

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

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

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制

李欢, 王磊*, 王亚楠

(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: 通过测定不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 培养时排硫硫杆菌 (DSM 505) 菌液的总有机碳浓度 (TOC), 分析 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 对排硫硫杆菌固碳能力的影响, 并结合各浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下固碳关键酶 RubisCO 编码基因 *cbb* 的转录特性和胞外游离有机碳浓度 (EFOC), 阐明 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 影响排硫硫杆菌固碳能力的作用机制。结果表明, 适当范围内增加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的浓度能显著提高排硫硫杆菌的固碳能力, 降低胞外游离有机碳在总有机碳中所占的比例。 *cbb* 基因转录特性分析结果表明, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度对 *cbb* 基因的转录效率和表达模式均无显著影响。因此推测 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 影响排硫硫杆菌固碳能力的作用机制可能是作为电子供体提供能量, 促进细胞骨架合成, 从而削弱胞外游离有机碳对排硫硫杆菌自养过程的抑制作用, 进而增强固碳能力。

关键词: CO_2 同化; 电子供体; 有机碳抑制; 核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶/加氧酶

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2496-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201610043

Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of *Thiobacillus thioparus* and Its Mechanism

LI Huan, WANG Lei*, WANG Ya-nan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The effect of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ on the carbon fixation capability of *Thiobacillus thioparus* (DSM 505) was determined by measuring the total organic carbon (TOC) concentrations under different concentrations of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. In addition, the mechanism was clarified by analyzing the transcription characteristics of RubisCO-encoding genes (*cbb* genes) and the concentrations of extracellular free organic carbon (EFOC) under different concentrations of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. The result showed that by increasing the concentrations of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ appropriately, the carbon fixation capability of *Thiobacillus thioparus* could be promoted and the ratio of extracellular free organic carbon to total organic carbon fell significantly. Moreover, the analysis from the transcription characteristics of *cbb* genes revealed that $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ had no significant effect on the transcription efficiency and transcription pattern of *cbb* genes. So $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ might improve the carbon fixation capability by promoting the cytoskeleton synthesis rate as electron donors to eliminate the inhibition effect of extracellular free organic carbon on the carbon fixation of *Thiobacillus thioparus*.

Key words: CO_2 assimilation; electron donors; inhibition effect of organic carbon; RubisCO

微生物固碳是缓解温室气体过量排放所导致的温室效应的有效措施之一。主要的固碳微生物是自养微生物, 分为光能自养型和化能自养型^[1], 它们利用光能或还原性无机物氧化时所产生的化学能同化 CO_2 以构成细胞物质。

化能自养微生物通过氧化无机化合物, 即电子供体, 获得能量, 可将 CO_2 还原为小分子有机碳之后再用于合成细胞骨架。根据提供能源的无机物类型不同, 化能自养微生物主要分为硝化细菌、硫化细菌、铁细菌和氨氧化细菌等类群, 以及某些分离于海洋的混合微生物菌群^[2]。排硫硫杆菌是一种重要且典型的专性化能自养菌, 属硫化细菌, 它可将 S^{2-} 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 等低价态硫化物氧化成亚硫酸、连四硫酸及硫酸等, 并可在这一氧化过程中获得能量, 利用 CO_2 为碳源进行生长繁殖, 并形成胞外单质硫^[3], 因

此具有脱硫和固碳的功能。目前其相关研究和应用主要集中于废水、废气脱硫处理方面^[4], 而对于其固碳功能的研究相对较少。排硫硫杆菌通过卡尔文循环途径固定 CO_2 , 核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶/加氧酶 RubisCO 是卡尔文途径的关键酶^[5,6], 按其结构、催化性能和对 O_2 的敏感性来区分, 主要有 RubisCO I 和 RubisCO II 两种类型, *cbbL* 和 *cbbM* 分别是其对应的大亚基编码基因, 而排硫硫杆菌同时拥有 *cbbL* 和 *cbbM* 编码基因^[7]。

化能自养菌的固碳速率主要取决于其内在因

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2017-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21577101); 教育部博士点基金 (博导类) 项目 (20130072110025)

作者简介: 李欢 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物固碳, E-mail: liihuan@tongji.edu.cn

* 通信作者, E-mail: celwang@tongji.edu.cn

素,如固碳途径的关键酶蛋白的表达量及其催化活性^[8],而外在因素主要是营养物质、能量物质的有效供给和适合的环境条件等。很多研究表明,在化能自养菌的生长过程中,其利用无机碳合成有机物需要消耗大量的能量和还原力,因此电子供体是影响其生长的重要限制性因素^[9, 10]。此外,有研究发现,环境中的有机物会抑制化能自养菌的自养过程^[11],另有研究表明,化能自养菌在无机环境下培养时都会在胞外积累自我产生的有机物^[12],而这些有机物是否会抑制其自养过程的相关研究目前较少。

还原性硫既是排硫硫杆菌硫化作用的底物,又是细胞生长的硫源。但目前关于还原性硫化物 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 在排硫硫杆菌固碳过程中的作用,及其对固碳能力的影响和机制尚未见研究报道。本实验为探究 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制,测定了不同 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度下排硫硫杆菌的固碳能力,并从固碳过程关键酶基因 *cbb* 的转录特性和胞外游离有机碳两方面分析了 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 影响排硫硫杆菌固碳的作用机制。

1 材料与方法

1.1 菌种来源

排硫硫杆菌 DSM505 购自德国微生物菌种保藏中心(DSMZ),并由同济大学环境科学和工程学院环境生物实验室保存并培养。

1.2 培养方法与条件

种子培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.10; K_2HPO_4 4.0; KH_2PO_4 4.0; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.10; CaCl_2 0.10; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.02; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.02; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 10; pH 6.6。

基础培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.10; K_2HPO_4 4.0; KH_2PO_4 4.0; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.10; CaCl_2 0.10; $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.02; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.02; pH 6.6。

种子培养:在 100 mL 血清瓶中装入 40 mL 种子培养基,灭菌后 (121°C , 20 min) 接入菌种(购自 DSMZ),用硅胶塞密封后向瓶中注入 21% O_2 及 10% CO_2 ,采用封口膜封口后,置于摇床避光振荡培养 3 d (28°C , $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 后菌液用作后续接种。

不同 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度下排硫硫杆菌的培养:在 100 mL 血清瓶中装入 40 mL 基础培养基,加入电子供体 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 使其浓度分别为 1、5、10、15、30 和 50 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,灭菌后 (121°C , 20 min) 接

种 1 mL 种子菌液,用硅胶塞密封后向瓶中注入 21% O_2 及 10% CO_2 ,采用封口膜封口后,置于摇床避光振荡培养 3 d (28°C , $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

1.3 分析方法

1.3.1 固碳能力及胞外游离有机碳测定

测定固碳能力:采用岛津 TOC-VCPH 有机碳分析仪(Shimadzu Seisakusho Co. Ltd., Kyoto, Japan)测定培养后菌液的 TOC 值,以反映微生物的固碳能力。测定 TOC 前需用浓盐酸将待测菌液的 pH 调至 4.0 左右,以消除无机碳对测定结果的影响。

测定胞外游离有机碳浓度:将培养后的菌液通过 0.22 μm 水相微孔滤膜,以同样的方法测定滤液中的 TOC 值,以反映胞外游离有机碳浓度。

1.3.2 *cbb* 基因丰度及转录量

DNA 提取、RNA 提取及反转录:取一定量培养后的菌液通过 0.22 μm 微孔滤膜获得排硫硫杆菌菌体,采用 DNA 提取试剂盒(UltraClean® DNA Isolation Kit, MoBio USA)提取总细菌 DNA。采用 TRIzol® Plus RNA 纯化试剂盒(Invitrogen, USA)提取总 RNA,通过核酸定量仪 NanoDrop ND-2000 (Thermo, USA)测定 DNA 样品和 RNA 样品的浓度及纯度。采用反转录法分析 *cbb* 基因转录量,进行反转录前,使用 gDNA Eraser (Takara, Japan)处理样品 (42°C , 2 min)以去除基因组 DNA 的干扰,处理后的样品使用反转录试剂盒 PrimeScript™ RT reagent kit (Takara)根据其操作手册进行反转录合成 cDNA。

cbb 基因丰度及转录量分析:采用定量 PCR (qPCR)分析仪分别测定 DNA 和 cDNA 样品中的 *cbb* 基因拷贝数,它们分别代表 *cbb* 基因丰度及 *cbb* 基因转录量。本研究采用绝对定量方法计算样品浓度,根据含有不同目标基因(*cbbL/cbbM*)的质粒标准品构建相应的标准曲线,每个标准曲线以 10 倍倍数逐步梯度稀释,标准曲线浓度变化范围为 $10^2 \sim 10^8$ copies $\cdot \mu\text{L}^{-1}$ 。标准曲线 R^2 大于 0.99,且样品回收率在 90% ~ 110%。qPCR 反应中所用的引物及扩增条件如表 1 所示。所有 qPCR 的测定采用 ABI 7500 Real-time PCR 仪 (Applied Biotechnologies) 进行分析。qPCR 反应体系采用 SYBR Premix Ex Taq™ 体系 (20 μL),其中 DNA/cDNA 为 2 μL 。在每个循环的最后一个阶段收集荧光,溶解曲线温度变化为 $60 \sim 95^\circ\text{C}$,根据样品循环阈值(Ct 值)计算样品的基因拷贝数。

1.4 数据处理与统计分析

采用 SPSS 20.0 统计分析软件对实验数据进行

单因素方差分析 (ANOVA) 和 LSD 多重比较 (Duncan 法), 分析 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度不同时各指标的差异显著性; 采用 SPSS 20.0 统计分析软件对各指标进行皮尔森相关性分析。

表 1 qPCR 所用引物和反应程序¹⁾

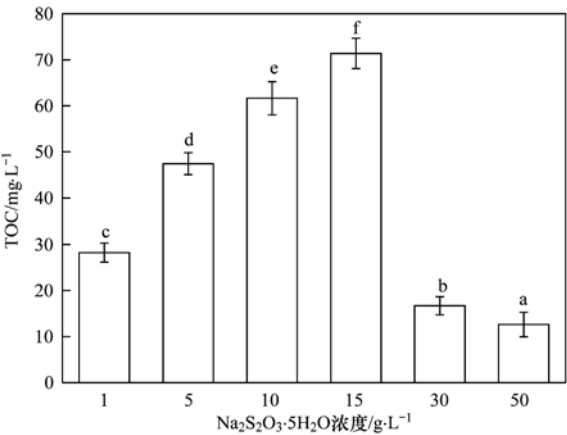
Table 1 Primers and experimental conditions for qPCR of <i>cbb</i> genes				
目标基因	引物名称	引物序列(5'-3')	步骤与条件	文献
<i>cbbL</i>	K2F	ACCAYCAAGCCSAAGCTSGG	预变性(95℃, 3 min)→40 个循环(Step1: 95℃, 10 s, Step2: 62℃, 40 s, Step3: 72℃, 30 s)	[13]
	V2F	GCCTTCSAGCTTGCCSACCRC		
<i>cbbM</i>	<i>cbbM</i> -F	TTCTGGCTGGGBGGHGAYTTYATYAARAAYGACGA	预变性(95℃, 3 min)→40 个循环(Step1: 95℃, 30 s, Step2: 55℃, 60 s, Step3: 72℃, 60 s, Step4: 83℃, 15 s)	[14]
	<i>cbbM</i> -R	CCGTGRCRCGVCVCGRTGGTARTG		

1) M = A/C; R = A/G; W = A/T; S = G/C; Y = C/T; K = G/T; V = A/G/C; H = A/C/T; D = A/G/T; B = G/C/T; N = A/G/C/T

2 结果与讨论

2.1 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下排硫硫杆菌固碳能力

将排硫硫杆菌按 1.2 节的方法在不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下进行培养, 经过一个培养周期后测定净固碳量(TOC), 所得结果如图 1 所示。



固碳能力以净固碳量衡量, 净固碳量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) = 培养 3 d 后菌液 TOC 值 - 培养前菌液初始 TOC 值

图 1 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下排硫硫杆菌的固碳能力

Fig. 1 Variation of carbon fixation capability of *Thiobacillus thioautotrophicus* with the concentrations of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

可以看出, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的浓度显著影响排硫硫杆菌的固碳能力。当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 1 ~ 15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 固碳量随 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度的升高而升高, 而当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度升高至 30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 固碳量开始大幅下降并随 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度的升高而降低。可能原因是盐度增加导致渗透压过高使细胞失活, 抑制其生长繁殖^[15]。

2.2 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下排硫硫杆菌 *cbb* 基因转录特性

固碳途径关键酶蛋白的表达量及其催化活性是影响排硫硫杆菌固碳的重要因素之一^[8]。由于

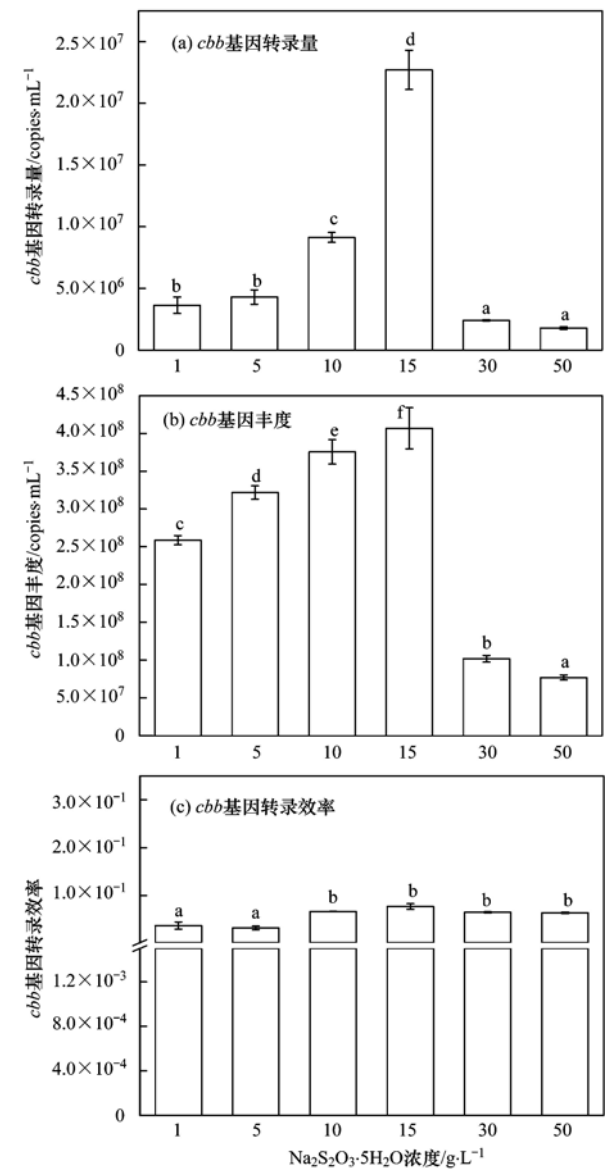
RubisCO 酶蛋白浓度太低难以检出, 而 *cbb* 的 mRNA 浓度变化与 RubisCO 酶的表达水平基本相一致, 故采用 1.3.2 节中的方法分析了不同 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度下 *cbb* 基因的转录特性, 以此间接表征酶的表达水平, 探究 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 影响排硫硫杆菌固碳能力的作用机制。

结果如图 2(a) 所示, *cbb* 基因转录量与固碳能力变化规律基本一致, 二者呈显著正相关 ($r = 0.837, P < 0.05$), 但 *cbb* 基因总转录量受菌体数量的影响, TOC 值越高的样品其排硫硫杆菌浓度也越高, 因此总的 *cbb* 基因转录量并不能代表单位菌体的 *cbb* 基因转录效率。为进一步阐明 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度对单个细胞 *cbb* 基因转录效率的影响, 本实验另测定了不同样品的 *cbb* 基因丰度。由图 2(b) 可以看出, 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下, 样品的 *cbb* 基因丰度与固碳能力的变化规律基本一致, 呈显著正相关 ($r = 0.963, P < 0.01$)。这表明随着 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度的增加 (1 ~ 15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内), 细胞数量增加, 从而导致 *cbb* 基因丰度乃至总转录量随之增加。

由图 2(c) 可见, 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下, *cbb* 基因转录效率 (即单位 *cbb* 基因拷贝的转录量) 无显著性差异, 这说明 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 对 *cbb* 基因转录效率无显著影响, 故 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 影响排硫硫杆菌固碳的作用机制可能不是通过影响其 *cbb* 基因转录效率。当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、50 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 固碳量大幅下降, 但 *cbb* 基因转录效率较高, 这说明过高的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度只是抑制了排硫硫杆菌的生长繁殖, 并没有抑制其 *cbb* 基因转录效率。

2.3 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下 *cbb* 基因表达模式

cbbL 和 *cbbM* 分别是 RubisCO I 和 RubisCO II 两种类型固碳关键酶所对应的大亚基编码基因, 不同



cbb 基因转录效率 = cbb 基因转录量/ cbb 基因丰度
图 2 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下排硫硫杆菌 *cbb* 基因转录量、*cbb* 基因丰度及 *cbb* 基因转录效率

Fig. 2 Variation of *cbb* genes transcription level, *cbb* genes abundance and *cbb* genes transcription efficiency of *Thiobacillus thioarvus* with the concentrations of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

类型 RubisCO 酶的催化比活性可能不同^[16]. 大量研究表明,某些环境条件对两种类型 *cbb* 基因的表达有重要的影响,有报道指出了 O_2 及 CO_2 对 *cbb* 基因的表达模式,表达效率和 RubisCO 酶的比催化活性有显著的影响^[17,18]. 如 RubisCO II 在低氧和高二氧化碳浓度下有较高的表达,而 RubisCO I 则相反,其能够在 CO_2 较低的环境中有效表达^[19,20].

为进一步探究 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度变化是否也会影响 *cbb* 基因的表达模式,从而影响催化活性,本文以 *cbbL*、*cbbM* 基因的转录效率在总 *cbb* 基因转录效率中的所占比来表示不同 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度条件下排硫硫杆菌 *cbb* 基因的表达模式,结果表明(见表 2),排硫硫杆菌的固碳基因有两种形式,即 *cbbL* 和 *cbbM*, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度的变化对 *cbb* 基因的表达模式基本无影响,任何浓度下都是 *cbbL* 基因的表达占绝对优势.

2.4 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下胞外游离有机碳浓度及其与固碳能力的相关性

有研究发现,环境中的有机物会抑制化能自养菌的自养过程,如环境中的丙酮酸能抑制氧化硫硫杆菌固定 CO_2 ,当丙酮酸浓度达到 1 mmol·L⁻¹ 时,其对于氧化硫硫杆菌固定 CO_2 的抑制率可达 84%^[21],Silver 等^[22] 研究发现葡萄糖的存在会抑制微生物的自养代谢过程. 另有研究表明,化能自养菌在无机环境下培养时都会在胞外积累自我产生的有机物^[12],除了培养后期细胞死亡和裂解释放大量有机碳外,细菌细胞代谢过程中也会透过细胞膜扩散释放部分有机碳到胞外环境中,有机碳的存在会抑制其自养过程^[23]. 而 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 是否会影响胞外有机碳的浓度,进而影响化能自养菌的固碳能力,目前尚未见研究报道.

如图 3(a) 所示,在排硫硫杆菌固碳过程中会产生并积累胞外游离有机碳,且 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的浓

表 2 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下 *cbb* 基因不同表达模式所占比

Table 2 Transcription pattern of *cbb* genes under different $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ concentrations

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ /g·L ⁻¹	<i>cbbL</i> 转录效率	<i>cbbM</i> 转录效率	总 <i>cbb</i> 转录效率	<i>cbbL</i> 所占比 ¹⁾	<i>cbbM</i> 所占比 ²⁾
1	3.66×10^{-2}	1.15×10^{-3}	3.77×10^{-2}	0.97	0.03
5	3.23×10^{-2}	5.73×10^{-4}	3.29×10^{-2}	0.98	0.02
10	6.60×10^{-2}	1.17×10^{-3}	6.71×10^{-2}	0.98	0.02
15	7.26×10^{-2}	4.92×10^{-3}	7.75×10^{-2}	0.94	0.06
30	6.43×10^{-2}	1.15×10^{-3}	6.55×10^{-2}	0.98	0.02
50	6.30×10^{-2}	1.16×10^{-3}	6.42×10^{-2}	0.98	0.02

1) *cbbL* 所占比 = *cbbL* 基因转录效率/总 *cbb* 基因转录效率;2) *cbbM* 所占比 = *cbbM* 基因转录效率/总 *cbb* 基因转录效率

度显著影响 EFOC/TOC 比率 [图 3 (b)]. 当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 5、10、15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, EFOC/TOC 比率约为 25% ~ 35%, 而当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 1、30、50 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, EFOC/TOC 比率约为 45%. 相关性分析发现, EFOC/TOC 比率与 TOC 呈显著负相关 ($r = -0.970, P < 0.01$), EFOC/TOC 比率越低, 固碳能力越强.

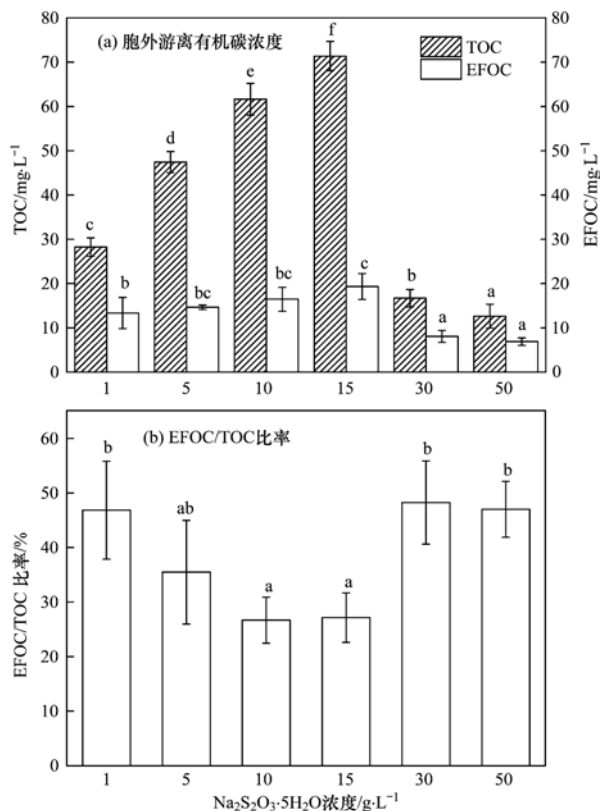


图3 不同浓度 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 条件下排硫硫杆菌的胞外游离有机碳浓度及 EFOC/TOC 比率

Fig. 3 Extracellular free organic carbon concentrations and EFOC/TOC ratio of *Thiobacillus thioparus* under different $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ concentrations

在自养菌同化 CO_2 的过程中会产生大量的糖类以供合成蛋白及细胞骨架^[24], 当细胞骨架合成速率不能与 CO_2 同化速率相匹配时, CO_2 同化产生的有机物可能会透过细胞膜释放到胞外成为胞外游离有机碳 (EFOC)^[25]. 当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 5、10、15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 作为电子供体供应充足, 可以提供足够的能量以促进细胞骨架合成, 此时 EFOC/TOC 比率能保持较低水平, 反馈抑制效应可能也较弱. 而当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 1 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 能量供应不足, 细胞骨架合成速率可能较低, 固碳过程中产生的有机物释放到胞外成为胞外游离有机碳. 当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 30 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、50 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

时, 盐度增加导致渗透压过高使细胞失活^[15], 细胞骨架合成速率会受到抑制, 导致较高的胞外有机碳浓度和较低的总固碳量.

这些结果表明排硫硫杆菌自我产生的胞外游离有机碳会抑制其自养过程, 通过供给适当浓度的电子供体 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (5 ~ 15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内), 可以有效提高细胞骨架合成速率, 使 CO_2 同化速率与细胞骨架合成速率相匹配, 将固碳产生的有机碳转变为细胞骨架, 从而削弱胞外游离有机碳对排硫硫杆菌自养过程的抑制作用, 增强其固碳能力.

3 结论

(1) 排硫硫杆菌固碳能力随电子供体 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度的增加而增强 (1 ~ 15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 15 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时固碳能力最强, 浓度继续增加会使固碳能力大幅下降.

(2) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度对固碳关键酶基因 *cbb* 的转录效率和表达模式均无显著影响, 但能显著影响胞外游离有机碳在总有机碳中所占比 EFOC/TOC. 胞外游离有机碳对排硫硫杆菌的自养固碳过程有抑制阻遏作用, 通过提供充足的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 可以促进细胞骨架合成, 进而降低胞外游离有机碳所占比, 削弱胞外有机碳的抑制阻遏作用, 增强固碳能力.

参考文献:

- [1] Ono E, Cuello J L. Design parameters of solar concentrating systems for CO_2 -mitigating algal photobioreactors [J]. *Energy*, 2004, **29**(9-10): 1651-1657.
- [2] 胡佳俊, 王磊, 李艳丽, 等. 非光合 CO_2 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.
- [3] Hu J J, Wang L, Li Y L, et al. Breeding, optimization and community structure analysis of non-photosynthetic CO_2 assimilation microbial flora [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(8): 2438-2444.
- [4] Johnson E J, Peck Jr H D. Coupling of phosphorylation and carbon dioxide fixation in extracts of *Thiobacillus thioparus* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1965, **89**(4): 1041-1050.
- [5] 宋红彪. 几类非光合微生物的固碳特性及其优化研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [6] 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.
- [7] 梅杨, 李海蓝, 谢晋, 等. 核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶/加氧酶 (Rubisco) [J]. *植物生理学通讯*, 2007, **43**(2): 363-368.
- [8] Mei Y, Li H L, Xie J, et al. Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) [J]. *Plant Physiology Communications*, 2007, **43**(2): 363-368.
- [9] Delwiche C F, Palmer J D. Rampant horizontal transfer and

- duplication of rubisco genes in eubacteria and plastids [J]. Molecular Biology and Evolution, 1996, **13**(6): 873-882.
- [8] 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.
- Yuan H Z, Qin H L, Liu S L, *et al.* Advances in research of molecular ecology of carbon fixation microorganism[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **44**(14): 2951-2958.
- [9] 袁莹, 周伟丽, 王晖, 等. 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1835-1844.
- Yuan Y, Zhou W L, Wang H, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors [J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1835-1844.
- [10] Frattini C J, Leduc L G, Ferroni G D. Strain variability and the effects of organic compounds on the growth of the chemolithotrophic bacterium *Thiobacillus ferrooxidans* [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2000, **77**(1): 57-64.
- [11] 刘相梅, 林建群, 田克立, 等. 极端嗜酸性专性化能自养硫细菌有机质代谢的研究进展[J]. 生物工程学报, 2008, **24**(1): 1-7.
- Liu X M, Lin J Q, Tian K L, *et al.* Metabolism of organic compounds by extremely acidophilic, obligately chemolithoautotrophic *thiobacilli*-a review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2008, **24**(1): 1-7.
- [12] 黄兴, 孙宝盛, 孙井梅, 等. 贫营养条件下 EPS、SMP 和微生物多样性的研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1468-1474.
- Huang X, Sun B S, Sun J M, *et al.* EPS, SMP and microbial biodiversity under the oligotrophic environment [J]. Environmental Science, 2009, **30**(5): 1468-1474.
- [13] Yuan H Z, Ge T D, Zou S Y, *et al.* Effect of land use on the abundance and diversity of autotrophic bacteria as measured by ribulose-1, 5-biphosphate carboxylase/oxygenase (RubisCO) large subunit gene abundance in soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, **49**(5): 609-616.
- [14] Kong W D, Dolhi J M, Chiuchiolo A, *et al.* Evidence of form II RubisCO (*cbhM*) in a perennially ice-covered Antarctic lake [J]. Fems Microbiology Ecology, 2012, **82**(2): 491-500.
- [15] 诸葛健, 沈微, 方慧英, 等. 工业微生物实验与研究技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 182-185.
- [16] Tabita F R. Molecular and cellular regulation of autotrophic carbon dioxide fixation in microorganisms [J]. Microbiological Reviews, 1988, **52**(2): 155-189.
- [17] 方峰, 王磊, 席雪飞, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1550-1556.
- Fang F, Wang L, Xi X F, *et al.* Potential carbon fixation capability of non-photosynthetic microbial community at different depth of the south china sea and its response to different electron donors[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1550-1556.
- [18] 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**(7): 1525-1541.
- [19] Roh K S, Kim I S, Kim B W, *et al.* Decrease in carbamylation of rubisco by high CO₂ concentration is due to decrease of rubisco activase in kidney bean[J]. Journal of Plant Biology, 1997, **40**(2): 73-79.
- [20] Wang Y N, Wang L, Shan Y N, *et al.* Optimization of inorganic carbon sources to improve the carbon fixation efficiency of the non-photosynthetic microbial community with different electron donors[J]. Environmental Technology, 2015, **36**(10): 1246-1255.
- [21] Rittenberg S C. The roles of exogenous organic matter in the physiology of chemolithotrophic bacteria [J]. Advances in Microbial Physiology, 1969, **3**: 159-196.
- [22] Silver M, Margalith P, Lundgren D G. Effect of glucose on carbon dioxide assimilation and substrate oxidation by *Ferrobacillus ferrooxidans*[J]. Journal of Bacteriology, 1967, **93**(6): 1765-1769.
- [23] 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**(14): 7147-7153.
- [24] Berg I A. Ecological aspects of the distribution of different autotrophic CO₂ fixation pathways [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(6): 1925-1936.
- [25] Xie W M, Ni B J, Seviour T, *et al.* Characterization of autotrophic and heterotrophic soluble microbial product (SMP) fractions from activated sludge[J]. Water Research, 2012, **46**(19): 6210-6217.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-nu, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao, <i>et al.</i> (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die, <i>et al.</i> (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen, <i>et al.</i> (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, <i>et al.</i> (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping, <i>et al.</i> (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (2617)