

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

**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

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 ..... 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)  
卫星遥感在 NO<sub>x</sub> 总量控制中的应用 ..... 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)  
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 ..... 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)  
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 ..... 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)  
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 ..... 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)  
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 ..... 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)  
泉州市大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 ..... 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)  
2011~2012 年北京大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征与来源分析 ..... 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)  
厦门海沧区 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染评价及来源分析 ..... 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)  
道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征及健康风险评价 ..... 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)  
福建九仙山大气 PM<sub>10</sub> 及部分化学组成的季节变化 ..... 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)  
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 ..... 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)  
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 ..... 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)  
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 ..... 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)  
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 ..... 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4108)  
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例 ..... 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)  
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例 ..... 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)  
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 ..... 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)  
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 ..... 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)  
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 ..... 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)  
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 ..... 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)  
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 ..... 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)  
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 ..... 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)  
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 ..... 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)  
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 ..... 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)  
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 ..... 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)  
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 ..... 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)  
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 ..... 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)  
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 ..... 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)  
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响 ..... 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)  
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 ..... 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)  
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 ..... 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)  
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 ..... 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)  
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 ..... 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)  
AnMBR-A-MBR 和 A<sup>2</sup>-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 ..... 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)  
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)  
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 ..... 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)  
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 ..... 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)  
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 ..... 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)  
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 ..... 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)  
醋糟高效厌氧消化体系构建 ..... 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)  
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例 ..... 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)  
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 ..... 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)  
三峡库区典型消落带 CH<sub>4</sub> 排放的变化特征及影响因素 ..... 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)  
地膜覆盖对菜地生态系统 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)  
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 ..... 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)  
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 ..... 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)  
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 ..... 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)  
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 ..... 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)  
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 ..... 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)  
冬小麦田 O<sub>3</sub> 气孔与非气孔沉降及风险评估 ..... 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)  
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 ..... 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)  
《环境科学》征稿简则(4261) 《环境科学》征订启事(4270) 信息(4186, 4404, 4446)

# 细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响

涂仁杰, 金文标\*, 韩松芳, 陈洪一

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 土木与环境工程学院, 深圳 518055)

**摘要:** 利用城市污水培养微藻, 可在实现污水无害化处理的同时, 培养微藻回收生物质能源. 污水为微藻的培养提供氮、磷等营养组分和所需水源, 同时污水中的细菌可分解污水中的有机物产生  $\text{CO}_2$ , 为微藻提供生长所需碳源. 菌藻混合培养既可以收获藻类, 又可以净化污水, 由于城市污水含有大量的原生菌类, 且微藻与细菌之间存在着互生、拮抗等复杂的相互关系, 因此, 需要筛选出既能够适应于城市污水又能促进微藻生长和油脂积累的优势菌种. 本文从不同来源的 13 种细菌中筛选出 2 种能够显著促进蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 生长和油脂积累细菌, 并分析了微藻培养结束后城市污水的菌群结构. 结果表明: 污水中光合细菌初始吸光度  $D_{600}$  为 0.01, W4 菌初始吸光度  $D_{600}$  为 0.02 时, 对小球藻的干重和油脂产量促进作用最显著, 油脂产量分别可达  $0.114 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.113 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 油脂产量比空白对照组分别提高了 22.58%、21.50%. 通过对生成的脂肪酸甲酯进行气相色谱分析, 结果显示光合细菌和 W4 菌的添加并未改变小球藻脂肪酸成分, 但提升了单不饱和脂肪酸的含量, 有利于提升所得生物柴油的品位. 培养结束后污水的菌群结构分析显示投加细菌会降低污水中菌群的丰富度和多样性, 初步判断是投加的菌在藻液中能够成为优势菌群, 且实验组中丛毛单胞菌属 (*Comamonas*) 和假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 的丰度大于对照组.

**关键词:** 细菌; 城市污水; 小球藻; 油脂产量; 菌群结构

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4279-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201703054

## Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in *Chlorella pyrenoidosa* Cultivated in Municipal Wastewater

TU Ren-jie, JIN Wen-biao\*, HAN Song-fang, CHEN Hong-yi

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Cultivating microalgae using municipal wastewater can treat wastewater and recover algal biofuel as an energy source. Wastewater provides necessary nutrients such as nitrogen, phosphorus, and water for microalgal growth. Due to the complexity of the components of municipal wastewater and the complex symbiotic and antagonistic relationship between microalgae and bacteria, it is necessary to select the suitable dominant bacterial species that can promote the microalgae to achieve high lipid production and algal biofuel production using municipal wastewater. Based on the microalgal growth and lipid production, we selected *Photosynthetic* bacteria and W4 bacteria from 13 different types of bacteria and analyzed the microbial community structure of the municipal wastewater at the end of the microalgal culture cycle. Laboratory test results showed that the amount of lipid production by *Photosynthetic* bacteria and W4 was  $0.114 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $0.113 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , which is 22.58% and 21.50% higher than the production by the control group, respectively. According to the gas chromatography (GC) analysis of the lipids, *Photosynthetic* bacteria and W4 bacteria exerted a relatively low influence on the composition of fatty acids of *Chlorella pyrenoidosa* but increased the content of monounsaturated fatty acids that improve the grade of biodiesel. The results of the analysis of microbial community structure of the municipal wastewater showed that *Photosynthetic* and W4 bacteria reduced the richness and diversity of bacterial communities and have the potential to become the dominant bacterial community.

**Key words:** bacteria; municipal wastewater; *Chlorella pyrenoidosa*; lipid production; microbial community structure

随着能源危机与环境污染的加剧, 微藻生物柴油越来越受到各国研究者的关注<sup>[1-3]</sup>. 就整体工艺而言, 微藻生物柴油的生产包括藻种选育、微藻培养、微藻收获、油脂提取与转脂. 微藻培养是其中一个重要环节, 在微藻培养过程中, 利用淡水培养微藻需消耗大量淡水资源, 有悖于当前淡水资源紧缺的背景. 同时, 营养物质的投加进一步提高了微藻的培养成本<sup>[4,5]</sup>. 利用城市污水培养微藻, 藻类通过光合作用释放出氧气供给好氧异养型微生物进

行代谢活动, 而好氧异养型微生物对有机污染物进行氧化分解, 代谢产物二氧化碳和无机氮、磷化合物又供给藻类作为光合作用所需的碳源和营养, 如此循环, 形成藻菌之间共生的关系<sup>[6]</sup>. 菌藻混合培养既可以收获藻类, 又可以净化污水, 受到国内外

收稿日期: 2017-03-07; 修订日期: 2017-05-07

基金项目: 深圳市科技计划资助项目 (JCYJ20150529114024234)

作者简介: 涂仁杰 (1985~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微藻生物能源, E-mail: turenjie@stmail.hitsz.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: jinwb@hit.edu.cn

极大关注<sup>[7]</sup>.

陈小晨等<sup>[8]</sup>发现低浓度的光合细菌液对铜绿微囊藻和小球藻具有明显的促进作用,且小球藻受到的影响比铜绿微囊藻要显著. Zhou 等<sup>[9]</sup>以曲霉为生物质载体实现小球藻的固定化培养,利用菌藻共生体高效收获藻体. 细菌除了对微藻的生长有影响,在污水处理方面也有广泛的应用. Hargreaves<sup>[10]</sup>将光合细菌应用于水产养殖,增加了水体的溶氧量,有效降低水体污染程度. 王冰等<sup>[11]</sup>研究了小球藻和光合细菌共培养对污水的处理效果,结果表明菌藻共生体对氨氮的去除率在 4 h 内可达到 80%. 目前,此领域的大多数研究集中在利用微藻改善污水水质或者利用人工污水培养基及灭菌污水培养微藻方面,而将实际城市污水处理与微藻培养制备生物柴油相耦合的研究报道较少,也极少关注微藻培养后菌群结构的变化情况<sup>[12,13]</sup>.

鉴于城市污水含有大量的原生菌类,且微藻与细菌之间存在着互生、拮抗等复杂的相互关系<sup>[14]</sup>. 本研究将基于城市污水系统中菌藻共生体系,筛选出能够有效促进小球藻生长和油脂积累的细菌,通过分析体系中菌群多样性并确定主导菌群,初步探讨菌类促进藻类生长的机制,使菌藻共生体系更好地指导微藻培养与污水处理耦合技术的进一步推广应用.

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种与培养基

实验所用微藻为课题组前期经离子注入法诱变筛选的蛋白核小球藻诱变株(CH-M)<sup>[15]</sup>,藻种采用 BG-11 培养基<sup>[16]</sup>进行传代培养保藏. 选取的细菌共有 3 个来源:水产养殖领域常用的对水质具有净化作用的光合细菌(广东省菌种保藏中心)、EM 菌和枯草芽孢杆菌(河南中广集团天义生物谷);课题组前期从污水中筛选的高效氨化菌、聚磷菌、阴离子洗涤剂降解菌(LAS 菌)、二甲基甲酰胺降解菌(DMF 菌)<sup>[17]</sup>;从小球藻污水培养系统中筛选出的可在培养基中快速生长的 6 种细菌 W1、W2、W3、W4、W5、W6<sup>[18]</sup>.

实验所用城市污水取自深圳大学城市污水井,经简单预处理后的污水水质见表 1.

表 1 大学城城市污水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Municipal wastewater quality at the Shenzhen University/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	COD	TP	TN	$\text{NH}_4^+-\text{N}$
参数	121.33 ± 3.14	4.31 ± 0.08	24.62 ± 0.12	23.66 ± 0.05

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 微藻培养

以 BG11 培养基培养处于对数生长期的微藻为种子液,接种培养体积为 600 mL,于气泡柱式光生物反应器(直径为 5 cm、长度为 50 cm、容积大小约为 1 L)中培养,以相应的不加微藻的城市污水为空白对照,使扣除空白后藻液初始吸光度  $D_{680} = 0.1$ ,于培养温度 ( $25 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ ,光照强度  $100 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,光暗比(L:D)为 12 h:12 h 条件下,连续通气培养(空气流速为  $120 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,由底部通入). 每天取样测定扣除空白后藻液的  $D_{680}$  以监测藻细胞生长情况. 取培养达到稳定期的藻液测定扣除空白后藻细胞的干重、油脂产量. 每组实验各设 3 个平行.

### 1.2.2 污水预处理方法

城市污水采用沉淀 + 过滤的预处理方式,原污水先沉淀 2 h 处理后,上清液用定性滤纸过滤后使用.

## 1.3 分析方法

### 1.3.1 微藻干重的测定

微藻的干重采用重量法测定,10 mL 藻液经预称重( $W_1$ )的微孔滤膜( $\Phi 0.45 \mu\text{m}$ )过滤、洗涤,于  $105^{\circ}\text{C}$  下烘至恒重( $W_2$ ),不加微藻的空白对照组干重为  $W_0$ ,微藻干重 DW ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )的计算公式如下:

$$\text{DW} = (W_2 - W_1 - W_0) / 0.01$$

### 1.3.2 微藻油脂产量与脂肪酸组成的测定

微藻油脂提取采用氯仿甲醇共溶剂提取法<sup>[19]</sup>. 待提取结束后,收集氯仿相,转移至预称重的锡纸盘中,待有机溶剂挥发完全后,于  $80^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘至恒重,得到微藻油脂产量,微藻细胞油脂含量为微藻油脂产量与微藻干重的质量比.

微藻脂肪酸分析,首先对提取的油脂进行甲酯化<sup>[20]</sup>,将 5 mL 藻液中脂肪酸转化成相对应的脂肪酸甲酯. 采用赛里安 456-GC 气相色谱仪进行分析,色谱柱为 BR-2560 柱,  $100 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$  (内径)  $\times 0.20 \mu\text{m}$  (膜厚),FID 检测器,分流方式进样,分流比为 30:1,进样量为  $1 \mu\text{L}$ .

### 1.3.3 菌群结构分析方法

微生物菌群结构的研究主要是通过对细菌 16S rRNA 的 V4 ~ V5 高可变区基因进行测序,并基于测序结果进行数据筛选以及微生物菌群信息的分析. 主要包括:细菌组 DNA 提取、PCR 扩增、电泳验证、PCR 产物纯化与浓度测定、高通量测序以及测序结果分析. 细菌组 DNA 的提取采用 MOBIO

PowerSoil<sup>®</sup> DNA Isolation Kit 试剂盒(MOBIO Solon, USA), 将提取出来的 DNA 采用引物对 515F: 5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3' 和 907R: 5'-CCGTC AATTCMTTTRAGTTT-3'对 16S rRNA 高可变的 V4 ~ V5 区进行序列扩增. PCR 产物纯度采用 1% 的琼脂糖凝胶电泳进行验证, DNA marker 采用 DL2000(SIGMA, USA). 电泳条件为 100 V 电压, 电泳 30 min. 最后通过紫外凝胶成像系统观察目的 DNA 片段大小, 估测 DNA 浓度, PCR 产物纯化采用 E. Z. N. A.<sup>®</sup> Gel Extraction Kit(OMEGA, USA). 最后将胶回收后的 PCR 产物建库后使用 Hiseq2500 PE250(Illumina, USA)测序平台对构建的扩增子文库进行测序<sup>[21]</sup>.

### 1.3.4 数据分析方法

数据采用统计软件 SPSS 21.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用 LSD 法进行统计检验( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 细菌促进小球藻产脂的初步优化

通过考察 13 种菌对小球藻的干重和油脂产量的促进作用, 初步筛选出促进作用明显的细菌. 将小球藻按照初始吸光度  $D_{600} = 0.1$  接种到投加了不同种类细菌的城市污水中, 污水中细菌初始吸光度  $D_{600}$  为 0.02, 取稳定期的藻液测其干重, 结果如图 1 所示. 从中可以看出, 所投加的细菌中, 光合细菌、枯草芽孢杆菌、氨化菌、DMF 菌、W4、W5、W6 等 7 种菌对小球藻干重促进作用明显, 其中投加 W4 菌的情况下微藻干重增加最为显著. 不同细菌投加情况下, 微藻的油脂含量和油脂产量如图 2、图 3 所示, 不同字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ).

由图 2、图 3 可以看出, 投加细菌后大多数细菌对微藻油脂含量影响不大, 小球藻油脂含量受不同细菌种类的影响不大. 由于微藻的油脂产量由微藻干重和油脂含量共同决定, 投加光合细菌、枯草芽孢杆菌、DMF 菌、W4 和 W5 对小球藻的油脂产量提高有明显促进作用( $P < 0.05$ ), 其中光合细菌对小球藻油脂产量的促进作用最为显著, 油脂产量相比于空白对照组提高了 46.51%. 因此, 选取对微藻生长和产脂具有显著促进作用的光合细菌、枯草芽孢杆菌、DMF 菌、W4 和 W5 作为后续进一步优化的对象.

### 2.2 细菌促进小球藻产脂的进一步优化

#### 2.2.1 最佳菌种及浓度的确定

选取对小球藻油脂产量提高促进作用明显的 5

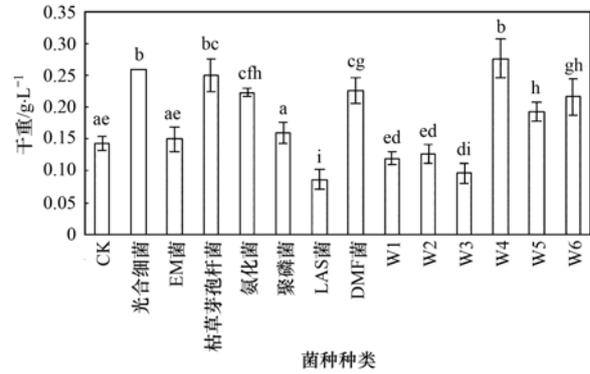


图 1 小球藻在添加不同细菌城市污水中的生物质产量

Fig. 1 Biomass production of microalgae in municipal wastewater with different bacteria

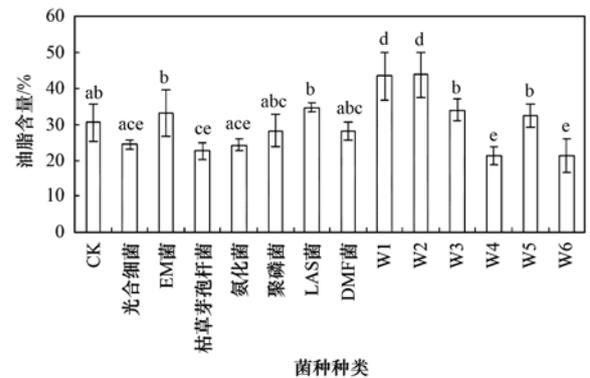


图 2 小球藻在添加不同细菌城市污水中的油脂含量

Fig. 2 Lipid content of microalgae in municipal wastewater with different bacteria

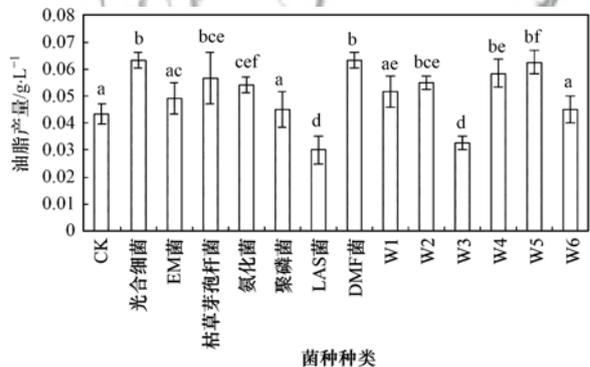


图 3 小球藻在添加不同细菌城市污水中的油脂产量

Fig. 3 Lipid production of microalgae in municipal wastewater with different bacteria

种菌:光合细菌、枯草芽孢杆菌、DMF 菌、W4 和 W5, 对其投加量进行进一步优化, 5 种细菌在污水中的初始吸光度  $D_{600}$  均设置为 0、0.002、0.01、0.02、0.03, 将小球藻按照初始吸光度  $D_{600} = 0.1$  接种到添加不同量细菌的城市污水中. 取稳定期的藻液测其微藻干重, 油脂产量, 并计算其油脂含量, 所得结果如图 4~6 所示. 从中可以看出, 光合细菌的初始吸光度  $D_{600}$  为 0.01, W4 菌的初始吸光度

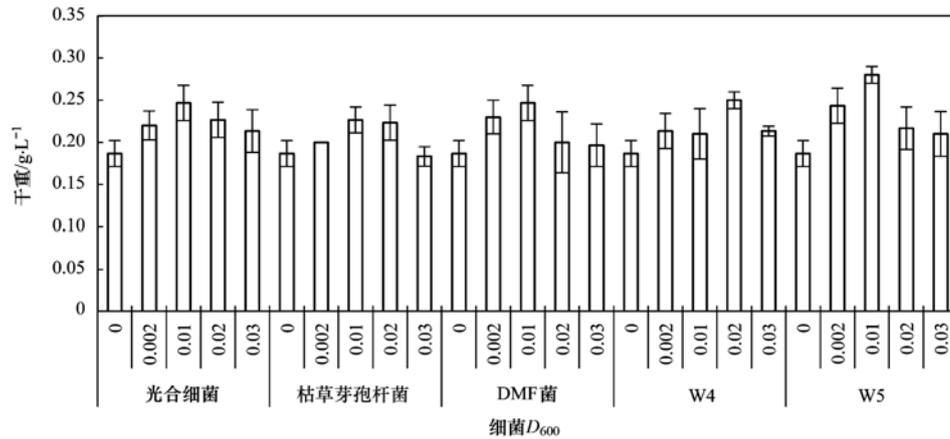


图 4 小球藻在添加不同量细菌城市污水中的生物质产量

Fig. 4 Biomass production of microalgae in municipal wastewater with different amount of bacteria

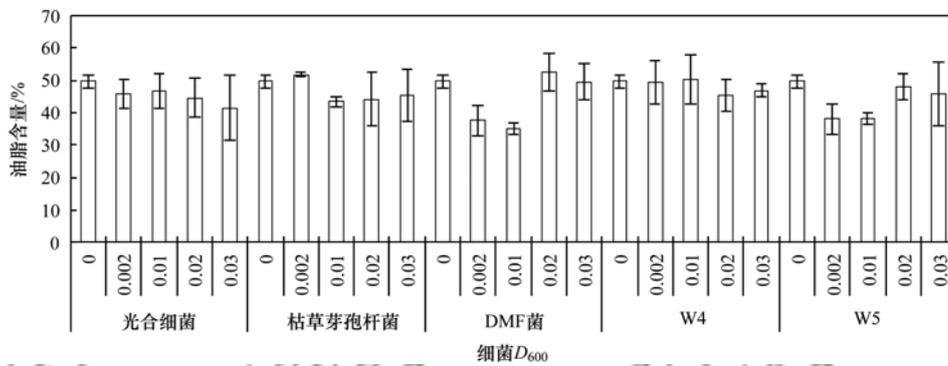


图 5 小球藻在添加不同量细菌城市污水中的油脂含量

Fig. 5 Lipid content of microalgae in municipal wastewater with different amount of bacteria

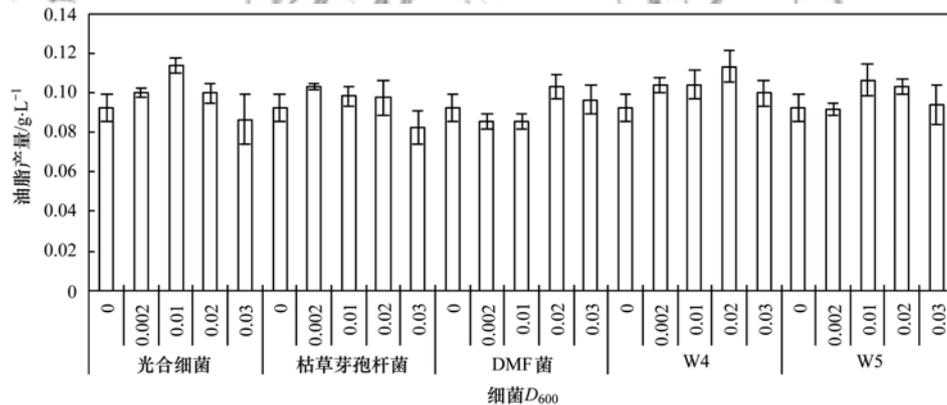


图 6 小球藻在添加不同量细菌城市污水中的油脂产量

Fig. 6 Lipid production of microalgae in municipal wastewater with different amount of bacteria

$D_{600}$  为 0.02 时, 对小球藻的干重和油脂产量促进作用最显著, 干重比空白对照组分别显著提高了 32.09% 和 33.69% ( $P < 0.05$ ), 油脂产量比空白对照组分别显著提高了 22.58%、21.50% ( $P < 0.05$ ). 因此选取初始吸光度  $D_{600}$  为 0.01 的光合细菌和初始吸光度  $D_{600}$  为 0.02 的 W4 菌作为后续研究对象.

### 2.2.2 细菌对小球藻脂肪酸甲酯的影响

对投加光合细菌, W4 菌与空白对照组油脂进

行甲酯化反应, 通过对生成的脂肪酸甲酯进行气相色谱分析, 考察小球藻脂肪酸组成的差异, 结果如表 2 所示. 从中可知, 4 种微藻在脂肪酸组成上均以 C16、C18 为主, 为绿藻中常见脂肪酸<sup>[22,23]</sup>. Song 等<sup>[24]</sup> 和 Ma 等<sup>[25]</sup> 的研究表明, 适合制备生物柴油的原料应含有较多的 C16~C18 脂肪酸, 主要包括十六烷酸 (C16:0)、十八烷酸 (C18:0)、十八碳烯酸 (C18:1)、十八碳二烯酸 (C18:2)、十八碳

三烯酸(C18:3). 对照组与投加光合细菌、W4 菌的实验组中该 5 种脂肪酸在总脂肪酸中的质量占比分别可达 94.41%、93.91%、94.14%, 适宜于作为制备生物柴油的原料. 同时, 脂肪酸甲酯的结构会对生物柴油的性能(十六烷值、低温流动性、氧化安定性等)产生影响<sup>[26]</sup>. 有研究表明, 生物柴油的十六烷值随着饱和脂肪酸甲酯含量的增加而增加, 多不饱和脂肪酸甲酯含量的增加而降低<sup>[27]</sup>. 生物柴油低温流动性随着饱和脂肪酸甲酯尤其是长碳链质量分数增高而变差. 生物柴油的氧化安定性随着不饱和脂肪酸不饱和度增高而变差. 高品位的生物柴油应尽量少地含有多不饱和脂肪酸甲酯和饱和脂肪酸甲酯, 尽量多地含有单不饱和脂肪酸, 以改善其十六烷值、低温流动性、氧化安定性、运动黏度等性能<sup>[28]</sup>. 从表 2 中可以看出, 投加光合细菌、W4 菌的实验组中单不饱和脂肪酸的质量占比分别为 10.39%、10.60%, 比对照组 5.35% 有大幅度提高, 有利于提升所得生物柴油的品位.

表 2 添加细菌组与对照组脂肪酸分析/%

脂肪酸	对照组	光合细菌	W4 菌
C14:0	0.62	0.46	0.69
C16:0	27.27	23.80	23.51
C16:1	4.97	3.50	3.25
C16:3	2.20	2.13	1.92
C18:0	23.52	18.94	19.18
C18:1	0.39	6.89	7.35
C18:2	13.74	14.91	12.60
C18:3	27.30	29.39	31.50
总饱和脂肪酸	51.41	43.20	43.38
单不饱和脂肪酸	5.35	10.39	10.60
多不饱和脂肪酸	43.23	46.42	46.02

### 2.3 细菌对菌群结构影响

取培养达到稳定期的空白对照组与投加细菌(光合细菌, W4 菌)的实验组藻液, 通过 DNA 提取、16S V4 ~ V5 高变区 PCR 扩增, 高通量测序考察藻液中菌群的组成与多样性.

#### 2.3.1 菌群多样性分析

菌群多样性是指某个集合群落内, 不同类型微生物的变化以及它们之间的相对丰度. 一般而言, 系统中微生物菌群多样性越高, 越有利于抵抗外界环境的变化, 较快的进行系统自我调整和更新. 反之, 微生物菌群多样性较低, 存在优势度较高微生物群落的系统, 可能富集重要的功能种群, 有利于对目标污染物的去除, 但可能带来运行不稳定的风险.

生物多样性测定主要有 3 个空间尺度从小到大分为: $\alpha$ 多样性、 $\beta$ 多样性、 $\gamma$ 多样性. 其中  $\alpha$ 多样性主要关注局域均匀生境下的物种数目, 因此也被称为生境内的多样性. 多样性指数是反映丰富度和均匀度的综合指标, 与以下两个因素有关:①种类数目, 即丰富度;②种类中个体分配上的均匀性. 群落丰富度(community richness)的指数, 包括 Chao1 指数和 observed species 指数, 数值越大, 说明样品中物种越丰富;群落多样性的指数, 包括 PD whole tree 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数, 数值越大, 说明样品群落多样性越高. 所得实验组与对照组样品的  $\alpha$ 多样性参数统计结果如表 3 所示. 从中可以看出, 投加细菌(光合细菌, W4 菌)的实验组 Chao1 指数和 observed species 指数均小于对照组, 表明投加细菌会降低藻液中菌群的丰富度, 虽然 PD whole tree 指数有所降低, 但 Shannon 指数和 Simpson 指数并未发生明显变化, 表明投加细菌并未改变菌群多样性.

表 3 不同样品的生物多样性

样品	Chao1 指数	observed species 指数	PD whole tree 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
对照组	1 802.37	945	50	7.55	0.97
光合细菌	1 757.36	909	46	7.44	0.97
W4 菌	1 677.78	903	45	7.65	0.98

#### 2.3.2 主导菌群分析

对投加光合细菌、W4 菌的实验组与空白对照组有效序列在不同物种分类水平上的丰度进行分析. 图 7 为样品在门分类级别上的丰度. 从中可以看出, 对照组与实验组在门级别上, 均以变形菌门(Proteobacteria)占主导. 这与世界各地分布的污水

处理厂中微生物菌群结构的相关报道一致<sup>[29,30]</sup>. 空白对照组与投加光合细菌、W4 菌组, Proteobacteria 丰度分别高达 84.13%、84.50% 和 77.99%. 其他占主导的门为拟杆菌门(Bacteroidetes)丰度分别为 11.33%、13.89% 和 20.16%. 由于 Proteobacteria 门的丰度高达 77.85% ~ 84.50%, 因而分析了其下

属的  $\alpha$ -、 $\beta$ -、 $\gamma$ -、 $\delta$ -、 $\epsilon$ -Proteobacteria 的丰度. 结果表明, 空白对照组  $\alpha$ -Proteobacteria 和  $\gamma$ -Proteobacteria 的丰度较多, 分别为 32.52% 和 31.16%, 其它依次为  $\beta$ -Proteobacteria, 丰度为 20.24%. 而投加细菌(光合细菌、W4)组  $\gamma$ -Proteobacteria 的丰度最大, 分别为 36.91% 和 32.62%, 其次为  $\alpha$ -Proteobacteria 和  $\beta$ -Proteobacteria, 丰度分别为 30.91%、24.40% 和 16.65%、20.81%. 即相比于空白对照组, 投加细菌的实验组 3 种 Proteobacteria 变化不大. 进一步对比空白对照组与实验组的属分类级别上的丰

度. 实验组丛毛单胞菌属(*Comamonas*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)的丰度大于对照组. 丛毛单胞菌属可以将氨氮分解为亚硝酸盐氮, 同时可以将氨氮转化为氮气, 既能够作为脱氮微生物将氨氮转化为亚硝酸盐氮, 又能够将氨氮转化为氮气, 实现短程硝化-反硝化. 该菌株的益处是具有对含氮废水的硝化-反硝化作用, 对氨氮的降解速度快, 适用于含氮工业废水、含氮生活污水的处理. 假单胞菌属有利于废水中有机物残留尤其毒性芳香烃类化合物的降解, 说明投加的细菌有利于污水水质的改善.

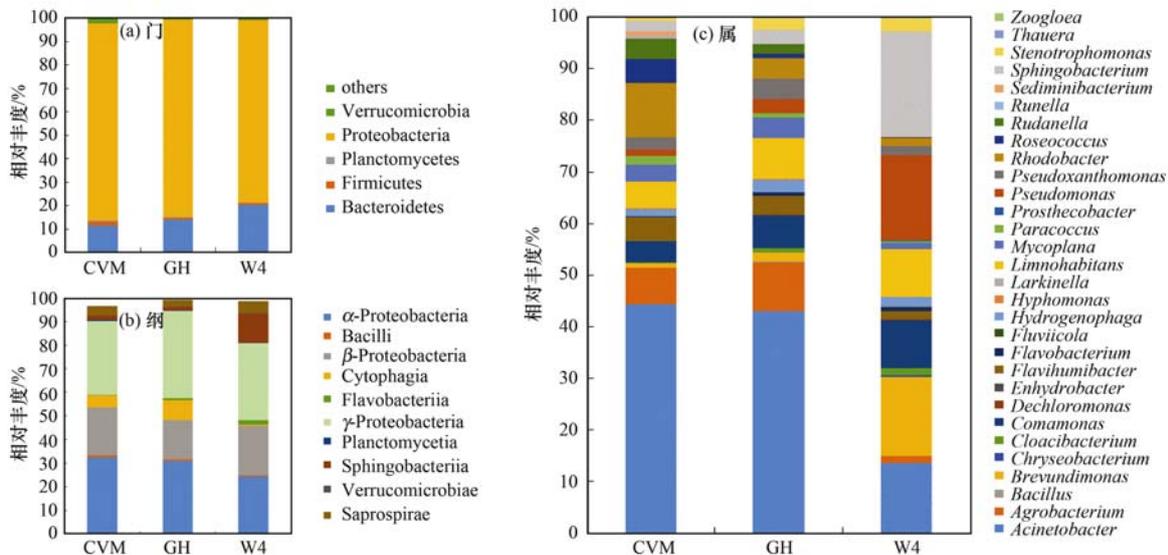


图 7 样品在不同层级(门纲属)上的丰度  
Fig. 7 Relative abundance at different levels

### 3 结论

城市污水中光合细菌初始吸光度  $D_{600}$  为 0.01, W4 菌初始吸光度  $D_{600}$  为 0.02 时, 对小球藻的干重和油脂产量促进作用最显著, 油脂产量分别可达  $0.114 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.113 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 油脂产量比空白对照组分别提高了 22.58%、21.50%. 通过对生成的脂肪酸甲酯进行气相色谱分析, 结果显示光合细菌和 W4 菌的添加并未改变小球藻脂肪酸成分, 但提升了单不饱和脂肪酸的含量, 有利于提升所得生物柴油的品位. 培养结束后污水的菌群结构分析显示投加细菌会降低污水中菌群的丰富度和多样性, 初步判断是投加的菌在藻液中能够成为优势菌群, 且实验组中丛毛单胞菌属和假单胞菌属的丰度大于对照组.

#### 参考文献:

[1] Chisti Y. Constraints to commercialization of algal fuels[J].

Journal of Biotechnology, 2013, 167(3): 201-214.

- [2] Han S F, Jin W B, Tu R J, et al. Biofuel production from microalgae as feedstock: current status and potential[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2015, 35(2): 255-268.
- [3] Abomohra A E F, Jin W B, Tu R J, et al. Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiesel: current status and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 596-606.
- [4] Yang J, Xu M, Zhang M X, et al. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 159-165.
- [5] Morales-Amaral M D M, Gómez-Serrano C, Ación F G, et al. Production of microalgae using centrate from anaerobic digestion as the nutrient source[J]. Algal Research, 2015, 9: 297-305.
- [6] 巫小丹, 阮榕生, 王辉, 等. 菌藻共生系统处理废水研究现状及发展前景[J]. 环境工程, 2014, 32(3): 35-37, 69. Wu X D, Ruan R S, Wang H, et al. Current status and prospect of sewage purification with the algal-microbe symbiotic system [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(3): 35-37, 69.
- [7] McKinlay J B, Harwood C S. Carbon dioxide fixation as a central redox cofactor recycling mechanism in bacteria[J]. Proceedings

- of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, **107**(26): 11669-11675.
- [ 8 ] 陈小晨, 薛凌展, 林泽, 等. 光合细菌对铜绿微囊藻和小球藻生长的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2010, **16**(23): 29-31.
- Chen X C, Xue L Z, Lin Z, et al. The effect of photosynthetic bacteria (PSB) on the growth of microcystis aeruginosa and chlorella vulgaris [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2010, **16**(23): 29-31.
- [ 9 ] Zhou W G, Cheng Y L, Li Y, et al. Novel fungal pelletization-assisted technology for algae harvesting and wastewater treatment [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, **167**(2): 214-228.
- [ 10 ] Hargreaves J A. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture[J]. Aquacultural Engineering, 2006, **34**(3): 344-363.
- [ 11 ] 王冰, 周集体, 杨宝灵, 等. 光合细菌-藻类共固定深度净化污水的研究[J]. 大连民族学院学报, 2014, **16**(3): 249-252.
- Wang B, Zhou J T, Yang B L, et al. Deep treatment of wastewater by co-immobilized photosynthetic bacteria and algae [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2014, **16**(3): 249-252.
- [ 12 ] Ramsundar P, Guldhe A, Singh P, et al. Assessment of municipal wastewaters at various stages of treatment process as potential growth media for *Chlorella sorokiniana* under different modes of cultivation [J]. Bioresource Technology, 2017, **227**: 82-92.
- [ 13 ] Ryu B G, Kim E J, Kim H S, et al. Simultaneous treatment of municipal wastewater and biodiesel production by cultivation of *Chlorella vulgaris* with indigenous wastewater bacteria [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2014, **19**(2): 201-210.
- [ 14 ] Muñoz R, Guieysse B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review [J]. Water Research, 2006, **40**(15): 2799-2815.
- [ 15 ] Tu R J, Jin W B, Wang M, et al. Improving of lipid productivity of the biodiesel promising green microalga *Chlorella pyrenoidosa* via low-energy ion implantation [J]. Journal of Applied Phycology, 2016, **28**(4): 2159-2166.
- [ 16 ] Stanier R Y, Kunisawa R, Mandel M, et al. Purification and properties of unicellular blue-green algae (order *Chroococcales*) [J]. Bacteriological Reviews, 1971, **35**(2): 171-205.
- [ 17 ] 闫韞. 布吉河生物修复过程中氮循环功能菌群分布研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- Yan Y. Study on the distribution of nitrogen cycling microbial community in bioremediation process of Buji River[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [ 18 ] 郭仕达. 城市污水高效降解菌对产油微藻生长促进作用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [ 19 ] Folch J, Lees M, Sloane Stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, **226**(1): 497-509.
- [ 20 ] Kaczmarzyk D, Fulda M. Fatty acid activation in cyanobacteria mediated by acyl-acyl carrier protein synthetase enables fatty acid recycling[J]. Plant Physiology, 2010, **152**(3): 1598-1610.
- [ 21 ] Hua Z S, Han Y J, Chen L X, et al. Ecological roles of dominant and rare prokaryotes in acid mine drainage revealed by metagenomics and metatranscriptomics[J]. The ISME Journal, 2015, **9**(6): 1280-1294.
- [ 22 ] 刘林林, 黄旭雄, 危立坤, 等. 15 株微藻对猪场养殖污水中氮磷的净化及其细胞营养分析[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 1986-1994.
- Liu L L, Huang X X, Wei L K, et al. Removal of nitrogen and phosphorus by 15 strains of microalgae and their nutritional values in piggery sewage[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(8): 1986-1994.
- [ 23 ] Vidyashankar S, VenuGopal K S, Swarnalatha G V, et al. Characterization of fatty acids and hydrocarbons of chlorophycean microalgae towards their use as biofuel source[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, **77**: 75-91.
- [ 24 ] Song M M, Pei H Y, Hu W R, et al. Evaluation of the potential of 10 microalgal strains for biodiesel production[J]. Bioresource Technology, 2013, **141**: 245-251.
- [ 25 ] Ma Y B, Wang Z Y, Yu C J, et al. Evaluation of the potential of 9 *Nannochloropsis* strains for biodiesel production [J]. Bioresource Technology, 2014, **167**: 503-509.
- [ 26 ] Stansell G R, Gray V M, Sym S D. Microalgal fatty acid composition: implications for biodiesel quality [J]. Journal of Applied Phycology, 2012, **24**(4): 791-801.
- [ 27 ] 方利国, 林璟. 脂肪酸甲酯对生物柴油十六烷值影响的研究[J]. 化工新型材料, 2008, **36**(11): 94-96.
- Fang L G, Lin J. Effects of fatty acid methylesters on the cetane number of biodiesel [J]. New Chemical Materials, 2008, **36**(11): 94-96.
- [ 28 ] Hoekman S K, Broch A, Robbins C, et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, **16**(1): 143-169.
- [ 29 ] Wang X H, Wen X H, Yan H J, et al. Bacterial community dynamics in a functionally stable pilot-scale wastewater treatment plant[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2352-2357.
- [ 30 ] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(6): 1137-1147.

## CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China .....	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO <sub>x</sub> Emission Control .....	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration .....	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing .....	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter .....	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu .....	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Quanzhou City .....	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012 .....	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM <sub>2.5</sub> in Haicang District, Xiamen City, China .....	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> Fraction of Road Dust .....	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM <sub>10</sub> and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province .....	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qiong-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area .....	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016 .....	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer .....	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River .....	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province .....	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan .....	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir .....	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir .....	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake .....	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions .....	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River .....	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area .....	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City .....	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities .....	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation .....	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance .....	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammoxidation and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters .....	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper ( II ) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium ( VI ) Wastewater in Microbial Fuel Cells .....	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater .....	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater .....	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies .....	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A <sup>2</sup> -MBR Processes .....	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler .....	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow .....	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types .....	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge .....	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue .....	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province .....	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter .....	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH <sub>4</sub> Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir .....	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field .....	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process .....	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture .....	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process .....	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique .....	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization .....	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways .....	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China .....	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)