

研究报告

长潭水库铁锰含量与环境因子的季节性变化相关性分析及铁锰氧化菌群的富集培养

翁国永^{1,2}, 应之悦³, 李正明⁴, 许楹^{*3}

1 浙江省城市供水水质监测网台州监测站, 浙江 台州 318020

2 台州市黄岩城乡自来水有限公司, 浙江 台州 318020

3 上海交通大学生命科学技术学院 微生物代谢国家重点实验室, 上海 200240

4 绿川(浙江)环境科技有限公司, 浙江 天台 317200

翁国永, 应之悦, 李正明, 许楹. 长潭水库铁锰含量与环境因子的季节性变化相关性分析及铁锰氧化菌群的富集培养[J]. 微生物学通报, 2022, 49(11): 4503-4512

Weng Guoyong, Ying Zhiyue, Li Zhengming, Xu Ying. Correlation between concentration of iron/manganese ion and environmental factors, and enrichment of iron- and manganese-oxidizing bacteria in Changtan Reservoir during different seasons[J]. Microbiology China, 2022, 49(11): 4503-4512

摘要:【背景】目前对水库水体污染原因的研究往往专注于水体的富营养化、pH值、溶解氧、氨氮、菌落总数指标的变化,而重金属含量与环境因子的季节性变化相关性分析研究较少,同时对于典型季节原位微生物种群的多样性差异研究尚未见报道。【目的】研究浙江省台州市长潭水库底部水中正二价金属离子(二价锰离子 Mn^{2+} ; 二价铁离子 Fe^{2+})浓度与不同环境因子的季节性变化规律,并对其相关性进行分析;富集平水期(2月)和丰水期(8月)水库底部水体中功能微生物菌群,分析其种类和丰度的差异。【方法】分别检测12个月的水库水 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度及多种环境因子(水体溶解氧浓度、pH值、总磷浓度、浊度、水库环境温度及降水量),过滤并富集培养水库底部水体的功能微生物菌群,对其16S rRNA基因V3-V4区测序并分析其菌群结构。【结果】长潭水库水中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度呈季节性变化,每年的春夏交替季节水体中铁锰含量从零开始慢慢升高,至夏秋高温季节水体中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度达到最高值,然后慢慢降低,至秋末冬初检测不到含量。在检测的多种环境因子中,水体溶解氧浓度、水库环境温度及降水量呈明显的季节性规律变化。 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度与温度、降水量和浊度有正相关性,与溶解氧浓度、pH值和总磷浓度有负相关性,其中在正负相关性分析中两种金属离子的浓度与溶解氧浓度的相关性最强,其次是环境温度及降水量。丰水期和平水期中富集获得的功能微生物菌群的种类和丰度差异很大,从属水平上分类,丰水期时菌群只包含不动杆菌(*Acinetobacter*)和鲑色沉

基金项目:台州市黄岩区科技计划(2021036)

Supported by: Taizhou Huangyan District Science and Technology Program (2021036)

*Corresponding author: E-mail: ying.xu@sjtu.edu.cn

Received: 2022-05-04; Accepted: 2022-05-23; Published online: 2022-06-17

积物杆菌(*Sediminibacterium*)这 2 个属的菌株, 含量各占约 50%; 平水期时菌群则主要由杆菌属(*Bacillariophyta*) (47.62%)和 *Limnohabitans* (9.52%)等 9 个属的菌株构成。富集获得的平水期和丰水期的两个可培养的菌群均具有去除水库水中 Mn^{2+} 的功能, 去除率分别约为 35.9%和 11.4%。【结论】长潭水库底部水体中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度与不同环境因子均呈季节性规律变化, 它们之间呈现不同的正负相关性, 丰水期和平水期的功能微生物菌群结构差异很大。本研究为利用微生物进行重金属污染水体的治理储备了微生物资源, 为实现国家“美丽乡村”的建设目标提供一定的参考价值。

关键词: 水库; 锰离子; 铁离子; 环境因子; 季节性变化; 相关性分析

Correlation between concentration of iron/manganese ion and environmental factors, and enrichment of iron- and manganese-oxidizing bacteria in Changtan Reservoir during different seasons

WENG Guoyong^{1,2}, YING Zhiyue³, LI Zhengming⁴, XU Ying^{*3}

1 Taizhou Monitoring Station of Zhejiang Municipal Water Quality Monitoring Network, Taizhou 318020, Zhejiang, China

2 Taizhou Huangyan Urban and Rural Water Supply Limited Company, Taizhou 318020, Zhejiang, China

3 State Key Laboratory of Microbial Metabolism, School of Life Sciences & Biotechnology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4 Luchuan (Zhejiang) Environmental Science and Technology Limited Company, Tiantai 317200, Zhejiang, China

Abstract: [Background] Research on the causes of the pollution in reservoir water often focuses on water eutrophication, and the changes of pH value, dissolved oxygen, ammonia nitrogen, and total bacterial count. However, a few studies on the seasonal variation pattern of heavy metal content and environmental factors and the correlation between the heavy metal content and different environmental factors are available. In addition, there is no report on the diversity of *in-situ* microbial populations in typical seasons. [Objective] To detect the seasonal variation of the concentration of Mn^{2+} and Fe^{2+} and different environmental factors in the bottom water of Changtan reservoir, Taizhou city, Zhejiang province, analyze their correlation, enrich functional microbial consortia at the bottom of the reservoir in normal (February) and wet (August) periods, and elucidate the difference in the species and diversity of the enriched microbial communities. [Methods] The bottom water of the reservoir was filtrated and the functional microbial consortia was enriched. The V3–V4 regions of 16S rRNA genes were sequenced and the community structure was analyzed. All tests were carried out according to the Standard Examination Methods for Drinking Water (GB5750-2006). [Results] The concentration of Mn^{2+} and Fe^{2+} in the water of Changtan reservoir changed seasonally. The concentration of Mn^{2+} and Fe^{2+} (initial 0 mg/L) in the water began to slowly increase in the spring-summer succession period every year, peaked in summer and autumn, and then decreased to below the detection limit in the late autumn and early winter. Among the detected environmental factors, the concentration of dissolved oxygen in water, ambient temperature of reservoir, and precipitation showed obvious seasonal

changes. The concentration of Mn^{2+} and Fe^{2+} had a positive correlation with temperature, precipitation, and turbidity but a negative correlation with dissolved oxygen concentration, pH value, and total phosphorus concentration. In the correlation analysis, the concentration of two metal ions had the strongest correlation with dissolved oxygen concentration, followed by ambient temperature and precipitation. The species and diversity of functional microbes were significantly different between the normal and wet periods. Only *Acinetobacter* and *Sediminibacterium* were detected in the wet period, accounting for about 50% each, while the normal period was dominated by 9 genera, such as *Bacillariophyta* (47.62%) and *Limnohabitans* (9.52%). The culturable consortia from water in the normal period and wet period both can remove the Mn^{2+} in the reservoir water, and the removal rates were about 35.9% and 11.4%, separately. **[Conclusion]** The concentration of Mn^{2+} and Fe^{2+} in the bottom of Changtan reservoir changes seasonally with different environmental factors, and the concentration of Mn^{2+} and Fe^{2+} shows different correlation with different environmental factors. The structures of the two functional microbial communities enriched in wet and normal periods are different. This study provides microbial resources for the treatment of heavy metal-polluted water by microorganisms, and has a certain reference value for realizing the goal of “beautiful countryside” in China.

Keywords: reservoir; manganese ion; iron ion; environmental factor; seasonal variation; correlation analysis

铁(Fe)和锰(Mn)是地壳中丰度最高的 2 种化学性质相近的过渡金属元素,通常两种元素均以化合态形式广泛地共存于自然界中^[1-2]。在中性天然水中锰离子主要以正二价和正四价存在,铁离子则主要以正二价和正三价存在^[2-4]。当水体中的铁锰含量超过一定浓度时,就会对生态环境产生十分不利的影响,对动植物产生极大的毒害作用^[5-7]。目前常用的氧化去除水体中铁锰的方法有自然氧化法^[8]、接触氧化法^[8-11]和微生物氧化法^[12-14]。相较于常用的自然氧化法和接触氧化法,微生物氧化法去除铁锰,不需要添加任何药剂,投资及运行费用低,而且不受铁锰含量变化等优点。

长潭水库位于浙江省台州市黄岩区西 23 km 处(东经 121°00′–121°04′,北纬 28°3′–28°40′),是一座以供水和灌溉为主,集发电、防洪和养殖于一体的多功能大型水库,是台州市椒江区、黄岩区、路桥区和温岭市等 200 万城镇居民生活用水和数万家企业生产用水的水源地。水库

湖面宽广,东西宽 1 200 m,南北长约 4 200 m,四周高山在 350–780 m 之间,集雨面积约 441.3 km²,地质构造以刚性火山岩分布,断裂构造为主。水库周边土壤主要为含铁锰氧化物的红壤和黄壤。台风是水库当地的灾害性气候,台风季节,水库周边含铁锰土壤被冲刷流入水库,导致水库水体铁锰含量不断升高,铁锰污染现象日益加重,给制水工艺和成本造成很大的麻烦,严重影响了人们的正常生活和生产。为建设美丽浙江,浙江省政府启动了“五水共治”碧水行动。为了保障供水水质,减小铁锰对饮用水源的污染,研究铁锰污染水源的机制具有很高的应用价值。

本研究旨在阐明长潭水库水铁、锰含量的季节性变化规律和差异,其与不同环境因子的相关性及其水库底部水体中功能微生物菌群结构的季节性变化规律和差异。本研究储备了微生物资源,为利用微生物法根据季节变化有效去除水体中的铁锰提供了潜在的可行性,对实

现国家“美丽乡村”的建设目标具有一定的参考价值。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

1.1.1 水样

水样采集自浙江省台州市黄岩区长潭水库坝下底部出水管(水面下 25 m)。检测铁锰指标的水样加硝酸至 pH<2.0 并于当天检测。

1.1.2 培养基

JFMII 液体培养基(g/L)^[15]: 柠檬酸三钠 8.0, 柠檬酸 2.0, 硝酸钠 0.5, 氯化钙 0.2, 调节 pH 为 7.2 后加入 13.0 mg/L 柠檬酸铁铵和 4.0 mg/L 硫酸锰。用于培养铁锰氧化细菌。

PYCM 液体培养基(g/L)^[15]: 蛋白胨 0.8, 酵母浸膏 0.2, 硫酸锰 0.2, 磷酸氢二钾 0.1, 硝酸钠 0.2, 氯化钙 0.1, 碳酸铵 0.1。调节 pH 值为 6.8–7.2, 用于培养铁锰氧化细菌。

固体培养基: 向液体培养基内加入 18 g/L 琼脂粉。

液体和固体培养基均用高压灭菌锅于 1×10^5 Pa 灭菌 20 min。

1.1.3 主要试剂和仪器

硝酸钠, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司(化学纯度 $\geq 98.5\%$); 其他化学试剂, 国药集团化学试剂有限公司(化学纯度 $\geq 98\%$); FastDNA™ Spin Kit for Soil DNA 提取试剂盒, MP Biomedicals 公司。酶标仪, Gene 公司; 超纯水仪, MilliPore 公司; 火焰石墨炉原子吸收分光光度仪、紫外可见分光光度计, 耶拿分析仪器股份公司; 浊度仪、pH 检测仪, 哈希公司; 超低温冰箱, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.2 分析检测项目及方法

参考《生活饮用水标准检验方法》(GB5750—2006)^[16], 铁和锰离子浓度使用火焰

原子吸收分光光度法检测; pH 值使用玻璃电极法检测; 浊度使用浊度仪散射法检测, 总磷浓度使用可见分光光度法检测^[16]。

1.3 功能菌群的富集

将新鲜石英砂装入滤柱, 滤层厚 1 200 mm, 然后用水库底部富含铁锰的自然水连续慢慢过滤 40 d, 滤速为 10 m/h。取石英砂 10 g, 加无菌水至 50 mL 充分振荡 5 min, 取 1 mL 菌悬液, 接种至 JFMII 液体培养基中 30 °C、180 r/min 富集培养, 然后收集菌体细胞重悬于 20% 甘油并 -80 °C 保存。该富集方法根据已报道的方法^[15]进行修改。

1.4 长潭水库底部水样在平水期和丰水期的微生物多样性测序分析

将 2020 年 2 月份和 8 月份分别富集的菌群以 1% 接种于 10 mL PYCM 液体培养基^[15]中, 30 °C、180 r/min 培养 3 d 后, 使用 FastDNA™ Spin Kit for Soil DNA 提取试剂盒提取微生物总 DNA, 样品送至生工生物工程(上海)股份有限公司, 对 16S rRNA 基因的 V3–V4 区使用 Illumina NovaSeq 平台进行双端测序, 并进行微生物多样性分析。

1.5 可培养功能菌群去除自然水中锰离子

将富集获得的平水期(2 月份)和丰水期(8 月份)的可培养微生物菌群, 分别使用 PYCM 液体培养基^[15]于 30 °C、180 r/min 培养 3 d。将石英砂、火山岩、陶粒 3 种滤料分别置于玻璃柱(高度 1 200 mm, 内径 40 mm)内, 3 种滤料的玻璃柱为一组, 将培养菌群的菌液以 3 m/h 的低滤速循环过滤 72 h, 然后用过滤后的菌液再浸泡 24 h, 然后排掉过滤柱中的菌液, 用水库底部富含铁锰的水库水以 3 m/h 的低速过滤, 24 h 后测量进水锰含量和滤后水的锰含量。两种菌群各设置 3 组平行重复, 未添加菌群的填充滤料的玻璃柱作为阴性对照。

2 结果与分析

2.1 长潭水库底部水体铁锰含量全年变化情况

每天对水库底部出水的 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度进行检测, 每月取平均值。由图 1 可知, 长潭水库水中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度呈季节性变化, 每年的春夏交替季节水体中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度从零开始慢慢升高, 至夏秋高温季节水体中达到最高值, 然后慢慢降低, 至秋末冬初低于检测限。具体来说, 水库底部水体 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 的浓度分别在 0–0.6 mg/L 和 0–0.4 mg/L 之间波动。从 11 月份到次年的 3 月份, 未能检测到 Mn^{2+} , 其浓度都是低于最低检出限; 3–7 月, Mn^{2+} 浓度逐渐升高, 并达到全年的最高点; 7–9 月, Mn^{2+} 浓度相对平稳, 但有微弱的减缓趋势; 9–11 月, 随着气温的降低, Mn^{2+} 浓度急剧下降; 11 月份, Mn^{2+} 浓度又低于最低检出限。同样地, 从 11 月份到次年的 5 月份, Fe^{2+} 浓度也都是低于最低检出限, 随后其浓度变化趋势与 Mn^{2+} 浓度相同。

2.2 长潭水库当地全年气温和降水的变化

长潭水库属亚热带季风气候区, 受海洋性暖湿气团和台风影响强烈。年平均气温约为

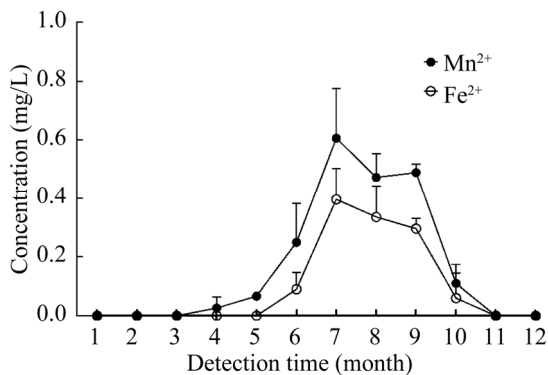


图 1 水库底部水中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度月平均变化图
Figure 1 Monthly changes of Mn^{2+} and Fe^{2+} concentrations in water at the bottom of the reservoir.

16.4 °C, 年降水量约 1 500 mm, 在降水的季节分配上, 一年之中有明显的干季和雨季之分, 3–9 月降水量占全年总量的三分之二以上, 7–9 月多台风雨季, 约占全年降水量的 40% (表 1)。台风是本地的灾害性气候, 有时会引起较大的风灾和涝灾。

2.3 长潭水库底部水全年溶解氧、pH 值、浊度和总磷浓度的变化

长潭水库底部水体的溶解氧一年之中变化非常显著。如图 2A 所示, 6–9 月 4 个月份, 溶解氧浓度均低于 0.5 mg/L, 从 9 月份开始到次年的 2 月份溶解氧浓度逐渐升高, 2 月份达到全年的最高点(10.74 mg/L), 从 2 月份到 6 月份, 溶解氧浓度逐渐下降, 6 月份时降到低于 0.5 mg/L。底部水体全年 pH 值在 6.7–7.3 之间波动(图 2B)。底部水体全年均处于低浊度(小于 10 NTU), 8 月份浊度最高(8.53 NTU), 而 10 月份时浊度最低(1.47 NTU) (图 2C)。全年总磷浓度变化不大, 在 0.1–0.2 mg/L 之间波动。

表 1 水库当地全年气温降水量月变化统计表

Table 1 Annual local temperature and precipitation of the reservoir

月份 Month	气温 Temperature (°C)	降水量 Precipitation (mm)
1 月 January	11.2	86.6
2 月 February	9.0	71.7
3 月 March	11.4	161.9
4 月 April	14.1	54.8
5 月 May	15.7	167.1
6 月 June	17.9	277.2
7 月 July	20.1	184.4
8 月 August	22.2	240.6
9 月 September	23.5	158.9
10 月 October	21.8	8.3
11 月 November	17.5	13.2
12 月 December	13.2	28.5

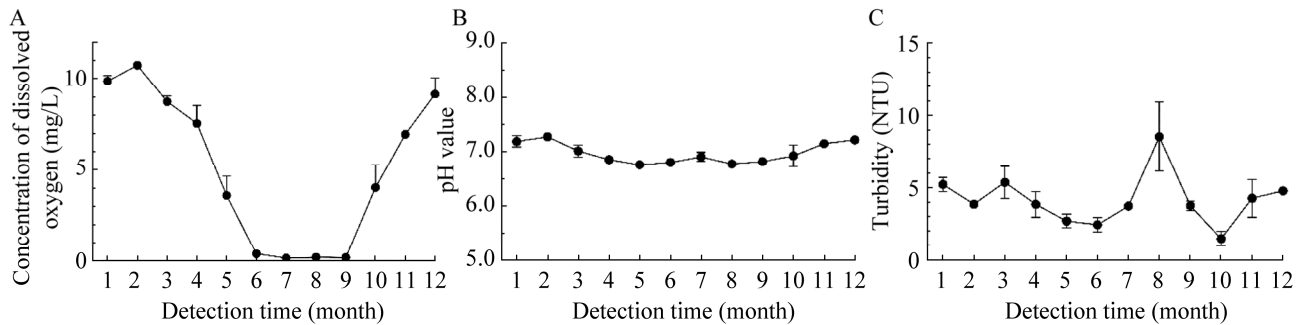


图2 水库底部水体全年溶解氧、pH值和浊度的变化 A: 溶解氧浓度; B: pH值; C: 浊度

Figure 2 Monthly changes of dissolved oxygen, pH value and turbidity of water at the bottom of the reservoir. A: Dissolved oxygen; B: pH value; C: Turbidity.

2.4 铁锰离子含量与温度、降水量、溶解氧、pH值、浊度和总磷含量的相关性分析

将 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度与温度、降水量、溶解氧、pH值、浊度和总磷含量进行相关性分析。皮尔逊相关系数(图3)显示, 2种金属离子浓度与温度、降水量和浊度呈正相关性: 其中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度含量之间呈极强正相关性(0.99); 2种金属离子浓度分别与水库集水区的温度(0.76和0.74)和

降水量(0.63和0.56)均呈强正相关性, 与水体的浊度呈极弱或弱正相关性(0.17和0.29)。两种金属离子浓度与溶解氧、pH值和总磷含量呈负相关性: 2种金属离子浓度与溶解氧均呈极强负相关性(-0.87和-0.80), 与pH值呈中等程度负相关(-0.59和-0.51), 与总磷含量呈弱负相关(-0.33和-0.34)。特别是在正负相关性分析中2种金属离子的浓度与溶解氧的相关性最强。

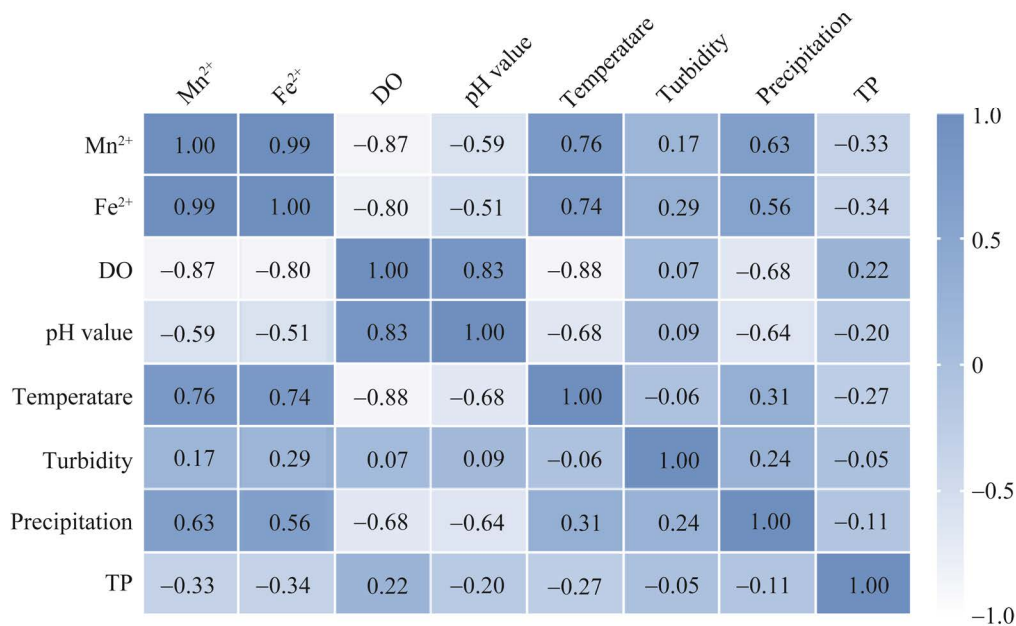


图3 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度与不同影响因子的皮尔逊相关系数

Figure 3 Pearson correlation coefficients among Mn^{2+} , Fe^{2+} and different influencing factors. DO: Dissolved oxygen; TP: Total phosphorous.

2.5 富集的可培养菌群去除水库水中锰离子

当水库水以 3 m/h 低速通过填充了添加丰水期(8 月份)富集菌群滤料的玻璃柱时, 进水锰含量为 (0.78 ± 0.08) mg/L, 出水锰含量为 (0.50 ± 0.10) mg/L, 去除率约为 35.9%。当水库水以 3 m/h 低速通过填充了平水期(2 月份)富集菌群滤料的玻璃柱时, 进水锰含量为 (0.79 ± 0.11) mg/L, 出水锰含量为 (0.70 ± 0.15) mg/L, 去除率约为 11.4%。而当水库水以 3 m/h 低速通过未添加菌群的填充滤料的玻璃柱(阴性对照)时, 进水锰含量为 (0.79 ± 0.04) mg/L, 出水锰含量为 (0.77 ± 0.07) mg/L, 去除率仅约为 2.6%。因此, 富集获得的丰水期(8 月份)和平水期(2 月份)的 2 个可培养菌群均具有去除锰离子的功能, 其中丰水期(8 月份)的可培养功能菌群去除效果更好。

2.6 长潭水库平水期和丰水期功能菌群结构差异

根据富集获得的可培养的平水期(2 月份)和丰水期(8 月份) 2 个菌群的 16S rRNA 基因 V3-V4 区序列[sequence read archive (SRA) 登录号为 SRR15324914 和 SRR15324913], 分析平水期和丰水期水库底部水中功能微生物菌群的种群结构, 结果如图 4 所示, 平水期时的微生物种群按照属分类, *Bacillariophyta* 占 47.62%, *Limnohabitans* 占 9.52%, 噬冷菌属 (*Algoriphagus*)、远洋杆菌属 (*Candidatus Pelagibacter*)、绿藻属 (*Chlorophyta*)、弯曲杆菌 (*Curvibacter*)、草螺菌属 (*Herbaspirillum*)、*Methylibium*、多核杆菌属 (*Polynucleobacter*)、*Terrimonas* 各占 4.76%, 未能在属水平分类的占 4.76%。丰水期时的微生物种群在属水平分类, 功能微生物菌群由 *Acinetobacter* 和 *Sediminibacterium* 2 个属的菌株组成(约各占 50%)。与平水期时的微生物种类相比, 丰水期时的微生物在属的分类上更加集中, 属性更加单一。

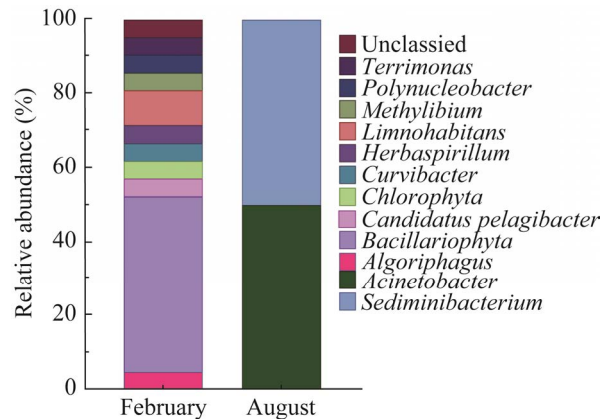


图 4 平水期(2 月份)和丰水期(8 月份)功能菌群结构分析

Figure 4 Microbial community structure in high and normal wet periods.

3 讨论与结论

长期以来, 水体中 Mn^{2+} 的去除是水处理行业公认的难题。探究 Mn^{2+} 的产生原因对 Mn^{2+} 的去除具有十分重要的意义。本研究检测分析了长潭水库底部水体 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 含量及不同环境因子的呈季节性规律变化, Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度与温度、降水量和浊度呈正相关性, 与溶解氧、pH 值和总磷含量呈负相关性。特别是在正负相关性分析中 2 种金属离子的含量与溶解氧的相关性最强。富集获得的丰水期和平水期的 2 个可培养的功能菌群的微生物种类和丰度差异很大, 丰水期时微生物只有 *Acinetobacter* 和 *Sediminibacterium* 2 个属的菌株, 含量各占约 50%; 平水期时菌群则主要由 *Bacillariophyta* (47.62%) 和 *Limnohabitans* (9.52%) 等 9 个属的菌株构成。特别是丰水期的可培养功能菌群可以更加有效地去除水体中约 35.9% 的锰离子。目前报道的铁锰氧化细菌未特别集中于某些种属, 而本研究中不同时期富集获得的功能菌群其结构存在很大差异, 可能与不同季节的多种环境因子存在相关性, 原因有待进一步研究。

目前对长潭水库的富营养化原因、氮磷的来源及溶解氧对微生物的丰度和种类都有相关的研究报道^[17]。对于铁、锰的季节性变化及其与多种环境因子的多元变量相关性分析却尚无研究报道。长潭水库也是台州市三区两市 300 万市民的饮用水源, 目前各个制水厂都是利用强氧化剂高锰酸钾把水体中的二价锰离子氧化成四价的二氧化锰小颗粒被石英砂滤层吸附而去除。根据本研究的结果可知, 长潭水库铁锰呈季节性变化, 各制水厂可在精准时段对原水的铁锰进行检测, 确定制水厂高锰酸钾投加量, 对指导水厂生产具有很大的意义。此外, 目前世界各国除铁除锰的工艺, 几乎都是应用强氧化剂直接氧化或催化氧化去除水中的 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} ^[7-11,18-19], 这样虽然出水的 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度达到了标准, 而铁和锰依然残留在处理后的水中, 可能会造成二次污染。微生物除铁锰是一种高效、经济、无残留的技术, 是除铁锰的发展方向。本研究从原水中富集获得的 2 个可以去除锰的功能微生物菌群, 为利用可培养的功能微生物根据季节变化来有效去除水体中的铁锰储备了微生物资源和潜在的可行性, 对实现国家“美丽乡村”的建设目标具有一定的参考价值。

除了本研究证明的水库中多种环境因子与 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度的季节性变化存在不同的相关性, 水库中功能微生物菌群结构变化及藻类的季节性生长对 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度的影响也是不容忽视的。每年的 3 月底 4 月初春末夏初季节, 随着气温逐渐升高, 底部微生物活性慢慢增加, 功能微生物菌群结构逐渐发生变化, 水库底部的二氧化锰被还原, 二氧化锰颗粒被还原成二价锰离子进入水体, 水体里的锰含量慢慢增加, 铁也是同样的情况^[19]。到了夏季高温季节, 一年中的气温达到最高点, 日照时间增加, 水库表层水体出现了藻类的繁殖, 处于表层的藻类

可以获得充足的阳光进行正常的光合作用, 因此表层水体有充足的溶解氧^[20]; 但是在富营养化水体的底部, 由于表层密集藻类的反射和吸收作用, 使得阳光难以穿透水库深层, 深层水体的光合作用明显受到抑制而减弱, 从而使溶解氧来源大大减小, 水体的溶解氧消耗殆尽而呈厌氧状态^[21-22]。另一方面, 水温较高时, 藻类繁殖直至疯长, 藻类会消耗二氧化碳, 使水体的 pH 值升高^[23-24], 藻类同时也阻断了水面的溶解氧向水库底部的水体传输溶解氧^[25-26]。这最后均会导致水库底部的水体溶解氧降低, 成为厌氧的状态。活跃的厌氧菌使水库底部水体的二氧化锰被还原成二价锰离子进入水体, 而造成水库底部水体的 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度呈季节性变化。由此推测, 水库底部功能微生物菌群结构变化及藻类的季节性生长与 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 浓度的季节性变化也均呈正相关性, 这个推测还有待于后期进一步的研究来证明。

致谢: 感谢上海交通大学周宁一教授对本文的指导和建设。

REFERENCES

- [1] Bin Jusoh A, Cheng WH, Low WM, Nora'aini A, Megat Mohd Noor MJ. Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon[J]. *Desalination*, 2005, 182(1/2/3): 347-353
- [2] Leach RM, Harris ED. Manganese: Handbook of Nutritionally Essential Minerals[M]. Marcel Dekker, New York, 1997
- [3] 鲁安怀, 卢晓英, 任子平, 韩丽荣, 方勤方, 韩勇. 天然铁锰氧化物及氢氧化物环境矿物学研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 473-483
Lu AH, Lu XY, Ren ZP, Han LR, Fang QF, Han Y. New advances in environmental mineralogy of natural oxides and hydroxides of iron and manganese[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2): 473-483 (in Chinese)
- [4] 孙家富. 我国富锰矿资源现状及其成矿条件分析[J]. *中国锰业*, 1995, 13(6): 7-11
Sun JF. Present status of China's high-grade manganese

- ore resources and analysis of their formation[J]. China's Manganese Industry, 1995, 13(6): 7-11 (in Chinese)
- [5] Sharma SK, Kappelhof J, Groenendijk M, Schippers JC, Schippers JC. Comparison of physicochemical iron removal mechanisms in filters[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2001, 50(4): 187-198
- [6] Mazuelos A, Palencia I, Romero R, Rodríguez G, Carranza F. Ferric iron production in packed bed bioreactors: influence of pH, temperature, particle size, bacterial support material and type of air distributor[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(5): 507-514
- [7] Mazuelos A, Romero R, Palencia I, Carranza F, Borjas FJ. Oxygen transfer in ferric iron biological production in a packed-bed reactor[J]. Hydrometallurgy, 2002, 65(1): 15-22
- [8] Vigneswaran S, Visvanathan C. Water Treatment Processes: Simple Options[M]. CRC Press, New York, 1995
- [9] Robinson RB. State-of-the-art iron and manganese control[J]. Journal of the New England Water Works Association, 2000, 114(3): 176-186
- [10] Nordell E. Water Treatment[M]. 2nd ed. Reinhold, New York, 1961
- [11] Van Halem D, Olivero S, De Vet WWJM, Verberk JQJC, Amy GL, Van Dijk JC. Subsurface iron and arsenic removal for shallow tube well drinking water supply in rural Bangladesh[J]. Water Research, 2010, 44(19): 5761-5769
- [12] 李惠珍, 许旭萍, 林跃鑫, 谢华玲. 铁-锰氧化鞘细菌的生境条件及分离鉴定[J]. 水生生物学报, 1999, 23(4): 311-315
Li HZ, Xu XP, Lin YX, Xie HL. Isolation identification and habitat conditions of Fe-Mn oxidized sheathed bacteria[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1999, 23(4): 311-315 (in Chinese)
- [13] 赵焱, 李冬, 李相昆, 吴小莉, 张杰. 高效生物除铁除锰工程菌 MSB-4 的特性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(1): 40-44
Zhao Y, Li D, Li XK, Wu XL, Zhang J. A highly effective engineering strain MSB-4 for biological removal of iron and manganese[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(1): 40-44 (in Chinese)
- [14] 李冬, 张杰, 王洪涛, 张艳萍. 除铁除锰生物滤层内铁的氧化去除机制探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(8): 1323-1326
Li D, Zhang J, Wang HT, Zhang YP. Study on the mechanism of Fe²⁺ oxidation and removal in the biological filter for iron and manganese removal[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(8): 1323-1326 (in Chinese)
- [15] 陈建军, 翁国永. 除锰菌筛选及其生物活性[J]. 净水技术, 2017, 36(12): 79-83
Chen JJ, Weng GY. Screening of manganese removal microorganism and the performance of biological activity[J]. Water Purification Technology, 2017, 36(12): 79-83 (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家标准, 生活饮用水标准检验方法 GB 5750—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
National Standard of the People's Republic of China. Standard Examination Methods for Drinking Water GB 5750—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006 (in Chinese)
- [17] 潘鸿, 唐宇宏. 长潭水库浮游植物群落结构及其富营养化评价[J]. 湖南生态科学学报, 2021, 8(2): 60-65
Pan H, Tang YH. Phytoplankton community structure and eutrophication evaluation of changtan reservoir[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2021, 8(2): 60-65 (in Chinese)
- [18] 刘灿生, 黄毅轩, 陈牧民. 关于地下水除铁、除锰机理的讨论[J]. 给水排水, 1996, 22(10): 17-20
Liu CS, Huang YX, Chen MM. Discussion on the mechanism of iron and manganese removal from groundwater[J]. Water & Wastewater Engineering, 1996, 22(10): 17-20 (in Chinese)
- [19] 张吉库, 傅金祥, 周华斌, 赵玉华, 陶飞. 地下水除铁除锰技术与发展趋势[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2003, 19(3): 212-214
Zhang JK, Fu JX, Zhou HB, Zhao YH, Tao F. Technology about Fe and Mn removals of underground water and development[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2003, 19(3): 212-214 (in Chinese)
- [20] 罗肖丽. 地表水中藻类代谢对溶解氧含量及 pH 值的影响[J]. 广东化工, 2021, 48(21): 138-139
Luo XL. The influence of algae metabolism on dissolved oxygen and pH in surface water[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(21): 138-139 (in Chinese)
- [21] 王翠, 姜鑫, 刘佳. 尔王庄水库总磷、总氮、溶解氧与藻类计数相关性的研究[J]. 天津科技, 2016, 43(8):

- 35-37, 40
Wang C, Jiang X, Liu J. Correlation of total phosphorus, total nitrogen, dissolved oxygen with algae counts in Erwangzhuang reservoir[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2016, 43(8): 35-37, 40 (in Chinese)
- [22] 李冬, 张杰, 陈立学, 杨宏, 高孟臣. 生物除铁除锰在地下水处理厂的应用[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(12): 85-88
Li D, Zhang J, Chen LX, Yang H, Gao MC. Application of biological removal of iron and manganese from groundwater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(12): 85-88 (in Chinese)
- [23] Tekerlekopoulou AG, Vayenas DV. Ammonia, iron and manganese removal from potable water using trickling filters[J]. *Desalination*, 2007, 210(1/2/3): 225-235
- [24] Vayenas DV, Lyberatos G. A novel model for nitrifying trickling filters[J]. *Water Research*, 1994, 28(6): 1275-1284
- [25] 杨沈生, 杨沈丽, 刘华. 周口市水体氮污染状况及防治对策[J]. *河南水利与南水北调*, 2008(8): 28-29
Yang SS, Yang SL, Liu H. Nitrogen pollution status and control countermeasures of water body in Zhoukou city[J]. *Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion*, 2008(8): 28-29 (in Chinese)
- [26] 张翀, 赵亮, 张莹, 赵庆良. 藻类爆发危害及其控制技术研究进展[J]. *环境保护科学*, 2015, 41(3): 107-112
Zhang C, Zhao L, Zhang Y, Zhao QL. Research progress of the hazard and control technology of algae bloom[J]. *Environmental Protection Science*, 2015, 41(3): 107-112 (in Chinese)