

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

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(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系

辛胜林^{1,2}, 梁月明^{2,3*}, 彭文杰^{1,2}, 宋昂^{2,3}, 靳振江^{1*}, 朱美娜^{2,3}, 李强^{2,3}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541006; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 桂林 541004)

摘要: 细菌丰度是反映水体污染状况的敏感指标. 为了解亚热带岩溶区水库营养状况, 细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系, 本文以亚热带典型岩溶水库——广西上林县大龙洞水库为研究对象, 采用综合营养状态指数法 (TLI) 评价大龙洞水库水体的营养化类型、荧光定量 PCR 技术研究细菌丰度分布情况以及¹⁴C标记法测定细菌生产力. 结果表明, 大龙洞水库处于富营养化状态, 细菌丰度在调查水域存在明显空间异质性; 沿着水流方向从上游到下游表层水的细菌丰度呈先递减后增加的趋势; 细菌丰度垂向分布特征均表现为表层 > 中层 > 底层; 细菌生产力的变化特征为表层水的细菌生产力明显高于中层和底层. 相关性分析表明, 细菌丰度与细菌生产力呈显著正相关; 细菌丰度与温度、pH、高锰酸盐指数呈显著正相关, 与电导率和 DIC 呈显著负相关, 与 DO、叶绿素 a、DOC 呈极显著正相关; 细菌生产力则与 pH、DOC、高锰酸盐指数呈显著正相关, 与电导率、DIC 呈显著负相关, 与 DO 极显著正相关. 主成分分析将影响细菌丰度和细菌生产力的 10 个环境因子均划分为两个主成分, 第一主成分为温度、pH、电导率、DIC、DO、Chla、DOC 和高锰酸盐指数, 第二主成分为 TN 和 TP, 表明大龙洞水库细菌丰度和细菌生产力受多种环境因子共同影响, 进而使光合细菌成为水体初级生产力的重要贡献者.

关键词: 岩溶水库; 细菌丰度; 细菌生产力; 环境因子; 富营养化

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5647-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201804227

Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir

XIN Sheng-lin^{1,2}, LIANG Yue-ming^{2,3*}, PENG Wen-jie^{1,2}, SONG Ang^{2,3}, JIN Zhen-jiang^{1*}, ZHU Mei-na^{2,3}, LI Qiang^{2,3}

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 3. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China)

Abstract: In recent years, the increasing scarcity of water resources and eutrophication of water have become more serious. Reservoirs that are far from big cities have become important sources of drinking water and were targets of research and protection. Therefore, the abundance and production of bacteria and their correlations with environmental factors were investigated in the Dalongdong Reservoir, Shanglin County, Guangxi Province, using Quantitative Real-time PCR technology and the ¹⁴C tracer technique. The Dalongdong Reservoir is a typical subtropical karst reservoir. The bacterial abundance of the surface water decreased from the upstream to the downstream along the water flow direction and then increases. The vertical distribution of the bacterial abundance at each sampling site shows a similar trend; it is the highest in the surface water and the lowest on the bottom. The correlation analysis results show that the temperature, pH, electrical conductivity, dissolved organic carbon (DOC), chlorophyll-a, dissolved oxygen (DO), and other environmental factors significantly correlate with the bacterial abundance, indicating that these parameters are the main factors limiting the bacterial abundance in this region. The bacterial production is positively correlated with the pH, DOC, and permanganate index; negatively correlated with the conductivity and DIC; and significantly positively correlated with DO. The principal component analyses (PCA) shows that the environmental factors affecting the bacterial abundance and bacterial production can be grouped into two PCAs. PCA1 includes the temperature, pH, electrical conductivity, DIC, DO, chlorophyll-a, DOC, and permanganate index and PCA2 includes TN and TP. The bacterial abundance and production in the Dalongdong Reservoir are affected by various environmental factors and photosynthetic bacteria are the important contributors to the production of organic carbon.

Key words: karst reservoir; bacterial abundance; bacterial production; environmental factors; eutrophication

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-07-10

基金项目: 广西自然科学基金杰出青年基金项目(2015GXNSFGA139010)

作者简介: 辛胜林(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶生物地球化学, E-mail: glqiangli@163.com

* 通信作者, E-mail: lym@karst.ac.cn; zhenjiangjin@163.com

水库是一种介于河流和湖泊间的半人工半自然水体,并且受人为调控明显,具有独特的生态学特征^[1].近年来,我国南方由于水体污染,例如太湖、巢湖、滇池等水体的富营养化,水质性缺水问题严重,远离大城市的水库逐渐成为重要的饮用水水源地.在我国西南地区,由于碳酸盐的地质背景,形成了特殊的水环境,使岩溶水库与非岩溶水库在水化学特征以及生态环境特征等方面都存在较大的差异.

细菌是水库生态系统中分布最广的、最丰富的生物,并且细菌在生物地球化学循环的过程中发挥着极为重要的作用,一方面参与有机物质的分解和矿化过程,另一方面参与矿物质的再生和生物量的产生过程^[2,3].因此,细菌不仅作为生态系统中有机的分解者,而且还是食物链、食物网中的关键组分之一^[4,5],并在水体环境中的物质循环和能量流动过程中具有重要的作用.然而,水库中的细菌对环境变化极为敏感^[6].赛·巴雅尔图等^[7]通过研究新疆博斯腾湖浮游细菌丰度对富营养化和咸化的响应时发现,细菌丰度是反映博斯腾湖富营养化与咸化的一个敏感指标;李建洋等^[8]发现深圳近海表层浮游细菌丰度在时间上主要受温度影响,在空间上主要受营养盐和叶绿素 a 影响;周菁等^[9]对福建莆田东圳水库秋季细菌群落垂直分布进行调查,发现溶解氧是显著影响细菌群落组成的环境因子;胡明明等^[10]认为水温、总氮、总磷、叶绿素 a 是影响

浮游细菌数量与分布的主要限制因素.在我国亚热带地区分布着面积广阔的岩溶地区,在这些地区分布着众多的湖泊和水库,然而,细菌丰度和细菌生产力在亚热带岩溶水库中的分布规律及其与环境因子的关系却鲜有报道.

为此,本文以亚热带典型岩溶水库——广西上林大龙洞水库为研究对象,采用综合营养状态指数法评价其营养化程度、荧光定量 PCR 技术研究细菌丰度分布情况以及¹⁴C 标记法测定细菌生产力,分析细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系,以为水环境保护及其生态服务功能评价提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大龙洞水库位于广西上林县北面西燕镇境内,距县城约 25 km,库区位于 23°30'01"~23°40'08" N, 108°30'02"~108°36'04"E 之间.水库始建于 1957 年,是一座利用天然岩溶谷地并堵塞洞穴、落水洞和一些裂隙而成并集防洪、发电、灌溉为一体的大型水库.水库总库容 1.5 亿 m³,总集雨面积 310 km²^[11].水库近似峡谷型呈西北-东南方向倾斜,是一座典型的地下水补给型水库,主要接受上游遐龙和大龙洞两条地下河补给,库区出露地层主要为下石灰统和中泥盆统东岗岭组碳酸盐岩^[12](如图 1).水库库区处于大明山背斜和乔贤向斜两个

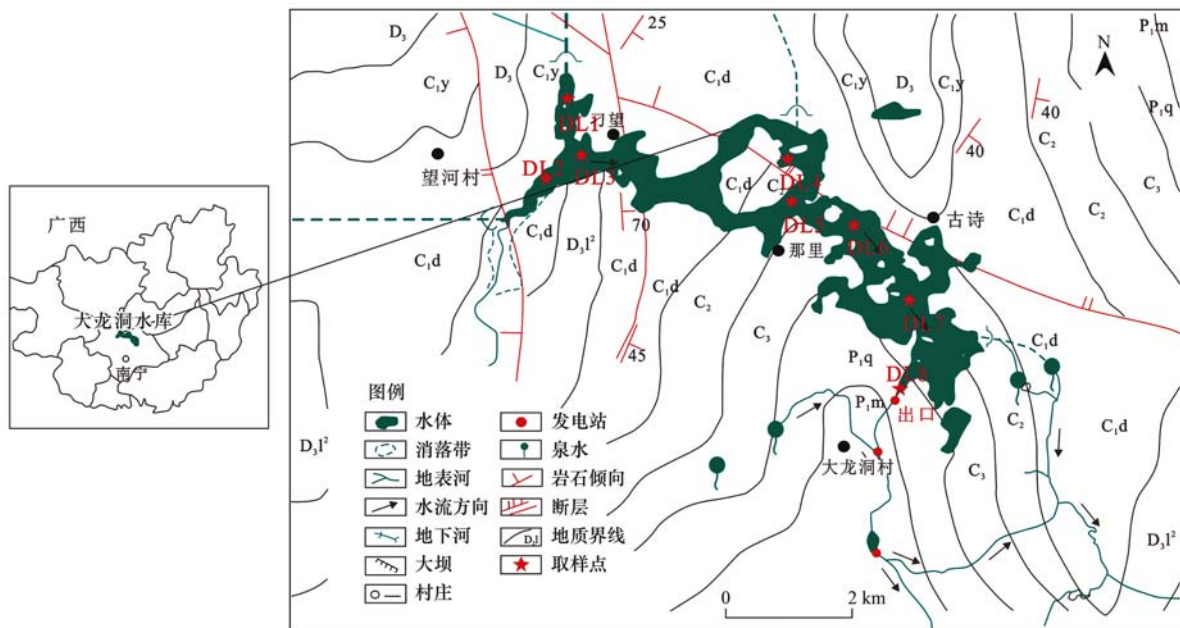


图 1 研究区水文地质简图及采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of the hydrogeology of the study area and sampling points

溶岩区之间, 受构造和地下水活动的影响, 岩溶地貌十分发育^[13].

大龙洞水库紧邻北回归线, 属亚热带季风气候, 多年年均降水量 1 584 mm, 多年年均气温 20.9℃, 雨热同季, 丰水期为 4~9 月, 丰水期月均降雨量为 207.0 mm, 枯水期为 10 月到次年 3 月, 枯水期月均降雨量为 57.0 mm^[14].

1.2 采样点设置与样品采集

2017 年 8 月对广西上林县大龙洞水库按照水库上游(DL1、DL2、DL3)、中游(DL4、DL5、DL6)、下游(DL7、DL8)的顺序共设置 8 个采样点, 并进行分层采样(间隔 5 m 根据水库实际深度确定采样个数), 见图 1. 现场采用德国 HYDRO-BIOS 公司生产的 Ruttner 标准定深采样器对水样进行采集, 8 个采样点均采集表层水, 其中 DL1~DL6 采样点除采集表层水外还采集了水深为 5 m 处的水样, DL5、DL6 号点由于水深较深还采集到了水深 10 m 处的水样, DL7、DL8 两个采样点由于水深的限制只采到表层水, 共计获得 16 个样品(图 1). 用高密度聚乙烯瓶储存 1 500 mL 水样用于测试阴阳离子、溶解有机碳(DOC)等. 现场用 0.22 μm 无菌微孔滤膜过滤水样, 用以收集浮游细菌, 将滤膜置于无菌离心管中并保存在便携式冰箱中, 4 h 内运回实验室 -80℃ 保存直至提取 DNA.

采用¹⁴C标记法^[15]测定细菌生产力, 用 3 μm 的无菌滤膜过滤水样, 将过滤水样分别取 50 mL 装入两个可密闭的灭菌玻璃瓶中, 分别编号为 1 号和 2 号, 其中 1 号瓶加入 10 滴饱和 HgCl₂, 两个瓶中都加入 100 μL NaH¹⁴CO₃ 溶液(每个样品做 3 个重复, 最后结果取平均值), 样品在采样点原地悬挂培养 48 h, 48 h 后用 0.22 μm 无菌微孔滤膜过滤水样, 将滤膜保存待测.

1.3 样品理化指标的测定

使用多参数水质检测仪 YSI EXO(美国 YSI 公司)现场测定水温(*T*)、溶解氧(DO)、pH 值和电导率等基本水质指标. 用碱度试剂盒(德国 Merck 公司)现场滴定 HCO₃⁻, 滴定精度为 0.01 mg·L⁻¹. 水体中阳离子和 TP 的测定采用美国生产的 IRIS Intrepid II XSP 全谱直读等离子体光谱仪测定, 透明度(SD)采用黑白赛氏盘现场测定, TN 和 DOC 采用德国耶拿公司 MultiN/C3100 碳氮分析仪测定, Chla 含量的测定采用丙酮萃取分光光度法.

1.4 细菌生产力的测定

细菌生产力的测定在中国地质科学院岩溶地质

研究所国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成. 将过滤好的滤膜用 1220C 超低本底液闪仪测量¹⁴C放射性强度.

细菌生产力的计算公式^[15]:

$$PP_L = \frac{1\,000 \times 1.05 \times (R_L - R_K) \times W}{R_s \times t}$$

式中, PP_L 为光照下细菌固碳速率 μg·(L·h)⁻¹; R_L 为过 3 μm 膜水样中¹⁴C放射性活度(Bq); R_K 为加 HgCl₂ 水样中有机¹⁴C放射性活度(Bq); W 为水样中 DIC 浓度(mg·L⁻¹); R_s 为已知的原液有机¹⁴C 的放射性活度(Bq); t 为原地悬挂培养的时间(h); 1.05 是用以校正¹⁴C与¹²C 之间差别的校正系数.

1.5 水体富营养化状况

采用综合营养状态指数法(TLI)评价大龙洞水库水体的营养化类型, TLI 指数法可以将湖泊的营养状态从贫营养型至富营养型, 采用 0~100 的连续数值对湖泊营养状态分级, 评价标准为: TLI < 30 为贫营养, 30 < TLI < 50 为中营养, TLI > 50 为富营养^[16].

$$TLI(Chla) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln Chla)$$

$$TLI(SD) = 10 \times (5.118 - 1.94 \ln SD)$$

$$TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln TP)$$

$$TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln TN)$$

$$TLI(\text{高锰酸盐指数}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \ln \text{高锰酸盐指数})$$

综上, TLI = [TLI (Chla) + TLI (SD) + TLI (TP) + TLI (TN) + TLI (高锰酸盐指数)] / 5

式中, TLI (Chla)、TLI (SD)、TLI (TP)、TLI (TN) 和 TLI (高锰酸盐指数) 分别是以叶绿素 a (μg·L⁻¹)、透明度(m)、总磷(mg·L⁻¹)、总氮(mg·L⁻¹)和高锰酸盐指数(mg·L⁻¹)为基准的营养状态指数.

1.6 细菌丰度测定

采用 MP Biomedicals 公司生产的 DNA 快速提取试剂盒, 按照说明对样品进行细菌 DNA 的提取; 然后利用微量紫外分光光度计(Quawell 5000, 美国)测定 DNA 浓度和纯度, DNA 样品放 -20℃ 冰箱中保存, 以供下游分子生物学实验使用.

采用荧光定量 PCR 测定细菌 16S rRNA 基因拷贝数. 细菌扩增引物^[17]: 正向引物为 F338 (5'-CCTACG GGA GGC AGC AG-3'), 反向引物为 R518 (5'-ATT ACC GCG GCT GCT GG-3'). 反应体系 25 μL, 模板 DNA (genomic DNA, 5 ng·μL⁻¹) 1 μL, Green-2-Go qPCR Mastermix (Sangon Biotech, 上海)

12.5 μL , 去离子无菌水 9.5 μL , 质量浓度为 10 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{L}^{-1}$ 的正向引物和反向引物各 1 μL . 16S rRNA 的扩增程序: 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 1 min, 95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 30 s, 56 $^{\circ}\text{C}$ 退火 30 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 1 min, 30 个循环, 最后 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 5 min.

标准曲线制作: 将细菌测序获得的已知种属的阳性克隆子扩增培养后提取质粒 DNA, 经紫外分光光度计检测浓度后, 将其进行 $10^1 \sim 10^5$ 倍梯度稀释, 作为 16S rRNA 基因的荧光定量的标准样品. 所有样品均做 4 次技术重复, 为了消除不同批次扩增的误差将每个基因的标准曲线样品, 阴性对照, 样品扩增同时在 96 孔板上进行. 实验采用荧光定量 PCR 仪 (BIO RAD, CFX96TM Real-Time System, 美国) 进行 qPCR 扩增.

1.7 分析与统计

利用 CorelDRAWx6 及 Origin 8.5 软件进行采样点图及数据分析图的制作; AqQA 软件绘制水化学三角图; 运用 SPSS 20.0 软件进行皮尔森 (Pearson) 相关性分析 (双侧) 和主成分分析; Excel 2016 进行相关数据计算.

2 结果与分析

2.1 基本水化学特征和水体营养状况

大龙洞水库丰水期水化学三角图 (图 2) 和水化学数据 (表 1) 表明: Ca^{2+} 和 HCO_3^- 是水体中的主要离子, 其中 Ca^{2+} 占阳离子总质量的 79.88% ~

87.65%, Mg^{2+} 占 9.73% ~ 14.28%, K^+ 占 1.11% ~ 2.87%, Na^+ 占 1.51% ~ 2.97%; HCO_3^- 占阴离子总质量的 91.95% ~ 95.45%, SO_4^{2-} 占 3.41% ~ 5.89%, Cl^- 占 1.14% ~ 2.16%. 根据舒卡列夫分类法判断大龙洞水库水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型, 说明水库水体为碳酸盐平衡体系所控制.

采用综合营养状态指数法对其进行评价, TLI 的计算结果如图 3 所示, 结果表明: TLI 数值介于 77.49 ~ 84.8 之间, 平均值 82.9, 达到了富营养状态, 很有可能发生水华现象.

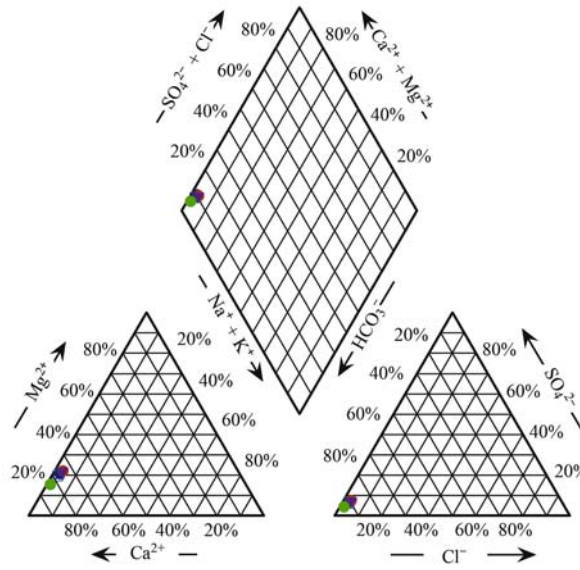


图 2 大龙洞水库水化学三角图

Fig. 2 Hydrochemistry triangle for the Dalongdong Reservoir

表 1 大龙洞水库表层水主要水化学参数

Table 1 Major water chemical parameters of surface water in the Dalongdong Reservoir

采样点	T $/^{\circ}\text{C}$	pH	电导率 $/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	DIC $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DO $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Chla $/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	DOC $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	高锰酸盐指数 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
DL1	31.50	8.21	219.3	136.84	13.50	52.08	7.61	2.84	0.054	0.94
DL2	35.87	8.43	183.4	115.78	7.10	55.24	6.86	2.83	0.026	1.00
DL3	34.46	8.89	181.4	119.29	8.98	65.90	8.03	3.04	0.038	1.11
DL4	32.77	8.61	173.0	112.28	7.54	71.85	7.63	3.03	0.013	0.87
DL5	33.03	8.58	182.3	114.90	7.35	42.87	8.53	2.91	0.013	0.87
DL6	32.2	8.84	175.1	107.89	9.57	44.19	7.36	2.81	0.021	1.00
DL7	34.07	8.74	166.6	112.28	8.19	61.81	7.51	3.14	0.026	0.94
DL8	26.42	7.36	314.5	209.64	4.81	24.11	3.75	2.94	0.022	0.52

2.2 细菌丰度和生产力的分布

大龙洞水库细菌丰度存在明显空间分异, 变化范围为 $1.48 \times 10^7 \sim 3.82 \times 10^8 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$, 平均值为 $1.63 \times 10^8 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$, 沿着水流方向从上游到下游表层水中浮游细菌丰度呈先递减后增加的趋势, 浮游细菌丰度介于 $1.18 \times 10^8 \sim 3.82 \times 10^8 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$; 表层水中细菌丰度的最高值出现在上

游的 DL1, 最低点出现在下游的 DL8. 各采样点浮游细菌丰度垂向分布特征均表现为表层 > 中层 > 底层 (如图 4). 细菌生产力的变化范围是 $0.03 \sim 4.08 \mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 平均值 $1.23 \mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 上游到下游表层水细菌生产力的变化范围为 $1.15 \sim 4.08 \mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 平均值 $2.02 \mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 细菌生产力的分布表现为从上游到下游先递减后增加的趋

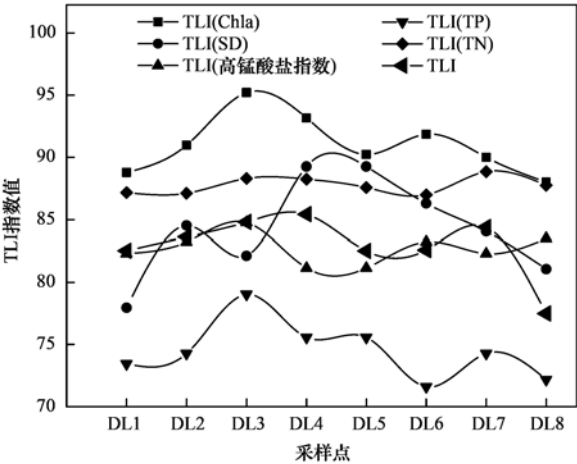


图3 大龙洞水库综合营养状态指数
Fig. 3 Comprehensive eutrophication status index of the Dalongdong Reservoir

势, 垂向分布特征表层水明显高于中层和底层, 中层和底层仅占表层生产力的 32.1% 和 20.04% (见表 2)。

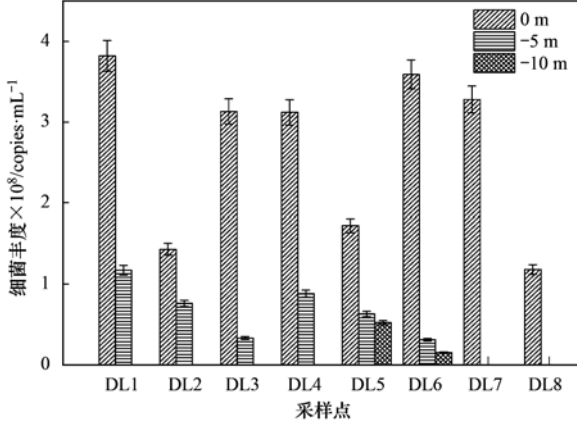


图4 各采样点分层水体细菌丰度分布
Fig. 4 Bacterial abundance at different depths of sampling sites

2.3 细菌丰度、细菌生产力与环境因子间的相关性
对细菌丰度、细菌生产力与主要环境因子间做皮尔森(Pearson)相关性分析, 结果见表 3。结果显示: 细菌丰度与 T 、 pH 、高锰酸盐指数呈显著正相关($P < 0.05$), 与电导率和 DIC 呈显著负相关($P <$

表 2 各采样点细菌丰度和细菌生产力(PP_L)¹⁾

Table 2 Bacterial abundance and production (PP_L) at each sampling point

深度/m	项目	DL1	DL2	DL3	DL4	DL5	DL6	DL7	DL8
0	细菌丰度 $\times 10^8 / \text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$	3.82	1.43	3.13	3.12	1.72	3.59	3.28	1.18
	$PP_L / \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	4.08	1.17	1.66	1.28	1.25	3.85	1.68	1.15
-5	细菌丰度 $\times 10^8 / \text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$	1.170	0.755	0.331	0.875	0.628	0.314	—	—
	$PP_L / \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	0.93	0.58	0.08	0.89	0.56	0.05	—	—
-10	细菌丰度 $\times 10^8 / \text{copies} \cdot \text{mL}^{-1}$	—	—	—	—	0.523	0.148	—	—
	$PP_L / \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	—	—	—	—	0.49	0.03	—	—

1) “—”表示未测得该数据

表 3 大龙洞水库细菌丰度、细菌生产力与主要环境因子的相关性¹⁾

Table 3 Correlation between bacterial abundance, bacterial production, and major environmental factors in the Dalongdong Reservoir¹⁾

项目	T	pH	电导率	DIC	DO	Chla	DOC	TN	TP	高锰酸盐指数
PP_L	0.487	0.614 *	-0.570 *	-0.592 *	0.896 **	0.409 *	0.571 *	-0.214	0.475	0.643 *
$\lg B$	0.655 *	0.726 *	-0.746 *	-0.783 **	0.768 **	0.694 **	0.692 **	-0.054	0.438	0.786 *

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; PP_L : 细菌生产力; $\lg B$: 细菌丰度的 $\lg$ 转换值

0.05), 与 DO、叶绿素 a、DOC 呈极显著正相关($P < 0.01$); 细菌生产力则与 pH 、DOC、高锰酸盐指数呈显著正相关($P < 0.05$), 与电导率、DIC 呈显著负相关($P < 0.05$), 与 DO 极显著正相关($P < 0.01$); 细菌丰度与细菌生产力呈显著正相关($P < 0.05$)。

2.4 细菌丰度、细菌生产力与环境因子的主成分分析

为进一步了解大龙洞水库环境因子对细菌丰度和细菌生产力的影响, 利用 SPSS 20.0 统计软件对

水体 10 个环境因子的特征值进行了主成分分析。主成分分析表明: 环境因子对细菌丰度和细菌生产力具有不同程度的影响, 环境因子均被分成 2 个主成分(表 4 和表 5), 影响细菌丰度和细菌生产力的两个主成分一致, 第一主成分为温度、 pH 、电导率、DIC、DO、Chla、DOC 和高锰酸盐指数, TN 和 TP 在第二主成分中占较大比重。影响细菌丰度和细菌生产力的主成分的累积百分比分别为 84.50% 和 85.08%, 即对 2 个主成分进行分析已经能够反映全部数据的大部分信息。

表 4 细菌丰度初始因子载荷矩阵及方差贡献率¹⁾

Table 4 Component matrix and contribution rates of the bacterial abundance

因子	<i>T</i>	pH	电导率	DIC	DO	Chla	DOC	TN	TP	高锰酸盐指数	方差贡献率/%
第一主成分	0.966	0.947	-0.934	-0.95	0.838	0.916	0.956			0.917	74.39
第二主成分								0.808	-0.584		10.11

1)提取方法:主成分;提取了 2 个成分,下同

表 5 细菌生产力初始因子载荷矩阵及方差贡献率

Table 5 Component matrix and contribution rates of the bacterial production

因子	<i>T</i>	pH	电导率	DIC	DO	Chla	DOC	TN	TP	高锰酸盐指数	方差贡献率/%
第一主成分	0.933	0.946	-0.934	-0.947	0.843	0.913	0.953			0.921	74.98
第二主成分								0.817	-0.586		10.10

3 讨论

3.1 大龙洞水库营养状况分析

大龙洞水库是亚热带岩溶区的一座淡水水库, TN 和 TP 的含量比国内一些富营养化较为严重的湖泊水库^[18]相对较低,但也超过了国际上公认的富营养化指标($TN > 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $TP > 0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[19],这意味着大龙洞水库达到了富营养状态.此外,根据世界经济合作与发展组织(OECD)评价标准^[20],发现大龙洞水库水体表层水 Chla 浓度介于 $24.1 \sim 71.8 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间($\text{Chla} < 3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为贫营养; $3 \sim 11 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为中营养, $11 \sim 78 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为富营养, $\text{Chla} > 78 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为严重富营养),达到了富营养状态.为更准确评价大龙洞水库营养化状况,采用综合营养状态指数(TLI)对其进行评价,计算结果 TLI 平均值达到 82.9 (TLI > 50 为富营养状态),表明大龙洞水库已达到了富营养状况.一般认为,适宜的水温和充足的营养盐是导致水体富营养化的主要原因,比如太湖和滇池等的富营养化^[21].通过采样结果分析与现场调查,认为大龙洞水库水体富营养化与大面积网箱养鱼饲料投放以及鱼类粪便等密不可分.加之,大龙洞水库为近似峡谷型的水库,水体交换性差,没有大型的水生植物吸收和调节营养盐,以致于营养盐的持续积累造成水体富营养化加剧,这与王斌等^[22]关于天山天池夏季富营养化结论基本一致.

3.2 细菌丰度和生产力特征

细菌丰度是反映水体水质状况的一个重要指标.大龙洞水库丰水期细菌丰度平均值为 $1.63 \times 10^8 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$,比贫中营养型水库^[23](五里峡水库)高出了一个数量级($4.76 \times 10^7 \sim 7.69 \times 10^7 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$),并与营养物较高、呈富营养化特征的珠江口^[24]表层水细菌丰度结果基本一致($1.18 \times$

$10^8 \sim 4.73 \times 10^8 \text{ copies}\cdot\text{mL}^{-1}$).有研究表明:温度和营养盐浓度是限制细菌丰度的主要因素^[25].大龙洞水库长期大面积网箱养鱼导致水体营养盐浓度较高.大龙洞水库细菌丰度呈现出从上游到下游先递减后增加的趋势,并且最高点出现在 DL1,这与 DL1 附近具有高密度居民区生活污水排放以及网箱养鱼的综合影响有关.而 DL2 由于上游大量来水稀释营养盐浓度以及网箱养殖和居民减少,进而使细菌丰度呈递减的趋势.沿水流方向,水体中的营养物质不断被细菌以及浮游植物消耗,细菌丰度呈下降的趋势,并且在 DL5 达到最低值.随后细菌丰度再次出现的先增加后减小的情况与输入营养盐的增加与减少有关.垂直方向上细菌丰度表现为表层 > 中层 > 底层这与浮游细菌的光合作用主要集中在真光层有关.

细菌生产力的空间变化特征与细菌丰度的变化趋势基本一致,从相关性分析(表 3)可以看出,细菌生产力与细菌丰度呈显著正相关($r = 0.606$, $P < 0.05$),表层水细菌生产力最高点也出现在 DL1 号点,达到 $4.08 \text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,约为 DL8 的 3.55 倍,并与影响细菌丰度的因素相一致.受污染或富营养化水体细菌的丰度一般较高,一般细菌生产力也较高^[26].大龙洞水库是一个富营养水库,其细菌生产力高于北欧海 [$0.019 \text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$] 和楚科奇海^[27] [$0.023 \text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$],与长江冲淡水区^[28]相当 [$0.22 \sim 4.41 \text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$],低于大亚湾^[29] [$0.5 \sim 30.2 \text{ }\mu\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$].大亚湾细菌生产力较高的原因在于人为污染物、养殖业区的扩大及采样期间温度较高等.因此,大龙洞水库此时具有较高的细菌丰度和生产力.

3.3 细菌丰度和细菌生产力的影响因素

温度是影响细菌丰度和细菌生产力的重要环境因子.一方面,温度通过影响细菌新陈代谢酶的活

性,影响细菌丰度和生产力^[30],或通过影响初级生产力,改变水体溶解有机质(DOM)的含量,影响细菌生产力^[31]。另一方面,温度作为一个关键的环境要素,对所有的生物地球化学过程都有重要影响,进而对细菌丰度和生产力产生影响^[32]。大量的室内及野外实验均报道了细菌丰度与温度呈正相关的现象^[33,34],通过相关性分析(表3)可以看出,细菌丰度与温度呈显著正相关,这与大龙洞水库夏季温度较高有关,即使是垂向温度的变化(25.03 ~ 33.03℃)也在细菌生长适宜的范围内,因此随着温度的升高细菌数量也在增多。在本研究中温度与细菌生产力的相关性不显著,说明温度不是大龙洞水库细菌生产力的主要影响因子,该结果与宋星宇等^[35]对南海北部海域的研究以及 Lee 等^[30]对楚科奇海的研究发现细菌生产力与温度的相关性不显著的结果相一致。

pH 是生态系统中群落组成的主要驱动力^[36],通过影响细菌酶活性进而影响细菌的生命活动。大龙洞水库水体 pH 值介于 7.13 ~ 8.89 之间,平均值 7.85,水体呈弱碱性。水库呈富营养状态,水体溶解氧被藻类大量繁殖所消耗,所以水体整体溶解氧都较低,而这种低氧环境有利于厌氧光合细菌的生长^[37]。光合细菌的大量繁殖,进行强烈的光合作用能够消耗水中大量的 DIC,细菌生产力升高,并使水体 pH 升高,水体呈弱碱性。在本研究中细菌丰度与 pH 呈极显著正相关。已有研究表明^[38],酸性水体会抑制细菌的生长,在一定范围内 pH 值的增大将促进细菌的生长,大龙洞水库水体呈弱碱性,有利于细菌生长。

营养盐的浓度及其组成可能通过影响细菌的生长来影响细菌丰度和细菌生产力^[39]。营养盐中的成分能够单独或者共同影响细菌的增殖^[40,41]。Kuosa 等^[42]报道了波罗的海细菌的生长受磷酸盐的控制;张喆等^[43]对青海近岸水体的研究发现硝酸盐是细菌数量的主要限制因子;Pomeroy 等^[44]认为温度和 DOC 对细菌的生长以及结构群落的影响最大。在本研究中,由于水体中 TN 和 TP 浓度达到了 2.76 mg·L⁻¹和 0.025 mg·L⁻¹,水体呈富营养化状态, TN 和 TP 不再是细菌生长的主要限制因素,因此 TN、TP 与细菌丰度的相关性不显著,这与 Niu 等^[45]和沈烽等^[46]对富营养化湖泊研究的结果一致。DOC 作为细菌的“食物”对细菌的生长具有强烈的影响^[47],本研究中 DOC 的浓度变化范围为 3.75 ~ 8.53 mg·L⁻¹,平均值为 5.93 mg·L⁻¹,高于

贫中营养型水库五里峡水库(1.1 ~ 1.81 mg·L⁻¹)^[16],低于富营养化程度更高的东湖(7 ~ 22 mg·L⁻¹)^[48]和博斯腾湖(9.3 ~ 10.3 mg·L⁻¹)^[49]。一般情况下随着营养盐浓度的升高,细菌丰度也会随之增高^[50],因而 DOC 与细菌丰度极显著正相关($r = 0.692$, $P < 0.01$)。

Chla 是水体初级生产力的重要指标,通常与细菌数量和细菌生产力密切相关^[51],细菌能够利用浮游植物光合作用产生的 DOM,为细菌的二次增长提供碳源^[52]。同时,细菌在自身代谢过程中也能为浮游植物提供营养。Szczepan-Wasielewska 等^[53]对 Warta 河细菌与物理化学参数的关系研究发现,细菌丰度与 Chla 呈显著正相关。与此类似,本研究中 Chla 与细菌丰度也呈显著正相关($r = 0.694$, $P < 0.01$),与 DOC 极显著正相关($r = 0.811$, $P < 0.01$),说明细菌利用的有机碳来源于水体初级生产力,光合细菌对水体 DOC 的产生也具有重要贡献,这与 Li 等^[54]的研究发现光合微生物是岩溶水体有机碳的重要贡献者相一致。因此,初级生产力是影响大龙洞水库细菌分布的重要因素。

水体中的 DO 除小部分来自大气以外,大部分由浮游植物和光合细菌产生^[55]。白洁等^[56]发现水体中的 DO 含量与浮游细菌的含量有关;姜发军等^[55]发现大鹏湾细菌丰度与 DO 全年呈负相关,这与大鹏湾浮游细菌主要为一些专性或兼性厌氧细菌有关;吴娅等^[57]发现三峡库区典型支流细菌与 DO 呈极显著正相关,与本研究的结果细菌丰度与 DO 呈显著正相关($P < 0.01$)一致,从而说明大龙洞水库细菌类型可能主要为光合细菌。Pakulski 等^[58]的研究证明,细菌生产力对光照辐射有较强的依赖性。在垂直方向上随着水深的增加,光照减弱,水体 DO 减少,抑制了微生物的生长,说明在垂直方向上细菌丰度和生产力的递减与光照减弱造成 DO 的降低有关。大龙洞水库 DIC 浓度介于 112.28 ~ 259.64 mg·L⁻¹之间,平均值 172.69 mg·L⁻¹,较半岩溶水库(均值 57.7 mg·L⁻¹)和非岩溶水库(33.6 mg·L⁻¹)要高^[59],因为碳酸盐的地质背景使得大龙洞水库水体 DIC 保持在一个较高水平, Liu 等^[60]的研究表明,碳酸盐地区由岩石风化产生的 DIC 能够被水生光合微生物利用,通过光合作用转化为有机碳。在本研究中,细菌丰度与 DIC 极显著负相关($r = -0.783$, $P < 0.01$),说明光合细菌能够利用水体 DIC 进行光合作用并增加 DOC 含量。

综上所述,细菌生产力、细菌丰度与环境因子

间的关系表现出极大的关联,并且细菌生产力与细菌丰度呈显著正相关,进一步说明细菌是水体初级生产力的重要贡献者。

4 结论

(1)大龙洞水库水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,水岩相互作用明显;综合营养状态指数(TLI)表明大龙洞水库水体已经达到富营养化水平并有发生水华的风险。

(2)细菌丰度呈现明显的空间异质性,变化范围为 $1.48 \times 10^7 \sim 3.82 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$,平均值为 $1.63 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$,沿着水流方向从上游到下游表层水细菌丰度呈先递减后增加的趋势;细菌丰度垂向分布特征均表现为表层 > 中层 > 底层。

(3)细菌丰度与细菌生产力呈显著正相关($r = 0.606$, $P < 0.05$),细菌生产力变化趋势与细菌丰度相似,细菌生产力变化范围为 $0.03 \sim 4.08 \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,平均值为 $1.23 \mu\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,其中表层的细菌生产力明显高于中层和底层。

(4)大龙洞水库细菌丰度与温度、pH、高锰酸盐指数呈显著正相关($P < 0.05$),与电导率和 DIC 呈显著负相关($P < 0.05$),与 DO、叶绿素 a、DOC 呈极显著正相关($P < 0.01$);细菌生产力则与 pH、DOC、高锰酸盐指数呈显著正相关($P < 0.05$),与电导率、DIC 呈显著负相关($P < 0.05$),与 DO 极显著正相关($P < 0.01$)。表明大龙洞水库细菌丰度和细菌生产力受多种环境因子共同影响,进而使光合细菌成为水体初级生产力的重要贡献者。

参考文献:

- [1] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报, 2001, **21**(6): 1034-1040.
Lin Q Q, Han B P. Reservoir limnology and its application in water quality management: an overview [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, **21**(6): 1034-1040.
- [2] Cho B C, Azam F. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior[J]. Nature, 1988, **332**(6163): 441-443.
- [3] Woo S H, Enders A, Lehmann J. Microbial mineralization of pyrogenic organic matter in different mineral systems [J]. Organic Geochemistry, 2016, **98**: 18-26.
- [4] Azam F, Malfatti F. Microbial structuring of marine ecosystems [J]. Nature Reviews Microbiology, 2007, **5**(10): 782-791.
- [5] Zou K J, Thébault E, Lacroix G, et al. Interactions between the green and brown food web determine ecosystem functioning[J]. Functional Ecology, 2016, **30**(8): 1454-1465.
- [6] Matulich K L, Martiny J B H. Microbial composition alters the response of litter decomposition to environmental change [J]. Ecology, 2016, **96**(1): 154-163.
- [7] 赛·巴雅尔图,黄瑾,谢贵娟,等. 新疆博斯腾湖浮游细菌丰度对富营养化及咸化的响应[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 934-941.
Sai B, Huang J, Xie G J, et al. Response of planktonic bacterial abundance to eutrophication and salinization in Lake Bosten, Xinjiang [J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(6): 934-941.
- [8] 李建洋,赵月,谢宁栋,等. 深圳近海表层浮游细菌分布特征及其环境影响因素[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8567-8577.
Li J Y, Zhao Y, Xie N D, et al. Distribution characteristics of bacterioplankton and effect of environmental factors in the coastal surface waters of Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(24): 8567-8577.
- [9] 周菁,余正,刘开国,等. 典型亚热带热分层水库秋季细菌群落垂直分布[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6205-6213.
Zhou J, Yu Z, Liu K G, et al. Bacterial community and its relation to environmental variables in a subtropical stratified reservoir for drinking water supply in autumn [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(21): 6205-6213.
- [10] 胡明明,王英才,李艳晖,等. 云南高原湖库浮游细菌的生态分布及其影响因素[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(3): 21-25.
Hu M M, Wang Y C, Li Y H, et al. The ecological distribution of bacterioplankton and its influencing factors in the Yunnan Plateau Lakes [J]. Journal of Hydroecology, 2011, **32**(3): 21-25.
- [11] 广西壮族自治区水利厅. 广西壮族自治区水利厅[EB/OL]. <http://www.gxwater.gov.cn>, 2018-04-01.
- [12] 雷恒新,姚星辉. 区域地质水文普查报告[R]. 南宁:广西壮族自治区地质局, 1979. 6-90.
- [13] 李建鸿,蒲俊兵,袁道先,等. 岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2833-2842.
Li J H, Pu J B, Yuan D X, et al. Variations of inorganic carbon and its impact factors in surface-layer waters in a groundwater-fed reservoir in karst area, SW China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2833-2842.
- [14] 刘文. 亚热带不同地质背景水库碳转移过程的研究[D]. 重庆:西南大学, 2015.
- [15] 彭文杰,李强,宋昂,等. 五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2673-2679.
Peng W J, Li Q, Song A, et al. Spatial-temporal variations of CO_2 and CH_4 flux through water-air interface under the effect of primary productivity in Wulixia reservoir [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2673-2679.
- [16] 卢晓漩,李强,靳振江,等. 桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2075-2085.
Lu X X, Li Q, Jin Z J, et al. Water chemistry and characteristics of dissolved organic carbon in wet season from Wulixia reservoir, SW China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2075-2085.
- [17] Manerkar M A, Seena S, Bärlocher F. Q-RT-PCR for assessing archaea, bacteria, and fungi during leaf decomposition in a stream [J]. Microbial Ecology, 2008, **56**(3): 467-473.
- [18] 邓建才,陈桥,翟水晶,等. 太湖水体中氮、磷空间分布特

- 征及环境效应[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3382-3386.
- Deng J C, Chen Q, Zhai S J, *et al.* Spatial distribution characteristics and environmental effect of N and P in water body of Taihu lake [J]. Environmental Science, 2008, **29**(12): 3382-3386.
- [19] 匡武名, 张萌, 张金美, 等. 鄱阳湖外围湖泊水体营养波动周年特征的比较湖沼学研究[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1293-1305.
- Kuang W M, Zhang M, Zhang J M, *et al.* Comparative limnological study on annual dynamic pattern of nutrients in water column of three suburb lakes adjacent to Lake Poyang [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(6): 1293-1305.
- [20] 世界经济合作与发展组织. 水体富营养化监测评价与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 92-95.
- [21] 王震, 邹华, 杨桂军, 等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 567-575.
- Wang Z, Ma J, Yang G J, *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(4): 567-575.
- [22] 王斌, 马健, 王银亚, 等. 天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2465-2471.
- Wang B, Ma J, Wang Y Y, *et al.* Distribution of chlorophyll-a and eutrophication state in Tianchi lake of Tianshan mountains in summer[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2465-2471.
- [23] 宋昂, 彭文杰, 何若雪, 等. 好氧不产氧光合细菌反馈作用下的五里峡水库坝前水体化学特征研究[J]. 岩矿测试, 2017, **36**(2): 171-179.
- Song A, Peng W J, He R X, *et al.* Hydrochemistry characteristics in front of the Wulixia reservoir dam associated with feedback from aerobic anoxygenic phototrophic bacteria[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, **36**(2): 171-179.
- [24] 富冰冰. 珠江口厌氧氨氧化细菌丰度、群落结构及其环境响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [25] Song H, Xu J H, Lavoie M, *et al.* Biological and chemical factors driving the temporal distribution of cyanobacteria and heterotrophic bacteria in a eutrophic lake (West Lake, China) [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, **101**(4): 1685-1696.
- [26] 胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 等. 宁波三江口水域原核生物群落结构分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2487-2495.
- Hu A Y, Li J W, Yang X Y, *et al.* Analysis of prokaryotic community structure in river waters of the Ningbo Sanjiang Mouth [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2487-2495.
- [27] Gao Y, He J F, Chen M, *et al.* Factors dominating bacterioplankton abundance and production in the Nordic seas and the Chukchi Sea in summer 2012 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, **36**(8): 153-162.
- [28] 刘子琳, 越川海, 宁修仁, 等. 长江冲淡水区细菌生产力研究[J]. 海洋学报, 2001, **23**(4): 93-99.
- Liu Z L, Yue C H, Ning X R, *et al.* Bacterioplankton production in dilution zone of the Changjiang (Yangtze River) estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, **23**(4): 93-99.
- [29] 彭安国, 黄奕普, 刘广山, 等. 大亚湾细菌生产力研究[J]. 海洋学报, 2003, **25**(4): 83-90.
- Peng A G, Huang Y P, Liu G S, *et al.* Study on bacterial production in the Daya Bay [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, **25**(4): 83-90.
- [30] Lee C W. Bacterial abundance and production and heterotrophic nanoflagellate abundance in subarctic coastal waters (Western North Pacific Ocean) [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2001, **23**(3): 263-271.
- [31] 季凤云, 郭立梅, 李洪波, 等. 南海北部细菌丰度和细菌生产力分布及其与环境因子相关性[J]. 海洋环境科学, 2017, **36**(3): 354-359.
- Ji F Y, Guo L M, Li H B, *et al.* Abundance and production of bacteria and their correlations with environmental factor [J]. Marine Environmental Science, 2017, **36**(3): 354-359.
- [32] Yucel N. Seasonal and spatial variation of bacterial production and abundance in the northern Levantine Sea [J]. Mediterranean Marine Science, 2017, **18**(1): 97-106.
- [33] Puddu A, La Ferla R, Allegra A, *et al.* Seasonal and spatial distribution of bacterial production and biomass along a salinity gradient (Northern Adriatic Sea) [J]. Hydrobiologia, 1997, **363**(1-3): 271-282.
- [34] Tuomi P, Suominen K, Autio R. Phytoplankton and bacterioplankton production and bacterial biomass in a fjord-like bay—open sea gradient [J]. Hydrobiologia, 1999, **393**: 141-150.
- [35] 宋星宇, 刘华雪, 黄良民, 等. 南海北部夏季基础生物生产力分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2010, **30**(23): 6409-6417.
- Song X Y, Liu H X, Huang L M, *et al.* Distribution characteristics of basic biological production and its influencing factors in the northern South China Sea in summer [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(23): 6409-6417.
- [36] Jain A, Bandekar M, Gomes J, *et al.* Temporally invariable bacterial community structure in the Arabian Sea oxygen minimum zone [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2014, **73**(1): 51-67.
- [37] Lu H F, Zhang G M, Wan T, *et al.* Influences of light and oxygen conditions on photosynthetic bacteria macromolecule degradation: different metabolic pathways [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(20): 9503-9508.
- [38] 王博雯, 汤祥明, 高光, 等. 博斯腾湖细菌丰度时空分布及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2014, **34**(7): 1812-1821.
- Wang B W, Tang X M, Gao G, *et al.* Spatiotemporal dynamics of bacterial abundance and related environmental parameters in Lake Bosten [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(7): 1812-1821.
- [39] Haukka K, Kolmonen E, Hyder R, *et al.* Effect of nutrient loading on bacterioplankton community composition in lake mesocosms [J]. Microbial Ecology, 2006, **51**(2): 137-146.
- [40] Lewicka-Rataj K, Kaczorkiewicz M, Heese T, *et al.* Structure and function of bacterioplankton in the rehabilitated Lake Trzeciecko [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014, **14**(1): 96-105.
- [41] 陈祯, 何聃, 任丽娟. 温度和营养盐水平对淡水浮游细菌群落结构的潜在影响[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2016, **52**(4): 590-600.
- Chen Z, He D, Ren L J. The potential impacts of temperature

- and nutrient levels on freshwater bacterioplankton community structure[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, **52**(4): 590-600.
- [42] Kuosa H, Kaartokallio H. Experimental evidence on nutrient and substrate limitation of Baltic Sea sea-ice algae and bacteria[J]. *Hydrobiologia*, 2006, **554**(1): 1-10.
- [43] 张喆, 孟祥红, 肖慧, 等. 青岛近岸水体夏冬季浮游病毒、细菌分布特征及其与环境因子的关系[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2008, **54**(2): 209-214.
- Zhang Z, Meng X H, Xiao H, *et al.* Distribution characteristics of viruses and bacteria and their relationships with environmental factors in summer and winter in coastal waters of Qingdao[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2008, **54**(2): 209-214.
- [44] Pomeroy L R, Wiebe W J. Temperature and substrates as interactive limiting factors for marine heterotrophic bacteria[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2001, **23**(2): 187-204.
- [45] 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.
- [46] 沈烽, 赵大勇, 黄睿, 等. 南京玄武湖浮游细菌群落结构的季节变化及其与环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(3): 662-669.
- Shen F, Zhao D Y, Huang R, *et al.* Seasonal variation of bacterioplankton community structure in Xuanwu Lake (Nanjing) and its relationship with environmental factors [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(3): 662-669.
- [47] Nikrad M P, Cottrell M T, Kirchman D L. Abundance and single-cell activity of heterotrophic bacterial groups in the western Arctic Ocean in summer and winter [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(7): 2402-2409.
- [48] Liu X J, Xu X Q, Xie P, *et al.* Seasonal changes of dissolved and particulate organic carbon in Donghu Lake, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2000, **18**(4): 372-377.
- [49] 王秀君, 房传苓, 于志同, 等. 新疆博斯腾湖水体颗粒和溶解有机碳的季节变化及其来源初探[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 552-558.
- Wang X J, Fang C L, Yu Z T, *et al.* Seasonal variations and sources of particulate and dissolved organic carbon in Lake Bosten, Xinjiang Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 552-558.
- [50] Boteva S, Traykov I, Kenarova A, *et al.* Abundance and spatial dynamics of bacterioplankton in the Seven Rila Lakes, Bulgaria [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, **28**(3): 451-458.
- [51] Bricker S B, Ferreira J G, Simas T. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status [J]. *Ecological Modelling*, 2003, **169**(1): 39-60.
- [52] 倪健斌, 张朝霞, 柯才焕, 等. 北部湾夏、冬两季异养细菌的水平分布特征及其影响因子[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2012, **51**(3): 434-440.
- Ni J B, Zhang Z X, Ke C H, *et al.* Horizontal distribution characteristics and influencing factors of heterotrophic bacterial abundance in Beibu Gulf in summer and winter[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2012, **51**(3): 434-440.
- [53] Szeląg-Wasielewska E, Joniak T, Michałkiewicz M, *et al.* Bacterioplankton of the Warta River in relation to physicochemical parameters and flow rate [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2009, **9**(2-4): 225-236.
- [54] Li Q, Song A, Peng W J, *et al.* Contribution of aerobic anoxygenic phototrophic bacteria to total organic carbon pool in aquatic system of subtropical karst catchments, Southwest China: Evidence from hydrochemical and microbiological study [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(6), DOI: 10.1093/femsec/fix065.
- [55] 姜发军, 胡章立, 胡超群. 大鹏湾浮游细菌时空分布与环境因子的关系[J]. *热带海洋学报*, 2011, **30**(1): 96-100.
- Jiang F J, Hu Z L, Hu C Q. Correlation between spatial-temporal distribution of bacterioplankton and environmental factors in the Dapeng Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, **30**(1): 96-100.
- [56] 白洁, 李岩然, 李正炎, 等. 渤海春季浮游细菌分布与生态环境因子的关系[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, **33**(6): 841-846.
- Bai J, Li K R, Li Z Y, *et al.* Relationship between the environmental factors and distribution of bacterioplankton in the Bohai sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, **33**(6): 841-846.
- [57] 吴娅, 王雨春, 胡明明, 等. 三峡库区典型支流浮游细菌的生态分布及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2015, **34**(4): 1060-1065.
- Wu Y, Wang Y C, Hu M M, *et al.* Ecological distribution and its influencing factors of bacterioplankton in the typical tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(4): 1060-1065.
- [58] Pakulski J D, Baldwin A, Dean A L, *et al.* Responses of heterotrophic bacteria to solar irradiance in the eastern Pacific Ocean[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2007, **47**(2): 153-162.
- [59] 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 等. 不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4032-4042.
- Li J H, Pu J B, Sun P A, *et al.* Summer greenhouse gases exchange flux across water-air interface in three water reservoirs located in different geologic setting in Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4032-4042.
- [60] Liu Z H, Zhao M, Sun H L, *et al.* "Old" carbon entering the South China Sea from the carbonate-rich Pearl River Basin: coupled action of carbonate weathering and aquatic photosynthesis [J]. *Applied Geochemistry*, 2017, **78**: 96-104.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)