松,郭小雅,朱佳,王丽,陶益,张丽(3302)

不同湿地模型中根系微生物的多样性 王林,李冰,余家辉,朱加宾,朱健(3312)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征 张雅洁,李珂,朱浩然,张洪勋(3319)

基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析 张海耿,宋红桥,顾川川,单建军,张宇雷,倪琦(3330)

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析 孟婷,杨宏(3339)

基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理 韩松芳,金文标,涂仁杰,陈洪一(3347)

生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果 王愿珠,程鹏飞,刘德富,刘天中(3354)

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水 刘春,周洪政,张静,陈晓轩,张磊,郭延凯(3362)

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响 于德爽,周同,李津,王晓霞,吴国栋,王晓静(3369)

酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性 周正,林兴,王凡,顾澄伟,沈婧,袁砚,金润(3377)

模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性 康乃馨,朱能武,郭雯颖,何志心(3385)

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程 王利君,李志华,韩冬,张天宇,杨成建(3393)

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动 张婷,吴鹏,沈耀良,闫刚,徐乐中, Samwine Thomas(3399)

硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径 完颜德卿,黄勇,毕贞,刘沂,姚鹏程,张文静(3406)

不同 TOC/NH₄⁺-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 王凡,刘凯,林兴,周正,李祥,黄勇(3415)

盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响 谭潇,黄靓,杨平,涂弈州(3422)

CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略 孙延芳,韩晓宇,张树军,李星,曹相生(3429)

胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛烷磺酸(PFOS)的影响 刘鑫彤,尹华,彭辉,李浩榕,杨萍萍,曹雅娟(3435)

不同施肥方式下紫色土 N₂O 与 NO_x 的排放特征 胡磊,刘韵,朱波(3442)

地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响 张凯莉,郝庆菊,冯迪,石将来,石孝均,江长胜(3451)

模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响 张翠景,沈菊培,孙翼飞,王军涛,杨中领,韩红艳,张丽梅,万师强,贺正(3463)

长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征 徐白璐,钟文辉,黄欠如,秦红益,邓欢,韩成(3473)

施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响 郭安宁,段桂兰,赵中秋,唐仲,王扬扬,王伯勋(3483)

水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应 魏亮,汤珍珠,祝贞科,蔡观,葛体达,王久荣,吴金水(3489)

凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素 张彦军(3497)

西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义 王新,夏敦胜,王博,陈红,刘浩(3507)

小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd²⁺ 活性 张如玉,刘海波,邹雪华,庆承松,李梦雪,陈冬,陈天虎(3519)

交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响 汪婷,丁锐,黄丹妮,祝子逸,章军,叶怀庄,徐迎春,金永堂(3529)

外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响 杨萍萍,尹华,彭辉,唐少宇,卢妙,刘皓(3536)

中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价 刘巍,田金平,陈吕军(3544)

《环境科学》征稿简则(3280) 《环境科学》征订启事(3301) 信息(3353, 3472, 3535)

北海湖微生物群落结构随季节变化特征

张雅洁¹, 李珂^{1,2}, 朱浩然¹, 张洪勋^{1*}

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 2. 华北水利水电大学水务研究院, 郑州 450045)

摘要: 分别于夏季、秋季、冬季和春季采集北海湖水样, 进行水质和微生物群落结构分析。水质分析表明, 夏季和秋季的水质较冬季和春季差, 其中 TN 和 TP 是影响水质的最重要因素。通过 MiSeq 高通量测序分析微生物群落结构表明: 蓝细菌门 (Cyanobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 是湖水中的优势门, 但在不同季节的分布不同。夏季和秋季微生物的多样性高, 蓝细菌门 (Cyanobacteria) 是第一优势菌门 (32.7% ~ 43.2%), 其中聚球藻属 (*Synechococcus*) 是优势蓝细菌。冬季变形菌门 (Proteobacteria) 的含量相对丰富, 占细菌群落的 34.8% ~ 40.4%。而春季, 放线菌门 (Actinobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 的含量增加, 两者之和占细菌群落的 51.5% ~ 64.3%。RDA (redundancy analysis) 分析表明, 水温是影响北海湖微生物群落结构的最主要环境因子。总体而言, 北海湖水质符合景观水的标准, 但夏季聚球藻属 (*Synechococcus*) 的大量繁殖使北海湖发生水华的风险增加, 因此要加强对北海湖水质检测和管理。

关键词: 北海湖; 高通量测序; 微生物; 群落结构; 环境因子; 水质评估

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3319-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201612253

Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake

ZHANG Ya-jie¹, LI Ke^{1,2}, ZHU Hao-ran¹, ZHANG Hong-xun^{1*}

(1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China, 2. Water Affairs Research Institute, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Water samples were collected in summer, autumn, winter, and spring in Beihai Lake for the analysis of water quality and microbial community structure. It was found that the water quality in summer and autumn was worse than in winter and spring, and TN and TP were the most important factors affecting the water quality. The microbial community structure was investigated using MiSeq high-throughput sequencing. It was found that the phyla Cyanobacteria, Proteobacteria, Actinobacteria, and Bacteroidetes were abundant in all the samples, whereas their relative abundances differed among the four seasons. In summer and autumn, the microbial diversities were higher, and the phylum Cyanobacteria was most abundant, with the genus *Synechococcus* dominant. In winter, the phylum Proteobacteria was dominant. In spring, Actinobacteria and Bacteroidetes were abundant, accounting for 51.5% - 64.3% of the bacterial community. The redundancy analysis (RDA) results showed that the microbial communities were mostly affected by water temperature in Beihai Lake. Overall, the water quality of Beihai Lake was qualified for the use of landscape water. However, the abundance of *Synechococcus* in summer may lead to algal blooms. Thus, it is necessary to strengthen the monitoring and estimation of water quality in Beihai Lake.

Key words: Beihai Lake; high-throughput sequencing; microorganisms; community structure; environmental factors; water quality assessment

水体富营养化已成为世界性关注的问题, 在全球范围内 30% ~ 40% 的湖泊和水库遭受不同程度富营养化的影响^[1,2]。水华的发生是在富营养情况下, 藻类的生理学特征与适宜的环境条件和生物因子叠加的生态结果^[3]。蓝细菌是引起水华的重要组成部分。绝大部分的水华是由浮游微生物 (包括蓝细菌门、绿藻门、甲藻门、裸藻门及隐藻门等) 引起, 其中蓝细菌水华的发生对环境及人体健康危害最大^[4,5]。氮、磷等无机营养物质的过量增加是导致蓝细菌水华暴发的主要原因^[6]。蓝细菌的最适生长温度一般为 25.0 ~ 35.0°C, 高于绿藻和硅藻, 这使得蓝细菌在夏秋高温天气更具有竞争力^[7-10]。同

时 Zimba 等^[11]认为水体稳定性、扰动及气候变化等环境因素都会影响蓝细菌的生长及水华的暴发。

北海湖位于北京北海公园内, 是北京城内最大水域之一, 属于城市景观浅水型水体, 由于客流量大而受人为污染风险大, 尤其在旺季 (4 ~ 11 月), 游船项目的开设增加了游客对水体破坏的风险。同时湖水与京城其他水域相连接 (上连什刹海, 下接中南海), 北海湖水质受什刹海水质的影响, 同时如果北

收稿日期: 2016-12-29; 修订日期: 2017-03-13

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZ-EW-09-01)

作者简介: 张雅洁 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: zhuoanyouzhuan@163.com

* 通信作者, E-mail: hxzhang@ucas.ac.cn

海水水质变差可能会影响中南海的水质. 但是关于北海湖水质的数据较少, 并且鲜见报道北海湖微生物的群落结构特征.

采用传统显微镜观察方法研究微生物多样性受多方面条件限制, 如工作量大, 需要观察者具有丰富的微生物观察经验等. 但是高通量测序是通过对微生物群落的 DNA 进行测序, 并与数据库中已有的序列进行比对, 获得微生物的多样性数据. 由于该方法不需要人工培养和肉眼鉴定因此工作量小、受人为影响的因素小, 数据量大, 还可能发现新的物种, 因而越来越受研究者的关注. 本研究调查北海湖水水质随季节的变化特征, 并采用 MiSeq 高通量测序方法检测北海湖微生物群落结构的季节特征, 分析其与环境因子之间的关系, 旨在通过本研究对北海湖水水质和水华风险评价提供参考.

1 材料与方 法

1.1 研究区域和样品采集

北海湖位于北海公园内 ($39^{\circ}55'28.04''\text{N}$, $116^{\circ}22'58.83''\text{E}$), 占公园总面积的 54.8%, 湖岸线长 3 749 m, 平均水深 1.0 m, 最深处达 2.5 m. 其水源来自颐和园的昆明湖, 流经紫竹院、什刹海, 注入本湖后, 通向中南海及故宫的筒子河, 后经通慧河和海河而流注渤海. 在北海湖的出水口处设置采样点 (图 1). 于 2014 年 9 月至 2015 年 8 月对该湖水进行采集, 共采集 10 个时间点的样品 (201409、201410、201412、201501、201503、201504、201505、201506、201507 和 201508); 前四个数字为年份, 后两个数字为月份, 按季节分为秋季 (201409、201410)、冬季 (201412、201501)、春季 (201503、201504、201505) 和夏季 (201506、201507、201508). 每个时间点对采样点均进行 3 次重复采样取平均值, 每次采集 1.0 L

水样, 其中 0.5 L 用于理化性质的测定, 剩余的水样用于水样 DNA 的提取.



图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Sampling sites in Beihai Park

北海湖所属气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 春、秋短促. 汛期一般为每年的 6~8 月, 封冰期一般为 3 个月. 水文条件 (表 1) 由北京统计局官方网站 (<http://www.bjstats.gov.cn/tjsj/>) 提供, 由表 1 可知降雨量季节差异较大, 主要集中在夏季, 夏季降

表 1 天气情况及水文条件

Table 1 Weather and hydrological conditions

季节	样品编号	天气情况(当天)/ $^{\circ}\text{C}$	降雨量(月)/mm	大风日数/d
秋	201409	小到中雨/18~28	127.6	0
	201410	阴/11~17	12.0	0
冬	201412	晴/2~13	0.0	2
	201501	小雪/-2~2	0.4	0
春	201503	晴/8~20	7.7	0
	201504	多云/10~29	34.5	2
	201505	多云/16~30	35.0	1
夏	201506	阵雨/18~29	42.0	1
	201507	雷阵雨/21~28	107.4	0
	201508	雷阵雨/22~29	82.6	0

雨量为 232.2 mm, 占年降雨量的 50.6%; 其次为秋季, 降雨量为 139.6 mm, 占年降雨量的 30.2%; 春冬季降雨相对较小. 全年只有在个别月份会出现短暂的大风天气, 不会因风速引起湖面明显波动.

1.2 水质指标的测定

表 2 检测项目方法仪器

Table 2 Methods and instruments

检测项目	方法标准	仪器设备
COD	重铬酸盐法(GB 11914-1989)	滴定管
TP(以 P 计)	钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989)	紫外可见分光光度计
TN(以 N 计)	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)	紫外可见分光光度计
BOD ₅	稀释与接种法(HJ 505-2009)	电热恒温培养箱

1.3 DNA 的提取和高通量测序

取约 300 mL 水样, 用 0.22 μm 的滤膜(47 mm 直径的亲水性 Durapore 表面滤膜, 聚偏氟乙烯材料, Millipore, Ireland, UK) 抽滤, 收集一张滤膜的微生物约需 1 h. 在提取总 DNA 之前将滤膜保存在 -20°C 的冰箱内. 用无菌剪刀剪碎滤膜后, 采用 DNA 提取试剂盒(Fast DNA[®] SPIN Kit for Soil) 提取总 DNA 时, 操作步骤按照试剂盒说明书进行. 用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测提取 DNA 的效果, 并用 NanoDrop ND-2000 超微量分光光度计(Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) 定量检测 DNA 的浓度. 将提取得到的 DNA 保存于 -20°C 的冰箱中备用.

PCR 扩增及其高通量测序采用细菌引物为 338F:5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3' 和 806R:5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'. 在 PCR 扩增前, 合成带有 barcode(5~8 个核苷酸序列)的上述引物用于 PCR 扩增. PCR 扩增采用 TransGen AP221-02: TransStart Fastpfu DNA Polymerase, 即全部样本按照正式实验条件进行, 每个样本 3 个重复, 将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测, 使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒(AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物, Tris_HCl 洗脱; 2% 琼脂糖电泳检测. 在 PCR 产物荧光定量后采用 Illumina MiSeq PE250/PE300 进行高通量测序. 测序委托上海美吉生物信息公司进行, 对原始序列进行预处理, 选取高质量的序列进行分析.

1.4 数据分析

高通量测序所得的序列通过 QIIME (<http://qiime.org/tutorials/index.html>) 进行处理, 主要包括 OTU (Operational Taxonomic Units) 分类、PCoA (principal co-ordinates analysis) 聚类分析、序列的系统发育分析和多性分析.

采用便携式水质分析仪(Hach, USA) 现场测定水温(*T*)和溶解氧(DO). 其他理化指标(包括化学需氧量 COD、生化需要量 BOD₅、总磷 TP 和总氮 TN)则在水样带回实验室 24 h 之内完成, 具体测定方法如表 2 所示.

采用冗余分析(redundancy analysis, RDA) 方法, 分析微生物种群与环境因子之间的相关性^[12], 其中微生物物种以 OTUs 代替, 采用 R 语言进行作图.

2 结果与分析

2.1 水质评估

北海湖水温随季节变化明显, 由高到低依次为夏季(27.5°C)、秋季(22.2°C)、春季(19.7°C)、冬季(8.0°C). 参考《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB 3838-2002), 对北海湖水的 DO、TN、TP、COD 和 BOD₅ 进行评价(表 3).

以每季度平均值为标准. DO 含量为 7.40 ~ 8.86 mg·L⁻¹, 其中冬季最低, 符合 II 类水标准, 其他 3 个季节均为 I 类水. TN 含量为 0.83 ~ 1.67 mg·L⁻¹, 其中冬季 TN 最高, 为 V 类水, 夏季和秋季含量稍低, 符合 IV 类水标准, 春季含量最低, 但也仅达到 III 类水标准. TP 含量为 0.04 ~ 0.11 mg·L⁻¹, 其中夏季含量最高, 符合 III 类水标准, 其他 3 个季节均为 II 类水. COD 为 10.2 ~ 22.1 mg·L⁻¹, 其中夏季最高, 符合 IV 类水标准, 其他 3 个季节均为 I 类水. BOD₅ 为 2.7 ~ 3.9 mg·L⁻¹, 夏季含量最高, 符合 III 类水标准, 其他 3 个季节均为 I 类水. 由表 3 分析可知, 除夏季 COD 含量较高外, TN 和 TP 是影响北海湖水质的主要因素.

2.2 微生物群落结构

如表 4 所示, 经过 MiSeq 测序, 每个样品挑取 19 096 条优质序列进行分析. 本研究将相似度为 97% 的序列划分为 1 个 OTU, 并进行多样性指数计算. 所有样品的覆盖度(coverage)均超过 99.0%, 表明细菌测序深度已达到较高水平, 数据可靠. 由 Ace 丰富度指数可知, 夏秋两季群落的丰富度较高,

表 3 不同季节各项理化指标及水质评估(平均值 ± 标准偏差)/mg·L⁻¹Table 3 Physicochemical indices of different seasons and water quality assessment (Mean ± SD)/mg·L⁻¹

季节	项目	T/°C	DO	TN(以 N 计)	TP(以 P 计)	COD	BOD ₅
秋	201409	25.1 ± 0.16	7.97 ± 0.02	1.28 ± 0.02	0.08 ± 0.00	15.4 ± 0.07	2.5 ± 0.01
	201410	19.3 ± 0.26	8.89 ± 0.05	1.00 ± 0.10	0.09 ± 0.01	13.8 ± 0.02	2.9 ± 0.01
	平均值	22.2 ± 4.10	8.43 ± 0.65	1.14 ± 0.20	0.09 ± 0.01	14.6 ± 1.13	2.7 ± 0.28
	水质评估	—	I	IV	II	I	I
冬	201412	15.0 ± 0.43	7.80 ± 0.02	1.13 ± 0.01	0.06 ± 0.01	17.5 ± 0.01	3.7 ± 0.01
	201501	1.0 ± 0	7.00 ± 0.01	2.20 ± 0.02	0.06 ± 0.03	12.3 ± 0.01	2.3 ± 0.02
	平均值	8.0 ± 9.90	7.40 ± 0.57	1.67 ± 0.75	0.06 ± 0.00	14.9 ± 3.68	3.0 ± 0.98
	水质评估	—	II	V	II	I	I
春	201503	14.0 ± 0.26	9.73 ± 0.04	0.90 ± 0.03	0.03 ± 0.01	7.3 ± 0.04	1.4 ± 0.01
	201504	20.6 ± 0.36	9.17 ± 0.06	0.70 ± 0.02	0.04 ± 0.01	9.6 ± 0.01	3.8 ± 0.02
	201505	24.5 ± 0.60	7.69 ± 0.02	0.90 ± 0.01	0.05 ± 0.00	13.8 ± 0.01	3.9 ± 0.02
	平均值	19.7 ± 5.30	8.86 ± 1.05	0.83 ± 0.12	0.04 ± 0.01	10.2 ± 4.66	3.0 ± 1.42
夏	201506	27.4 ± 0.35	9.33 ± 0.04	1.09 ± 0.01	0.10 ± 0.01	20.2 ± 0.02	3.9 ± 0.02
	201507	27.0 ± 0.17	7.56 ± 0.01	0.94 ± 0.00	0.14 ± 0.01	19.2 ± 0.02	3.8 ± 0.02
	201508	28.0 ± 0.17	7.65 ± 0.02	1.24 ± 0.01	0.09 ± 0.01	26.8 ± 0.01	4.0 ± 0.11
	平均值	27.5 ± 0.50	8.18 ± 1.00	1.09 ± 0.15	0.11 ± 0.03	22.1 ± 4.14	3.9 ± 0.16
水质评估	—	I	IV	III	IV	III	

表 4 浮游微生物种群丰富度和多样性指数¹⁾

Table 4 Summary of the richness and diversity indices of the planktonic microorganism communities

季节	采样编号	序列数	OTUs	Ace	Chao	覆盖度/%	Shannon 指数	Simpson 指数
秋	201409	19096	620	708 (681, 746)	710 (677, 762)	99.36	4.81 (4.78, 4.83)	0.021 1 (0.020 4, 0.0217)
	201410	19096	610	687 (663, 722)	680 (653, 723)	99.42	4.63 (4.61, 4.66)	0.025 4 (0.024 7, 0.026 1)
冬	201412	19096	610	628 (620, 643)	639 (624, 669)	99.74	5.12 (5.10, 5.14)	0.016 4 (0.015 8, 0.017 1)
	201501	19096	314	424 (386, 483)	430 (381, 512)	99.51	3.92 (3.90, 3.94)	0.035 8 (0.035 0, 0.036 7)
春	201503	19096	476	590 (555, 640)	587 (545, 654)	99.39	4.46 (4.44, 4.49)	0.027 3 (0.026 4, 0.028 2)
	201504	19096	469	609 (567, 669)	643 (580, 742)	99.29	4.47 (4.45, 4.49)	0.024 5 (0.023 7, 0.025 3)
	201505	19096	405	510 (476, 561)	502 (464, 565)	99.46	4.00 (3.97, 4.02)	0.044 2 (0.043 1, 0.045 4)
夏	201506	19096	554	677 (641, 728)	689 (642, 763)	99.27	4.39 (4.37, 4.42)	0.037 8 (0.036 5, 0.039 0)
	201507	19096	533	673 (633, 730)	687 (633, 772)	99.26	4.25 (4.22, 4.27)	0.045 1 (0.043 6, 0.046 7)
	201508	19096	488	611 (574, 665)	603 (561, 671)	99.36	4.18 (4.15, 4.20)	0.049 9 (0.048 2, 0.051 6)

1) 括号内表示最小值和最大值

Ace 指数高于 611, 而冬季和春季样品的 Ace 均低于 628, 冬季 201501 样品的 Ace 指数甚至低至 424. Chao 丰富度指数所表现的趋势和 Ace 指数相同. Shannon 多样性指数季节变化趋势为: 夏季 < 春季 < 冬季 < 秋季, Shannon 多样性指数常作为一种生

物监测的指标来指示水体受有机体污染的状况, 其值越高多样性也越高, 稳定性越强, 水质越好, 其值大于 3 为轻或无污染, 2~3 为 β -中污染, 1~2 为 α -中污染, 0~1 为重污染^[13,14]. 由此判断北海湖全年水质均为轻或无污染. Simpson 多样性指数值越大,

群落多样性越低^[15], 稳定性越差, 由表 4 可知, 其所表现的多样性规律与 Shannon 多样性指数结果一致。

如图 2 所示, 细菌序列主要分布于 10 个菌门中, 其中放线菌门 (Actinobacteria)、变形菌门 (Proteobacteria)、蓝细菌门 (Cyanobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 之和在各个样品中均占 79% 以上, 但这些菌门的分布有所不同。夏秋样品中 (除 201506 外), 蓝细菌门 (Cyanobacteria) 是第一优势门, 占全细菌群落的 32.7% ~ 43.2%。冬季变形菌

门 (Proteobacteria) 取代蓝细菌门 (Cyanobacteria), 成为第一优势门, 占全细菌群落的 34.8% ~ 40.4%。春季, 随着气温的升高, 变形菌门 (Proteobacteria) 的优势作用降低, 放线菌门 (Actinobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 的相对丰度明显增高, 两者之和占细菌群落的 51.5% ~ 64.3%。其他被检测到的菌门包括疣微菌门 (Verrucomicrobia)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、绿菌门 (Chlorobi)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、厚壁菌门 (Firmicutes) 和梭杆菌门 (Fusobacteria)。

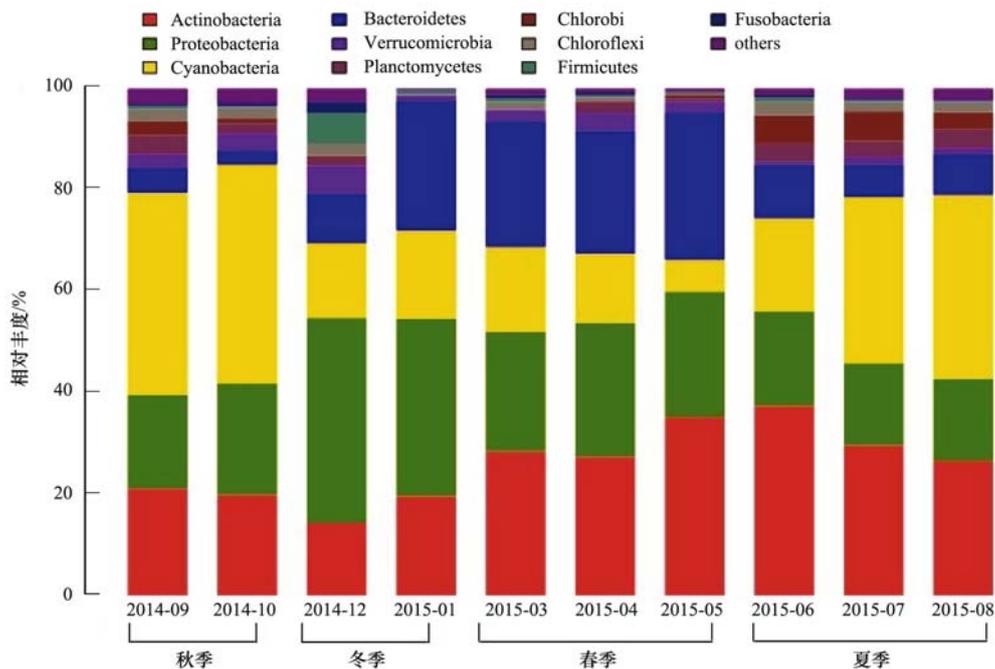


图 2 门分类水平

Fig. 2 Relative abundances of the bacterial phyla

在属分类水平上, 细菌的群落随季节变化明显。如表 5 所示, 真核藻类的叶绿体 (*Chloroplast*) 序列在所有样品中的含量均高于 2.0%, 其中夏季样品中相对丰度最低, 仅为 2.0% ~ 2.3%, 而在冬末 (201501) 和初春 (201503), 其相对丰度达到 15.9% ~ 16.8%。聚球藻属 (*Synechococcus*) 和 (Order) Subsection I 在夏季和秋季含量较高 (5.0% ~ 16.9%), 在冬季和春季含量较低 (0.3% ~ 4.8%)。鞘丝藻属 (*Leptolyngbya*) 在夏季和初秋 (201409) 含量较高, 分别占全细菌序列的 4.3% ~ 15.1% 和 3.8%, 而在其他样品中的含量仅为 0.1% ~ 0.7%。(Order) Subsection III 在夏季含量达到 1.1% ~ 2.6%, 初秋 (201409) 含量为 0.6%, 而在其他样品中的含量低于 0.1%。

秋季和冬季变形菌门 (Proteobacteria) 中属的多

样性较高, 其中 (Family) *Rhodobacteraceae*、*Albidiferax* 和 *GOBB3-C201* 仅在冬季和春季检测到, 而未在夏季和秋季检测到。*Limnohabitans* 和 *Polynucleobacter* 在冬季和春季含量丰富, 而在夏季和秋季含量较低 (表 5)。

放线菌门 (Actinobacteria) 中, *hgcl_clade* 的含量由高到底依次为夏季 (15.9% ~ 20.2%)、秋季 (6.1% ~ 9.8%), 春季 (3.4% ~ 7.0%) 和冬季 (0.7%)。*CL500-29_marine_group* 的含量在各个季节的变化趋势与 *hgcl_clade* 相似, 含量由高到底依次为夏季 (5.7% ~ 15.6%)、秋季 (7.7% ~ 8.0%), 春季 (2.6% ~ 3.4%)、冬季 (0.1% ~ 0.2%)。而放线菌门 (Actinobacteria) 的其他属在春季含量较高。

拟杆菌门 (Bacteroidetes) 中的黄杆菌属 (*Flavobacterium*) 在冬季和春季节含量较高, 分别为

0.9% ~ 20.2% 和 3.8% ~ 15.7%, 但是在夏季和秋季的样品中含量仅为 0.1%.

本研究中检测到其他属的存在, 如在绿藻门

(Chlorobi) 中的 OPB56 和浮霉菌门 (Planctomycetes) 中的 CL500-3 仅在夏季和秋季含量丰富, 而在冬季和春季含量较低.

表 5 不同季节样品中的细菌含量/%

Table 5 Bacteria present in the different seasons/%

项目	秋季		冬季		春季			夏季		
	201409	201410	201412	201501	201503	201504	201505	201506	201507	201508
Cyanobacteria										
<i>Chloroplast</i>	5.8	10.4	6.5	16.8	15.9	8.7	2.3	2.3	2.0	2.1
<i>Synechococcus</i>	11.8	16.9	4.8	0.3	0.4	3.5	2.5	5.0	10.0	7.7
(Order) Subsection I	13.0	12.1	2.0	0.2	0.3	1.2	1.1	4.8	7.8	7.3
<i>Leptolyngbya</i>	3.8	0.7	0.7	0.1	0.1	0.2	0.1	4.3	8.9	15.1
(Order) Subsection III	0.6	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	2.6	2.5
Proteobacteria										
<i>Limnhabitans</i>	0.3	0.7	2.0	5.6	4.1	6.1	12.3	0.5	0.2	0.1
<i>Polynucleobacter</i>	1.3	0.8	1.4	3.4	3.0	5.2	1.3	1.0	1.3	0.8
(Family) MNG7	1.1	1.7	2.8	0.2	0.2	1.4	1.0	0.6	0.8	1.0
<i>Rhodobacteraceae</i>	0.0	0.0	1.1	5.2	2.2	1.2	0.1	0.0	0.0	0.0
<i>Albidiferax</i>	0.0	0.0	1.5	5.8	1.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
(Family) GOBB3-C201	0.0	0.0	3.7	2.1	0.8	1.7	0.7	0.0	0.0	0.0
<i>Paucimonas</i>	1.6	0.3	0.3	0.2	0.6	1.1	0.7	1.4	1.4	1.0
<i>mitochondria</i>	0.0	6.2	0.7	0.0	0.2	0.6	0.1	0.1	0.1	0.0
(Family) Comamonadaceae	1.6	1.1	3.0	1.1	2.4	1.8	1.9	1.6	1.4	1.4
Actinobacteria										
<i>hgcI_clade</i>	9.8	6.1	0.7	0.7	4.5	3.4	7.0	15.9	20.2	17.1
<i>CL500-29_marine_group</i>	7.7	8.0	0.2	0.1	2.6	2.6	3.4	15.6	5.7	7.1
(Family) Sporichthyaceae_norank	0.1	0.7	1.6	2.6	10.3	9.9	10.2	1.1	0.4	0.1
<i>Mycobacterium</i>	0.2	0.7	8.8	5.2	1.8	2.5	4.9	0.8	0.3	0.2
<i>Candidatus_Aquiluna</i>	0.4	0.4	0.1	3.2	0.7	1.7	2.9	0.4	0.3	0.3
(Family) PeM15	1.1	0.9	1.0	0.6	0.6	0.4	0.9	1.1	0.8	0.5
(Family) Sporichthyaceae	0.3	0.8	0.2	1.9	5.6	4.4	2.9	0.9	0.5	0.1
Bacteroidetes										
<i>Flavobacterium</i>	0.0	0.1	0.9	20.2	13.6	3.8	15.7	0.1	0.1	0.1
<i>Sediminibacterium</i>	0.3	0.3	1.1	0.7	1.6	2.3	2.1	0.8	1.0	0.5
<i>Arcicella</i>	0.0	0.1	0.0	0.5	1.0	2.3	5.4	0.6	0.3	0.0
(Family) Chitinophagaceae	1.1	0.5	1.0	0.2	1.7	0.8	1.0	1.5	0.8	0.8
<i>Fluvicola</i>	0.2	0.2	0.3	0.8	1.7	3.0	0.7	0.5	0.2	0.3
(Order) NS11-12_marine_group	0.5	0.3	0.3	0.4	2.0	1.3	1.2	4.0	1.5	1.7
Chlorobi										
(Family) OPB56	2.5	0.8	0.0	0.1	0.0	0.2	0.6	5.5	5.8	3.5
Planctomycetes										
<i>CL500-3</i>	2.4	1.7	0.3	0.1	0.0	1.2	0.6	3.4	1.3	2.8
Verrucomicrobia										
(Family) LD29	0.9	2.2	4.0	0.3	0.3	2.8	1.2	0.3	0.6	0.6

2.3 聚类分析

采用 PCoA 分析衡量样间群落物种组成的相似度(图 3), 结果表明四个季节分布在不同位置, 因此不同月份水体间物种还是存在较大差异, 从图 3 可以看出, 结合主成分 PC1 以及主成分 PC2 进行分析, 算出 PC1 和 PC2 对物种分布的总解释量为 76.64%. 夏秋季节微生物群落结构相似度高, 冬春季节微生物群落结构相似度高, 除冬季外, 同一季节

内的样品相似度高. 因此可将夏秋数据分为一组, 春冬季分为一组. 进而将这两个分组的 Ace 和 Chao 指数进行方差分析, 结果也表明夏秋季节和春冬季多样性存在显著性差异 ($P=0.03$).

2.4 RDA 环境因子分析

采用 RDA 分析方法分析北海湖水体理化性质对细菌群落结构的影响. 由图 4 可知, 两个坐标轴 RDA1 与 RDA2 对细菌群落结构分布的总解释度为

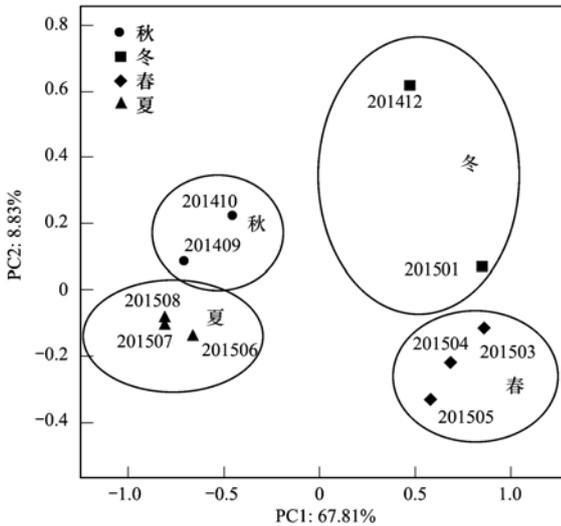


图3 PCoA分析

Fig. 3 PCoA plot

67.11%. T 对北海湖水体细菌群落结构影响最大, 其次是 TP 和 TN . T 和 TN 对夏季(除 201508 外)样品分别呈正相关和负相关. TP 对秋季样品与夏季(201508)呈正相关.

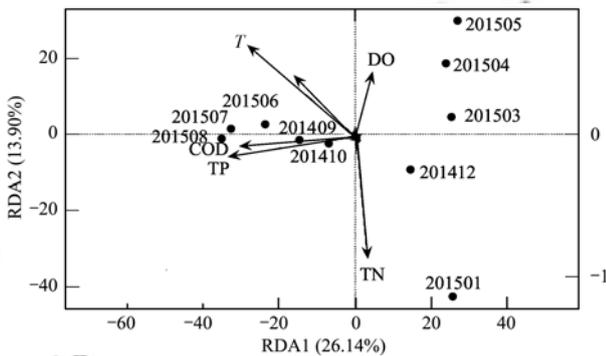


图4 北海湖微生物与环境因子的 RDA 分析

Fig. 4 RDA of microbiological and environmental factors

3 讨论

3.1 水质分析

北海湖水质符合景观水标准, 夏秋季节水质劣于春冬季节. 北海湖水体中 TN 是影响水质的关键因素, 尤其在冬季(201501)其含量高达 $2.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这可能由于冬季水温低, 水体中微生物的活性较低, 导致 TN 的降解效果较差^[16,17]. TP 是衡量水体受污染程度的一个重要指标, 当水体中磷含量过高时, 水质变坏, 因此 TP 是水质中不可或缺的指标^[18]. 依据文献^[19]规定湖泊营养类型, 北海湖水体秋冬季节为富营养型, 春季为中营养型, 夏季为重营养型. 究其原因, 首先上游污染严重的水体流入湖内是导致水体理化指标超标的重要原因之一,

什刹海作为北海湖上游, 2007 ~ 2013 年 TN 、 TP 含量较高, 陶亮等^[20]在 2013 年调查研究也曾发现, “六海” TN 含量较高主要原因是上游河道将 TN 含量明显较高的水体输入导致^[21]. 其次降雨径流可能使外源性污染物流入湖内造成污染, 张青青^[22]指出降雨径流污染和内源释放污染已经成为城市景观水体氮磷等营养盐的主要来源, 苟婷等^[23]也曾指出强降雨会将土壤中积累的营养盐流入水体. 降雨也会引起湖泊水体水文和水动力学特征的变化, 从而影响营养盐的变化^[24]. 采样期间, 夏秋季节降雨量分别占年降雨量的 50.6% 和 30.2%, 明显高于其他两季, 致使夏秋季节的水质劣于春冬. 另外旅游污染也可能引起水体污染, 北海公园为北京名胜公园之一, 旅游旺期(4 ~ 11 月)每日接待游客至少约 2 万人, 游客往湖内投食、丢弃废物相比其他季节更为严重^[25]. 对此, 要进一步加大对上游水源的监督与控制; 加强对雨污合流排水管的改造, 减轻降雨径流对湖泊的危害; 同时公园管理人员要加强管理力度, 对游客丢弃垃圾、投食喂鱼等不文明现象及时制止, 甚至可以在适当的时候控制游客数量.

3.2 北海湖细菌群落结构分析

细菌多样性指数即 Shannon 多样性是反映多样性综合性指标, 既包括物种丰富度又包括均匀度^[26]. 袁聪等^[27]、张华等^[28]发现夏季 Shannon 多样性指数高于冬季, 但本研究结果却与之相反, 本研究中夏季的 Ace 和 Chao 丰富度指数均高于冬季, 由于夏季样品中的某些优势物种的丰度随温度降低而降低, 低丰度物种随温度降低而升高, 导致冬季样品中群落的均匀度高于夏季, 进而使得北海湖冬季微生物多样性整体高于夏季.

蓝细菌门 (Cyanobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、放线菌门 (Actinobacteria) 和变形菌门 (Proteobacteria) 是北海湖水体中的主要菌门, 这与大量研究湖水细菌群落结构的文献相似^[29~32], 但不同菌门的分布呈现明显的季节特征, 且细菌的群落结构与环境因子的关系密切.

由 RDA 分析可知, T 对北海湖微生物群落结构影响最大, 且夏季和秋季样品的微生物群落分布与 T 和 TP 呈正相关性. Brogueira 等^[33]和 Cameiro 等^[34]在 Tagus 河口研究发现 T 也是影响微生物群落结构(主要为浮游藻类)的主要因子. 这是由于夏秋季节水温偏高, 营养物质丰富的环境中微生物生长较旺盛, 进而导致不同环境出现较大的微生物群落差异^[35]. 北海湖夏秋季节蓝细菌 (Cyanobacteria)

的相对丰度较高,原因是蓝细菌(Cyanobacteria)嗜高温的特性致使其在夏秋季节大量繁殖所致^[36,37]. Zarina 等^[38]在巴基斯坦淡水栖息地也曾发现蓝细菌(Cyanobacteria)在高温下生长旺盛. 一般而言,TP 的含量越高蓝细菌(Cyanobacteria)的相对丰度也越高,和本研究发现的夏季和秋季 TP 含量较高,蓝细菌(Cyanobacteria)的相对丰度也较高的结果一致^[39]. *T* 和 TP 的变化导致蓝细菌(Cyanobacteria)丰度发生变化,进一步影响了北海湖整体微生物群落结构的季节性变化. 水质分析结果表明夏季水体中 COD 增加,主要原因也和蓝细菌(Cyanobacteria)大量繁殖而进行更多的光合作用有关. 而 COD 的变化使得夏季样品微生物群落结构发生变化. 聚球藻属(*Synechococcus*)是超微蓝细菌的一种,是初级生产力的主要参与者和贡献者,在生态系统的光合作用、碳循环及食物链中具有重要作用并且很难通过形态学观察检测到,已在太湖、滇池和其他富营养化的淡水湖泊中发现该菌属大量存在^[40~44]. 北海湖夏秋季节水体中的聚球藻属(*Synechococcus*)含量丰富,因此应对其水体加强监测和管理,避免蓝细菌水华的暴发. 本研究中检测 Subsection I 和 Subsection III 中未分类的 (Order) Subsection I 和 (Order) Subsection III (表 5) 与数据库中已有的序列相似度过低,标志北海湖中有特异性的微生物存在. 与蓝细菌(Cyanobacteria)的分布不同,真核微生物(藻类)在夏季的相对丰度最低,而冬季的相对丰度较高,研究者针对微生物(藻类)随温度的分布特征发现,硅藻与温度呈现负相关,在 10℃ 相对丰度达到最大^[45].

变形菌门(Proteobacteria)通常是水环境中主要的原核生物,包含了光营养性、化能自养型和化能异养型细菌,这类细菌在水环境中普遍存在,相关报道指出在湿地、养殖废水和深海沉积物等环境中以第一优势门存在^[46~49],也是本研究冬季样品中的优势门. *Limnohabitans* 作为主要的淡水浮游生物, TN 和 TP 对其生长繁殖有重要的作用^[50]. 本研究结果发现 *Limnohabitans* 在夏秋季节含量丰富,这和本次研究中发现夏秋季节水体中 TN、TP 含量高的现象相符. 这也间接反映出夏秋季节水质较差,与水质评价结果相一致,因此在夏秋季节更要加强水质监测避免发生水体富营养化. 文献[51~53]分别在天津海河、巴西 Paraguaçu 河和黄海岸淡水泉中发现 *Limnohabitans* 大量存在.

放线菌门(Actinobacteria)和拟杆菌门

(Bacteroidetes)是水体中主要的微生物,承担水体的基本功能,是本研究中春季样品的优势门. 放线菌门(Actinobacteria)中的 *hgcI*-clade 属在秋季和夏季样品中含量较高(6.1%~20.2%). 这与王鹏等^[54]研究赣江南昌段丰水期细菌群落特征时 *hgcI*-clade 属含量最高(16.39%)结果较为相似. *hgcI*-clade 具有较强的吸收碳水化合物和富氮化合物的遗传能力,能在较低的 DO 含量下生存,还能利用低温水中的低浓度溶解有机碳^[55,56]. 拟杆菌门(Bacteroidetes)中的黄杆菌属(*Flavobacterium*) 在冬末、春初和春末 3 个时间段含量最高(13.6%~20.2%). 卢思丹等^[57]在沔河微生物群落中发现它以优势属出现;秦焯^[58]调查鄱阳湖微生物群落结构时也曾发现它是优势属. 黄杆菌属(*Flavobacterium*)主要分布在淡水湖泊和土壤中靠分解有机物生存,具有广泛的溶藻能力,使得水质在一定程度上得以提高^[59,60],这与本研究观察到此段时间水质优于夏秋季节的现象相符合. 另外,黄杆菌属(*Flavobacterium*)的某些菌种具有致病作用,集中分布在淡水河水、江河、土壤沉积物和鱼的发病组织中,主要表现在对鱼的致病作用^[61]. 同时它还可以引起医院内感染,尤其是婴幼儿更容易感染^[62]. 因此,对于该菌属也不容忽视,要加强防护意识.

4 结论

总体而言,北海湖水在夏季和秋季的水质偏差, TN 和 TP 是影响水质的主要因素. 环境因子和微生物的关系密切, TN 和 TP 有助于微生物的生长,会引起微生物的大量繁殖,微生物通过光合作用,固定空气中的 CO₂,从而导致水体 COD 增高,引起水质的恶性循环. *T* 是影响微生物群落结构的关键因素;夏季和秋季水温较高,微生物的多样性最高,蓝细菌的分布尤为广泛,其中聚球藻属(*Synechococcus*)大量存在,可能会引起水华的暴发,因此应保持对北海湖水质和微生物的检测,预防水华的发生.

致谢:对北京市北海公园及相关工作人员在现场采样给予的帮助表示感谢!

参考文献:

- [1] 王圣瑞,倪兆奎,席海燕. 我国湖泊富营养化治理历程及策略[J]. 环境保护, 2016, 44(18): 15-19.
Wang S R, Ni Z K, Xi H Y. Management process and strategy of lake eutrophication in China [J]. Environmental Protection, 2016, 44(18): 15-19.
- [2] 袁琦. 上海水源水中微生物群落结构的分子生态学研

- [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- Yuan Q. Molecular ecology research on microbial community in the water of waterhead area in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [3] 张艳会, 李伟峰, 陈求稳. 太湖水华程度及其生态环境因子的时空分布特征[J]. 生态学报, 2016, **36**(14): 4337-4345.
- Zhang Y H, Li W F, Chen Q W. Spatial-temporal variance of the intensity of algal bloom and related environmental and ecological factors in Lake Taihu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(14): 4337-4345.
- [4] 莫婉湫, 李策, 刘玉, 等. 认识“水华”[J]. 湿地科学与管理, 2009, **5**(1): 62-63.
- [5] 谢平. 论蓝藻水华的发生机制——从生物进化、生物地球化学和生态学观点[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] WHO, UNESCO, UNEP. Toxic cyanobacteria in water [M]. London: St. Edmundsbury Press, 1999.
- [7] 胡传林, 万成炎, 吴生桂, 等. 蓝藻水华的成因及其生态控制进展[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(12): 1471-1477.
- Hu C L, Wan C Y, Wu S G, *et al.* Progress in causes and ecological control of cyanobacterial bloom [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(12): 1471-1477.
- [8] 郑维发, 曾昭琪. 淡水蓝藻的高温适应[J]. 湖泊科学, 1994, **6**(4): 356-363.
- Zheng W F, Zeng Z Q. High temperature adaptation of fresh water cyanobacterium [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, **6**(4): 356-363.
- [9] Roberts R D, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, **21**(3): 391-399.
- [10] Yamaguchi M, Ogawa T, Muramoto K, *et al.* Effects of culture conditions on the expression level of lectin in *Microcystis aeruginosa* (freshwater cyanobacterium) [J]. *Fisheries Science*, 2000, **66**(4): 665-669.
- [11] Zimba P V, Khoo L, Gaunt P S, *et al.* Confirmation of catfish, *Ictalurus punctatus* (Rafinesque), mortality from *Microcystis* toxins [J]. *Journal of Fish Diseases*, 2001, **24**(1): 41-47.
- [12] Xiao L J, Wang T, Hu R, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5099-5109.
- [13] 余海霞, 来勇, 赵佳佳, 等. 城市河道浮游植物群落多样性指数对水质的指示作用[J]. 化学与生物工程, 2016, **33**(9): 32-36.
- Yu H H, Lai Y, Zhao J J, *et al.* Water quality indication of phytoplankton community diversity index in urban rivers [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2016, **33**(9): 32-36.
- [14] 朱爱民, 胡菊香, 李嗣新, 等. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(3): 378-385.
- Zhu A M, Hu J X, Li S X, *et al.* Phytoplankton diversity and water quality in the main stream and tributaries of Three Gorges Reservoir region of Yangtze River during dry season [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, **25**(3): 378-385.
- [15] 马永红, 曾燊, 任丽萍, 等. 嘉陵江四川段藻类植物群落结构及水质评价[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2573-2579.
- Ma Y H, Zeng Y, Ren L P, *et al.* community structure of phycophyta and evaluation of water quality in Sichuan section of Jialing River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(9): 2573-2579.
- [16] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略[J]. 生态学报, 2012, **32**(1): 48-55.
- Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, *et al.* The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 48-55.
- [17] 刘婷婷. 嘉陵江水体中碳、氮、磷季节变化及其输出[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [18] 王爱爱, 冯佳, 谢树莲. 汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 915-923.
- Wang A A, Feng J, Xie S L. Phytoplankton community structure and assessment of water quality in the middle and lower reaches of Fenhe River [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 915-923.
- [19] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [20] 陶亮, 杨菊, 孙峰. “六海”富营养化态势及对策研究[J]. 北京水务, 2014, (4): 33-35.
- [21] 周坤朋, 刘阳春, 王崇臣. 北京什刹海区域水体富营养化时空演变特征分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(4): 703-712.
- Zhou K P, Liu Y C, Wang C C. Analysis on temporal-spatial variation of eutrophication in Shichahai area, Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(4): 703-712.
- [22] 张青青. 城市景观水体氮磷污染负荷来源解析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- Zhang Q Q. The nitrogen and phosphorus pollution of the landscape water [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [23] 苟婷, 马千里, 许振成, 等. 贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 946-954.
- Gou T, Ma Q L, Xu Z C, *et al.* Phytoplankton community structure and eutrophication risk assessment of Beijing River [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 946-954.
- [24] O'Farrell I, Izaguirre I, Chaparro G, *et al.* Water level as the main driver of the alternation between a free-floating plant and a phytoplankton dominated state: a long-term study in a floodplain lake [J]. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(2): 275-287.
- [25] 王迎春, 任天志, 王立刚, 等. 北京市水体富营养化的成因与治理对策分析[J]. 中国农业资源与区划, 2005, **26**(3): 40-44.
- Wang Y C, Ren T Z, Wang L G, *et al.* Analysis on reasons and harness counter measures for nutritive water in Beijing [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2005, **26**(3): 40-44.
- [26] 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.
- [27] 袁聪, 陶诗雨, 张莹莹, 等. 安康水库表层浮游藻类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(7): 2167-2176.

- Yuan C, Tao S Y, Zhang Y Y, *et al.* community structure of phytoplankton and its relationships with environmental factors in surface water of Ankang Reservoir, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(7): 2167-2176.
- [28] 张华, 胡鸿钧, 晁爱敏, 等. 浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 944-956.
- Zhang H, Hu H J, Chao A M, *et al.* Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinshuitan Reservoir, Zhejiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(3): 944-956.
- [29] 陈楠. 太湖沉积物微生物群落组成与物质循环及藻华爆发的相关性[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- Chen N. Relationship between microbial community structure and nutrient cycles and algal bloom in Taihu Lake [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [30] Parfenova V V, Gladkikh A S, Belykh O I. comparative analysis of biodiversity in the planktonic and biofilm bacterial communities in Lake Baikal[J]. Microbiology, 2013, **82**(1): 91-101.
- [31] Kaluzhnaya O V, Itskovich V B. Distinctive features of the microbial diversity and the polyketide synthase genes spectrum in the community of the endemic Baikal sponge *Swartschewskia papyracea*[J]. Russian Journal of Genetics, 2016, **52**(1): 38-48.
- [32] Bai F, Zeng S Y, Li D, *et al.* Analysis of the bacterial community by 454 pyrosequencing in two freshwater lakes: Yangcheng Lake and Taihu Lake in China [J]. Advanced Materials Research, 2013, **788**: 315-320.
- [33] Brogueira M J, do Rosário Rosario M, Cabecadas G. Phytoplankton community structure defined by key environmental variables in Tagus estuary, Portugal [J]. Marine Environmental Research, 2007, **64**(5): 616-628.
- [34] Gameiro C, Cartaxana P, Brotas V. Environmental drivers of phytoplankton distribution and composition in Tagus Estuary, Portugal [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, **75**(1-2): 21-34.
- [35] 孙寓姣, 陈程, 丁爱中, 等. 官厅水库水质特征及水体微生物多样性的响应[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1547-1553.
- Sun Y J, Chen C, Ding A Z, *et al.* The corresponding of microbial diversity on water quality and environmental variables of Guanting Reservoir [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(5): 1547-1553.
- [36] 田昌. 洪泽湖浮游植物种群结构变化的水环境驱动因子分析 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- Tian C. Variation of phytoplankton community and its driving factors in Hongze Lake [D]. Ji'nan: Shandong University, 2015.
- [37] Liu Z H, Huang S B, Sun G P, *et al.* Phylogenetic diversity, composition and distribution of bacterioplankton community in the Dongjiang River, China [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012, **80**(1): 30-44.
- [38] Zarina A, Shameel M, Naz S. Distribution of freshwater blue-green algae (*Cyanophyta*) in northeastern Pakistan [J]. International Journal on Algae, 2010, **12**(3): 257-270.
- [39] 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.
- [40] Raven J A. The twelfth Tansley lecture. Small is beautiful: the picophytoplankton [J]. Functional Ecology, 1998, **12**(4): 503-513.
- [41] 李胜男, 周建, 魏利军, 等. 淡水超微型浮游植物多样性及其研究方法[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(4): 1174-1182.
- Li S N, Zhou J, Wei L J, *et al.* A review of diversity of freshwater picophytoplankton and its related research methods [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(4): 1174-1182.
- [42] 冯丽君. 太湖蓝藻多样性及群落结构时空动态研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- [43] 李艳晖. 滇池、洱海超微浮游蓝藻、绿藻细胞学和多样性研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2009.
- [44] Bailey-Watts A E, Bindloss M E, Belcher J H. Freshwater primary production by a blue-green alga of bacterial size [J]. Nature, 1968, **220**(5174): 1344-1345.
- [45] 曹方意. 太湖流域浮游藻类特征及对水生态功能分区的指示意义 [D]. 南京: 南京工业大学, 2015.
- [46] Spring S, Schulze R, Overmann J, *et al.* Identification and characterization of ecologically significant prokaryotes in the sediment of freshwater lakes; molecular and cultivation studies [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2000, **24**(5): 573-590.
- [47] 杜瑞芳, 李靖宇, 赵吉. 乌梁素海湖滨湿地细菌群落结构多样性 [J]. 微生物学报, 2014, **54**(10): 1116-1128.
- Du R F, Li J Y, Zhao J. Bacterial diversity in littoral wetland of Wuliangsu lake [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2014, **54**(10): 1116-1128.
- [48] 张健. 海参循环水养殖系统建立及曝气生物滤池细菌多样性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Zhang J. Establishment of recirculating aquaculture system of sea cucumber and analysis of bacterial diversity in biological aerated filter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [49] 陈丽蓉. 北极深海沉积物中微生物的多样性研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
- Chen L R. The investigation on microbial diversity of Arctic deep sea sediments [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012.
- [50] Salcher M M. Same same but different: ecological niche partitioning of planktonic freshwater prokaryotes [J]. Journal of Limnology, 2013, **73**(S1): 74-87.
- [51] 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.
- [52] Lopes F A C, Catão E C P, Santana R H, *et al.* Microbial community profile and water quality in a protected area of the Caatinga biome [J]. PLoS One, 2016, **11**(2): e0148296.
- [53] Ye Q, Liu J, Du J Z, *et al.* Bacterial diversity in submarine groundwater along the coasts of the Yellow Sea [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, **6**: 1519.
- [54] 王鹏, 陈波, 李传琼, 等. 赣江南昌段丰水期细菌群落特征 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2453-2462.
- Wang P, Chen B, Li C Q, *et al.* Bacterial communities in Nanchang section of the Ganjiang River in wet season [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2453-2462.
- [55] Ghylis T W, Garcia S L, Moya F, *et al.* comparative single-cell genomics reveals potential ecological niches for the freshwater actinobacteria lineage [J]. The ISME Journal, 2014, **8**(12): 2503-2516.

- [56] Liu J W, Fu B B, Yang H M, *et al.* Phylogenetic shifts of bacterioplankton community composition along the Pearl Estuary: the potential impact of hypoxia and nutrients [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**: 64.
- [57] 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 等. 降水对沔河水质和水体微生物的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2563-2569.
Lu S D, Sun Y J, Zhao X, *et al.* Impact of precipitation on Fenghe River water and aquatic microorganisms [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2563-2569.
- [58] 秦焯. 基于高通量 DNA 测序的鄱阳湖微生物生态研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
Qin X. Study on the microbial ecology of Poyang Lake based on next-generation sequencing [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [59] da Costa M S, Albuquerque L, Nobre M F, *et al.* The identification of polar lipids in prokaryotes [J]. *Methods in Microbiology*, 2011, **38**: 165-181.
- [60] 吴刚, 席宇, 赵以军. 溶藻细菌研究的最新进展[J]. *环境科学研究*, 2002, **15**(5): 43-46.
Wu G, Xi Y, Zhao Y J. The latest development of research on algae-lysing bacteria [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, **15**(5): 43-46.
- [61] 高远. 发现于茅台地区的黄杆菌 *Flavobacterium maotaiensis* sp. nov. 和 *Flavobacterium renhuaiensis* sp. nov. 的分类学研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
Gao Y. *Flavobacterium maotaiensis* sp. nov. and *Flavobacterium renhuaiensis* sp. nov., isolated from Maotai Town [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [62] 尚建中, 马光远, 巫善明, 等. 黄杆菌属感染[J]. *中国实用内科杂志*, 1995, **15**(11): 695-696.



CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl ₂ Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric PM _{2.5} in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-bao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM ₁₀ Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll a and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH ₄ ⁺ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N ₂ O and NO _x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of CaCO ₃ Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)