

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性

黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振轮*

(西南大学资源与环境学院, 土壤多尺度界面过程与调控重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 从云南某一沼泽地中分离筛选出 1 株可降解氨氮的光合细菌 psb1, 细胞形态及活细胞特征吸收光谱与红假单胞菌属 (*Rhodopseudomonas* sp.) 基本一致. 光合细菌 16S rDNA 特异引物扩增序列比对结果表明, 菌株 psb1 与 *Rhodopseudomonas* sp. 同源性达 99%, 且细菌叶绿素 Y 亚基的蛋白质序列比对结果表明, 菌株 psb1 与 *Rhodopseudomonas palustris* 相似性最大, 为 99%. 但生理生化特征及其主要脂肪酸分析发现菌株 psb1 与 *Rhodopseudomonas palustris* 有较大差异, 菌株 psb1 不能利用葡萄糖和甘露醇等, 且含特定脂肪酸 C_{18:1 ω6c}. 单一因素实验结果表明: 菌株 psb1 最适生长温度和 pH 分别为 40℃ 和 7.0, 最优生长氮源为酵母膏; 初始 pH 为 6.0~7.0, 30℃ 条件下厌氧光照培养, 投加 0.4% 的 psb1 菌剂对模拟废水中氨氮的去除率达 99% 以上. 说明光合细菌 psb1 为 *Rhodopseudomonas* 属的一个新菌, 能高效去除氨氮, 在景观水体水质调控中具有重要应用前景.

关键词: 红假单胞菌; 分离; 鉴定; 特性; 氨氮

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2276-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.035

Isolation, Identification and Characteristics of a *Rhodopseudomonas* with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency

HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun*

(Key Laboratory of Soil Multiscale Interface Process and Control, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: A strain of photosynthetic bacterium named psb1 capable of ammonia-nitrogen degradation was isolated from a swamp in Yunnan. The psb1 was similar to *Rhodopseudomonas* sp. according to its cell morphological properties and absorption spectrum analysis of living cells. The alignment result of 16S rDNA amplification sequence with specific primers of photosynthetic bacteria showed that the homology between strain psb1 and *Rhodopseudomonas* sp. was 99%, and the alignment results of protein sequences of bacterial chlorophyll Y subunit showed that the strain psb1 and *Rhodopseudomonas palustris* were the most similar, with a similarity of 99%. But there was a great difference in the biological properties of the strains psb1 and *Rhodopseudomonas palustris* according to physiological biochemical characteristics and main fatty acid analysis. For example, strain psb1 could not utilize glucose and mannitol as carbon source, and had specific fatty acid C_{18:1 ω6c}. The results of single factor test showed that: the optimal growth was obtained at pH 7.0 and 40℃, the optimal nitrogen source was yeast extract. The optimal conditions for ammonia nitrogen biodegradation were as following: anaerobic, light, initial pH 6.0-7.0, temperature 30℃, inoculation volume 0.4%. Under that cultural condition, the degradation rate of ammonia nitrogen in wastewater could reach 99%. The results indicated that strain psb1 might be a novel bacterium in genus *Rhodopseudomonas* with high ammonia removal efficiency, and can be applied in the bioremediation of polluted landscape water.

Key words: *Rhodopseudomonas* sp.; separation; identification; characteristics; ammonia nitrogen

近年来,随着社会发展和人们生活水平的提高,用于美化城市环境的景观水体已成为现代城市的核心组分. 然而景观水体具有水域面积小、自净能力低、流动性差等特点^[1,2], 通常水体中氧气含量不高, 在微生物作用下, 水体中有机氮易转化成 NH₄⁺, 而 NH₄⁺ 易引起景观水体富营养化而发臭, 因此景观水体中 NH₄⁺ 含量是景观水体质量控制的重要污染指标^[3], 控制水体中氨氮的含量对防治景观水体富营养化具有重要意义. 景观水体净化的方法有引水换水、疏浚底泥、循环过滤、混凝沉淀、投加杀藻剂、曝气充氧等^[4-9], 这些方法效果明显, 但成本较高, 且有些方法还会对水中的生物造成危害, 因此难

以大规模实施.

目前, 一种行之有效的处理方法是污染水体生物处理法, 该处理方法能有效去除污水中有机污染物, 降低污染物总量, 使水体得到彻底净化, 在污水及微污染水处理中已得到广泛应用^[10-12]. 光合细菌 (photosynthetic bacteria, PSB) 是一类能进行光合作用而又不产氧的特殊菌群, 可在高有机负荷的污水中正常生长, 并在进行光合代谢的同时吸收并

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2016-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2013BAJ11B03)

作者简介: 黄雪娇 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物, E-mail: 1548217611@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lizhulun4740@sina.com

消解有机物质^[13],能降解水中氨氮,起到净化水质的作用,具有无毒、低投入、污染物去除率高且能回收利用资源的优点^[14]。目前报道的主要是用于处理生活污水^[15]、水产养殖污水^[16~18]及工业废水^[19~21]的光合细菌,而景观水体污染物含量和成分与生活污水、水产养殖污水和工业废水不同,因此,筛选并研究适宜于防控景观水体污染的光合细菌具有重要的现实意义。本文从云南省某一沼泽地中筛选具有很强生物活性的光合细菌菌株,通过优化温度、氮源及 pH 值等条件,对已分离出的光合细菌进行快速培养,并进一步研究其对模拟氨氮废水中氨氮的去除效果,以期在景观水体水质净化中的应用提供技术资料。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样品来源

用于菌株分离的水样采自云南某一沼泽地。

1.1.2 培养基

富集培养基: 酵母膏 $1.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 乙酸钠 $3.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 氯化铵 $0.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷酸氢二钾 $0.9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 硫酸镁 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 碳酸氢钠 $0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 补蒸馏水到 1 000 mL, pH 7.0。分离纯化培养基(双层固体培养基): 在富集培养基中分别加入 1.3% (上层)、1.8% (下层) 的琼脂。以上培养基 121°C 下灭菌 25 min。

1.1.3 氨氮废水制备

氯化铵 $0.02 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷酸氢二钾 $0.09 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 硫酸镁 $0.05 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 乙酸钠 $0.34 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 补超纯水到 1 000 mL, 灭菌后备用。

1.2 菌株的分离、纯化

取 1 mL 云南某一沼泽地中的水样接种于装满 PSB 富集培养液的厌氧瓶中,光照厌氧培养约 7 d,直至出现红色培养物。取 1 mL 红色培养物接种于第 2 瓶富集培养基中继续培养,重复 3~4 次得到深红色培养液^[22],利用连续划线分离法^[23]将富集得到的菌液进行分离、纯化,得到供试菌株,命名为 psb1。

1.3 菌株的鉴定

1.3.1 形态观察及生理生化鉴定

用 PSB 双层固体培养基培养 7 d 后观察菌落形态,革兰氏染色显微观察菌体的个体形态,根据文献^[24,25]鉴定菌株生理生化特性。并用扫描电镜观察菌株 psb1 的细胞形态。

1.3.2 活细胞吸收光谱测定

取 1.5 mL 菌株 psb1 的 7 d 培养液,用 0.9% 的生理盐水 $8\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心洗涤 3 次,将菌体置于 60% 蔗糖溶液中,摇匀,在紫外可见分光光度计上于 300~900 nm 范围内扫描^[26]。

1.3.3 菌株分子生物学鉴定

提取菌株基因组 DNA,利用关大伟等^[27]设计的光合细菌 16S rDNA 特异引物 PPF2/PPR2 (正向引物 fwd: $5'\text{-CTGGAAGTCTTGAGTATGGC-3}'$; 反向引物 rev: $5'\text{-AGTAAACCCACTAACGGCTG-3}'$) 进行 PCR 扩增。反应体系为: PCR Mix 25 μL , 超纯水 16 μL , 正向引物 fwd ($1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 4 μL , 反向引物 rev ($1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 4 μL , 模板 ($90.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 1 μL 。扩增程序为: 95°C 预变性 5 min; 95°C 变性 40 s; 60°C 退火 40 s; 72°C 延伸 30 s; 扩增 30 个循环; 最后 72°C 延伸 10 min。Yutin 等^[28]研究发现不产氧光合细菌均会合成细菌叶绿素 (BChls), 而叶绿素酸酯氧化还原酶 (chlorophyllide oxidoreductase, POR) 是 BChls 生化合成途径中至关重要的中间产物,也是唯一一种广泛存在于不产氧光合细菌中,但不存在于产氧光合细菌中的酶。通过比对分析发现 POR 中由 BehY 基因编码的 Y 亚基中只含有两个保守区域,因此 BehY 基因被作为不产氧光合细菌的普遍通用的基因标记。因而本研究同时采用 Yutin 等^[28]设计的一对适用于不产氧光合细菌的特异性简并引物: Primer 1 ($5'\text{-CCNCARACNATGTGYCCNGCNTT-3}'$) 和 Primer 2 ($5'\text{-GGRTCNRNCGRAANATYTCNCC-3}'$) 进行 PCR 扩增。反应体系与上述反应体系一致。扩增程序为: 95°C 预变性 5 min; 94°C 变性 30 s; 50°C 退火 40 s; 72°C 延伸 1 min; 扩增 30 个循环; 最后 72°C 延伸 7 min。扩增产物经琼脂糖凝胶电泳后,回收克隆,阳性克隆送公司测序。测序结果在 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov> 的数据库中对分析,并构建系统发育树。

1.4 菌株脂肪酸的测定

将 40 mg psb1 菌株纯培养物进行提取、皂化、甲基化、萃取以及碱洗涤后获得上机样品,用 Agilent 6850 气相色谱仪 (FID 检测器) 分析磷脂脂肪酸 (PLFA) 的成分。色谱条件为: HP-5 柱 ($25.0 \text{ m}\times 200 \mu\text{m}\times 0.33 \mu\text{m}$), 进样量 1 μL , 分流比 10:1, 载气 (H_2), 尾吹气高纯 N_2 , 助燃气空气, 流速 $0.8 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; 汽化室温度 250°C 、检测器温度 300°C , 柱前压 10.0 psi (1 psi = 6.895 kPa), 质谱全扫描范围 30~600 m/z ; 二阶程序柱温 170°C (5 min) →

260℃→310℃,维持 1.5 min.

1.5 菌株生长条件的优化

以 PSB 富集培养基为基础,分别设置 pH 为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 和 10.0 的实验组,观察不同 pH 对菌株 psb1 生长的影响;分别设置培养温度为 10、20、30、35、40、45、50 和 60℃,测定其生长温度范围.氮源测定是以终浓度为 $0.262\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的不同种类氮源取代 PSB 富集培养基中的氮源.接种量均为 0.4%,培养 48 h 后,测定菌悬液 D_{600} 值.

1.6 菌株对氨氮的去除效果

取对数期 psb1 菌剂,离心收集菌体细胞,用灭菌无氨水洗涤 2 次,制成菌悬液.接种至配制好的氨氮模拟废水 (pH 7.0) 中,改变接菌比例 (0、0.2%、0.4%、0.6%)、培养温度 (10、20、30、35、40、45、50℃)、培养基的初始 pH 值 (4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0),研究不同因素对菌株

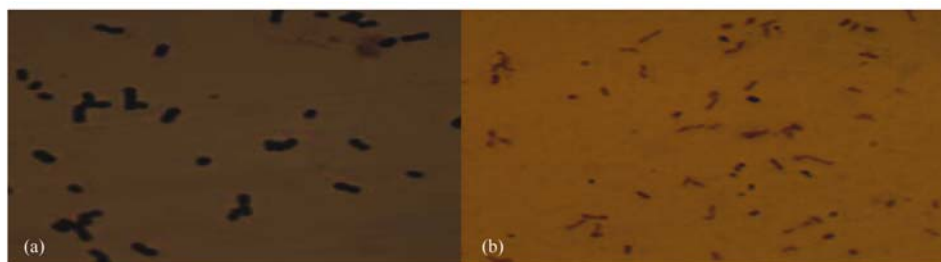
去除氨氮的影响.每个处理 3 个重复,隔 3 d 测定一次水体氨氮、硝氮及亚硝态氮,所有指标均按照地表水水质指标分析国家标准进行测定^[29].

2 结果与讨论

2.1 菌株的鉴定

2.1.1 菌株的形态学特征

从富集样品中筛选纯化得到 1 株光合细菌,命名为 psb1.该菌在富集培养基中光照厌氧条件下的液体培养物呈红色;不能在黑暗厌氧条件下生长.光照厌氧条件下的菌落呈粉红色,圆形,边缘整齐,光滑湿润,直径为 1 mm 左右.油镜下观察到其细胞在酸性培养基上呈球状,在碱性培养基上呈细杆状 (图 1),革兰氏染色为阴性.电镜观察发现该菌的繁殖方式为裂殖生殖,大小为 $(0.7\sim 0.8)\mu\text{m}\times(1.2\sim 1.5)\mu\text{m}$ (图 2).



(a) 酸性培养基中菌株细胞形态 (pH=6); (b) 碱性培养基中菌株细胞形态 (pH=9)

图 1 光学显微镜下菌株 psb1 的细胞形态 (10×100)

Fig. 1 Morphology of the strain psb1 under optical microscope

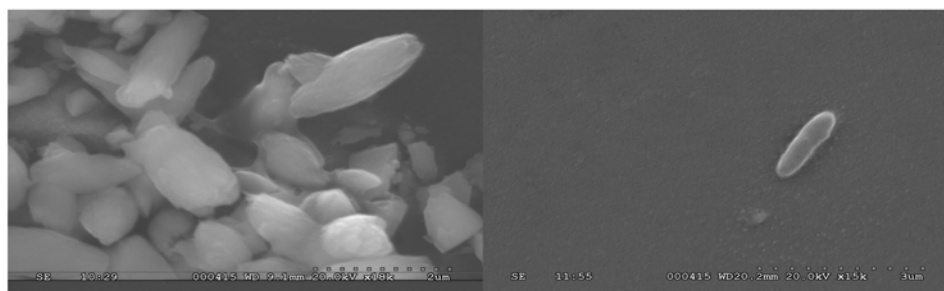


图 2 扫描电镜下菌株 psb1 的细胞形态 (20 000×)

Fig. 2 Morphology of the strain psb1 under electron microscope

2.1.2 吸收光谱

菌株 psb1 在 380、490、530、590、830 nm 处有特征吸收峰,其中在 830 nm 左右的特征吸收峰最明显.而 380 nm 和 590 nm 处为细菌叶绿素 a 的特征吸收峰,490 nm 处为类胡萝卜素的特征吸收峰^[26,30].表明菌株 psb1 含有细菌叶绿素 a 及类胡萝卜素,即 psb1 具有光合细菌典型吸收特性.

2.1.3 分子生物学鉴定

利用光合细菌 16S rDNA 的特异性引物 PPF2/PPR2 和光合细菌 BchY 基因简并引物进行扩增分别得到长度为 203bp 和 507bp 的 PCR 产物.将 507bp 的 BchY 基因转换成 168aa 的蛋白质序列,并将 203bp 和 168aa 序列在 NCBI 网站进行序列同源性比较,发现两序列分别与 *Rhodospseudomonas* sp. 和 *Rhodospseudomonas palustris*

的序列最相似, 同源性分别为 99% 和 99%。从 GenBank 基因数据库中下载与菌株 psb1 序列相似性较大的各菌株的 16S rDNA 或 BchY 蛋白质序列, 用 psb1 的序列和下载的序列通过 ClusererW 进行聚类分析后, 利用 MEGA311 软件以 Neighbor-Joining 计算方式生成系统发育进化树, 如图 3、图

4 所示。从图 3 中可看出菌株 psb1 与 *Rhodobacter sphaeroides* 的系统发生地位最近, 从图 4 中可看出菌株 psb1 与 *Rhodopseudomonas palustris* 的系统发生地位最近, 说明菌株 psb1 属于红假单胞菌属 (*Rhodopseudomonas* sp.), 并且有可能为 *Rhodopseudomonas palustris*。

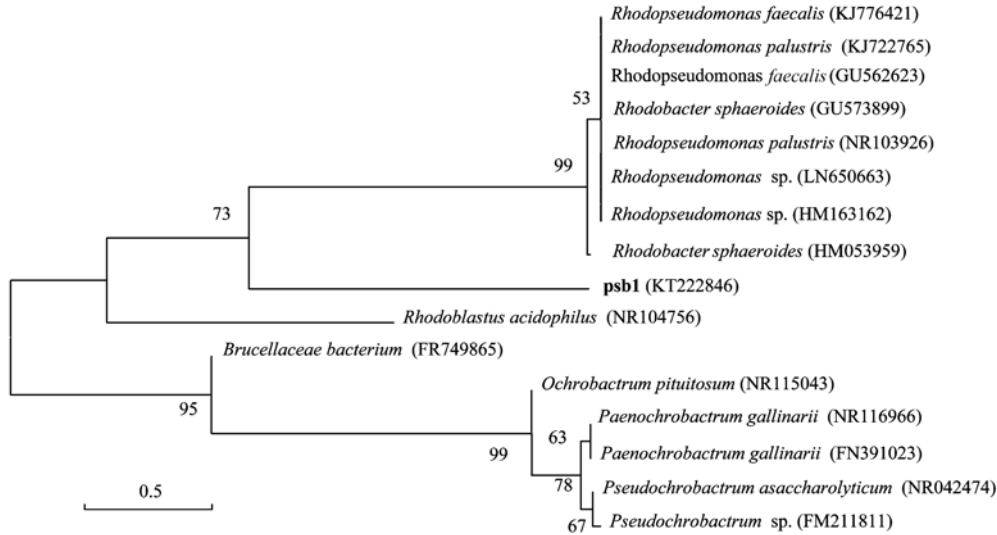


图 3 基于 16S rDNA 基因序列同源性的 psb1 系统发育树

Fig. 3 Phylogenetic tree of psb1 strain based on the 16S rDNA gene homology

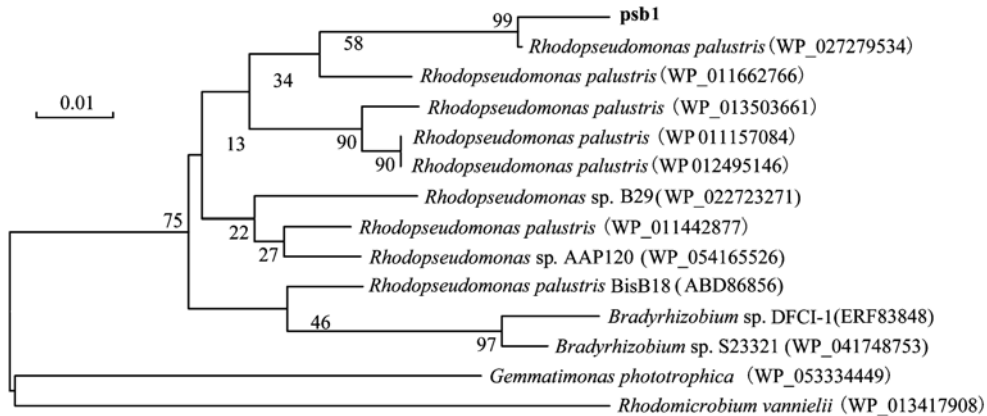


图 4 基于 BchY 蛋白质序列同源性的 psb1 系统发育树

Fig. 4 Phylogenetic tree of psb1 strain based on the BchY protein homology

2.1.4 菌株生理生化特征

生理生化特征见表 1, 微生物对碳源的利用范围因种而异, 是种的分类依据之一, 见表 2。在厌氧光照条件下, 菌株 psb1 不能利用葡萄糖以及甘露醇, 不能水解淀粉, 可产生吡啶。而 Ramana 等^[31] 和 Girija

等^[32] 研究发现与菌株 psb1 同源性最近的 *Rhodopseudomonas faecalis*、*Rhodopseudomonas palustris* 及 *Rhodobacter sphaeroides* 可利用葡萄糖和甘露醇。说明菌株 psb1 与亲缘关系最近的红假单胞菌属的几个模式种在对碳源利用上存在一定差异。

表 1 菌株 psb1 的生理生化特性

Table 1 Physiological and biochemical characteristics of strain psb1

革兰氏染色	接触酶试验	H ₂ S 生成试验	吡啶试验	淀粉水解试验
-	+	-	+	+

2.1.5 磷脂脂肪酸分析

用 Agilent 6850 气相色谱仪(FID 检测器)分析菌株 psb1 的磷脂脂肪酸(PLFA)成分,一共检测出十几种脂肪酸. 其中脂肪酸 $C_{18:1 \omega 7c}$ 占的比例最高,达到 33.55%. 通过将菌株 psb1 与系统发育树中邻近的 3 株红假单胞菌属模式菌株进行比较,发现菌株 psb1 与 3 株模式菌株体内所含的主要脂肪酸种类基本一致,但含量相差较大,且菌株 psb1 含特有脂肪酸 $C_{18:1 \omega 6c}$ ^[31,32],说明菌株 psb1 与另外 3 种菌株不同(见表 3).

表 2 菌株 psb1 对碳源的利用特性

Table 2 Utilization of carbon source by strain psb1

试验项目	结果
醋酸钠	+
甲醇	-
葡萄糖	-
硫代硫酸钠	-
甘露醇	-
蛋白胨	+

表 3 菌株 psb1 与邻近红假单胞菌属模式菌株细胞内的脂肪酸含量¹⁾/%

Table 3 Cellular fatty acid profiles of strain psb1 and closely related species of the genus *Rhodospseudomonas*/%

脂肪酸组分/%	1	2	3	4
$C_{12:0}$	5.78	1.6	—	1.7
$C_{16:0}$	16.76	20.8	5.1	14.9
$C_{16:1 \omega 7c/16:1 \omega 6c}$	13.53	10.2	1.9	6.2
$C_{18:1 \omega 6c}$	7.39	—	—	—
$C_{18:1 \omega 7c}$	33.53	51	77.2	63

1)1 代表 psb1; 2 代表 *Rhodospseudomonas palustris* ATCC 17001T; 3 代表 *Rhodobacter sphaeroides* DSM158T; 4 代表 *Rhodospseudomonas faecalis* JCM 11668T

经过细胞形态结构及特征吸收光谱扫描发现该菌株的主要特征符合红假单胞菌属的特性,初步鉴定该菌株为红假单胞菌(*Rhodospseudomonas* sp.). 同源性分析发现利用特异性引物 PPF2/PPR2 扩增得到的 psb1 序列与 *Rhodospseudomonas* sp. 最相似,同源性为 99%. 利用光合细菌 BehY 基因简并引物进行 PCR 扩增得到的序列与 *Rhodospseudomonas palustris* 同源性最高,为 99%. 生理生化特征及主要脂肪酸分析发现,菌株 psb1 与同源性相近的红假单胞菌属的其他模式菌株在生物学性质上有较大差异,菌株 psb1 具有较低的脂肪酸含量,且含特定脂肪酸 $C_{18:1 \omega 6c}$; 不能利用葡萄糖和甘露醇等,说明光合细菌 psb1 为 *Rhodospseudomonas* 属的一个新菌.

2.2 菌株生长条件的优化

2.2.1 pH 对菌株生长的影响

菌株 psb1 在 pH 值为 6.0 ~ 8.0 范围内生长较好,其中在 pH 7.0 时生长效果最佳. 当 pH 低于 5.0 以及 pH 高于 9.0 时,菌株的生长受到抑制. 结果表明菌株 psb1 生长适应性较广,在微酸性至微碱性条件下均能生长(图 5),这与陈慧等^[33]的研究结果一致.

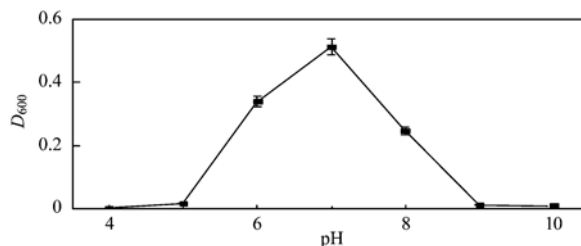


图 5 pH 对菌株 psb1 生长的影响

Fig. 5 Effect of pH on growth of the strain psb1

2.2.2 温度对菌株生长的影响

菌株 psb1 在 10 ~ 60℃ 内均能生长,其中在 20 ~ 50℃ 之间生长较为适宜. 在 10℃ 以下,菌株几乎不生长,当培养温度从 10℃ 上升到 40℃ 时,菌株的生长速度明显加快,当培养温度超过 40℃ 时,菌株的生长速度下降,由此得出:菌株 psb1 的最适生长温度在 40℃ 左右,且对外界温度的抵抗力较强(图 6). 而已报道的红假单胞菌属菌株的最适温度为 25 ~ 38℃^[33-36],均不超过 40℃,说明菌株 psb1 是一株耐高温光合细菌.

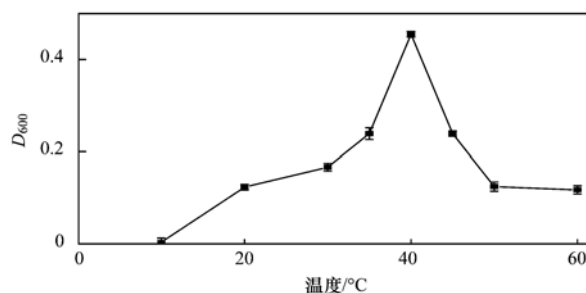


图 6 温度对菌株 psb1 生长的影响

Fig. 6 Effect of temperature on growth of the strain psb1

2.2.3 氮源对菌株生长的影响

不同种类的氮源对菌株生长的影响不一致,铵态氮中草酸铵最适合菌株 psb1 的生长,硝态氮中硝酸钾最适合菌株 psb1 的生长,有机氮中酵母膏最适合菌株 psb1 的生长. 综合比较发现酵母膏为菌株生长的最优氮源(见图 7).

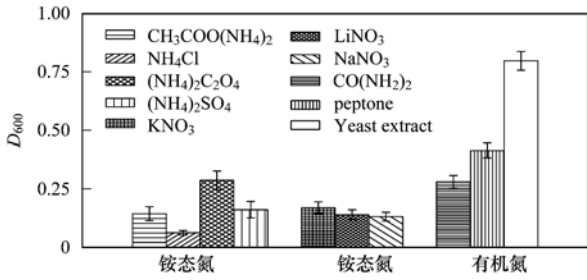


图 7 不同氮源种类对菌株 psb1 生长的影响

Fig. 7 Effect of nitrogen source on growth of the strain psb1

2.3 菌株对氨氮的去除效果

2.3.1 接菌比例对菌株去除氨氮的影响

生物量大小严重影响微生物的除氮能力. 接种量不足或过多均会导致环境氮素含量去除不明显, 适当的接种量有助于提高菌株除氮效率. 本实验对接种量研究结果如图 8 所示, 菌株 psb1 可有效去除废水中的氨氮, 不同处理组废水中氨氮的下降量不同. 接菌比例为 0.4% 和 0.6% 的废水中氨氮浓度在前 3 d 内显著下降, 其中接菌比例为 0.6% 的处理组中氨氮下降量更为显著, 与 D_{600} 的变化趋势一致, 之后 2 个处理组中氨氮浓度持续下降, 分别于第 9 d 和第 6 d 降至最低值 ($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 而接菌比例为 0.2% 的废水中氨氮浓度呈持续下降趋势, 于第 12 d 降至 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明添加菌株 psb1 的量越多, 氨氮的去除效果越明显. 考虑成本问题, 实际应用中建议采用 0.4% 的接菌比例. 整个实验阶段模拟废水中硝氮及亚硝氮含量变化较小, 且各处理间差异不大, 说明菌株 psb1 通过吸收模拟废水中氨氮, 并用于自身生长繁殖, 从而达到去除废水中氨氮的效果. 0.4% 比例的菌株 psb1 在第 9 d 时对模拟废水中氨氮的去除率高达 99.8%, 而刘洋

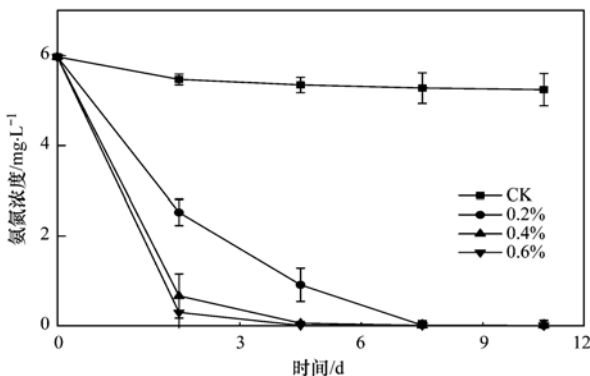


图 8 菌株比例对模拟废水中氨氮浓度的影响

Fig. 8 Effect of different amount of the strain psb1 on ammonia concentration in the water

等^[37]分离 *Rhodovulum* sp. 菌株 GHJ-2 对污水中氨氮的去除率为 67.5%, 远远低于菌株 psb1 的去除率 99.8%, 可见菌株 psb1 能高效降解氨氮, 这为该菌在实际应用中提高效率、节约成本打下基础.

2.3.2 温度对菌株去除氨氮的影响

温度对菌株 psb1 去除氨氮效果的影响见图 9. 当温度低于 30°C 时, 前 3 d 内, 模拟废水中氨氮浓度随温度的升高而急剧下降, 之后缓慢下降, 于第 6 d 趋于稳定; 温度为 $30 \sim 45^\circ\text{C}$ 的废水中, 前 3 d 氨氮浓度降低速度较慢, 之后急剧下降, 于第 9 d 趋于平稳; 50°C 废水中氨氮浓度在整个实验过程中缓慢下降, 这可能是高温破坏或抑制酶催化反应过程, 从而抑制菌株 psb1 去除氨氮的能力. 温度为 30°C 时, 菌株 psb1 对氨氮的去除效果最好, 第 3 d 时就可将氨氮由初始的 $5.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 之后水体氨氮浓度缓慢下降, 最低降至 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对氨氮的去除率高达 99.5%. 而在菌株最适生长温度 40°C 条件下 (图 6), 菌株 psb1 对氨氮的去除效果比 30°C 和 35°C 条件下差, 且生长量也较 30°C 和 35°C 条件下低. 说明菌株生长的最优温度并不一定是菌株去除氨氮的最优温度, 还需考虑水体营养元素成分. 废水中硝氮及亚硝氮含量在整个实验过程均无显著变化, 且各处理组无显著差异, 说明菌株 psb1 并没有将氨氮转化为硝氮和亚硝氮, 而是通过自身吸收利用, 从而去除废水中的氨氮.

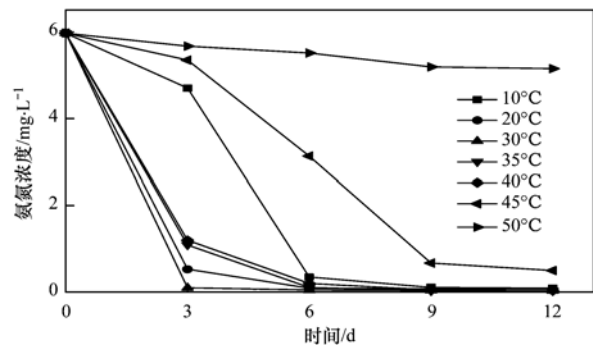


图 9 培养温度对模拟废水中氨氮浓度的影响

Fig. 9 Influence of culture temperature on ammonia concentration in the water

2.3.3 初始 pH 对菌株去除氨氮的影响

环境中氢离子浓度与微生物的生命活动以及新陈代谢紧密相关. 不同 pH 值对微生物的影响效果不同. 改变模拟废水的初始 pH, 考察初始 pH 对菌株 psb1 去除氨氮效果的影响, 结果如图 10. 在 pH 4.0 ~ 10.0 范围内, 不同模拟废水中氨氮均呈不同

程度下降. 说明菌株 *psb1* 对氨氮具有一定的去除效果. pH 为 4.0 时, 水体氨氮缓慢下降, 12 d 后由初始的 $5.97 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $5.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下降率仅为 11.1%. 当 pH 由 5.0 ~ 7.0 时, 水体氨氮下降速率及下降量逐渐增大, 其中 pH 7.0 的下降速率最大. 12 d 后 pH 6.0 和 7.0 的模拟废水中氨氮均降至 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下降率为 99.7%. 当 pH 大于 7.0 小于 10.0 时, 水体氨氮下降速率有所减小, 12 d 后氨氮的去除率也有所降低, 但去除率仍可达 99.3%. 当 pH 为 10.0 时, 水体氨氮下降速率进一步减小, 12 d 后氨氮的去除率降为 82.1%. 可见菌株 *psb1* 在微酸到微碱条件下对氨氮的去除效果较好, 最佳去除氨氮 pH 为 6.0 ~ 7.0.

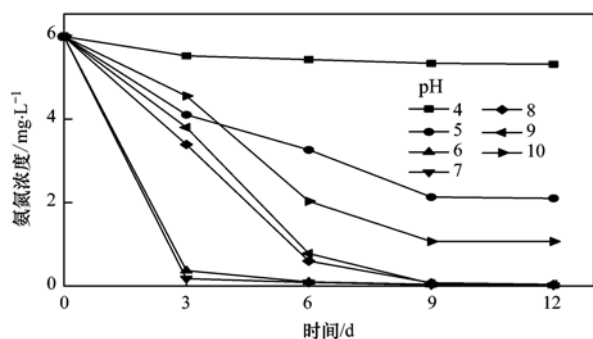


图 10 初始 pH 对模拟废水中氨氮浓度的影响

Fig. 10 Influence of initial pH value on ammonia concentration in the water

3 结论

(1) 从云南某一沼泽地中分离筛选出 1 株可降解氨氮的光合细菌, 命名为 *psb1*. 经过研究发现菌株 *psb1* 为 *Rhodospseudomonas* 属的一个新菌.

(2) 菌株 *psb1* 的最适生长温度为 40°C , 是 1 株耐高温光合细菌; 最适 pH 为 7.0; 最优生长氮源为酵母膏.

(3) 不同环境因素条件下对菌株 *psb1* 去除氨氮效果研究实验表明, 在初始 pH 为 6.0 ~ 7.0, 培养温度为 30°C 条件下, 投加比例为 0.4% 时, 菌株 *psb1* 对模拟废水中氨氮的最高去除率可达 99% 以上, 说明菌株 *psb1* 能高效降解氨氮, 这为该菌在实际应用中提高效率、节约成本打下基础.

参考文献:

[1] 贾滨洋, 付文丽, 于静, 等. 三岔湖沉积物揭示的湖泊营养化进程与人类活动的关系[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1638-1644.

[2] Su Z Y, Li X, Yang Y L, *et al.* Ballasted flocculation of micro-sand/magnetic powder for landscape water treatment [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **777**: 56-59.

[3] 刘海伟, 刘云, 王海云, 等. pH 和共存阳离子对草莓茎吸附水体氨氮的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1884-1889.

[4] 辜伟芳. 松北城区生态景观用水的经济安全分析[D]. 北京: 清华大学, 2011.

[5] Liu C, Fan C X, Shen Q S, *et al.* Effects of riverine suspended particulate matter on post-dredging metal re-contamination across the sediment-water interface [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 2329-2335.

[6] Sprenger C, Lorenzen G, Grunert A, *et al.* Removal of indigenous coliphages and enteric viruses during riverbank filtration from highly polluted river water in Delhi (India) [J]. *Journal of Water and Health*, 2014, **12**(2): 332-342.

[7] Chon K, Cho J, Kim S J, *et al.* The role of a combined coagulation and disk filtration process as a pre-treatment to microfiltration and reverse osmosis membranes in a municipal wastewater pilot plant [J]. *Chemosphere*, 2014, **117**: 20-26.

[8] Greenfield D I, Duquette A, Goodson A, *et al.* The effects of three chemical algacides on cell numbers and toxin content of the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* and *Anabaenopsis* sp. [J]. *Environmental Management*, 2014, **54**(5): 1110-1120.

[9] 朱文博, 王洪秀, 柳翠, 等. 河道曝气提升河水质的 WASP 模型研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1326-1331.

[10] Liao C L, Liu X B. High-cell-density cultivation and algicidal activity assays of a novel algicidal bacterium to control algal bloom caused by water eutrophication [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, **225**(11): 2120.

[11] 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 等. 1 株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 647-654.

[12] 何腾霞, 李振轮, 徐义. 耐冷亚硝酸盐型反硝化细菌 *Pseudomonas putida* Y-12 脱氮特性[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3071-3077.

[13] Kobayashi M. The role of phototrophic bacteria in nature and their utilization [A]. In: Subba Rao N S (Ed.). *Advances in Agricultural Microbiology* [M]. New Delhi: Oxford and IBH Publishing Co, 1982. 643-661.

[14] 黄雪娇, 杨冲, 罗雅雪, 等. 光合细菌在水污染治理中的研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2014, **34**(11): 119-124.

[15] Hülsen T, Batstone D J, Keller J. Phototrophic bacteria for nutrient recovery from domestic wastewater [J]. *Water Research*, 2014, **50**: 18-26.

[16] Zhang X P, Shu M A, Wang Y B, *et al.* Effect of photosynthetic bacteria on water quality and microbiota in grass carp culture [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2014, **30**(9): 2523-2531.

[17] 谢凤行, 张峰峰, 周可, 等. 水质净化高效复合微生态制剂的研制[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(2): 477-482.

[18] 邢国伟, 李彦芹, 李凤超, 等. 一株反硝化细菌与光合细菌对养殖海水的净化效果[J]. 生物技术通报, 2014, (3): 151-154.

[19] Chitapompan S, Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, *et al.* Organic carbon recovery and photosynthetic bacteria population in

- an anaerobic membrane photo-bioreactor treating food processing wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **141**: 65-74.
- [20] Prachanurak P, Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, *et al.* Biomass production from fermented starch wastewater in photo-bioreactor with internal overflow recirculation[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **165**: 129-136.
- [21] 胡筱敏, 董怡华, 李亮, 等. 光合细菌 PSB-1D 对 2-氯苯酚的降解特性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1672-1678.
- [22] Madukasi E I, Chunhua H, Zhang G. Isolation and application of a wild strain photosynthetic bacterium to environmental waste management[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2011, **8**(3): 513-522.
- [23] Lakshmi K V N S, Sasikala C, Ramana C V. *Rhodoplanes pokkaliisoli* sp. nov., a phototrophic alphaproteobacterium isolated from a waterlogged brackish paddy soil[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009, **59**(9): 2153-2157.
- [24] Holt J G, Krieg N R, Sneath P H A, *et al.* *Bergey's manual of determinative bacteriology* (9th ed)[M]. Baltimore: Williams & Wilkins, 1994. 2-40.
- [25] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 365-379.
- [26] Hiraishi A, Muramatsu K, Urata K. Characterization of new denitrifying *Rhodobacter* strains isolated from photosynthetic sludge for wastewater treatment[J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1995, **79**(1): 39-44.
- [27] 关大伟, 李俊, 沈德龙, 等. 光合细菌 PCR 检测技术的建立与应用[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, **14**(5): 699-704.
- [28] Yutin N, Suzuki M T, Rosenberg M, *et al.* BehY-based degenerate primers target all types of anoxygenic photosynthetic bacteria in a single PCR [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(23): 7556-7559.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 102-418.
- [30] Imhoff J F, Trüper H G. The genus *Rhodospirillum* and related genera[A]. In: Balows A, Truper H G, Dworkin M, *et al* (Eds.). *The Prokaryotes*[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1992. 2141-2155.
- [31] Ramana V V, Chakravarthy S K, Raj P S, *et al.* Descriptions of *Rhodopseudomonas parapalustris* sp. nov., *Rhodopseudomonas harwoodiae* sp. nov. and *Rhodopseudomonas pseudopalustris* sp. nov., and emended description of *Rhodopseudomonas palustris* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, **62**(Pt 8): 1790-1798.
- [32] Girija K R, Sasikala C, Ramana C V, *et al.* *Rhodobacter johrii* sp. nov., an endospore-producing cryptic species isolated from semi-arid tropical soils[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2010, **60**(9): 2099-2107.
- [33] 陈慧, 张德民, 王龙刚, 等. 一株反硝化光合细菌的生物学特性及系统发育分析[J]. *微生物学报*, 2011, **51**(2): 249-255.
- [34] 方立超, 黄雪峰, 杜珍辉, 等. 产生辅酶 Q10 的光合细菌菌株的分离及鉴定[J]. *微生物学报*, 2005, **45**(5): 772-775.
- [35] 刘影. 光合细菌的增殖培养及其处理城市污水中氮磷的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [36] Arunasri K, Ramana V V, Spröer C, *et al.* *Rhodobacter megalophilus* sp. nov., a phototroph from the Indian Himalayas possessing a wide temperature range for growth[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2008, **58**(8): 1792-1796.
- [37] 刘洋, 舒巧玉, 楼春燕, 等. 两株光合细菌的分离鉴定及其水质净化效果研究[J]. *淡水渔业*, 2013, **43**(5): 57-61.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行