

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 谢元博, 陈娟, 李巍 (1)

长白山 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)

青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响 柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)

重庆市大气二噁英污染水平及季节变化 张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)

西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放 卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)

西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放 张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)

杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征 蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)

模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究 符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)

川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化 童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)

重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)

汉江上游金水河流域氮湿沉降 王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)

麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)

兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究 吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)

中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究 马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)

水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO₂ 释放的影响 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)

黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征 吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)

浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价 马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)

POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测 张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)

降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义 陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师阳 (123)

锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素 唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)

子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征 赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)

水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响 宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)

黄东海表层沉积物中磷的分布特征 宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)

河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究 张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制 武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)

三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析 敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)

太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)

滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究 王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术 王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)

光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究 王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)

同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)

垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究 孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)

油田区土壤石油烃组分残留特性研究 胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)

水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态 谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)

土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)

水稻土团聚体 Cu²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化 许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)

Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响 刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)

淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌侵染 2 种湿地植物的影响 马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)

太湖水质与水生生物健康的关联性初探 周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)

3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较 姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)

某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究 杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)

异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响 胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)

Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价 王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)

基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)

微囊藻毒素降解菌 *Paucibacter* sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性 游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)

硝酸盐抑制油田采出水中硫酸盐还原菌活性研究 杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)

降解纤维素产甲烷的四菌复合系 吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)

中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)

内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究 史晶晶, 耿元波 (341)

南京河流夏季水-气界面 N₂O 排放通量 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)

杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响 肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)

生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究 彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)

不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究 卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)

硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用 严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)

县域尺度的京津冀都市圈 CO₂ 排放时空演变特征 汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)

保水剂性能及其农用安全性评价研究进展 李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

《环境科学》征订启事 (65) 《环境科学》征稿简则 (220) 信息 (226, 270, 298, 364)

浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术

王春艳^{1,2,3}, 史晓凤³, 李文东³, 张金亮¹

(1. 北京师范大学资源环境学院, 北京 100875; 2. 潍坊学院物理与电子科学学院, 潍坊 261061; 3. 中国海洋大学光学光电实验室, 青岛 266100)

摘要: 溢油事故的频繁发生对海洋环境造成极大的影响, 建立一种快速、准确、经济的现场溢油检测技术及时对事故作出响应有着重要的意义. 针对海洋环境中溢油样品浓度和油源都未知的情况, 对于溢油可疑样本, 获取其浓度参量同步荧光光谱 (concentration-synchronous-matrix fluorescence, CSMF), 通过在浓度维度上进行插值处理获取的样品的 CSMF 浓度层析荧光光谱. 而对于肇事溢油样品, 无需进行脱水浓缩等预处理, 只需取现场样本逐级稀释获取小浓度范围内的 CSMF 局部谱图, 并将之与可疑油样大浓度范围内的 CSMF 浓度层析荧光光谱进行曲面匹配, 利用最小二乘法确定最佳匹配光谱, 最佳匹配的可疑油样即满足最近油种符合度, 而对应的浓度即为待测样本的初始浓度值. 对原油样品集交叉检验的结果, 样品的识别准确度为 92%. 该油种鉴别方法快速、准确, 并可以同时实现油种鉴别和单位体积内溢油含量的定量.

关键词: 荧光光谱; 浓度参量同步荧光光谱 (CSMF); 溢油; 原油相关样品; 油种鉴别

中图分类号: X55; X834 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0202-06

Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra

WANG Chun-yan^{1,2,3}, SHI Xiao-feng³, LI Wen-dong³, ZHANG Jin-liang¹

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Department of Physics & Electronics Science, Weifang University, Weifang 261061, China; 3. Optics & Optoelectronics Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Oil spills occur every day worldwide. It is urgently required to develop a rapid, cost-effective, accurate, easy to use routinely fingerprinting technique which could offer decision-makers and model developers the preliminary information of spilled oils in a short period. In this paper, a species identification and concentration quantification technique using partial surface fitting method to concentration-synchronous-matrix-fluorescence (CSMF) spectra was introduced. In order to eliminate the errors due to concentration uncertainty, partial CSMF spectra in the small concentration range of the test oil spill samples were obtained, and for the oil spill candidate samples, the two-dimensional cubic convolution interpolation was used to make up the long interval of the concentration level. With the surface fitting of partial CSMF spectra of the test samples and the closely-related source crude oil samples were successfully discriminated, and the initial concentration of the test samples were also obtained. Cross validation results of the petroleum related sample set showed that the accuracy of the matching results was 92%. The parameters of this method were also discussed in detail. All results showed that this newly-developed method may become a more specifically applicable means in spilled oils identification.

Key words: fluorescence fingerprinting; concentration-synchronous-matrix-fluorescence (CSMF); oil spill; petroleum related samples; oil species identification

近年来, 溢油灾难引起了世界各国的高度重视, 2011 年中国渤海湾的溢油事故成为媒体关注的焦点, 也凸显了溢油检测的严重滞后性及应急处理执行力弱等问题. 因此如何迅速准确地给出溢油的定性定量分析数据, 确定溢油的来源及总量, 在油污染事件发生时先行, 短时间内向决策者及模式分析者提供所需的筛检资料以争取时效, 其意义十分重大.

由于海洋环境中溢油的组分及其变化都是极为复杂的, 目前普遍接受的观点是单靠某一种方法难以达到法事鉴别的要求, 需要整合多种溢油识别和鉴定方法^[1]. 溢油逐级指纹鉴别方法自 20 世纪 90 年代得以迅速发展: 荧光光谱^[2~6]、红外 (IR)^[7,8]

和气相色谱-火焰离子检测器 GC/FID^[9~11] 被用作初级筛选方法以迅速缩小可疑样本, 气相色谱/质谱法联用技术 (GC/MS)^[12~14] 则通过获取石油烃组分信息为环境法医学提供更详细佐证^[15].

其中与气相色谱相关的 GC/FID 及 GC/MS 是各个溢油实验室最重要的溢油鉴别手段, 但其价格昂贵, 样品前处理阶段程序复杂, 耗时费力, 同时需要大量超纯溶剂^[1]. 而光谱方法虽然预处理和分析

收稿日期: 2013-02-07; 修订日期: 2013-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40706037, 40906051); 山东省博士基金项目 (BS2011HZ015)

作者简介: 王春艳 (1972~), 女, 博士后, 副教授, 主要研究方向原油光谱技术, E-mail: wangcy@bnu.edu.cn

时间短,费用低,但在这一领域始终没有受到应有的重视. 特别是荧光光谱,虽然具有其他方法不能替代的优势,灵敏度高、受风化影响小,分析速度快,操作简单,非常适用于现场溢油检测操作^[16],但其可靠性却屡受质疑.

这是由于海洋溢油鉴别过程中海水的掺入很难避免,而原油的荧光光谱随萃取液浓度的变化比较大,因此在浓度不能准确获取的情况下,无法区别光谱谱形的变化是由浓度的变化引起的,还是油种的不同引起的. 这就是为什么荧光光谱在溢油鉴别的实际应用中往往并不准确的原因^[17,18]. 如何在浓度和油源未知的情况下同时实现油种鉴别和单位体积海水中的溢油含量的准确定量,就成为提高溢油检测准确度的关键问题.

本研究将浓度作为新的一维参量引入同步荧光光谱,获取原油萃取液不同浓度下的同步荧光光谱,形成由浓度-同步波长-荧光强度三维数据构成的浓度同步荧光光谱矩阵 (concentration-synchronous-matrix fluorescence CSMF). 为了实现准确地油种鉴别和含油量测定,首先针对溢油可疑样本,也即嫌疑船只运输的原油或石化产品样品,在 $10^{-4} \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 浓度范围逐步稀释获取其 CSMF 测试数据,并对其在浓度一维进行插值处理,获取其 CSMF 浓度层析荧光光谱;而对于肇事溢油样品,无需进行脱水浓缩等预处理,只需取现场样本逐级稀释获取小浓度范围内的 CSMF 局部谱图,并将之与可疑油样的浓度层析荧光光谱进行曲面匹配,利用最小二乘法确定最佳匹配光谱,最佳匹配的可疑油样即满足最近油种符合度,而对应的浓度即为待测样本的初始浓度值.

1 原理

1.1 浓度参量同步荧光光谱 CSMF 原理

原油及其石化产品作为溢油的主要污染物,有着极其复杂而独特的芳烃组成,荧光光谱溢油鉴别正是基于其不同芳烃组成比率会引起特有光谱的原理进行指纹识别的.

固定波长的同步光谱是指控制激发和发射波长的单色仪按照相同的速率同时扫描所获得光谱,表现在三维光谱上即为与 λ_{em} 坐标轴夹角为 45° ,截距为 $\Delta\lambda$ 的二维截面. 同步荧光法实际上是以特殊的二维截面信息反映三维荧光信息^[19].

对于原油及其相关样品这些复杂混合物,由于荧光光谱谱形和浓度之间的变化是非线性的变

化^[20-22],如果只利用低浓度范围的荧光信息,必然会导致较高环芳烃荧光峰信息的丢失. 引入浓度参量后,形成的浓度同步荧光光谱矩阵 CSMF,不仅同步光谱能反映三维光谱的主要信息,而且加上浓度一维,能更全面地反映不同激发波长下不同芳烃组分的荧光信息,如图 1 所示的胜利油田编号为史 138、夏 510、以及 4 号燃料油、液压油系列浓度下的同步荧光光谱,不同类型的溢油样品其光谱随浓度的变化趋势各不相同,这些光谱差异提供了开展基于浓度层析荧光光谱局部匹配研究进行油种鉴别的基础.

1.2 浓度层析荧光光谱局部匹配法

基于浓度参量同步荧光光谱,可得出浓度参量同步荧光光谱局部匹配的快速溢油鉴别方法,其原理流程如图 2 所示,当对肇事油样进行识别时:先将所有可疑油样在大浓度范围内 ($10^{-4} \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 进行逐步稀释获取其浓度同步荧光光谱矩阵 CSMF 测试谱,利用二维三次卷积插值对 CSMF 测试谱图进行插值处理,形成浓度维度上较为连续的 CSMF 浓度层析荧光光谱,由于在 5 个数量级的浓度范围内测试浓度不宜过细,所以插值的方法减少了大浓度范围内数据测量的工作量,测量不同的可疑油样以建立可疑油样的 CSMF 浓度层析荧光标准谱库.

对于肇事溢油样品,由于实际应用中海水的掺杂,其含油量(即萃取液浓度)未知,考虑到现场技术的需求,这里不进行脱水浓缩的预处理,而是直接配置肇事油样的萃取液,并以此为初始浓度逐步稀释,获得肇事油样的 CSMF 局部谱图. 将肇事油样的 CSMF 局部谱图与可疑油样的浓度层析荧光光谱进行逐一匹配,利用最小二乘法确定最佳匹配光谱,最佳匹配的可疑油样即满足最近油种符合度,而对应的浓度即为待测样本的初始浓度值.

图 3 中展示了三维坐标下的 CSMF 局部谱图和浓度层析荧光光谱的最佳匹配图,其中光滑的三维网格曲面为可疑油样插值后的 CSMF 浓度层析荧光光谱,平行于波长与强度轴构成平面的二维谱线为肇事油样的局部谱图,这里展示的是取 6 个系列浓度下的同步光谱构成的 CSMF 局部谱图,红色(深色)的展示的是当这 6 条局部谱图与浓度层析荧光光谱的曲面不能吻合的情况,而粉色(浅色)展示的是吻合较好的情况,即最佳匹配关系. 数值处理上即将肇事油样的 CSMF 局部谱图与各个可疑油样浓度层析荧光光谱中相应浓度间隔的样本谱线逐一求

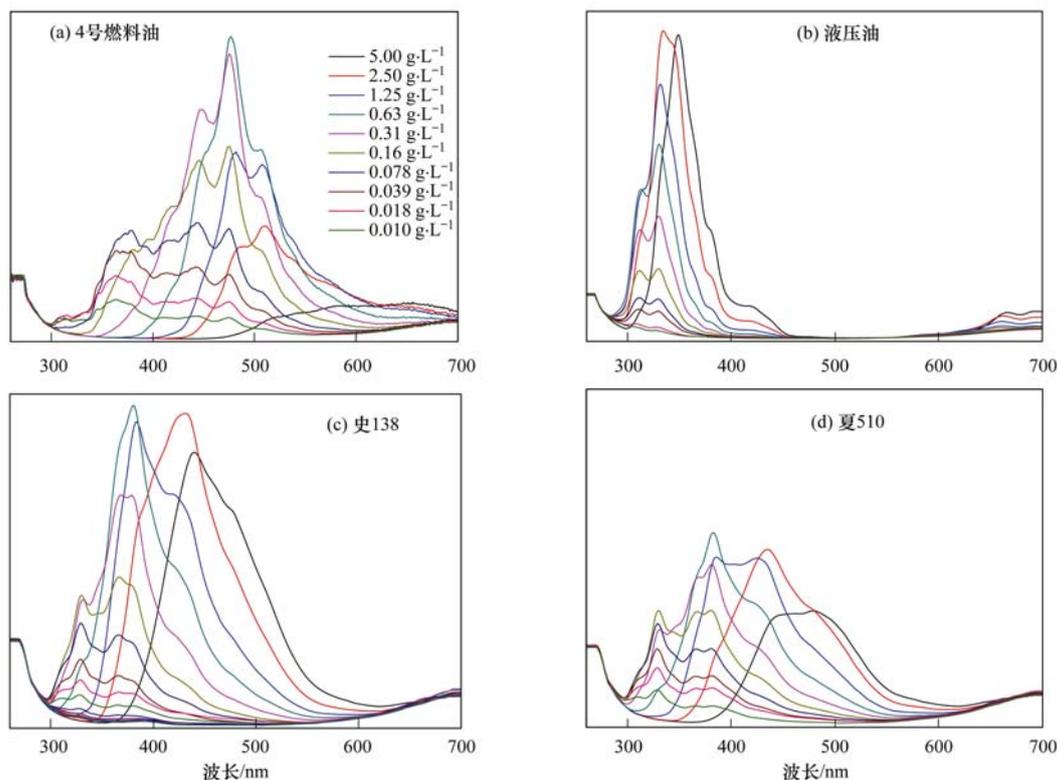


图1 4号燃料油、液压油以及胜利油田原油样品史138、夏510系列浓度下的同步荧光光谱

Fig. 1 Respective concentration dependent synchronous fluorescence spectra of 4# fuel, engine oil, and Shi138#, Xia 510# of different wellbore from Shengli oil field area in isopropanol solvent

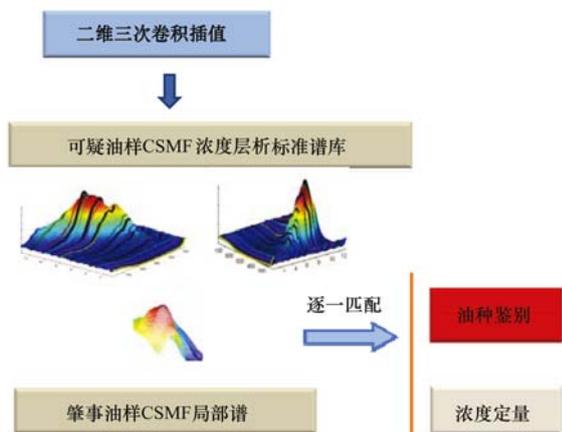


图2 浓度层析荧光光谱局部匹配原理

Fig. 2 Schematic diagram of the partial surface fitting method to CSMF spectra

方差值,方差值最小的一组光谱即为最佳匹配的光谱,此时,二者具有相同的油种,所对应的可疑油样的浓度值即为肇事溢油样本的初始浓度值。

2 材料与方法

2.1 样品处理

为了全面而主要反映原油光谱随浓度的变化趋

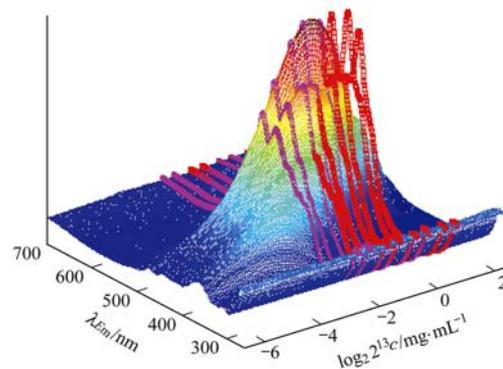


图3 浓度层析荧光光谱局部匹配最佳匹配图

Fig. 3 Best-fitted CSMF spectra based on the partial surface fitting method

势,这里选取样品萃取液的浓度范围为 $10^{-4} \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ [23],考虑到此浓度范围跨越5个数量级,对溶液进行过于精细的稀释会加大工作量,同时考虑光强与浓度呈指数关系,因此将溢油样品萃取剂溶液在所需的浓度范围内进行对半的稀释,是一种较合理、快捷的方法。

实验选取胜利油田的“夏510”、“金9-3”、“史138”、“商848”、“郑气363”共5个井区的原油样品、松辽油田的“白104”以及“0号柴油”、“93号汽油”作为测试样品。具体的萃取液配制方法是:用电

子天平称取原油样品,选取异丙醇(光复精细化工研究所,色谱纯)作为萃取剂,配制成为对应浓度为 $10.0 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的原液,振荡或将其放在超声振荡器中以加快溶解,充分溶解后,静置 30 min,取原液上部的清液为测试样品的初始浓度萃取液,异丙醇并不能将原油全部溶解,但可充分溶解 PAHs,获得较高的荧光峰^[24]. 采用浓度逐级对半稀释的方法配制第 2 组到第 18 组萃取液,获取 $10^{-4} \sim 10 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度范围的一组样品萃取液.

2.2 实验仪器和方法

实验所用的光谱仪器是日本岛津公司 RF-5301 荧光分光光度计. 实验测量起始激发波长设定为 220 nm,起始发射波长设定为 260 nm,测量 $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$ ^[25] 的同步荧光光谱,检测荧光光谱范围为 260 ~ 600 nm. 仪器参数设置:激发单色仪的狭缝宽度设定为 5.0 nm,发射单色仪的狭缝宽度设定为 1.5 nm,对实验所用萃取液进行同步荧光光谱测量.

3 结果与讨论

这里讨论了基于浓度参量同步荧光光谱,以实时检测的小浓度范围溢油样本 CSMF 局部谱图与可疑样品集内的大浓度范围 CSMF 浓度层析荧光光谱

进行局部匹配的具体实施方案.

3.1 油种鉴别及浓度定量

分别将“93 号汽油”,“白 104”,“金 9-3”、“史 138”、“夏 510”、“郑气 363”、“商 848”、“0 号柴油”标识为样品名(类别): gas、bai、Jin、shi、xia、zheng、shang、Diesel,每个油样分别获取 3 个平行样本的 CSMF 光谱,标识方法为样品名加平行样本号. 为了验证该方法的准确度,实验中采用交叉检验的方法,分别选取两个作为可疑样本获取其浓度层析荧光光谱,另外一个作为待测试肇事样品,测试样本为了模拟实际操作的小浓度范围局部谱,从中仅选取 6 条谱线,初始浓度选 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 附近,构成局部匹配谱图,与可疑样本的 CSMF 浓度层析荧光光谱进行分析对照.

表 1 为浓度层析荧光光谱局部匹配法交叉检验的结果,其中浓度的误差平均误差为 9.9%,光谱匹配准确度为 92%. 由于其中大部分样品均属于胜利油田的样品,特别是其中“金 9-3”、“史 138”、“郑气 363”光谱相近,可能都来自胜利史南油田史 138 井沙三段,若视为同类油源其识别的准确度会更高. 而对于不同的溢油类型或油源相差较大的原油源品,分类识别可达 100% 的准确率.

表 1 浓度层析荧光光谱局部匹配法交叉检验结果

Table 1 Cross validation results of species identification and concentration determination based on the partial surface fitting method

测试样品	匹配结果	测试浓度 / $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	实际浓度 / $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	浓度误差 /%
gas_1	gas_2	0.469	0.400	17.37
bai_1	bai_2	0.363	0.400	9.37
Jin_1	Jin_2	0.441	0.400	10.20
shi_1	zheng_3	0.259	0.250	3.47
xia_1	xia_2	0.469	0.400	17.37
zheng_1	zheng_3	0.275	0.250	10.20
shang_1	shang_3	0.456	0.400	14.02
Diesel_1	Diesel_2	0.621	0.625	0.67
gas_2	gas_3	0.453	0.500	9.39
bai_2	bai_3	0.588	0.500	17.69
Jin_2	shi_3	1.331	1.250	6.50
shi_2	shi_3	0.517	0.500	3.47
xia_2	xia_3	0.402	0.500	19.58
zheng_2	zheng_1	0.704	0.800	11.98
shang_2	shang_3	0.456	0.500	8.78
Diesel_2	Diesel_3	0.322	0.400	19.58
gas_3	gas_2	0.414	0.400	3.47
bai_3	bai_2	0.564	0.500	12.70
Jin_3	Jin_1	0.514	0.500	2.78
shi_3	shi_2	0.685	0.625	9.63
xia_3	xia_1	0.799	0.800	0.15
zheng_3	zheng_2	0.777	0.800	2.85
shang_3	shang_1	0.583	0.500	16.58
Diesel_3	Diesel_2	0.547	0.500	9.46

识别准确率:92%

平均浓度误差:10%

表 1 所示的浓度定量的结果误差较大,误差主要来源于实现溶液逐级对半稀释所采用的方法是简单的试管内添加等量试剂稀释,浓度配置不精确,系统误差可达 10% ~ 20%,同时在 10^{-4} ~ $10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 如此大的浓度范围内采取对半稀释方式采集 18 个光谱数据,仅靠插值方法不足以弥补大跨度造成的相邻浓度之间光谱变化信息的丢失. 考虑到过于精细的浓度配置虽然会增加实验室结果的准确性,必然会减弱方法简便快速的优势,而且在实际溢油检测中,浓度定量时这样的误差是被接受的. 当然若是实验设计浓度的稀释更为细致些,可以得到光谱随浓度变化的更详细数据,即可实现更为准确的浓度定量和相近油源原油样品的分类识别.

表 2 测试样本最佳初始浓度选择方法及匹配结果

Table 2 Method to choose the best initial concentration of test samples and the respective matching results

序号	测试样本浓度系列/ $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$	匹配结果/%	
		样本集 1	样本集 2
1	5.00 → 2.50 → 1.25 → 0.625 → 0.312 → 0.156	50	47
2	2.50 → 1.25 → 0.625 → 0.312 → 0.156 → 0.078	75	53
3	1.25 → 0.625 → 0.312 → 0.156 → 0.078 → 0.039	100	59
4	0.625 → 0.312 → 0.156 → 0.078 → 0.039 → 0.019 5	100	71
5	0.312 → 0.156 → 0.078 → 0.039 → 0.019 5 → 0.009 8	100	76
6	0.156 → 0.078 → 0.039 → 0.019 5 → 0.009 8 → 0.004 9	100	82
7	0.078 → 0.039 → 0.019 5 → 0.009 8 → 0.004 9 → 0.002 4	87	76
8	0.039 → 0.019 5 → 0.009 8 → 0.004 9 → 0.002 4 → 0.001 2	50	41

表 2 中两个样品集(不同溢油类型样本集 1 及相近油源样本集 2)的匹配结果表明,初始浓度的选取对准确率有较大的影响,初始浓度为 $0.156 \sim 1.25 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的样本识别率最高.

误差在两端较大的原因,主要是浓度较高时的光谱,仅仅反映高环芳烃信息,同时对半稀释过程会遗漏相邻浓度之间光谱变化信息;而低浓度的时候仅反映低环的信息,对于相近油源的油种,其谱形非常相似. 对照图 3 的最佳匹配图可以看出,初始浓度选择的原则应该为最大限度反映样品的荧光信息. 当选择整个光谱最高峰附近的浓度值时,则能够兼顾高低不同环数的芳烃信息,可以较好区分相似油源的溢油样品.

初始浓度选取得过高或者过低,虽然不会影响不同溢油类型如汽油、柴油、原油的鉴别,但是对于谱形相近的原油样品识别有较大影响,所以初始浓度的选取上应尽可能在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 附近,即整个荧光光谱的最高光强所对应的浓度值附近.

测试样本光谱数的选择从原理上来讲,应该是越多越精确,考虑现场实验工作量不易过多的问题,这里仅选取 6 条.

3.2 参数设定

浓度层析荧光光谱局部匹配法的主要参数为待测样品初始浓度最佳选取范围和待测样本光谱条数.

为了得出测试样本的最佳浓度取值范围,实验选取不同初始浓度来考察初始浓度选取对鉴别准确率的影响. 从 3 个平行样本中选一个作为测试样本,标定测试样本所取的初始浓度为 1 ~ 10,即从一组对半稀释的浓度值中选取 6 个不同浓度值所对应的谱线作为测试样本数据. 如表 2 所示的初始浓度选择方法,当初始浓度取 1 时,即为 $5.00 \sim 0.156$,初始浓度取 2,即为 $2.50 \sim 0.078$ 的 6 条谱线,以此类推,当初始浓度为 8 时,即为 $0.039 \sim 0.001 2$ 的 6 条谱线.

4 结论

(1) 基于最小二乘法(LS)的浓度层析荧光光谱局部匹配方法不需要对可疑油样提取大量训练样本,只需单次测量可疑油样的浓度同步荧光光谱矩阵(CSMF),同时对肇事油样,无需脱水浓缩样本,只需采集小浓度范围内 CSMF 局部谱图,十分符合快速、简便、易操作的溢油实时监测要求. 由于荧光检测灵敏度很高,通常配置萃取液时仍需多次稀释,即使是在油膜扩散较大的情况下,也能进行较为准确地用于含油量的定量及样品识别. 同时该方法也适用于石油勘探和其它多荧光物质混合物的检测.

(2) 该方法是以实时检测的小浓度范围 CSMF 局部谱图和可疑样品大范围浓度 CSMF 浓度层析荧光光谱的对比识别,识别不仅是样品的符合度,还有浓度的符合度,将该方法实用化有望解决困扰现在溢油实时检测中存在的难题.

参考文献:

- [1] Fernández-Varela R, Andrade J M, Muniategui S, *et al.* Identification of petroleum hydrocarbons using a reduced number

- of PAHs selected by Procrustes rotation [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(4): 526-535.
- [2] Valderrama P, Marçó P H, Locquet N, *et al.* A procedure to facilitate the choice of the number of factors in multi-way data analysis applied to the natural samples: Application to monitoring the thermal degradation of oils using front-face fluorescence spectroscopy [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2011, **106**(2): 166-172.
- [3] Zhou Z Z, Guo L D, Shiller A M, *et al.* Characterization of oil components from the deepwater horizon oil spill in the Gulf of Mexico using fluorescence EEM and PARAFAC techniques [J]. *Marine Chemistry*, 2013, **148**(20): 10-21.
- [4] Zhou Z Z, Liu Z F, Guo L D. Chemical evolution of Macondo crude oil during laboratory degradation as characterized by fluorescence EEMs and hydrocarbon composition [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **66**(1-2): 164-175.
- [5] Sinski J F, Exner J. Concentration dependence in the spectra of polycyclic aromatic hydrocarbon mixtures by front-surface fluorescence analysis [J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, **61**(9): 970-977.
- [6] Li J F, Fuller S, Cattle J, *et al.* Matching fluorescence spectra of oil spills with spectra from suspect sources [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2004, **514**(1): 51-56.
- [7] Fernández-Varela R, Gómez-Carracedo M P, Fresco-Rivera P, *et al.* Monitoring photooxidation of the Prestige's oil spill by attenuated total reflectance infrared spectroscopy [J]. *Talanta*, 2006, **69**(2): 409-417.
- [8] Fernández-Varela R, Andrade J M, Muniategui S, *et al.* The comparison of two heavy fuel oils in composition and weathering pattern, based on IR, GC-FID and GC-MS analyses: Application to the Prestige wreckage [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 1015-1026.
- [9] Peng X Z, Zhang G, Mai B X, *et al.* Tracing anthropogenic contamination in the Pearl River estuarine and marine environment of South China Sea using sterols and other organic molecular markers [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(8): 856-865.
- [10] Wang S J, Guo G L, Yan Z G, *et al.* The development of a method for the qualitative and quantitative determination of petroleum hydrocarbon components using thin-layer chromatography with flame ionization detection [J]. *Journal of Chromatography A*, 2010, **1217**(3): 368-374.
- [11] Snape I, Harvey P M, Ferguson S H, *et al.* Investigation of evaporation and biodegradation of fuel spills in Antarctica I. A chemical approach using GC-FID [J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(10): 1485-1494.
- [12] Wang Z D, Fingas M F. Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **47**(9-12): 423-452.
- [13] Yang C, Wang Z D, Hollebone B P, *et al.* Characteristics of bicyclic sesquiterpanes in crude oils and petroleum products [J]. *Journal of Chromatography A*, 2009, **1216**(20): 4475-4484.
- [14] Wang Z D, Yang C, Kelly-Hooper F, *et al.* Forensic differentiation of biogenic organic compounds from petroleum hydrocarbons in biogenic and petrogenic compounds cross-contaminated soils and sediments [J]. *Journal of Chromatography A*, 2009, **1216**(7): 1174-1191.
- [15] Wang Z D, Fingas M, Sigouin L. Using multiple criteria for fingerprinting unknown oil samples having very similar chemical composition [J]. *Environmental Forensics*, 2002, **3**(3-4): 251-262.
- [16] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 863-881.
- [17] Wang C Y, Li W D, Luan X N, *et al.* Species identification and concentration quantification of crude oil samples in petroleum exploration using the concentration-synchronous-matrix-fluorescence spectroscopy [J]. *Talanta*, 2010, **81**(1-2): 684-691.
- [18] 王春艳, 李文东, 栾晓宁, 等. 基于浓度参量同步荧光光谱的相近油源溢油鉴别 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(10): 2700-2705.
- [19] 王春艳, 王新顺, 王延华, 等. 基于不同光谱技术的原油样品的荧光分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(4): 728-732.
- [20] Christensen J H, Tomasi G. Practical aspects of chemometrics for oil spill fingerprinting [J]. *Journal of Chromatography A*, 2007, **1169**(1-2): 1-22.
- [21] Sinski J F, Compton B S, Nicoson M C, *et al.* Using 3-D fluorescence's red shift cascade effect to monitor mycobacterium PRY-1 degradation of aged petroleum [J]. *Applied Spectroscopy*, 2004, **58**(1): 91-95.
- [22] Patra D, Mishra A K. Recent developments in multi-component synchronous fluorescence scan analysis [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2002, **21**(12): 787-798.
- [23] 王春艳, 江华鸿, 高居伟, 等. 基于三维同步荧光光谱确定原油样品浓度的新方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(6): 1080-1083.
- [24] 栾晓宁, 王春艳, 李颖, 等. 从浓度定量分析探讨异丙醇作原油萃取剂的可行性 [J]. *海洋湖沼通报*, 2009, (2): 151-156.
- [25] 李文东, 王春艳, 高居伟, 等. 油样品的可变角同步荧光光谱的计算机模拟 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2007, **37**(1): 168-172.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jun-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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)

2014年1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行