

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽胞杆菌及其芽胞对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应

方峰¹, 王磊², 席雪飞², 胡佳俊², 付小花², 陆兵¹, 徐殿胜^{1*}

(1. 华东理工大学生物工程学院, 生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过对南海水域多个区域不同深度的海水分别以 H_2 、 $Na_2S_2O_3$ 、 $NaNO_2$ 为电子供体经过一定时间的驯化培养后, 测定其中非光合微生物的固碳潜力, 并统计南海水域不同深度非光合微生物在不同电子供体条件下固碳潜力的差异性, 最后结合不同深度海水的主要固碳基因丰度差异, 分析南海水域不同深度海洋非光合微生物在不同电子供体条件下固碳潜能差异的原因。结果发现以 $NaNO_2$ 为电子供体时, 海洋非光合微生物固碳能力普遍较低, 各深度之间没有显著差异; 以 H_2 为电子供体时, 表层海水中的非光合微生物的固碳潜力显著高于深层海水中的; 而以 $Na_2S_2O_3$ 为电子供体时, 深层海水中的非光合微生物的固碳潜力显著高于表层海水中的。基因分析结果表明, 固碳基因 *cbbL* 在表层海水中的丰度高于深层海水, 而 *cbbM* 基因在深层海水中的丰度高于表层海水。硫细菌大多以拥有 *cbbM* 基因为主, 而氢细菌大多以拥有 *cbbL* 基因为主。因此不同海洋深度非光合微生物对不同电子供体响应的差异性可能和优势菌群结构的差异有关。海洋表层和深层溶解氧、无机碳含量的差异是导致菌群结构差异, 乃至固碳潜力差异的重要原因。

关键词: 南海水域; 固碳潜力; 基因丰度; 海水深度; 影响因素

中图分类号: X55; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1550-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.05.006

Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors

FANG Feng¹, WANG Lei², XI Xue-fei², HU Jia-jun², FU Xiao-hua², LU Bing¹, XU Dian-sheng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, School of Biotechnology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The seawater samples collected from many different areas with different depth in the South China Sea were cultivated using different electron donors respectively. And the variation in the potential carbon fixation capability (PCFC) of non-photosynthetic microbial community (NPMC) in seawater with different depth was determined after a cycle of cultivation through the statistic analysis. In addition, the cause for the variation was clarified through analyzing key gene abundance regarding CO_2 fixation and characteristics of seawater with different depth. The result showed that the PCFCs of NPMC in seawater with different depth were generally low and had no significant difference when using $NaNO_2$ as the electron donor. The PCFC of NPMC in surface seawater was higher than that in deep seawater when using H_2 as the electron donor, on the contrary, the PCFC of NPMC in deep seawater was higher than that in surface seawater when using $Na_2S_2O_3$ as the electron donor. The abundance of the main CO_2 fixation gene *cbbL* in surface seawater was higher than that in deep seawater while the *cbbM* gene abundance in deep seawater was higher than that in surface seawater. Most hydrogen-oxidizing bacteria had the *cbbL* gene, and most sulfur bacteria had the *cbbM* gene. The tendency of seawater *cbbL/cbbM* gene abundance with the change of depth revealed that there were different kinds of bacteria accounting for the majority in NPMC fixing CO_2 at different depth of ocean, which led to different response of PCFC of NPMC at different depth of the sea to different electron donors. The distributions of dissolved oxygen and inorganic carbon concentration with the change of the depth of the sea might be an important reason leading to the difference of NPMC structure and even the difference of PCFC at different depth of the sea.

Key words: South China Sea; potential carbon fixation capability; gene abundance; depth of the sea; affecting factors

二氧化碳(CO_2)过量排放而引起的全球变暖是 目前全球面临的重大环境问题。生物固碳是 CO_2 吸

收稿日期: 2014-10-17; 修订日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177093, 21307093); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA050101); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130072110025); 中国博士后科学基金项目(2013M531220, 2014T70430)

作者简介: 方峰(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为二氧化碳的生物固定, E-mail: fangfeng89@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xuds@ecust.edu.cn

收与资源化的重要手段. 生物固定 CO_2 主要依靠植物和自养微生物^[1], 但植物生长对环境要求较为严格, 地球上有很多环境并不适合植物生长, 此时, 自养微生物固定 CO_2 的优势便显现出来了. 固碳微生物主要包括光合自养微生物^[2] 和化能自养微生物. 目前很多研究利用藻类固定 CO_2 , 但是藻类培养中需要光照, 且不耐高浓度 CO_2 . 因此, 探索无需光照的高效固碳微生物对于更广泛环境条件下的微生物固碳具有重要意义. 化能自养微生物主要通过氧化无机化合物获得能量, 能量的有效获得对于自养微生物的固碳效率具有举足轻重的作用. 自养微生物能够利用的无机化合物主要有一些还原性化合物, 包括 H_2 、 H_2S 、 S 以及含 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 Fe^{2+} 的化合物等^[3]. 其中 H_2 是最好的能源物质(自由能最大).

至今已发现的微生物固定 CO_2 途径有 6 条, 即卡尔文循环、还原柠檬酸循环、还原乙酰-CoA 途径、羟基丙酸循环、三羟基丙酸/四羟基丁酸酯循环以及二羧酸/四羟基丁酸酯循环^[4]. 其中, 卡尔文循环是光能自养生物和化能自养生物固定 CO_2 的主要途径^[5,6]. 核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(RubisCO)是卡尔文循环中碳同化的限速酶. 目前自然界存在的不同类型 RubisCO 已被鉴定出来, 按照其结构、催化性能和 O_2 的敏感性可分为 I ~ IV^[7]. 其中有关 III 和 IV 的研究较少, 大部分自养微生物主要以 I 和 II 型为主^[8]. 固碳功能基因 *cbbL* 和 *cbbM* 分别表达关键酶 RubisCO 的 I、II 构型.

海洋是全球最大的碳库, 溶解的无机碳储量约为 37 400 Gt^[9]. 同时, 海洋也是最大的微生物库, 据估计, 海洋微生物种类可能多达 1 000 万种. 迄今为止, 人类发现的微生物大约有 150 万种, 除了 7.2 万种存在于陆地外, 其余都存在于海洋之中^[10]. 由于许多自养微生物都为古菌, 而生物起源于海洋, 因此从生物进化角度来看, 海洋中可能含有丰富的自养微生物资源^[11]. 胡佳俊^[12] 已从全球各大海域表层海水筛选富集出非光合固碳微生物菌群, 并通过电子供体的优化, 发现以 H_2 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 NaNO_2 这 3 种还原性无机物作为电子供体能够较显著提高其固碳效率^[13]. 但是由于海水不同深度的自然环境差异很大, 如温度、压力、溶解氧、 CO_2 浓度等, 因此不同深度的海水的微生物群落结构以及优势固碳菌(基因)可能不同, 其固碳潜能以及对不同电子供体的响应也可能有异. 然而目前尚未有不同深度海洋

非光合微生物固碳潜能以及对不同电子供体响应的相关研究.

本文以 2013 国家自然科学基金南海西部开放航次(航次编号: NORC2013-07)从南海各海域不同深度所采集来的海水为研究对象, 以 H_2 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 NaNO_2 这 3 种还原性无机物作为电子供体, 研究南海不同深度海水中非光合微生物在特定培养条件下的固碳能力及其对不同电子供体的响应, 并将其定义为相应电子供体条件下的海水非光合微生物的固碳潜能. 通过分析不同深度海水样品中固碳途径关键酶基因的丰度以及海水理化因素, 讨论了不同深度海洋微生物固碳潜能差异的可能原因, 以期在今后普通培养条件下从海洋中筛选和驯化得到更有效的非光合固碳微生物菌群提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 采样区域概况及采样点分布

图 1 为南海水域采样点分布, 后期实验过程中将海水样品按地理位置区域混合, 分为 A、B、C、D、E、F 共 6 个区. 各区域采样深度见表 1. 用温盐盐测量仪(SBE911PlusCTD)采集水样, 并现场获取深度、温度、压强、盐度相关理化数据, 样品采集后以 4℃ 保存带回实验室做后期实验.

由于 200 m 左右深度以内阳光可以透射, 500 m 以下的深度区域不可见光^[14], 故将每个区域的水

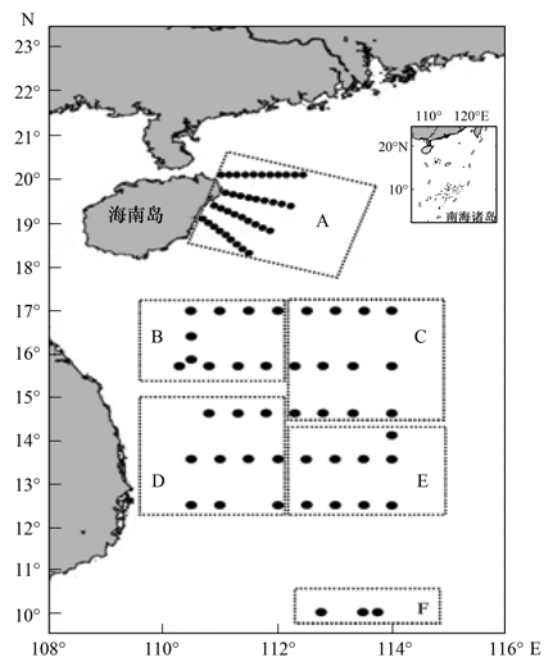


图 1 南海海域采样点分布及区域混合

Fig. 1 Distribution of sampling sites and mixing areas in the South China Sea

样,按照表层(5 m 深度),次表层(25 ~ 200 m 深度),次深层(500 ~ 1 000 m 深度)和深层(1 100 ~ 1 500 m 深度)共 4 个深度梯度进行分类归纳. 各区域的表层样品为 5 m 深度采得的样品,次表层为 25 ~ 200 m 深度范围采得的样品,次深层为 500 ~ 1 000 m 深度范围采得的样品,深层为 1 100 ~ 1 500 m 深度范围采得的样品.

表 1 各区域采样海水深度¹⁾
Table 1 Sampling seawater depth of each area

深度/m	区域					
	A	B	C	D	E	F
5	√	√	√	√	√	√
25	√	√	—	—	—	—
50	√	√	√	√	√	√
75	√	√	—	—	—	—
100	√	√	√	√	√	√
150	√	√	√	—	—	—
200	√	√	√	√	√	√
500	√	√	√	√	√	√
700	√	—	—	—	—	—
800	—	—	√	—	√	—
1 000	—	√	√	√	√	√
1 200	—	—	—	—	√	—
1 500	—	—	√	—	√	√

1) “√”表示相应的深度有样品,“—”表示没有样品

1.2 海水非光合固碳微生物培养

将 1.1 节中采集自所有样点的样品按划分的地理位置区域及深度梯度等比例混合得到各区域 4 个不同深度的混合海水样品,每个样品设置为 3 个平行样,各按 10% 的比例转入装有 90 mL 海水基本培养基^[15]的血清瓶中,用硅胶塞密封. 以 H₂ 为电子供体条件培养,按混合气比例 H₂: O₂: CO₂ 为 8.5: 0.5: 1 的比例注入气体,用封口膜封口. 其余电子供体条件按 2‰ 电子供体浓度^[12]加入培养基,按混合气比例空气: CO₂ 为 9: 1. 置于摇床避光振荡培养(28℃, 120 r·min⁻¹), 4 d 后重新充入混合气. 8 d 为一个周期^[16], 8 d 后测定培养液中有机碳含量.

1.3 固碳潜能的测定

由于海水微生物的不完全可培养性,常规培养不能完全反映原位条件下的非光合微生物的固碳能力,因此将等量海水在等体积量的培养体系中经过一定时间特定培养条件培养后固定 CO₂ 的量,定义为固碳潜能,以此反映其相对固碳能力. 由于培养基中除了接种的海水并不存在有机碳源,所以在培养后总有机碳的增加量即为 CO₂ 的固定量. 在分析中采用 Shimadzu TOC-VCPH 有机碳分析仪(Shimadzu Seisakusho Co. Ltd., Kyoto, Japan)测定

总有机碳含量(total organic carbon, TOC),并以此作为测量指标,衡量微生物的 CO₂ 固定潜能. 测量时统计 3 个平行样的平均值及标准差,以此计算每个实验样品的固碳潜能.

1.4 海水微生物采集及 DNA 提取

将所有地理位置点采集的海水样品按 1.1 节中的 4 个深度梯度等比例混合得到各深度范围的总混合海水样品,取 3 L 该混合海水样品过 0.22 μm 微孔滤膜采集海水微生物.

用 DNA 提取试剂盒(UltraClean® DNA Isolation Kit, MoBio USA)根据其使用说明书^[17]对过滤过海水的微孔滤膜提取总细菌 DNA. 通过 NanoDrop ND-2000(Thermo, USA)测定 DNA 样品的浓度和纯度,之后将样品在 -20℃ 保藏以用于分析.

1.5 固碳途径关键酶基因分析

由于卡尔文循环是主要的固碳途径,本研究主要分析卡尔文循环的关键酶基因 *cbbL*、*cbbM* 的丰度. 表达基因 *cbbL* 和 *cbbM* 用 1.4 节中提取的总 DNA 样品通过 ABI 7500 定量 PCR 仪(Life Technologies, USA)通过绝对定量的方法测定关键酶基因的数量. 基因 *cbbL* 的定量引物为 K2F(5'-ACCAAYCAAGCCSAAGCTSGG-3') 和 V2F(5'-GCCTTCSAGCTTGCCSACCRC-3')^[18], *cbbM* 定量引物为 *cbbM*-F(5'-TTCTGGCTGGGBGGHGAYTTYATY AARAAYGACGA-3') 和 *cbbM*-R(5'-CCGTGRCCR GCVCGRTGCTARTG-3')^[19].

定量分析步骤:取 2 μL 1.4 节中提取得到的 DNA 样品混入 18 μL SYBR Premix Ex Taq™ system(Takara, Japan). 循环条件如下:95℃ 预变性 3 min; 95℃ 延伸 30 s, 62℃ (*cbbL* 基因)/55℃ (*cbbM* 基因)退火 60 s,进行 40 个循环; 72℃ 延伸 10 min.

1.6 数据统计

统计各区域不同深度海水样品 3 个平行样的固碳能力的平均值及标准差,将其作为各区域不同深度海水样品的固碳潜力. 将所有区域各深度梯度的固碳潜力值按深度梯度统计,除在深层梯度(1 100 ~ 1 500 m)只有 3 个区域的平均值外,其余梯度排除 1 个最大区域值和 1 个最小区域值后取剩余区域的平均值,统计标准差,进行南海海域非光合微生物不同电子供体条件的固碳潜力深度差异分析.

采用 SPSS 13.0 统计软件对所测数据进行单因素方差分析(ANOVA),LSD 多重比较(*P* 为 0.05 或 0.01)分析不同深度间指标的差异显著性.

2 结果与讨论

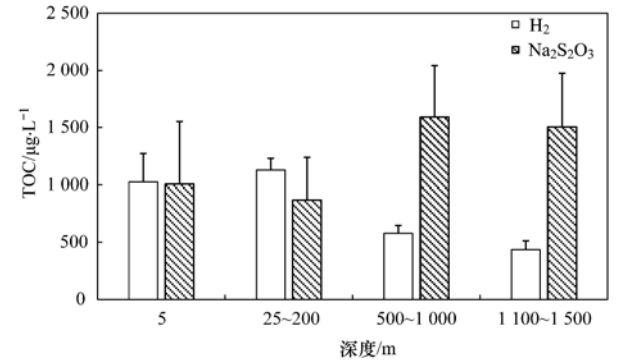
2.1 不同深度海洋非光合微生物的固碳潜力及其对不同电子供体的响应

对南海水域 6 个采样区域的水样分别按 4 个深度梯度混合,并以 H_2 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 、 NaNO_2 分别作为电子供体,按照 1. 2 节的方法进行培养,经过一个培养周期测定净固碳量. 所得的结果见表 2. 在一个

培养周期内,各区域及深度以 NaNO_2 为电子供体的响应值普遍较低,且没有显著差异,这可能是由于 NaNO_2 氧化时所产生的能量较低而且以其为电子供体的硝化菌世代时间长,生长缓慢,这与文献 [12,13] 结果相符,故不对该电子供体的响应情况进行进一步的分析. 将所有区域的结果按照深度梯度整合统计得到不同深度海洋微生物固碳潜力对 H_2 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的响应的关系,见图 2.

表 2 各区域海水非光合微生物固碳潜力对不同电子供体响应情况

Table 2 Response of potential carbon fixation capability of non-photosynthetic microbial community in each area seawater to different electron donors		固碳量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$					
培养条件	深度/m	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区	F 区
H_2 为电子供体	5	975.5 $\pm$ 107.0	2 638.2 $\pm$ 104.1	395.7 $\pm$ 37.5	1 309.9 $\pm$ 53.2	1 221.7 $\pm$ 18.1	639.9 $\pm$ 156.8
	25 ~ 200	1 202.8 $\pm$ 114.7	2 782.4 $\pm$ 284.8	1 088.9 $\pm$ 55.0	1 090.2 $\pm$ 67.0	869.9 $\pm$ 155.7	1 056.9 $\pm$ 102.4
	500 ~ 1 000	194.7 $\pm$ 102.7	623.8 $\pm$ 97.7	534.6 $\pm$ 77.3	664.5 $\pm$ 132.9	490.7 $\pm$ 65.5	1 052.7 $\pm$ 127.5
	1 100 ~ 1 500	—	—	412.4 $\pm$ 25.6	—	458.9 $\pm$ 37.5	440.6 $\pm$ 40.5
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为电子供体	5	1 163.3 $\pm$ 41.5	1 148.9 $\pm$ 252.4	959.6 $\pm$ 235.0	2 143.35 $\pm$ 169.8	594.6 $\pm$ 158.5	114.1 $\pm$ 36.5
	25 ~ 200	1 658.2 $\pm$ 231.1	723.2 $\pm$ 165.8	406.5 $\pm$ 6.5	771.2 $\pm$ 103.9	394.2 $\pm$ 122.9	923.5 $\pm$ 149.2
	500 ~ 1 000	1 555.3 $\pm$ 243.5	398.2 $\pm$ 94.2	883.5 $\pm$ 108.5	2 533.5 $\pm$ 106.3	1 821.8 $\pm$ 190.4	2 103.1 $\pm$ 145.1
	1 100 ~ 1 500	—	—	1 035.7 $\pm$ 213.7	—	1 976.2 $\pm$ 256.9	1 576.6 $\pm$ 106.8
NaNO_2 为电子供体	5	519.5 $\pm$ 78.6	458.4 $\pm$ 65.3	367.8 $\pm$ 45.6	434.8 $\pm$ 54.7	345.6 $\pm$ 69.3	420.8 $\pm$ 42.3
	25 ~ 200	429.5 $\pm$ 53.2	450 $\pm$ 62.4	364.4 $\pm$ 50.2	301.2 $\pm$ 49.6	420.8 $\pm$ 58.6	426.3 $\pm$ 47.2
	500 ~ 1 000	514.8 $\pm$ 53.1	547 $\pm$ 65.4	475.7 $\pm$ 72.3	494.8 $\pm$ 74.7	357.3 $\pm$ 56.0	358.4 $\pm$ 43.6
	1 100 ~ 1 500	—	—	472.1 $\pm$ 50.7	—	359.5 $\pm$ 61.1	330.7 $\pm$ 42.6



将表 2 中所有区域的净固碳量按各深度梯度平均,除 1 100 ~ 1 500 m 深度梯度外,其余排除 1 个最低区域值和 1 个最高区域值,将余下的区域值统计平均值和标准差

图 2 不同电子供体条件下海水非光合微生物固碳能力随深度变化

Fig. 2 Variation of carbon fixation capability of non-photosynthetic microbial community in seawater with the depth under different cultivation conditions using $\text{H}_2/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ as electron donors

从图 2 可知,以 H_2 为电子供体的培养条件下,200 m 以内的表层海水的非光合微生物的固碳能力要显著高于 500 m 以下深层海水. 数据偏差分析表明,5 m 深度的表层水的各区域的非光合微生物的固碳量差异要明显大于其他深度梯度各区域间的差

异(标准差是其他深度区域 2 倍以上),这可能是由于外部环境条件(光照,温度,生物)变化对表层水的理化性质和微生物结构的影响较显著,因此表层海水相较于其他深度海水微生物固碳量的区域差异性较大.

以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为电子供体的培养条件下,500 m 以下深层海水的非光合微生物的固碳能力要显著高于 200 m 以内表层海水,深层海水的非光合微生物固碳量是表层海水的 1.5 倍左右.

数据偏差分析表明,以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为电子供体的培养条件下的各深度梯度的非光合微生物固碳潜力的区域差异性要明显大于以 H_2 为电子供体培养条件下的区域差异性(以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为电子供体的标准差基本上是以 H_2 为电子供体的 3 倍以上). 说明南海水域能够利用以 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 为电子供体的化能自养菌丰度的区域间差异性要高于能以 H_2 为电子供体的化能自养菌的区间差异性.

从南海水域不同深度海洋微生物固碳潜力对 H_2 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 两种电子供体的响应效果看,表层水以 H_2 为电子供体的响应效果要略好于以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为电子供体的响应效果,而深层水以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为电

子供体的响应效果要明显好于以 H_2 为电子供体的响应效果,固碳潜力是后者的近 3 倍. 由于深海海水特殊的环境条件,大量的深海微生物多为嗜压、嗜冷微生物,在常温、常压下难以生存^[20]. 使得大量深海环境生存的细菌在采集以及后期实验室培养的过程中,由于环境条件较大的变化,已经失活或死亡. 所以如果在原位生长环境,深海区域能利用 $S_2O_3^{2-}$ 为电子供体固碳的微生物数量可能远高于表层海水,其固碳能力可能更大.

固碳潜力的差异肯定与不同深度海洋中的优势固碳微生物数量有关,但是由于采集过程中环境条件的变化,一些深海微生物已失活或死亡,因此传统的培养方法难以确定不同海洋深度各种固碳微生物的数量. 固碳途径的关键酶基因的丰度可以间接反映固碳微生物的数量. 为了阐明不同深度海洋微生物固碳潜力差异的深层原因,进一步研究了 2 个关键的固碳酶基因随海水深度变化的丰度差异.

2.2 南海海域不同深度主要固碳基因的差异性及其与微生物固碳潜能的相关性

对南海水域采集的样品按照深度梯度混合,按照 1.4 和 1.5 节的方法测定不同深度梯度海水中 *cbbL*、*cbbM* 基因的丰度,结果见图 3. 固碳基因 *cbbL* 的丰度,随着海水深度的增加逐渐递减,在 5 m 深度的表层水中,其数量显著高于其他的深度梯度(高于其他深度梯度数量 1 个数量级). 固碳基因 *cbbM* 的丰度随着海水深度增加逐渐递增,在 500 ~ 1 000 m 的深度范围内,基因含量达到最高值,而且深层水 *cbbM* 基因丰度都高于表层水的 10 倍以上,5 m 深度表层水最低.

由基因 *cbbL* 表达的 RubisCO I 广泛存在于植物和一些原核生物中,其有 4 种类型: IA ~ ID^[21],

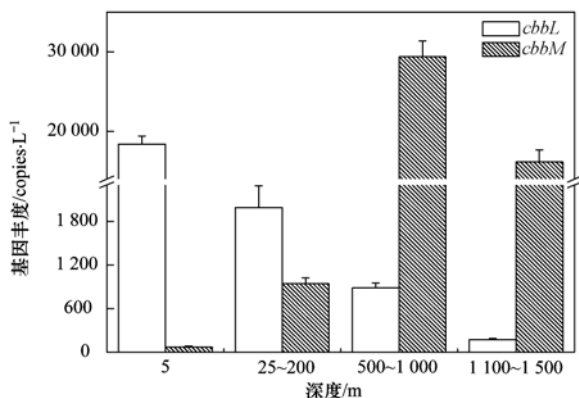


图 3 海水主要固碳基因随深度变化差异

Fig. 3 Differences of main CO_2 fixation gene abundance in sea water with the change of the depth

其中 IA 和 IC 多发现于变形菌门中,而变形菌门中有一部分菌属和 N, H_2 代谢有密切联系^[22], IB 和 ID 在蓝藻和真核生物中占优势^[21,23,24]. 由基因 *cbbM* 表达的 RubisCO II 广泛分布于厌氧的 α -变形菌门以及硫杆菌的一些种中,它们大多和硫代谢有关^[25]. 南海不同深度非光合微生物的固碳潜力与两种主要固碳功能基因随海水深度上的分布趋势是大致相符的,即表层水的 *cbbL* 基因丰度以及以 H_2 为电子供体的固碳能力均高于深层水,同时,深层水的 *cbbM* 基因丰度以及以 $Na_2S_2O_3$ 为电子供体的固碳能力均大于表层水. 因此表层水可能多以 *cbbL* 为固碳功能基因的光合微生物、氢-氧化细菌为主,深层水可能多以 *cbbM* 为固碳功能基因的 α -变形菌、硫细菌为主,从而使得不同深度海洋非光合固碳微生物的固碳潜力对不同电子供体的响应有显著差异. 然而,从图 2 和图 3 结果可见,次表层的 *cbbL* 显著低于表层,但以 H_2 为电子供体的固碳潜力却无显著差异(甚至略高于表层),这可能是由于表层中大量的 *cbbL* 来源于光合细菌,因此在避光培养中未发挥出其固碳能力,导致无光条件下的固碳能力较低.

图 3 中深层海水的 *cbbM* 固碳基因丰度明显高于表层水,比表层水高了 1 个数量级,而图 2 中,以 $Na_2S_2O_3$ 为电子供体的固碳量深层水仅是表层水的 1.5 倍左右. 而且次深层的 *cbbM* 丰度明显高于深层,但以 $Na_2S_2O_3$ 为电子供体的固碳量却大致相当. 这进一步验证了 2.1 节中的推测,即深层海水的固碳微生物以能利用还原性硫为电子供体并以 *cbbM* 为固碳功能基因的硫细菌为主,但是由于特殊的环境条件,在常温、常压环境中不能生存. 如果能进行原位培养,其固碳能力可能远高于表层海水.

2.3 海洋不同深度优势固碳菌差异的环境影响因素分析

海洋生态系统中,不同的深度海水在各种理化性质及环境条件等方面都存在着显著差异,对于微生物的生长以及菌群结构组成等造成显著影响,表 3 为通过 CTD 对采样现场测定的环境理化数据按照深度区域整合做了统计,可以看出,深层水相比较于表层水,含盐量高,温度低,压强大. RubisCO I 多在有氧微生物中被发现,被认为是一种主要存在于光合生物和好氧化能自养微生物中的 RubisCO 酶^[26],而 Badger 等^[27]通过生态学及对酶结构研究指出, RubisCO II 在低氧和高二氧化碳浓度下有较高活性,这与早期地球的大气环境极为相似, RubisCO II

表 3 海水各深度区域的物理化学性质特征¹⁾

Table 3 Physico-chemical properties of seawater within each range of depth

深度/m	TDS/g·L ⁻¹	温度/℃	压强/kPa
5	24.0 ± 0.2	29.49 ± 0.09	50.1 ± 1.4
25 ~ 200	25.9 ± 0.5	21.17 ± 0.11	1 100 ± 800
500 ~ 1 000	29.8 ± 0.4	8.88 ± 0.07	8 000 ± 2 000
1 100 ~ 1 500	29.1 ± 0.2	4.64 ± 0.06	12 000 ± 1 800

1) TDS(总溶解性固体),表示海水的含盐量

可能是 RubisCO 的共同进化祖先.

Alfrider 等^[28]和 Videmšek 等^[29]的研究表明,高 CO₂ 浓度的环境不利于 *cbbL* 为固碳基因的固碳细菌的生长,有利于以 *cbbM* 为固碳基因的细菌的生长.

因此可以推测,造成固碳基因 *cbbL*、*cbbM* 随深度变化的丰度差异原因可能和溶解 O₂ 含量、溶解 CO₂ 含量有关.

由于生物泵的作用,碳实现了从海洋表层向深层的转移^[30],并且深层海水低温、高压强等特殊的环境条件也有利于无机碳的储存.因此底部的 CO₂ 浓度远高于表层^[31],但氧气浓度极低,因此有利于以 *cbbM* 为固碳基因的微生物的生长.反之,表层海水含氧量高,CO₂ 浓度相对较低^[32],从而有利于以 *cbbL* 为固碳基因的微生物的生长

另一方面,许多研究指出^[33~36],海洋深处可挥发性硫化物(AVS)的浓度较高,也有利于以 *cbbM* 为固碳基因的微生物的生长.

结合文献报道的有关 *cbbL*、*cbbM* 固碳基因存在的微生物类群的生存条件及代谢类型,可以推测海洋中不同深度的 O₂、CO₂、还原性硫化物的含量差异可能是造成海洋中不同深度优势固碳菌菌群结构差异,乃至主要固碳基因丰度和固碳潜力差异的重要原因.

3 结论

(1)南海水域不同深度海洋非光合固碳微生物对不同电子供体的响应有显著差异.以 H₂ 为电子供体时,表层海水中的非光合微生物的固碳潜力高于深层海水,反之以 Na₂S₂O₃ 为电子供体时,深层海水微生物的固碳潜力高于表层海水.

(2)两种主要的固碳功能基因 *cbbL* 和 *cbbM* 丰度随海水深度变化而变化.表层海水中 *cbbL* 基因丰度显著高于深层水,相反,深层海水中 *cbbM* 的基因丰度显著高于表层水,表明表层和深层海水中的非

光合固碳微生物的优势种有较显著差异.这可能是表层和深层海水中的非光合固碳微生物对不同电子供体响应有显著差异的重要原因.

(3)导致不同的影响因素很多且复杂.海洋不同深度溶解 O₂/CO₂ 和还原性硫化物浓度的差异可能是导致其优势非光合固碳微生物差异的重要原因.深层海水的低 O₂、高 CO₂ 和高还原性硫化物环境适合于以 *cbbM* 为固碳基因的微生物生长,反之表层海水的高 O₂、低 CO₂ 和低还原性硫化物环境适合于以 *cbbL* 为固碳基因的微生物生长.

参考文献:

[1] Miltner A, Kopinke F D, Kindler R, et al. Non-phototrophic CO₂ fixation by soil microorganisms[J]. Plant and Soil, 2005, **269**(1-2): 193-203.

[2] De Morais M G, Costa J A V. Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide [J]. Energy Conversion and Management, 2007, **48**(7): 2169-2173.

[3] 周集体,王竞,杨凤林.微生物固定 CO₂ 的研究进展[J].环境科学进展,1999, **7**(1): 1-9.

[4] Moat A G, Foster J W, Spector M P. 微生物生理学[M]. (第四版). 北京:高等教育出版社,2009.

[5] Bassham J A, Benson A A, Calvin M. The path of carbon in photosynthesis[J]. The Journal of Biological Chemistry, 1950, **185**(2): 781-787.

[6] Saini R, Kapoor R, Kumar R, et al. CO₂ utilizing microbes-A comprehensive review[J]. Biotechnology Advances, 2011, **29**(6): 949-960.

[7] Andersson I, Backlund A. Structure and function of RubisCO [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2008, **46**(3): 275-291.

[8] Tabita F R, Satagopan S, Hanson T E, et al. Distinct form I, II, III, and IV Rubisco proteins from the three kingdoms of life provide clues about Rubisco evolution and structure/function relationships[J]. Journal of Experimental Botany, 2008, **59**(7): 1515-1524.

[9] 殷建平,王友绍,徐继荣,等.海洋碳循环研究进展[J].生态学报,2006, **26**(2): 566-575.

[10] 李艳华,张利平.海洋微生物资源的开发与利用[J].微生物学通报,2003, **30**(3): 113-114.

[11] Elsaied H E, Kaneko R, Naganuma T. Molecular characterization of a deep-sea methanotrophic mussel symbiont that carries a RuBisCO gene[J]. Marine Biotechnology, 2006, **8**(5): 511-520.

[12] 胡佳俊.非光合微生物固定 CO₂ 的过程优化及机理研究[D].上海:同济大学,2012.

[13] Hu J J, Wang L, Zhang S P, et al. Inhibitory effect of organic carbon on CO₂ fixing by non-photosynthetic microbial community isolated from the ocean [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**: 7147-7153.

- [14] 王风平, 周悦恒, 张新旭, 等. 深海微生物多样性[J]. 生物多样性, 2013, **21**(4): 445-455.
- [15] 胡佳俊, 王磊, 李艳丽, 等. 非光合 CO₂ 同化微生物菌群的选育/优化及其群落结构分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2438-2444.
- [16] 单伊娜. 非光合微生物固碳过程中碳源与能源物质的结构优化[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- [17] Queipo-Ortuño M I, Tena F, Colmenero J D, *et al.* Comparison of seven commercial DNA extraction kits for the recovery of *Brucella* DNA from spiked human serum samples using real-time PCR[J]. European Journal Clinical Microbiology & Infectious Diseases, 2008, **27**(2): 109-114.
- [18] Yuan H Z, Ge T, Zou S, *et al.* Effect of land use on the abundance and diversity of autotrophic bacteria as measured by ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RubisCO) large subunit gene abundance in soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, **49**(5): 609-616.
- [19] Kong W, Dolhi J M, Chiuchio A, *et al.* Evidence of form II RubisCO (*cbbM*) in a perennially ice-covered Antarctic lake [J]. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Ecology, 2012, **82**: 491-500.
- [20] 李学恭, 徐俊, 肖湘. 深海微生物高压适应与生物地球化学循环[J]. 微生物学通报, 2013, **40**(1): 59-70.
- [21] Watson G M F, Tabita F R. Microbial ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase: a molecule for phylogenetic and enzymological investigation [J]. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters, 1997, **146**(1): 13-22.
- [22] Yuan H Z, Ge T, Wu X H, *et al.* Long-term field fertilization alters the diversity of autotrophic bacteria based on the ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RubisCO) large-subunit genes in paddy soil [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, **95**(4): 1061-1071.
- [23] Tabita F R. Microbial ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase: A different perspective[J]. Photosynthesis Research, 1999, **60**(1): 1-28.
- [24] Shively J M, Devore W, Stratford L, *et al.* Molecular evolution of the large subunit of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RuBisCO) [J]. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters, 1986, **37**(3): 251-257.
- [25] English R S, Williams C A, Lorbach S C, *et al.* Two forms of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase from *Thiobacillus denitrificans* [J]. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters, 1992, **94**(1-2): 111-119.
- [26] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等. 固碳微生物分子生态学研究[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(14): 2951-2958.
- [27] Badger M R, Bek E J. Multiple Rubisco forms in proteobacteria: their functional significance in relation to CO₂ acquisition by the CBB cycle [J]. Journal of Experimental Botany, 2008, **59**: 1525-1541.
- [28] Alfreider A, Schirmer M, Vogt C. Diversity and expression of different forms of RubisCO genes in polluted groundwater under different redox conditions [J]. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Ecology, 2012, **79**(3): 649-660.
- [29] Videmšek U, Hagn A, Suhadolc M, *et al.* Abundance and diversity of CO₂-fixing bacteria in grassland soils close to natural carbon dioxide springs[J]. Microbial Ecology, 2009, **58**(1): 1-9.
- [30] 张远辉, 王伟强, 陈立奇. 海洋二氧化碳的研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, **15**(5): 559-564.
- [31] 韩舞鹰, 蔡艳雅, 吴林兴. 南沙海域海水二氧化碳体系[J]. 海洋通报, 1990, **9**(1): 27-33.
- [32] 林洪瑛, 程赛伟, 韩舞鹰, 等. 南沙群岛海域次表层溶解氧垂直分布最大值的强度特征[J]. 热带海洋学报, 2003, **22**(3): 9-15.
- [33] 刘景春, 严重玲, 胡俊. 水体沉积物中酸可挥发性硫化物 (AVS) 研究进展[J]. 生态学报, 2004, **24**(4): 812-818.
- [34] Howard D E, Evans R D. Acid-volatile sulfide (AVS) in a seasonally anoxic mesotrophic lake: seasonal and spatial changes in sediment AVS[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, **12**(6): 1051-1057.
- [35] Nedwell D D, Abram J W. Bacterial sulfate reduction in relation to sulfur geochemistry in two contrasting areas of salt marsh sediment[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1978, **6**(4): 341-351.
- [36] Oehm N J, Luben T J, Ostrofsky M L. Spatial distribution of acid-volatile sulfur in the sediments of Canadohta Lake, PA[J]. Hydrobiologia, 1997, **345**(1): 79-85.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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