

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮	(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健	(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋	(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红	(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军	(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅	(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲	(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵	(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静	(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰	(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅	(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰	(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林	(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷	(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠	(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军	(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻	(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌	(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永	(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴	(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋	(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成	(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青	(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏	(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国	(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红	(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋	(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰	(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅	(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙	(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣	(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪	(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松	(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌	(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州	(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军	(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静	(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟	(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强	(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才	(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红	(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红	(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛	(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩	(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英	(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵	(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰	(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军	(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野	(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰	(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙	(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷	(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥	(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁	(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)	信息(1490,1496,1586,1743)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布

满鹏, 齐鸿雁*, 呼庆, 马安周, 白志辉, 庄国强

(中国科学院生态环境研究中心中科院环境生物技术重点实验室(筹), 北京 100085)

摘要: 利用 Real-time PCR 技术, 分别对非油气田对照区域、未开发油田、未开发气田地表 30、60、100、150、200 cm 深度的甲烷氧化菌、 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌进行定量研究, 目的在于加深对该类型区域烃氧化菌空间分布特征的了解, 为微生物油气勘探技术的发展提供基础资料。结果表明, 气田区域甲烷氧化菌(*pmoA*) 含量为 $1.34E+04 \sim 3.90E+05$ copies·g⁻¹, 并随深度的加深逐渐减少; 油田仅为 $3.14E+02 \sim 4.32E+03$ copies·g⁻¹。100~200 cm 深度, 油田 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌(*alkB*) 含量为 $1.38E+07 \sim 3.61E+07$ copies·g⁻¹, 高于等深度对照 ($4.24E+06 \sim 2.14E+07$ copies·g⁻¹) 和气田区域 ($5.82E+06 \sim 3.52E+07$ copies·g⁻¹)。甲烷氧化菌分布受全氮、有机碳、pH 影响显著, 相关系数分别为 0.859、0.631、-0.549, 而 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌分布受环境因素影响相对较小。100~200 cm 深度范围内, 该区域全氮、有机碳、pH 等理化因素相对稳定, 烃氧化菌含量在不同深度间差异较小。因此, 本研究表明, 气田区域具有明显的甲烷氧化菌异常, 油田在 100 cm 以下深度具有一定的 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌异常; 100~200 cm 更适于作为统一取样深度进行大范围定量调查, 但仍需要进一步的验证。

关键词: 未开发油气田; Real-time PCR; 甲烷氧化菌; *pmoA*; $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌; *alkB*

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1663-07

Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields

MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, MA An-zhou, BAI Zhi-hui, ZHUANG Guo-qiang

(Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Spatial quantitative distribution of methanotrophs and C_5 - C_{16} hydrocarbon-oxidizing bacteria of different depths (30, 60, 100, 150, 200 cm) from the unexploited oilfield, gas field and control area was studied using Real-time PCR. The objectives of this study were to understand the quantitative distribution of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the regions of unexploited oil and gas fields, and provide basic information for the development of oil and gas exploration techniques. The results showed that the gas field area had higher content of methanotrophs (*pmoA*), $1.34E+04 \sim 3.90E+05$ copies·g⁻¹, and the copies of *pmoA* decreased with depths. Compared with that in the gas field, it was lower with only $3.14E+02 \sim 4.32E+03$ copies·g⁻¹ in the oilfield. Remarkably, the oilfield had a relatively higher content of C_5 - C_{16} hydrocarbon-oxidizing bacteria (*alkB*) with $1.38E+07 \sim 3.61E+07$ copies·g⁻¹ soil below the depth of 100 cm than that in the gas field ($5.82E+06 \sim 3.52E+07$ copies·g⁻¹) and the control area ($4.24E+06 \sim 2.14E+07$ copies·g⁻¹). The distribution of methanotrophs was significantly affected by the total nitrogen, organic carbon, pH with correlation coefficients were 0.859, 0.631 and -0.549 respectively. Within the depth of 100-200 cm, where physicochemical properties such as total nitrogen, organic carbon, pH were relatively stable, the content of methanotrophs and C_5 - C_{16} hydrocarbon-oxidizing bacteria at different depths varied little. Furthermore, there was indeed abnormal methanotrophs in the gas field and abnormal C_5 - C_{16} hydrocarbon-oxidizing bacteria in the oilfield below the depth of 100 cm. Besides 100-200 cm was more suitable as the oil-gas exploration sampling depth in this study which also required further validation.

Key words: unexploited oil and gas fields; Real-time PCR; methanotroph; *pmoA*; C_5 - C_{16} hydrocarbon-oxidizing bacteria; *alkB*

在地壳压力的驱动下, 油气藏中的轻烃($C_1 \sim C_5$)^[1]、挥发性或半挥发性高分子量烃(如 $C_5 \sim C_{16}$)^[2]持续的向地表扩散和渗漏, 土壤中的专性微生物以该类烃为唯一能源, 在油气藏地表形成微生物异常, 通过检测微生物异常即可推断出该区域油气资源的分布^[3-6]。其中, MPOG (microbial prospection for oil and gas) 技术通过检测土壤深度 150 cm 处的甲烷氧化菌、 $C_2 \sim C_8$ 烃氧化菌的异常来分析供试地区的油气分布^[2,5]。MOST (microbial oil

survey technique) 则通过分析土壤深度 20 cm 处的丁烷氧化菌异常来探测地表轻烃渗漏^[2,5]。但这些微生物勘探技术主要建立在直接培养法的基础上。直接培养法难以准确全面地揭示特定状态下的微生物定量分布^[7]。分子生物学方法, 如 Real-time PCR

收稿日期: 2011-07-06; 修订日期: 2011-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(20977106); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-YW-06-03)

作者简介: 满鹏(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物分子生态学, E-mail: pengman_st@rcees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: qihy@rcees.ac.cn

技术,可以较好的解决直接培养法的不足^[8]。

此外,在油气田开采之后,其地表的烃渗漏将严重减弱,进而影响微生物分布^[9~12]。目前,相关的研究主要集中在已污染或已开采油气田^[8, 13~15],针对未开采油气田的研究十分匮乏。

因此,本研究的创新及目的在于利用 Real-time PCR 技术,分析未开发油气田地地表土壤烃氧化菌(甲烷氧化菌、C₅~C₁₆烃氧化菌)的定量分布,用以进一步加深对该类型区域特定种类烃氧化菌空间立体分布特征的了解,以期为微生物油气勘探技术的发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样

样品采自胜利油田附近的某一小型未开采油气田(117°45'E~118°21'E, 37°34'N~38°11'N),紧邻渤海以及黄河三角洲,属温带季风型大陆性气候。土壤类型滨海潮土(滨海盐化潮土),土壤养分含量低、保水保肥性能差,pH 约为 8.7,地表植被较少,主要为棉花、枣树等耐盐碱植物。在前期的油气勘探中,通过一系列物理、化学方法已经确认该地区油气资源的存在,并进行了准确的区域划分。同时确认该区域并未出现石油污染或泄漏,区域内没有其他石油烃来源,且人为影响较小。取样时,依据地下油气资源的分布共设置 3 个区域:未开发油田、气田以及非油气田对照区域,三者彼此间距约为 2 km,并在纵向剖面上对于每个区域进行不同深度的取样,包括 30、60、100、150、200 cm。每个点进行 3 次重复(彼此间隔 1 m),并将 3 次所得土样充分混匀。土样获得后置于冰上,立即转移至实验室-20℃保存。

1.2 土壤理化性质测定

采用相应方法^[16,17]分别测定所采集土壤样品的理化指标,包括全氮、有机碳、有效磷、有效钾、水溶 SO₄²⁻、pH 等。

1.3 总 DNA 提取与 PCR 扩增

称取 0.5 g 土样,利用 FastDNA SPIN Kit for Soil (MP Biomedicals)试剂盒提取总 DNA。随后利用 Nanodrop® ND-1000 UV-Vis Spectrophotometer (NanoDrop Technologies)对获取的总 DNA 进行浓度和纯度检测。

1.4 Real-time PCR

定量 PCR 反应在 Mx3005P QPCR Systems (Stratagene)仪器上进行,以 1.3 节提取的总 DNA 为模板。所用试剂为 SYBR® Premix Ex Taq™

(Fermentas),试剂使用方法及含量参照说明书。*pmoA* 基因被广泛的运用于环境样品中甲烷氧化菌的检测与定量^[18, 20~24]。在 *pmoA* 定量过程中,所采用的引物为 A189f (5'-GGN GAC TGG GAC TTC TGG-3')和 mb661R (5'-CCG GMG CAA CGT CYT TAC C-3')^[18]。以 uncultured bacterium clone M-5 *pmoA* gene (GQ906777)为标准品构建标准曲线。Real-time PCR 所用程序为:95℃ 10 min,随后 95℃ 变性 20 s,57℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 35 s,重复该循环 40 次,并在退火阶段末端收集信号。对 C₅~C₁₆ 烃氧化菌的定量主要依靠 *alkB* 基因^[19, 26~28],引物分别为 *alkBFd* (5'-AAC TAC MTC GAR CAY TAC GG-3')和 *alkBRd* (5'-TGA MGA TGT GGT YRC TGT TCC-3')^[19]。以 *Salinisphaeraceae* bacterium PC39 alkane monooxygenase (*alkB*) gene (GU596486)为标准品。检测程序为:95℃ 10 min,随后 95℃ 变性 20 s,52℃ 退火 30 s,72℃ 延伸 20 s,重复该循环 40 次,并在退火末端收集信号。利用 MxPro QPCR Software (Version 4.1)分析定量结果。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

所取样品土壤理化性质如表 1 所示。各区域 pH (8.31~9.09)偏碱性。浅层(30~100 cm)区域 pH 随深度变化较大,150~200 cm 深度相对稳定。在 150~200 cm 深度,对照和气田区域 pH 平均值约为 8.80,油田区域约为 8.50。气田 30 cm 处全氮含量远高于其他采样点,剩余区域相差不大,维持在 0.126~0.695 g·kg⁻¹。统计分析显示,在该研究区域所涉及的 6 个养分及环境指标中,除水溶 SO₄²⁻(区域间, $P=0.017$)、有效磷(区域间, $P=0.025$)有显著差异外,其余指标在不同区域不同深度间差异并不显著。

2.2 总 DNA 提取

使用 FastDNA SPIN Kit for Soil 提取总 DNA,经琼脂糖电泳得到的片段长度约为 15 kb。此外,利用 Nanodrop® ND-1000 UV-Vis Spectrophotometer (NanoDrop Technologies)对获取的总 DNA 进行检测,各样品总 DNA 浓度(以新鲜土壤计)维持在 2~7 μg·g⁻¹,且纯度较高,可直接用于 PCR 扩增。

2.3 甲烷氧化菌(*pmoA*)

pmoA 基因 Real-time PCR 扩增结果显示,Eff. = 98.3%,RSq:0.999。本研究区域甲烷氧化菌分布如图 1 所示,*pmoA* 含量在不同区域($P=0.049$)不同

表 1 土壤样品理化性质							
Table 1 Physical and chemical properties of soil samples							
采样区域	深度 /cm	全氮 /g·kg ⁻¹	有机碳 /g·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	有效钾 /mg·kg ⁻¹	水溶 SO ₄ ²⁻ /mg·kg ⁻¹	pH
对照	30	0.616	5.73	3.12	194	633	8.47
	60	0.274	4.02	3.10	150	285	9.08
	100	0.398	2.91	3.02	94	338	9.09
	150	0.536	4.58	7.14	400	609	8.77
	200	0.422	5.79	7.40	401	584	8.87
油田	30	0.160	1.64	4.28	94	467	8.54
	60	0.171	2.06	5.00	100	399	8.62
	100	0.695	4.68	5.40	271	369	8.52
	150	0.239	2.73	4.34	89	353	8.49
	200	0.126	1.68	5.08	132	338	8.50
气田	30	5.930	6.61	1.84	148	336	8.31
	60	0.741	5.50	2.18	170	321	8.38
	100	0.456	4.62	2.46	172	169	8.97
	150	0.695	4.36	2.30	138	216	8.78
	200	0.182	1.38	1.76	75	145	8.77

深度间 ($P=0.022$) 差异显著. 在对照区域, *pmoA* 随深度加深不断减少, 30 cm 处含量达 $2.12\text{E}+05$ copies·g⁻¹, 随后 60 cm 处降至 $2.36\text{E}+04$ copies·g⁻¹, 100~200 cm 稳定在 $6.66\text{E}+03 \sim 1.40\text{E}+03$ copies·g⁻¹. 在油田区域, *pmoA* 含量很小, 仅为 $3.41\text{E}+02 \sim 4.32\text{E}+03$ copies·g⁻¹, 随深度的加深呈“Λ”型分布, 不同深度间差异较小, 最大值位于 100 cm 处, 200 cm 最小. 气田区域 *pmoA* 含量远高于油田和对照区域, 30 cm 处达 $3.90\text{E}+05$ copies·g⁻¹, 并随深度的加深逐渐减少, 依次为 $1.55\text{E}+05$ 、 $2.16\text{E}+04$ 、 $1.34\text{E}+04$ 、 $1.60\text{E}+04$ copies·g⁻¹, 在 100 cm 以下深度相对稳定.

从深度角度, 30~60 cm [如图 1(a)] 处 *pmoA* 含量相对较大(对照、气田), 100 cm 及其以下深度 [如图 1(b)] 相对较小, 并且相对于浅层区域其 *pmoA* 含量相对稳定. 这与含 *pmoA* 的甲烷氧化菌的好氧特性

密切相关^[25]. 油田区域检测结果并不符合这一分布特性, 特别是在 30~60 cm 深度, *pmoA* 含量很小, 但在 100 cm 以下深度与对照区域基本一致.

总之, 在本研究区域, 油气田区域确实存在着明显的 *pmoA* (甲烷氧化菌) 数量异常. 气田区域 *pmoA* 含量在所有深度均远高于等深度其他区域, 并随深度的加深而减少, 在 100 cm 以下深度相对稳定. 油田区域 *pmoA* 含量较小, 整体随深度呈“Λ”型分布, 在 30~60 cm 深度相对于对照区域明显偏低, 其原因有待进一步检验, 最大值位于 100~150 cm 深度, 并在该范围内相对稳定. 在深度上, 依据现有数据, 30~60 cm 深度不仅存在气田 *pmoA* 含量的增大异常, 同样也存在油田相对于对照区域的减小异常. 所有区域 100~200 cm 深度 *pmoA* 含量相对稳定, 深度间差异并不显著 ($P=0.058$), 而区域间差异极其显著 ($P=0.001$).

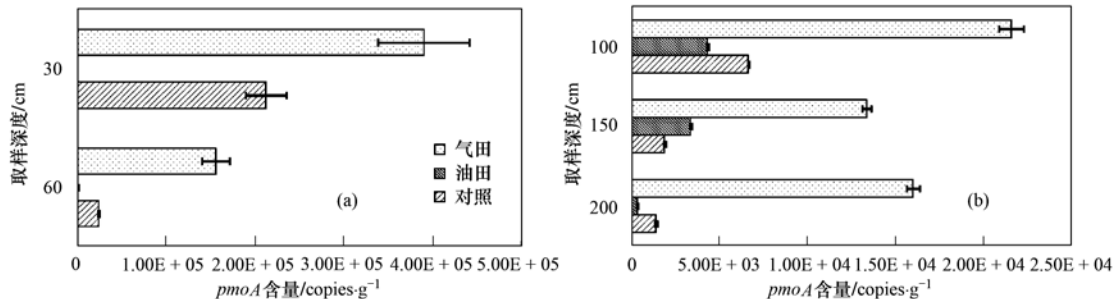


图 1 *pmoA* 在各区域不同土壤深度的分布

Fig. 1 Distribution of *pmoA* in different depths

2.4 C₅~C₁₆烃氧化菌(*alkB*)

alkB 基因 Real-time PCR 扩增结果显示, Eff. =

98.5%, RSq:0.993. 本区域 *alkB* 分布如图 2 所示. *alkB* 在各个区域内随深度具有不同的分布趋势, 并

没有太大的规律性或相似性. 对照区域, *alkB* 在浅层和深层的分布相差很大, 60 cm 处含量最大 $1.15\text{E} + 08 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, 30 cm 和 100 cm 分别为 $1.98\text{E} + 07$ 、 $2.14\text{E} + 07 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, 150 cm 和 200 cm 的深层较小. 油田 *alkB* 分布与 *pmoA* 一致, 呈“ $\wedge$ ”型, 拐点最大值位于 100 cm, 其余各深度含量相差不大. 气田 *alkB* 含量随深度变化剧烈, 不同深度间差异明显, 60 cm、150 cm 处相对较大, 其余深度相对较小.

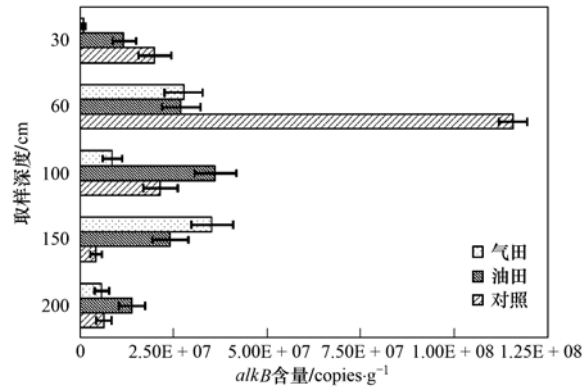


图2 *alkB* 在各区域不同土壤深度的分布
Fig. 2 Distribution of *alkB* in different depths

在不同的深度范围内, *alkB* 在各区域各深度并没有 *pmoA* 一样明显的类型分布, 也没有太大的规律性或相似性. 30 cm 处, 气田 *alkB* 含量最小, 对照区域最大. 60 cm 处, 对照区域 *alkB* 含量依旧最大, 达到 $1.15\text{E} + 08 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, 气田和油田含量基本一致. 100 cm 处油田含量最大, 气田最小. 150 cm 处, 气田含量升至最大, 相对于 100 cm 处的最小值有明显改变; 其次为油田. 200 cm 处, 整体含量偏低, 油田出现最大值. 总之, *alkB* 在各区域各深度并没有 *pmoA* 一样明显的类型分布. 在 100 cm 以下深度, 油田的 *alkB* 含量相对较高, 而在 100 cm 以上深度, 对照区域 *alkB* 含量较高. 此外, SPSS 统计分析显示, 区域间差异显著性 $P = 0.577$, 深度间差异显著性 $P = 0.258$, 表明两因素对 *alkB* 分布影响并不显著.

2.5 烃氧化菌与环境因子相关性

烃氧化菌含量与各环境影响因素之间的相关系数如表 2 所示. 该研究区域定量检测中, 全氮、有机碳、pH 与 *pmoA* 含量分布相关性显著或极其显著. 其中全氮、有机碳与 *pmoA* 呈正相关, pH 呈负相关. 表明该区域甲烷氧化菌分布受外界环境影响较大.

此外, 统计分析显示, 在该研究区域所涉及的 6 个营养及环境指标中, 除水溶 SO_4^{2-} (区域间, $P = 0.017$)、有效磷(区域间, $P = 0.025$)有显著差异外,

其余指标在不同区域不同深度间差异并不显著. 表明在该区域 *pmoA* 含量受 6 个环境指标影响相对较小, 有利于更为直接的反映出地底油气资源分布.

表2 烃氧化菌含量与各影响因素之间的相关系数¹⁾
Table 2 Correlation coefficient between various factors and the content of hydrocarbon-oxidizing bacteria

相关系数	全氮	有机碳	有效磷	有效钾	水溶 SO_4^{2-}	pH
<i>pmoA</i>	0.859 **	0.631 *	-0.465	-0.061	0.098	-0.549 *
<i>alkB</i>	-0.225	-0.005	-0.148	-0.152	-0.208	0.365

1) * 表示通过置信度为 0.05 的相关性检验, 即 2 个变量显著相关; *
* 表示通过置信度为 0.01 的相关性检验, 即 2 个变量高度显著相关

3 讨论

3.1 外界环境因子相关性

在本研究区域, 全氮、有机碳、pH 与 *pmoA* 含量分布相关性显著或极其显著, 表明该区域甲烷氧化菌分布受外界环境影响较大. 而 *alkB* 含量与所检测的 6 个环境因素并未表现出明显相关性. 但在类似研究中, 向廷生等^[13] 认为在一定范围内土壤湿度、pH(8.0 ~ 8.3) 对甲烷氧化菌的数量和活性没有影响. 郭敏等^[29] 的研究则显示, 甲烷氧化菌的生长还受到养分状况、湿度、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量以及土壤 pH 值的显著影响. 综合各方面研究结果, 本研究认为在定量检测过程中, 必须充分考虑相关环境因素的影响, 包括全氮、有机碳、pH、土壤湿度等.

3.2 横向分析

通过 Real-time PCR 的方法, 分别对各个区域甲烷氧化菌、 $\text{C}_5 \sim \text{C}_{16}$ 烃氧化菌的定量分布进行研究, 从而进一步加深对未开发油气田地表烃氧化菌定量分布特性的了解, 探索油气田的特有属性, 为后续研究奠定基础.

油田区域甲烷氧化菌含量较低, 随深度呈“ $\wedge$ ”型分布, 不同深度间差异较小. 在 30 ~ 60 cm 的浅层, 其含量甚至远低于对照区域. 表明该油田可能并不存在气帽结构, 即地底液态原油上方并不存在大量主成分为甲烷的气态烃成分, 或受油田区域其他上溢成分(长链烷烃、芳香烃等)及其氧化降解菌的影响, 抑制了该区域甲烷氧化菌的生长代谢. 这种现象在前人研究中并未提及, 尚需进一步验证. 同时, 也不排除对照区域 30 ~ 60 cm 处 *pmoA* 含量存在假阳性的风险, 即其甲烷来源为生物产甲烷. 在 100 cm 以下深度, 油田甲烷氧化菌含量与对照区域基本一致, 远低于气田. $\text{C}_5 \sim \text{C}_{16}$ 烃氧化菌随深度同样呈“ $\wedge$ ”型分布, 最大值位于 100 cm 处. 定量结果显示, 油田在 100 cm 以下深度 *alkB* 含量高于对照及

气田,表现出了一定的油气关联性,但在 100 cm 以上深度低于对照区域. 可能在于 *alkB* 仅仅是油气渗漏相关烃的降解功能基因中的一种,*alkB* 的含量和分布并不能全面的反映出该区域的油气渗漏烃降解菌分布状况,需要将其他的相关功能基因与 *alkB* 相互结合或叠加. Powell 等^[19]利用 *alkB* 对柴油(主要成分是含 9 ~ 18 个碳原子的链烷、环烷或芳烃)污染区域的烷烃降解菌进行了定量,结果显示 *alkB* 含量与土壤中的正构烷烃浓度成正比. 总之,针对本研究所涉及的未开发油田,其甲烷氧化菌含量较低,特别是在 30 ~ 60 cm 深度,而 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌在 100 cm 以下深度较高,表现出了一定的油气相关性.

气田区域 *pmoA* 含量在所有深度均远高于相同深度的其他区域,并随深度的加深逐渐减少,与孔淑琼等^[15]的研究结果相似,具有明显的甲烷氧化菌含量异常. 相对于其他区域,气田 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌(*alkB*) 在 150 cm 处含量较大,30、100、200 cm 处含量很小,并且随深度分布变化剧烈,缺乏明显的规律性,其原因有待于进一步检验. 总之,在本研究所涉及的未开发气田,其甲烷氧化菌含量明显偏高, $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌含量相对较小,并且随深度变化显著.

因此,横向分析显示,油气田区域存在明显的甲烷氧化菌异常,油田区域具有一定程度的 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌异常. 再进一步大范围取样反复验证的基础上,可以利用 Real-time PCR 方法检测这种含量异常,从而间接反映地底油气资源的存在,为初期勘探提供廉价有效的帮助.

3.3 纵向分析

在微生物油气勘探中,不同的勘探方法设置了不同的取样深度,如 20 cm^[5]、10 ~ 50 cm^[6]、150 cm^[2]等. 很少有研究涉及不同取样深度下微生物的定量分布. 因此,分别对各个区域不同深度的甲烷氧化菌、 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌定量分布进行研究,从而进一步了解深度因素对未开发油气田地表烃氧化菌定量分布的影响.

30 ~ 60 cm 深度范围内,除油田外,气田和对照区域甲烷氧化菌及 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌含量随深度变化明显. 对于甲烷氧化菌,气田和对照区域 30 cm 处含量远高于 60 cm 深度,这与含 *pmoA* 的甲烷氧化菌的好氧特性密切相关^[25]. 而 $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌在 60 cm 处的含量高于 30 cm,其原因有待于进一步检验. 对于对照区域 60 cm 处突然出现的最大值,可能是与该点的某些特殊理化或环境因素相关,不排除

其偶然性,这也表明在进行 *alkB* 定量时也许会有一些假阳性,需要多点重复取样,反复验证.

100 ~ 200 cm 深度,所有区域内 *pmoA* 含量相对稳定,深度间差异并不显著($P = 0.058$),而区域间差异极其显著($P = 0.001$). 气田 *pmoA* 含量显著降低,由 $1.00E + 05 \text{ copies} \cdot g^{-1}$ 降至 $1.00E + 04 \text{ copies} \cdot g^{-1}$,依旧远高于等深度其他区域. 对照区域则降至 $1.00E + 03 \text{ copies} \cdot g^{-1}$,与油田区域含量基本一致. $C_5 \sim C_{16}$ 烃氧化菌在 100 ~ 200 cm 深度的分布表现出了一定的油田相关性——油田 *alkB* 含量相对较高,符合其中的部分理论推断^[2, 5, 6, 30]. 同时在不同的深度也存在着某些特有属性,如 150 cm 处气田区域 *alkB* 含量高于油田和对照,而在其他深度均低于油田和对照.

总之,各个深度都表现出了各自的烃氧化菌定量分布特性. 这些分布特性与油气资源间的相关性还有待于进一步研究.

Zhang 等^[8]利用 RT-PCR 技术研究了大港油田板 876 储气库地表甲烷氧化菌含量随深度分布,结果显示在 150 cm 处甲烷氧化菌具有最好的生长和代谢活性. Wagner 等^[2]在欧洲地区油田做的深度实验表明,地表下 1.5 m 左右,是烃氧化菌生长的有利区,避免了各种理化和人为影响因素的干扰. 在实际取样时,还需根据实际的地形和地下对取样深度进行适当调整. 中国科学院菌种保藏委员会(中国科学院微生物研究所)^[31]在早期微生物油气勘探工作中进行过土样采集深度的实验,认为 1.5 m 的层位取样可以避免地表原油或沥青污染、植物根系、农田耕种等人为因素,以及有机质在厌氧条件下分解而产生的影响. 深度太浅时受地表影响太大,微生物的分布规律很不稳定,难以获得可靠的油、气烃氧化菌分布规律.

而在本研究区域,全氮、有机碳、有效磷、有效钾、pH、水溶 SO_4^{2-} 等土壤理化因素在 100 ~ 200 cm 深度范围内相对稳定,受外界影响较小. 而在大范围取样过程中,笔者很难保证影响烃氧化菌分布的各个因素在浅层区域都得到有效控制,所得结果代表性和准确性较差. 因此,依据本研究对象所得结果,从取样深度角度考虑,在针对未开发油气田地表烃氧化菌定量分布研究时,100 ~ 200 cm 更适于作为统一取样深度进行大范围定量调查,从而确定其中的油气相关性.

4 结论

(1) 该研究区域,全氮、有机碳与 *pmoA* 呈正相

关,pH 与 *pmoA* 呈负相关. 表明该区域甲烷氧化菌分布受外界环境影响较大. 而 *alkB* 含量与各环境因素并未表现出明显相关性.

(2) 横向分析显示, 油田区域甲烷氧化菌含量较低, 特别是在 30 ~ 60 cm 的浅层, 在 100 cm 以下深度 $C_5 \sim C_{16}$ 烷氧化菌含量较高; 气田甲烷氧化菌含量明显偏高, $C_5 \sim C_{16}$ 烷氧化菌含量相对较小.

(3) 纵向分析显示, 甲烷氧化菌、 $C_5 \sim C_{16}$ 烷氧化菌含量随土壤深度变化明显, 并在各区域显示出不同的分布特性. 30 ~ 60 cm 深度, 各区域内不同深度间甲烷氧化菌、 $C_5 \sim C_{16}$ 烷氧化菌差异显著, 而在 100 ~ 200 cm 则相对稳定.

(4) 100 ~ 200 cm 深度范围内, 该区域全氮、有机碳、pH 等理化因素相对稳定, 烷氧化菌含量在不同深度间差异较小, 表现出了更强的稳定性和油气相关性. 因此, 依据本研究对象所得结果, 100 ~ 200 cm 更适于作为统一取样深度进行大范围定量调查, 但仍需要进一步的大范围取样验证.

参考文献:

- [1] Rasheed M A, Prasanna M V, Kumar T S, *et al.* Geo-microbial prospecting method for hydrocarbon exploration in Vengannapalli Village, Cuddapah Basin, India[J]. *Current Science*, 2008, **95** (3): 361-366.
- [2] Wagner M, Piske J, Smit R. Case histories of microbial prospecting for oil and gas, onshore and offshore in northwest Europe[A]. In: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology. Surface exploration case histories: applications of geochemistry, magnetics, and remote sensing [C]. Okla: American Association of Petroleum Geologists, 2002. 453-479.
- [3] 赵邦六, 何展翔, 文百红. 非地震直接油气检测技术及其勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2005, **10**(6): 29-37.
- [4] 吴传芝. 微生物油气勘探技术及其应用[J]. *天然气地球科学*, 2005, **16**(1): 82-87.
- [5] Schumacher D. Surface geochemical exploration for petroleum [A]. In: American Association of Petroleum Geologists. Exploring for oil and gas traps[C]. Okla: American Association of Petroleum Geologists, 1999. 1-18.
- [6] Hatton R, Sleat R, Sleat R, *et al.* Detecting the presence of a hydrocarbon deposit in a geographical location by detecting the presence, at the location, or a target polynucleotide encoding a protein capable of metabolizing a hydrocarbon [P]. Great Britain: GB2451287-A, 2009-01-28.
- [7] Amann R I, Ludwig W, Schleifer K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1995, **59**(1): 143-169.
- [8] Zhang F, She Y H, Zheng Y, *et al.* Molecular biologic techniques applied to the microbial prospecting of oil and gas in the Ban 876 gas and oil field in China[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **86**(4): 1183-1194.
- [9] Schumacher D, Abrams M A. Hydrocarbon migration and its near-surface expression [A]. In: American Association of Petroleum Geologists. American Association of Petroleum Geologists Memoir [C]. Okla: American Association of Petroleum Geologists, 1996. 1-27.
- [10] Klusman R W, Saeed M A. Comparison of light hydrocarbon microseepage mechanisms [A]. In: AAPG Hedberg Research Conference. Hydrocarbon migration and its near-surface expression [C]. Okla: American Association of Petroleum Geologists, 1994. 157-445.
- [11] Ishido T, Goko K, Adachi M, *et al.* System integration of various geophysical measurements for reservoir monitoring [A]. In: World Geothermal Congress. Proceedings of World Geothermal Congress [C]. Turkey: World Geothermal Congress, 2005. 1-10.
- [12] Hitzman D. Detailed hydrocarbon microseepage surveys map reservoir heterogeneities and identify by-passed compartments [A]. In: American Association of Petroleum Geologists Hedberg Research Conference. Applications of reservoir fluid geochemistry [C]. Colorado: American Association of Petroleum Geologists, 2010. 1-2.
- [13] 向廷生, 周俊初, 袁志华. 利用地表甲烷氧化菌异常勘探天然气藏[J]. *天然气工业*, 2005, **25**(3): 41-43.
- [14] 王君, 马挺, 刘静, 等. 利用 PCR-DGGE 技术指导高温油藏中功能微生物的分离 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 462-468.
- [15] 孔淑琼, 黄晓武, 李斌, 等. 天然气库土壤中细菌及甲烷氧化菌的数量分布特性研究 [J]. *长江大学学报 (自科版) 理工卷*, 2009, **6**(3): 56-69.
- [16] 陈健. 用 BIOLOG 技术研究高度集约化农业条件下土壤微生物群落及其方法学进展 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2008. 17-29.
- [17] 黄武仁. 有机农业土壤质量与微生物群落结构相关性研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2011. 35-46.
- [18] Bourne D G, McDonald I R, Murrell J C. Comparison of *pmoA* PCR primer sets as tools for investigating methanotroph diversity in three Danish soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(9): 3802-3809.
- [19] Powell S M, Ferguson S H, Bowman J P, *et al.* Using real-time PCR to assess changes in the hydrocarbon-degrading microbial community in Antarctic soil during bioremediation [J]. *Microbial Ecology*, 2006, **52**(3): 523-532.
- [20] Kolb S, Knief C, Stubner S, *et al.* Quantitative detection of methanotrophs in soil by novel *pmoA*-targeted real-time PCR assays [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69** (5): 2423-2429.
- [21] Rastogi G, Ranade D R, Yeole T Y, *et al.* Novel methanotroph diversity evidenced by molecular characterization of particulate methane monooxygenase A (*pmoA*) genes in a biogas reactor [J]. *Microbiological Research*, 2009, **164**(5): 536-544.

- [22] 韩冰, 苏涛, 李信, 等. 甲烷氧化菌及甲烷单加氧酶的研究进展[J]. 生物工程学报, 2008, **24**(9): 1511-1519.
- [23] 杨芊葆, 范分良, 王万雄, 等. 长期不同施肥对暗棕壤甲烷氧化菌群落特征与功能的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2756-2762.
- [24] 孙寓姣, 左剑恶, 邢薇, 等. 高效厌氧产甲烷颗粒污泥微生物多样性及定量研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2354-2357.
- [25] McDonald I R, Bodrossy L, Chen Y, *et al.* Molecular ecology techniques for the study of aerobic methanotrophs[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(5): 1305-1315.
- [26] Schulz S, Pérez-de-Mora A, Engel M, *et al.* A comparative study of most probable number (MPN)-PCR vs. real-time-PCR for the measurement of abundance and assessment of diversity of *alkB* homologous genes in soil[J]. Journal of Microbiological Methods, 2010, **80**(3): 295-298.
- [27] Van Beilen J B, Funhoff E G. Alkane hydroxylases involved in microbial alkane degradation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **74**(1): 13-21.
- [28] Kloos K, Munch J C, Schlöter M. A new method for the detection of alkane-monoxygenase homologous genes (*alkB*) in soils based on PCR-hybridization[J]. Journal of Microbiological Methods, 2006, **66**(3): 486-496.
- [29] 郭敏, 何晶晶, 吕凡, 等. 垃圾填埋场覆土层 II 型甲烷氧化菌的群落结构[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(6): 536-541.
- [30] Alberto C, Renzo C, Dario F, *et al.* Encyclopaedia of hydrocarbons[M]. Rome: Istituto Della Enciclopedia Italiana, 2005. 271-298.
- [31] 王修垣. 石油微生物学在中国科学院微生物研究所的发展[J]. 微生物学通报, 2008, **35**(12): 1851-1861.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人