

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

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

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收锕钍沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)

石油降解菌的分离鉴定及4株芽胞杆菌种间效应

王佳楠¹, 石妍云¹, 郑力燕¹, 王喆¹, 蔡章^{2,3}, 刘杰^{2*}

(1. 南开大学滨海学院环境科学与工程系, 天津 300270; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 3. Department of Energy and Mineral Engineering, the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA)

摘要: 通过富集培养和分离纯化的方法, 从天津大港油田石油污染土壤和渤海海上钻井平台洗油污水中分离出6株石油降解细菌, 生理生化试验及16S rDNA序列分析鉴定表明, 它们分别属于 *Bacillus* 芽胞杆菌属(S1、S2、S3、S4)、*Pseudomonas* 假单胞菌属(W1)和 *Ochrobactrum* 苍白杆菌属(W2), 其中, S3具有最高的烷烃(41.3%)和芳烃(30.9%)降解率, 从石油污染场地中筛选出的内源微生物对本油田石油的降解效果优于外源物种。对4株芽胞杆菌属菌株构建微生物组进行石油降解实验, 结果表明, 由S1和S4构成的微生物组F3具有最高的烷烃(50.5%)和芳烃(54.0%)降解率, 比单菌降解率分别提高了69.9%和156.1%, 同时比最优降解单菌S3的降解率分别高出22.1%和74.6%, 而由S2和S3构成的微生物组F4对烷烃和芳烃的降解率最低, 分别为18.5%和18.9%, 比单菌降解率降低了55.3%和39.0%, 实验表明同菌属微生物种间对石油的降解同时存在协同促进和拮抗抑制作用, 芽胞杆菌属内亲缘性近的菌株之间对石油降解主要表现为促进作用。

关键词: 石油降解; 芽胞杆菌; 微生物组; 16S rDNA; 种间相互作用

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2245-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.06.044

Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four *Bacillus* Strains

WANG Jia-nan¹, SHI Yan-yun¹, ZHENG Li-yan¹, WANG Zhe¹, CAI Zhang^{2,3}, LIU Jie^{2*}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Nankai University Binhai College, Tianjin 300270, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Department of Energy and Mineral Engineering, the Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA)

Abstract: Six petroleum-degrading strains were isolated from oil-contaminated soil at Dagang oil field and oil sewage on Bohai offshore drilling platform in Tianjin using enrichment culture and isolation method. The physiological biochemical test together with 16S rDNA sequencing analysis indicated that they belonged to *Bacillus* (S1, S2, S3, S4), *Pseudomonas* (W1) and *Ochrobactrum* (W2), respectively. The strain S3 had the maximum degradation rate of alkane (41.3%) and aromatic hydrocarbon (30.9%) among all isolated strains showing the better degradation efficiency by endogenous bacteria when compared to that by the exogenous bacteria. The four *Bacillus* strains were used to construct microbiome, thereafter subjected to petroleum degradation efficiency test and analyzed. The results showed that microbiome F3 consisting of S1 and S4 had the maximum degradation rates of alkane (50.5%) and aromatic hydrocarbon (54.0%), which were 69.9% and 156.1% higher than those by single bacterium, respectively. Furthermore, they were 22.1% and 74.6% respectively higher than those by the most optimal degradation bacterium S3. Microbiome F4 consisting of S2 and S3 had the minimum degradation rates of alkane (18.5%) and aromatic hydrocarbon (18.9%) which were 55.3% and 39.0% lower than the degradation rates of single bacterium, respectively. The results also demonstrated that there were both microbial synergy promotion and antagonism inhibition among bacteria of the same genus in the petroleum degradation period. Bacteria with close affinity in *Bacillus* genus displayed mainly promoted petroleum degradation effect.

Key words: petroleum degradation; *Bacillus*; microbiome; 16S rDNA; interspecific interactions

微生物降解是石油污染修复的主要方法之一, 目前已有大量石油降解菌的分离研究报道^[1~3]。由于石油是一种复杂的碳氢混合物, 水溶性较低, 而通常单一菌株只对特定类型(如碳链长度、苯环数量等)烃类化合物具有降解效果, 因而石油的微生物降解受到很大程度的限制^[4,5]。同时, 由于石油降解是分步进行的, 在石油降解过程中需要多种酶和微生物参与^[6,7], 所以, 在实际应用中, 常采取多种混合菌降解石油^[8~11]。微生物菌群通过协同作用, 集

合多种酶促体系促进酶解反应, 能增加石油污染物质的降解水平^[12], Zhao等^[13]构建由 *Rhizobiales* sp.、*Pseudomonas* sp.、*Brucella* sp.、*Bacillus* sp.、*Rhodococcus* sp.、*Microbacterium* sp. 和 *Roseomonas* sp. 组成的混合菌群能够去除71.4%的脂肪烃和

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-01-11

作者简介: 王佳楠(1981~), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: wangjianan1029@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liujiebaiya@mail.nankai.edu.cn

36.0% 的芳香烃;张辉等^[14]将芽胞杆菌(*Bacillus* sp.)和黄杆菌(*Flavobacterium* sp.)混合固定化后应用于地表水石油的降解,发现其效果明显优于单菌;王志强等^[15]将3株假单胞菌属、黄杆菌属和微球菌属组合在一起发现复合菌的降解率要高于3株菌的单一降解率;赵硕伟等^[16]将*Rhodococcus* sp.、*Gordonia* sp.和*Pseudomonas* sp.等比例组成复合菌群,其石油降解能力超过任何单一菌株,在5 d内能降解70.3%的石油;Hudcova等^[17]比较了*Bacillus cereus* NDT4、*Pseudomonas putida* NDT1、*Pseudomonas fluorescens* NDT2和*Achromobacter* sp. NDT3这4株菌的混合菌及单菌对二硝基甲苯同分异构体的降解性能,结果表明混合菌比单菌的降解速度要快近50倍。

然而,微生物之间并非都是互惠共生关系,并不是所有的微生物组合都能促进污染物的降解,由于菌种之间存在着拮抗、竞争作用,微生物之间可能在一定程度上会对石油的降解起抑制作用,降低微生物组合的修复效果^[18,19],如何消除菌种间的抑制作用、构建出优势菌群是当前所要解决的一个主要问题之一。目前研究已发现不同种属的石油降解菌株组合在一起能促进石油的降解,但微生物之间的相互关系却仍不清楚,其筛选和组合还是一个随机过程,特别是关于种间相互作用机制的认识还十分有限,虽然已有少量关于同种属微生物的研究报道,如Serebrennikova等^[20]研究了固定化的两株红球菌属*Rhodococcus ruber*和*Rhodococcus opacus*在生物反应器中对石油烃的降解应用,Barsing等^[21]筛选分离出矿化解磺化芳香胺的3株假单胞菌属(*P. pseudoalcaligenes* TJ21、*P. citronellolis* TJ22和*P. testosterone* TJ23),通过构建混合菌群发现,三元混合菌效果要高于单菌和二元混合菌,其矿化效果高达90%,但是关于种间微生物对石油降解的相互作用机制仍不清楚,如何优化组合种间微生物有待进一步研究。

本研究从天津大港油田石油污染土壤和渤海海上钻井平台洗油污水中进行细菌分离富集,筛选出具有石油降解能力的菌株,通过细菌生理生化实验、16S rDNA序列分析对石油降解菌进行鉴定;采用单因子变量法,对同菌属种间的石油降解菌进行排列组合构建石油降解微生物组,测定其石油降解效果,从而确定最优菌种组合,同时结合微生物基因系统进化树来分析探讨同菌属种间的相互作用,以加深对石油降解菌群的认识,以期对石油污染的生物

修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与石油测定

样品采集:本实验所用土壤和含油废水分别取自于大港油田某输油管漏油口和中国渤海某钻井平台洗油污水。

土壤含水率测定:重量法。

pH值测定:土壤用去CO₂蒸馏水按1:2.5比例稀释后用pH计法测定;水样直接用pH计测定。

石油质量浓度测定:紫外分光光度法^[22,23]。用60~90石油醚溶解原油配制成0、1、2、4、6、8、10 mg·L⁻¹质量浓度的原油标样,依据不同的吸收特性,分别测定烷烃和芳烃的最佳吸收波长(实验确定烷烃为227 nm,芳香烃为258 nm),在最佳吸收波长下,制作烷烃和芳烃的标准吸光度曲线。

土样石油质量浓度测定:通过索氏提取法萃取土壤中石油烃,用紫外分光光度测定烷烃和芳烃的质量浓度。

水样石油质量浓度测定:称取80.00 mL水样至分液漏斗中,加入2.0 g NaCl和1 mL(1:1)H₂SO₄,用60~90石油醚洗涤采样瓶并将洗液转至分液漏斗,充分振荡3 min,静置分层,将水相放入原采样瓶中;在玻璃砂芯漏斗中内铺约1 cm左右厚度的脱脂棉,称取5.0 g无水Na₂SO₄放入脱脂棉上方,将萃取液滤入50 mL容量瓶中;将采样瓶中的原水相重复萃取3次,萃取液滤入同一容量瓶中;最后用15 mL石油醚洗涤漏斗,将洗液转移至容量瓶中、定容;以石油醚为参比,测定样品中烷烃和芳烃的吸光度值,计算烷烃和芳烃的质量浓度。

1.2 石油降解菌的筛选及鉴定

培养基 I: NaNO₃ 2.0 g·L⁻¹, KH₂PO₄ 1.0 g·L⁻¹, K₂HPO₄·3H₂O 0.5 g·L⁻¹, NaCl 0.5 g·L⁻¹, MgSO₄·7H₂O 0.1 g·L⁻¹, CaCl₂ 0.01 g·L⁻¹, FeSO₄·7H₂O 0.01 g·L⁻¹, 原油(取自大港油田) 10.0 g·L⁻¹, pH 7.2~7.4, 121℃灭菌20 min。

培养基 II: 牛肉浸出膏 3.0 g·L⁻¹, 蛋白胨 10.0 g·L⁻¹, NaCl 5.0 g·L⁻¹, 琼脂 20.0 g·L⁻¹, 原油(取自大港油田) 5.0 g·L⁻¹, pH 7.2~7.4, 121℃灭菌20 min。

降解菌富集:将石油污染土壤和污水分别用0.8%灭菌生理盐水按1:10稀释、混合均匀,取10 mL稀释菌液加入90 mL培养基 I中,28℃、300 r·min⁻¹条件下培养7 d;以10%接种量加入新的

培养基 I 中循环接种培养 3 次进行富集培养。

降解菌纯化: 将上述富集菌液用灭菌生理盐水稀释为 10、100、1 000 倍这 3 个梯度, 分别取菌液 1 mL 于培养基 II 中进行平板分离, 37℃ 恒温培养。待培养皿长出菌落后, 根据形态、颜色等挑选典型菌落在培养基 II 上划线纯化, 重复 3~4 次, 直至出现单菌落, 将纯化后的单菌株接入液体培养基中扩大培养并保存菌种。

生理生化试验: 对菌落的形态、颜色进行观察记录; 同时进行革兰氏染色和镜检, 并对纯菌进行生理生化实验(甲基红、淀粉水解、葡萄糖氧化发酵、乳糖氧化发酵、硝酸盐还原、柠檬酸利用、明胶、V-P 试验)。

16S rDNA 鉴定: 使用 DNeasy Blood & Tissue Kit (Qiagen, USA) 试剂盒提取菌株 DNA, 具体步骤参见试剂说明书, 采用 27F (5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3') 和 1492R (5'-GGT TAC CTT GTT ACG ACT T-3') 引物扩增 16S rDNA, 所用试剂为 Go Taq Master Mix (Promega, USA), PCR 步骤和程序采用 Wang 等^[24]的方法。PCR 产物送交华大基因北京公司进行 DNA 测序。将基因序列在 NCBI 数据库 (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) 中进行同源序列搜索, 使用 MEGA Version 5.0 软件对基因序列进行系统发育分析和进化树的构建。

1.3 单菌的降解性能

原油培养基: NH_4NO_3 2.0 g·L⁻¹, K_2HPO_4 0.5 g·L⁻¹, KH_2PO_4 1.0 g·L⁻¹, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g·L⁻¹, 无水 CaCl_2 0.02 g·L⁻¹, NaCl 5.0 g·L⁻¹, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.02 g·L⁻¹, 原油 5.0 g·L⁻¹, pH 7.2~7.4, 121℃ 灭菌 20 min。

培养条件: 将降解菌以 20% 接种含量加入 150 mL 原油培养基中, 在 30℃、300 r·min⁻¹ 振荡培养 7 d, 设置一组空白对照, 每组实验设置 3 个平行。

降解率测定: 参照 1.1 节中方法测定 7 d 后液体培养基中的残余烷烃和芳烃的质量浓度。为了消除石油灭菌和自然光降解等所引起的误差, 菌株对原油(烷烃和芳烃)的降解率以空白组为参照, 降解率计算公式如下:

$$\text{降解率} = \frac{\text{空白组质量浓度} - \text{接菌组质量浓度}}{\text{空白组质量浓度}} \times 100\%$$

1.4 微生物组的构建及降解性能

根据烷烃和芳烃降解率, 选取 4 株芽胞杆菌根据排列组合 ($\text{C}_4^2 + \text{C}_4^3 + \text{C}_4^4$) 构建 11 个微生物组, 以

20% 总接菌含量(每种细菌具有相同的比重)进行降解实验, 培养条件为: 150 mL 5.0 g·L⁻¹ 原油培养基, 30℃、300 r·min⁻¹ 恒温振荡培养 7 d, 设置一组空白对照, 每组设置 3 个平行。微生物组的石油降解率测定方法按照 1.3 节中所述方法进行, 最后计算出微生物组烷烃和芳烃的降解率, 使用方差分析比较数据间的差异。

2 结果与分析

2.1 菌株的分离鉴定及降解性能

大港油田石油污染土壤呈碱性(pH = 8.1), 芳烃含量(以干土计)为 $(10.10 \pm 4.64) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 烷烃含量(以干土计)为 $(9.55 \pm 5.05) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 石油废水呈酸性(pH = 6.3), 其芳烃含量为 $(5.65 \pm 2.37) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 烷烃含量为 $(5.47 \pm 2.57) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。本实验通过富集分离得到 6 株细菌, 经显微镜形态观察和生理生化试验进行初步鉴定, 其结果如表 1 所示, 从土壤中分离出的 S1、S2、S3 和 S4 是革兰氏阳性细菌, 从废水中分离出的 W1 和 W2 是革兰氏阴性细菌。

细菌 16S rDNA 基因系统进化树(图 1)分析鉴定进一步表明, 从土壤分离的 4 株菌(S1、S2、S3、S4)属于 Firmicutes 厚壁菌门中的 *Bacillus* 芽胞杆菌属, 其同源性分别为 100%、100%、97% 和 100%, 从废水中分离的 2 株菌 W1 和 W2 分别属于 Proteobacteria 变形菌门中的 *Pseudomonas* 假单胞菌属和 *Ochrobactrum* 苍白杆菌属, 其同源性分别为 100% 和 99%。

分离菌株的 7 d 石油降解率如图 2 所示, 各细菌降解率具有显著的差异($P < 0.05$), 从土壤中分离出的芽胞杆菌属 S3 对烷烃和芳烃降解率最高, 分别为 41.3% 和 30.9%, 同时, 除 W1 外, 各菌对烷烃的降解率要高于芳烃的降解率, 这与已有研究报道关于石油烃类的可降解性基本相一致, 即直链烷烃 > 分链烷烃 > 单环芳烃 > 多环芳烃^[2,25]。此外, 单菌石油降解结果还显示, 从中海油污水中分离出的 *Pseudomonas* 假单胞菌属(W1)和 *Ochrobactrum* 苍白杆菌属(W2)对大港油田石油的降解率低于从大港油田土壤中分离出的 *Bacillus* 芽胞杆菌属 S3 和 S4, 这表明, 从石油污染场地中筛选出的内源微生物对本油田石油的降解效果要优于外源物种。

2.2 微生物组的石油降解性能

实验从土壤中筛选出 4 株芽胞杆菌属菌株构建 11 个微生物组进行石油降解, 分析同菌属微生物之

表 1 石油降解菌株的形态和生理生化试验特性

Table 1 Morphologic, physiological and biochemical characteristics of petroleum-degrading microorganisms						
菌株编号	S1	S2	S3	S4	W1	W2
菌落形状	不规则	不规则	基本圆形	不规则	不规则	基本圆形
菌落颜色	浅黄	白色	浅黄	浅黄	灰白色	浅黄
菌落状态	湿润平滑	干燥褶皱	湿润平滑	湿润平滑	湿润平滑	湿润平滑
显微形态	杆状	杆状	杆状	杆状	杆状	杆状
微生物类别	细菌	细菌	细菌	细菌	细菌	细菌
革兰氏染色	阳性	阳性	阳性	阳性	阴性	阴性
芽胞	有	有	有	有	无	无
甲基红试验	+	-	-	-	-	-
淀粉水解	+	+	+	+	-	+
葡萄糖	+	+	-	+	+	+
乳糖	-	-	-	-	-	-
硝酸盐还原	+	+	+	+	+	+
柠檬酸利用	-	+	+	+	/	/
明胶	+	+	+	+	+	-
V-P 试验	+	+	+	+	-	-

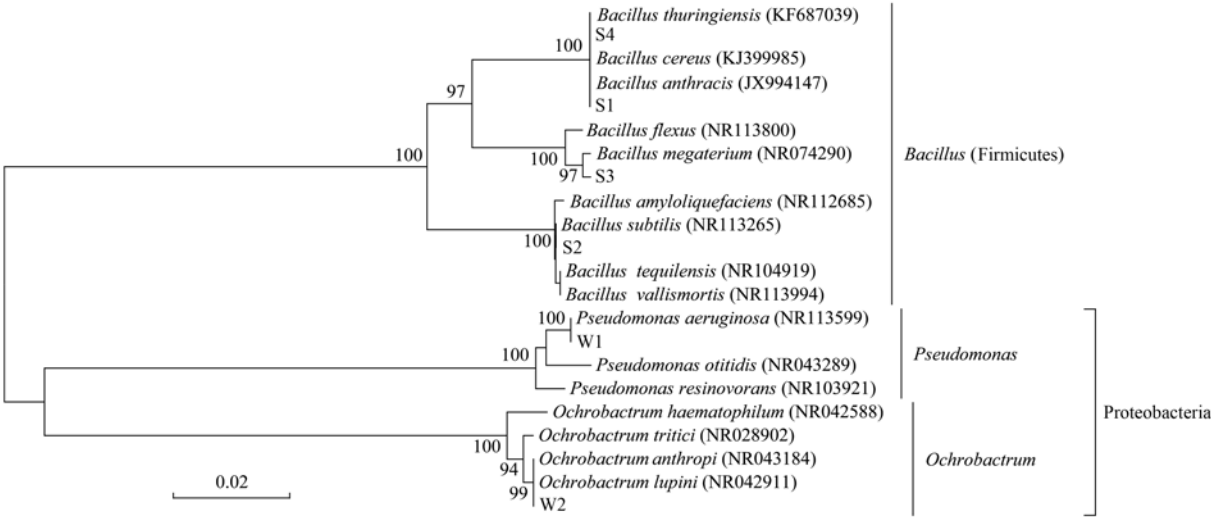


图 1 分离石油降解菌株的 16S rDNA 基因系统进化树

Fig. 1 16S rDNA phylogenetic tree of isolated petroleum-degrading microorganisms

间对石油降解的相互作用,其降解率如图 3 所示.

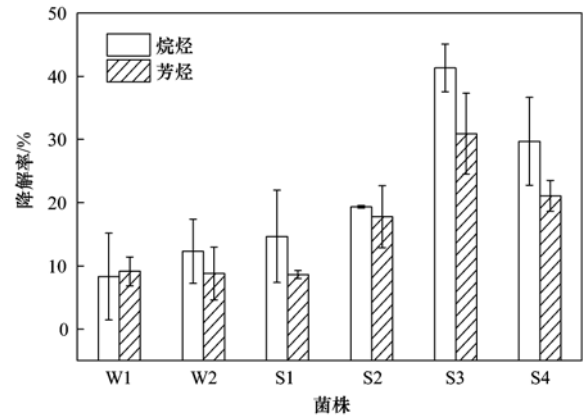


图 2 分离菌株的 7 d 石油降解率

Fig. 2 The 7 days-degradation rates of petroleum by the isolated microorganisms

结果显示即使是同菌属间的微生物组合也具有极显著不同的石油降解率($P < 0.01$),构成的 11 个微生物组对石油降解有着不同的效果. 在 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 原油培养基中,经过 7 d 培养后,由 S1 和 S4 构成的微生物组 F3 具有最高的烷烃 (50.5%) 和芳烃 (54.0%) 降解率,而由 S2 和 S3 构成的微生物组 F4 对烷烃和芳烃的降解率最低,分别为 18.5% 和 18.9%.

如图 4 所示,与构成微生物组中具有最高降解率的单菌相比,微生物组烷烃和芳烃降解有显著增强的分别有 1 个和 5 个,而降解效果显著降低的分别有 7 个和 4 个,其余微生物组对石油的降解没有显著促进和抑制作用. 微生物组 F3(S1 和 S4)对烷烃和芳烃降解的促进效果最高,比单菌(S4)的降解率分别提高了 69.9% 和 156.1%,同时比最优降解

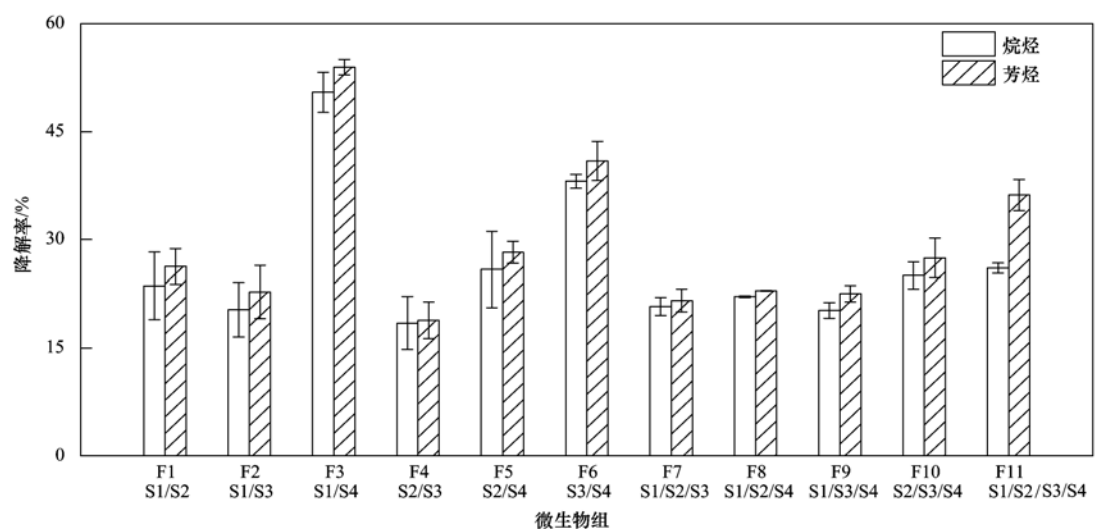


图3 微生物组的 7 天石油降解率
Fig. 3 The 7 days-degradation rates of petroleum by the microbiomes

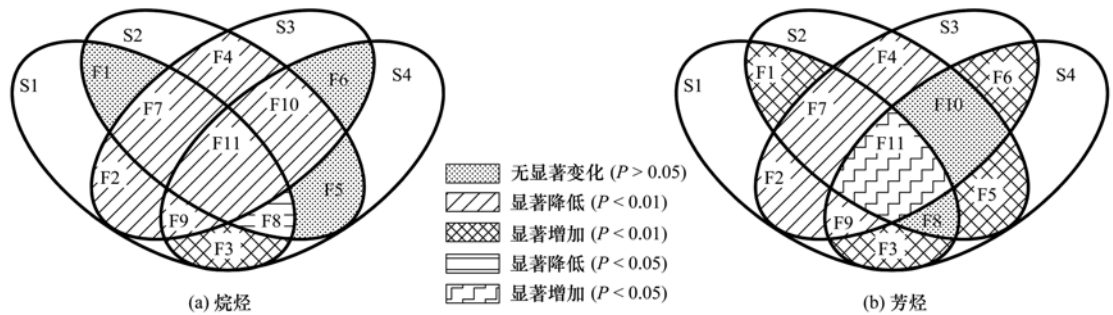


图4 微生物组的石油降解效果 Ven 图
Fig. 4 Ven figure for microbiome degradation efficiency of petroleum

单菌 S3 的降解率也分别高出 22.1% 和 74.6%；微生物组 F4 (S2 和 S3) 对烷烃和芳烃降解的抑制作用最高,比单菌 (S3) 的降解率分别降低了 55.3% 和 39.0%。上述结果表明,同菌属微生物之间对石油的降解同时存在协同促进和抑制作用；同时,尽管大部分微生物组对烷烃的降解表现为抑制作用,而对芳烃降解起抑制和促进作用的微生物组几乎各占一半,但仍然都存在最佳优势微生物组,即通过优化组合后仍可筛选出比最优降解单菌具有更高烷烃和芳烃降解率的微生物组；此外,结果还显示,虽然 S3 具有最高烷烃和芳烃降解率,但是与其他菌组合时并非是具有最高降解率的微生物组。

3 讨论

3.1 单菌降解性能

经过长期的适应和驯化,在受石油污染的环境中存在着许多可以降解石油的微生物,目前已报道发现能够降解石油烃类物质的微生物有 100 多个属 200 多个种^[1],本研究分离出的芽胞杆菌属和假单

胞菌属属于常见石油降解菌属^[26],而 *Ochrobactrum* 苍白杆菌属则鲜有报道,Sayavedra-Soto 等^[27]研究曾发现 *Ochrobactrum* 虽然不能降解烷烃,但是能够形成高细胞聚合体絮凝剂来增加烷烃的捕获从而促进降解,本研究所分离的苍白杆菌属 W2,在 5.0 g·L⁻¹ 原油培养基中,其烷烃和芳烃 7 d 降解率分别为 12.3% 和 8.8%,高于国内现有的报道,李宝明等^[28]从胜利油田石油污染土壤中分离出两株苍白杆菌属,在相同的 5.0 g·L⁻¹ 原油质量浓度下 (28℃、150 r·min⁻¹),其 5 d 石油降解率不到 3%。因此,本研究中筛选的苍白杆菌属 W2 有待做更深入地研究。

单菌降解实验显示,石油场地的内源微生物 (S3 和 S4) 对本土石油的降解率高于外源微生物 (W1 和 W2),这表明在污染土壤的石油老化过程中,微生物的适应驯化使得内源微生物对不同类型石油烃的降解能力跟本地石油烃的组分形成了一定相关性；同时,内源微生物比外源微生物更适应本地场的污染环境,而表现出更高的代谢活性,徐智等^[29]研究显示内源微生物接种剂更有利于堆肥的

快速启动;宋雪英等^[30]研究石油污染土壤生物修复时也发现,外源专性细菌和真菌的加入对矿物油和多环芳烃的降解没有显著的促进效果.因而在实际应用中,从石油污染场地中强化筛选出土著石油降解菌,再返投至污染场地后能够较快地适应原位污染场地的特殊环境,能有效解决菌剂修复周期长适应性差等问题.

3.2 种间微生物的相互影响

由于不同微生物对石油烃具有不同的利用率,以及石油烃类化合物的复杂性,通过组合不同微生物促进石油烃降解已成为石油污染修复的重要手段之一,但是也有部分研究报道发现微生物的相互作用能够抑制石油降解,王丽娟等^[31]曾在研究中发现有些混合菌明显低于各种单菌对石油的降解效果;王鑫等^[32]从石油污染海水中分离出 6 株石油降解菌,发现构建的六元混合菌的降解能力优于单一菌株,对 C_{13} 至 C_{19} 的组分几乎能全部降解,微生物之间表现出明显的协同作用,但是不同的二元混合菌中对柴油降解存在着协同和拮抗作用.

在本研究中,同菌属种间微生物在石油降解过程中表现出复杂的相互关系.在烷烃的降解中[图 4(a)],虽然 S3 具有最高的单菌烷烃降解率,但是 S3 与其他菌之间表现出对烷烃降解的显著抑制作用,如在与 S1/S2/S4 构成微生物组的烷烃降解率中,除了单独与 S4 构建的 F6 没有显著变化外(F6 的烷烃降解率仍略低于 S3,但 $P > 0.05$),其余均出现了极显著地降低($P < 0.01$),尤其 S1 和 S4 构成的微生物组 F3 具有最高烷烃降解率,而当 S3 与 S1 和 S4 共同构成微生物组 F9 后,烷烃降解率从 50.5% 极显著地降低至 20.2%,这表明在 F9 中,3 株同菌属微生物相互之间对烷烃降解的抑制效果要大于协同促进作用(在 F8 中也表现出相似的变化规律).在芳烃降解中[图 4(b)],微生物之间的相互作用表现得更为复杂,例如,由 S3 参与构成的微生物组 F2(S1/S3)、F4(S2/S3)和 F7(S1/S2/S3)对芳烃降解表现出极显著的抑制作用($P < 0.01$),S3 与 S4 组合时对芳烃降解表现出极显著的促进作用($P < 0.01$),而构成的三元微生物组 F9(S1/S3/S4)和 F10(S2/S3/S4)对芳烃降解的促进作用消失,但是当 4 种菌组合在一起时(F11),对芳烃降解又表现为显著的促进作用($P < 0.05$),这表明同菌属不同种间微生物对芳烃降解的抑制和促进作用各不相同;又如,S1/S4 和 S2/S4 均表现为对芳烃降解的促进作用(其中,S1 和 S4 组合后具有最大的芳烃降

解率,即具有最高促进作用),但当 3 种菌组合在一起时对芳烃降解既没有促进作用也没有抑制作用.

在构建的微生物组中,各菌之间对石油的降解并非仅是加和效应,如微生物组 F3(S1 + S4)对芳烃和烷烃的降解率均大于 S1 和 S4 两菌的单独降解率之和,同时其烷烃和芳烃降解率要显著高于其他微生物组,说明两株菌间存在着协同促进作用. S1 和 S4 之间主要存在着促进作用这可能是因为:S1 和 S4 属于同一进化分支,而与 S2 和 S3 分属 3 个不同分支(图 1),这表明亲缘性近的芽胞杆菌属种间微生物相互作用是协同互惠,从而对石油的降解表现出促进效果;而随着物种亲缘性减少(即进化距离增加,在 16S rDNA 系统进化树中表现为不同的分支),微生物之间开始出现拮抗或竞争,对石油的降解效果也表现为抑制作用.有研究发现某些细胞能释放出一种细胞毒素,它们具有很窄的杀菌效果,这种细胞素对协调自然界中微生物的种间相互作用具有重要作用,从而导致了物种相互作用的微妙变化^[33];Gong 等^[34]也曾指出在物种分类属的水平上,相似的外源细菌能够刺激相似的内源细菌,从而促进原油强化或微生物强化石油回收率技术的效果.因此,当构建混合菌降解石油时,在选择芽胞杆菌属的种间微生物过程中,应选择亲缘性近、进化距离小的微生物,才能避免微生物之间抑制作用,达到增强污染修复的效果.

4 结论

(1)研究从石油污染土壤和废水中分离出 6 株具有石油降解能力的细菌,经形态观察、生理生化试验以及 16S rDNA 序列分析鉴定表明,它们分别属于 *Bacillus* 芽胞杆菌属(S1、S2、S3、S4)、*Pseudomonas* 假单胞菌属(W1)和 *Ochrobactrum* 苍白杆菌属(W2),其中,S3 对大港油田原油具有最高的烷烃和芳烃降解率,从废水中分离出的苍白杆菌属 W2 的降解率要高于国内现有报道的降解率.

(2)石油污染场地中筛选出的内源微生物对本油田石油的降解效果要优于外源物种,内源微生物对不同类型石油烃的降解能力跟本场地石油烃的组分具有一定的相关性.

(3)4 株芽胞杆菌属细菌构建微生物组对本场地石油降解实验的结果表明,同菌属微生物种间对石油的降解同时存在协同促进和拮抗抑制作用,亲缘性近的芽胞杆菌属之间对石油降解主要表现为促进作用.

参考文献:

- [1] 王悦明, 王继富, 李鑫, 等. 石油污染土壤微生物修复技术研究进展[J]. 环境工程, 2014, (8): 157-161, 130.
- [2] 周宁一. 石油降解微生物[J]. 微生物学通报, 2013, 40(12): 2335.
- [3] Janbandhu A, Fulekar M H. Biodegradation of phenanthrene using adapted microbial consortium isolated from petrochemical contaminated environment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 187(1-3): 333-340.
- [4] Zhang Z N, Zhou Q X, Peng S W, et al. Remediation of petroleum contaminated soils by joint action of *Pharbitis nil* L. and its microbial community [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5600-5605.
- [5] Natter M, Keevan J, Wang Y, et al. Level and degradation of deepwater horizon spilled oil in coastal marsh sediments and pore-water[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(11): 5744-5755.
- [6] Mikesková H, Novotny C, Svobodová K. Interspecific interactions in mixed microbial cultures in a biodegradation perspective[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 95(4): 861-870.
- [7] Kanaly R A, Harayama S. Advances in the field of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation by bacteria[J]. Microbial Biotechnology, 2010, 3(2): 136-164.
- [8] 韩慧龙, 汤晶, 江皓, 等. 真菌-细菌修复石油污染土壤的协同作用机制研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 189-195.
- [9] Cai Z, Zhou Q X, Peng S W, et al. Promoted biodegradation and microbiological effects of petroleum hydrocarbons by *Impatiens balsamina* L. with strong endurance[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1-3): 731-737.
- [10] Wu M L, Chen L M, Tian Y Q, et al. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by microbial consortia enriched from three soils using two different culture media [J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 152-158.
- [11] Berdugo-Clavijo C, Gieg L M. Conversion of crude oil to methane by a microbial consortium enriched from oil reservoir production waters[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5(9): 74-81.
- [12] 黄艺, 礼晓, 蔡佳亮. 石油污染生物修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 361-367.
- [13] Zhao D F, Liu C S, Liu L H, et al. Selection of functional consortium for crude oil-contaminated soil remediation [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2011, 65(8): 1244-1248.
- [14] 张辉, 李培军, 王桂燕, 等. 固定化混合菌修复油污染地表水体的研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(12): 1613-1617.
- [15] 王志强, 武强, 叶思源, 等. 地下水石油污染高效生物降解研究[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 61-64.
- [16] 赵硕博, 沈嘉澍, 沈标. 复合菌群的构建及其对石油污染土壤修复的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1567-1572.
- [17] Hudcova T, Halecky M, Kozliak E, et al. Aerobic degradation of 2, 4-dinitrotoluene by individual bacterial strains and defined mixed population in submerged cultures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 605-613.
- [18] Lladó S, Gràcia E, Solanas A M, et al. Fungal and bacterial microbial community assessment during bioremediation assays in an aged creosote-polluted soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 67: 114-123.
- [19] McKew B A, Coulon F, Yakimov M M, et al. Efficacy of intervention strategies for bioremediation of crude oil in marine systems and effects on indigenous hydrocarbonoclastic bacteria [J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(6): 1562-1571.
- [20] Serebrennikova M K, Kuyukina M S, Krivoruchko A V, et al. Adaptation of coimmobilized *Rhodococcus* cells to oil hydrocarbons in a column bioreactor [J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2014, 50(3): 265-272.
- [21] Barsing P, Tiwari A, Joshi T, et al. Application of a novel bacterial consortium for mineralization of sulphonated aromatic amines[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 765-771.
- [22] 赵晴, 张甲耀, 陈兰洲, 等. 疏水性石油降解菌细胞表面疏水性及降解特性[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 132-136.
- [23] 周瑜, 柴迎梅, 杜宗军, 等. 海洋石油降解菌的分离、鉴定和与微藻共培养[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 230-233.
- [24] Wang Y Y, Hammes F, Boon N, et al. Quantification of the filterability of freshwater bacteria through 0.45, 0.22, and 0.1 μm pore size filters and shape-dependent enrichment of filterable bacterial communities[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(20): 7080-7086.
- [25] 李习武, 刘志培. 石油烃类的微生物降解[J]. 微生物学报, 2002, 42(6): 764-767.
- [26] 黄磊, 李丹, 谢玉娟, 等. 石油污染海域的微生物群落及烃的降解[J]. 微生物学通报, 2007, 34(2): 339-342.
- [27] Sayavedra-Soto L A, Chang W N, Lin T- K, et al. Alkane utilization by *Rhodococcus* strain NTU-1 alone and in its natural association with *Bacillus fusiformis* L-1 and *Ochrobactrum* sp. [J]. Biotechnology Progress, 2006, 22(5): 1368-1373.
- [28] 李宝明, 阮志勇, 姜瑞波. 石油降解菌的筛选、鉴定及菌群构建[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (3): 68-72.
- [29] 徐智, 张隲利, 张发宝, 等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 856-860.
- [30] 宋雪英, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 石油污染土壤生物修复中外源微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(7): 1168-1173.
- [31] 王丽娟, 王哲, 张翼龙, 等. 土壤中石油降解菌群的构建及其在降解过程的特征分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10834-10836.
- [32] 王鑫, 王学江, 刘免, 等. 高效石油降解菌群构建及降解性能[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 576-579, 597.
- [33] Hawlena H, Bashey F, Lively C M. Bacteriocin-mediated interactions within and between coexisting species[J]. Ecology and Evolution, 2012, 2(10): 2521-2526.
- [34] Gong X C, Liu Z S, Guo P, et al. Bacteria in crude oil survived autoclaving and stimulated differentially by exogenous bacteria [J]. PLoS One, 2012, 7(9): e40842.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 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