

延安石油开采对周边黄土污染的调查分析

刘培, 梁继东, 高伟, 贺延龄

(西安交通大学环境科学与工程系, 710049, 西安)

摘要: 为了探明陕北地区石油开采对周围黄土的污染状况, 分别采集了延安市宝塔区姚店镇上童沟油井、王庄油井、李渠镇刺崖沟油井附近的土壤, 测定了土壤的可溶有机质和总烃含量, 并用气相色谱-质谱联机法(GC-MS)分析了土壤中的正构烷烃的组成及分布特征。结果表明: 所查地区可溶有机质含量较高, 且不同采样点的含量相差很大, 平均含量分布在 3 561~46 725 mg/kg 之间; 总烃平均含量分布在 2 097~13 488 mg/kg 之间, 其中上童沟油井周围土壤总烃污染最为严重, 最高含量是当地土壤背景值的 27 倍。由调查地区正构烷烃的碳数分布显示, 土壤中烃类污染物主要来源于成熟原油及其衍生物, 部分地区烃类污染来源为原油和高等植物蜡的混合物。

关键词: 石油开采; 黄土污染; 可溶有机质; 总烃; 正构烷烃分布特征

中图分类号: X825 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0123-06

Investigation of Soil Contamination Caused by Petroleum Exploitation in Yan'an

LIU Pei, LIANG Jidong, GAO Wei, HE Yanling

(Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to investigate the loess soil contamination caused by petroleum exploitation in the north of Shaanxi province, three groups of soil samples around local oil wells at different sites were collected, and the extractable organic matter (EOM) and the total petroleum hydrocarbon (TPH) were measured. The characteristics of the composition and distribution of normal alkane (n-alkanes) in the soil samples were analyzed by GC-MS. The results show that EOM in the loess soil was quite high and these three groups of samples had clear differences in the EOM concentration, with the average range from 3 561 mg/kg to 46 725 mg/kg, showing that the loess soil was polluted by the alkanes during the process of oil exploitation. The TPH concentration in the three different groups of samples varied from 2 097 mg/kg to 13 488 mg/kg, and its highest value was 27 times the value of the background TPH concentration. The carbon number distribution of normal alkanes indicates that TPH is mainly from crude oil and its products in most of the areas while from the mixture of crude oil and advanced vegetable wax in some areas.

Keywords: petroleum exploitation; loess contamination; extractable organic matter; total petroleum hydrocarbon; distribution character of normal alkane

延安市地处黄土高原丘陵沟壑区, 是中国近代石油工业的发祥地之一。自 1907 年中国近代第一口陆上油井——延长油矿开采至今, 已有 100 多年石

油开采的历史。近年来, 延安地区石油开采迅猛发展, 从 20 世纪末的年均 100 多万吨发展至 2009 年的 1 224 万吨, 成为当地经济发展的支柱产业。在石

收稿日期: 2010-12-27. 作者简介: 刘培(1982—), 女, 硕士生; 梁继东(联系人), 女, 博士, 讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20907036); 国家自然科学基金重点资助项目(20936004); 西安交通大学校长科研基金资助项目(2008).

网络出版时间: 2011-06-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110602.1658.003.html>

油开采过程中,勘探、钻井、采油、井下作业和油气输送等都会对周边环境造成一定的污染^[1]. 土壤是石油烃的主要归宿之一^[2],石油运输和事故原油的泄漏、废弃泥浆的处置、原油的不合理存储、采油区有机溶剂的排放和泄漏对土壤的污染越来越严重^[3]. 石油进入土壤后,如果发生降雨并产生径流,则将进一步污染地表水和地下水. 由于石油的密度较小($829 \sim 896 \text{ kg/m}^3$)、黏着力强,黄土对石油的截留能力强等,所以黄土中石油的最大检出迁移深度为30 cm,主要集中在20 cm左右的表层^[4-5],而这部分土壤恰恰对农作物的生长至关重要. Lin等^[6]研究表明,土壤中烃浓度过高会降低植物的茎长、密度、覆盖率及生物量,石油中的一些成分通过挥发或沉积进入食物链,从而危害人类健康,影响人类和生物的繁衍^[7].

石油对陕北地区的环境污染已经引起社会和广大学者的关注:李小利等^[7]对延安燕沟、巴家河油区的土壤污染进行了调查;张佳音等^[8]对延河、清涧河流域进行了水质分析;黄廷林等^[9]对延河及其两条支流的沉积物进行了调查分析,他们的研究表明,调查地区的土壤和河流均受到了不同程度的石油污染;西安建筑科技大学针对陕北土壤集中研究了石油烃污染的径流模式和污染土壤的修复^[9-12]. 但是,目前有关陕北石油开采对周边土壤污染程度及污染来源的研究仍缺乏相关的基础数据,为了探明这一点,本文课题组进行了野外调查,即选择延安宝塔区延河流域分布于农田中的3个具有开采历史逾15年以上的采油井(姚店镇上童沟油井、王庄油井、李渠镇刺崖沟油井)进行了黄土石油污染调研,共采集土壤样品36份,分析了土壤中可溶有机质(EOM)和总烃(TPH)含量及土壤中正构烷烃的分布特征,讨论了土壤中石油类污染物的主要来源和污染程度,以为陕北地区延河流域土壤的石油污染现状评价及防治提供参考.

1 研究方法

1.1 样品采集

2009年4月在延安宝塔区油田共采集36份土壤样品. 姚店镇上童沟油井(1992年开采,目前日产油量为200 kg左右)采用扇形布点,采样点设在下风向的扇形平面内并距顶点位置分别为2、4、6 m的3条弧线上,每条弧线上设立4个采样点,两相邻采样点之间的夹角为 45° ,共布点12个;王庄油井(1989年开采,目前日产油量为1 000 kg左右)和刺

崖沟油井(1992年开采,目前日产油量为400 kg左右)采用下风向布点,采样点距井口距离依次为2、4、6 m,每个井的周围布设3个采样点. 各采样点分别采集0~5 cm(表层)和15~20 cm(浅表层)2个层面的土壤.

1.2 样品保存和预处理

采集到的新鲜湿土壤样品摊成厚约2 cm的薄层并放在阴凉通风处自行干燥1 d,再将土壤样品混匀过筛(筛网孔径为0.25 mm)去除砾石、树枝等大颗粒杂物,最后将研磨、过筛(80目筛)样品置于聚氯乙烯样品袋中冷藏(4°C 下)保存.

1.3 样品测定

土壤样品中总烃类的测定采用重量法^[12-14],氯仿为提取剂. 土壤样品中总萃取物(也称可溶有机质)的测定采用直接法^[15],仪器为JK-951红外光度测油仪.

土壤样品中石油组分采用气相色谱-质谱联机法(GC-MS)测定^[16]. GC-MS柱子型号:HP-5MS, $30 \text{ m} \times 250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ (5%二苯基,95%二甲基聚硅氧烷). 升温程序: 70°C 保持2 min;以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 120°C ,保持10 min;以 $6^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 280°C ,保持5 min;运行至 250°C 保持5 min. 质谱扫描范围为 $50 \sim 600 \text{ u/s}$,载气为高纯氦气,流速为 $1.0 \text{ L}/\text{min}$,前进样口温度为 240°C ,模式为不分流色谱柱,流量为 $1.0 \text{ mL}/\text{min}$,离子源温度为 230°C ,四极杆温度为 150°C .

2 结果与讨论

2.1 土壤样品中可溶有机质含量和总烃类含量及其分布特征

土壤有机质是土壤中各种含碳有机化合物的总称,石油烃进入土壤后会增加土壤中可溶有机质的含量. 采用直接法测得的可溶有机质包括动物油、植物油和石油类物质. 从表1、表2中可以看出:上童沟油井附近黄土的可溶有机质含量为 $10\,816 \sim 16\,662 \text{ mg}/\text{kg}$,总烃含量为 $6\,371 \sim 13\,488 \text{ mg}/\text{kg}$,烃类污染物占可溶有机质组分较大,说明上童沟油井周围黄土中的可溶有机质主要是烃类污染物;上童沟油井周围土壤可溶有机质和总烃含量均随与井口距离的增大逐渐减少,呈放射状分布,0~5 cm表层土中有机质含量和总烃含量略高于15~20 cm浅表层,这主要是油井开采时间较长,开采过程落地原油因降雨的冲刷和径流发生了横向和纵向迁移所致.

表 1 干土土壤样品中可溶有机物含量

距井口 距离/m	可溶有机物含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
	上童沟油井		王庄油井		刺崖沟油井	
	0~5 cm 表层	15~20 cm 浅表层	0~5 cm 表层	15~20 cm 浅表层	0~5 cm 表层	15~20 cm 浅表层
2	16 662	15 871	35 122	3 561	38 580	41 182
4	15 627	15 238	13 276	7 648	42 152	46 725
6	13 029	10 816	9 318	6 941	9 851	6 852

注:上童沟油井的可溶有机质含量是距油井距离相同的 4 个点的平均值。

表 2 干土土壤样品中总烃含量

距井口 距离/m	总烃含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
	上童沟油井		王庄油井		刺崖沟油井	
	0~5 cm 表层	15~20 cm 浅表层	0~5 cm 表层	15~20 cm 浅表层	0~5 cm 表层	15~20 cm 浅表层
2	10 888	13 488	10 850	2 084	5 049	2 302
4	9 875	7 247	3 019	2 427	4 132	5 581
6	8 308	6 371	7 653	6 286	7 901	2 097

注:上童沟油井的总烃含量是距油井距离相同的 4 个点的平均值。

王庄油井表层土的可溶有机质含量最高达 35 122 mg/kg,主要集中在距井口 2 m 的范围内,比上童沟油井相同土层的有机质含量高得多,距井口 2 m 处表层土的总烃含量也相对较高,可能是因为王庄油井的开采量比较大(1 000 kg/d),井口附近落地原油较多所致.王庄油井浅表土层的可溶有机质和总烃含量明显比相应表层土的可溶有机质含量低,这可能与当地土壤和石油的性质以及油井的开采年限有关.宝塔区土壤主要是以粉粒和细沙粒为主的黄绵土,石油的密度比水小,黏附能力强,而黄绵土的粒径小,比表面积大,对石油类污染物的吸附更为牢固.落地原油进入土壤后,吸附在表层土壤的表面,在短时间内形成了小范围、高浓度的污染区域.

刺崖沟油井的可溶有机质含量最高达 46 725 mg/kg,总烃类含量为 2 097~7 901 mg/kg.在距井口 4 m 的范围内,烃类占可溶有机质含量的比例较小,说明土壤可溶有机质主要为非烃类物质.刺崖沟油井表层土中可溶有机质含量略低于相应点的浅表层土壤中可溶有机质含量,总烃含量略高于相应点的浅表层土壤中总烃含量.有机质含量和总烃含量不符合射线分布,这可能与当地石油的运输方式有关.陕北原油运输方式主要采用油罐车,在运输过程中会出现漏油现象,形成黑色油斑,从而出现局部可溶有机质和石油烃的含量特别高的现象.

石油对土壤的污染程度与土壤类型有关,目前

大多数地区和国家均无界定石油污染的相关标准.与已有文献研究结果相比,本文调研区域的黄土石油污染在有机质含量、总烃含量及生态毒性等方面均达到重度污染水平,分别阐述如下.

玉门市老君庙油田^[17]位于甘肃省黄土地区,油田内的储油池和豆腐台油井储油罐旁侧土壤中可溶有机质含量分别为 897~83 601 mg/kg 和 111~481 mg/kg,而上童沟油井、王庄油井和刺崖沟油井周围黄土中可溶有机质最高含量分别为 16 662、35 122、46 725 mg/kg,远高于老君庙油田周围黄土中可溶有机质的含量.

据文献报道^[7],延安地区燕沟油区和巴家河油井周围土壤的总烃含量分别为 5 500~16 400 mg/kg 和 6 200~131 200 mg/kg.辽宁省环境中心监测站资料^[5]显示,辽河油田的重度污染区土壤中总烃含量已达到 10 000 mg/kg 以上,辽河油田盘锦地区^[18]油井周围土壤中石油污染负荷为 0~800 mg/kg,平均值为 158 mg/kg,陕北地区土壤中总烃含量的背景值^[7]为 500 mg/kg,而本文调查地区土壤总烃含量为 2 097~13 488 mg/kg,最高含量是土壤背景值的 27 倍.

据报道,黄土中含油量为 10 000 mg/kg 时,向日葵群体叶面指数从苗期至成熟期均受到严重影响^[19].依据土壤中石油含量对农作物的减产幅度、有毒物质残留量、土壤中 BaP 残留量的控制原则知,黑土中石油临界含量最高为 3 000 mg/kg^[20],而

上童沟油井、王庄油井和刺崖沟油井周围土壤中最高含烃量分别为 13 488、10 850、7 901 mg/kg,均超出或相当于生态毒性浓度的水平。

2.2 表层土壤中正构烷烃组成及分布特征

土壤中的正构烷烃主要来源于矿物油及其燃烧产物、原油及生物质(尤其是高等植物蜡和天然有机物的生物降解)等。在气相色谱图上,不同碳原子数的正构烷烃呈等间距分布,通过分析正构烷烃的分布特征可以推断石油源和非石油源对土壤有机污染的贡献。张枝焕^[21-25]等利用正构烷烃的分布对天津地区的土壤和沉积物中有机污染来源做了大量的研究,其中主峰碳是判断正构烷烃来源的主要依据,正构烷烃碳优势指数(CPI)1,即 CPI1,反映了低碳正构烷烃的污染源构成, Pr/nC_{17} 摩尔比 $r(Pr/nC_{17})$ 和 Ph/nC_{18} 摩尔比 $r(Ph/nC_{18})$ 反映了异构烷烃向正构烷烃、高碳数正构烷烃向低碳数正构烷烃的转化程度。根据正构烷烃的低、中、高分子量的 3 个峰群的相对组成及叠合关系,可将正构烷烃划分为 7 种不同

的叠合方式^[22]。

图 1 是姚店镇上童沟油井、王庄油井、李渠镇刺崖沟油井表层土壤的气相色谱-质谱图。从图 1 可以看出,样品中正构烷烃碳数范围主要是 $C_{15} \sim C_{30}$,根据正构烷烃的碳数分布指纹图可以划分为三类。由于刺崖沟距井口 4 m 处的土壤样品的谱图距基线偏离过大,所以该数据弃用。

第一类正构烷烃分布图为双峰态后峰型,上童沟的 3 个样品均为此峰型(见图 1a)。主要特征是主峰碳为 C_{29} ,次主峰碳为 C_{25} ;CPI1(见表 3)分布范围为 0.98~1.11, $r(Pr/Ph)$ 为 0.62~0.74,具有明显的植烷优势。高碳部分的主峰碳数较多,有明显的奇偶优势,这部分污染源主要来源于高等植物蜡;次主峰碳数中等,其 CPI1 接近 1, $r(Pr/nC_{17})$ 和 $r(Ph/nC_{18})$ 相对较小,无明显奇偶优势。由此可以推断,次主峰碳的正构烷烃主要来源于石油烃或其不完全燃烧产物。综合上述,上童沟土壤样品中的正构烷烃为石油污染和高等植物蜡分解产物的混合物。

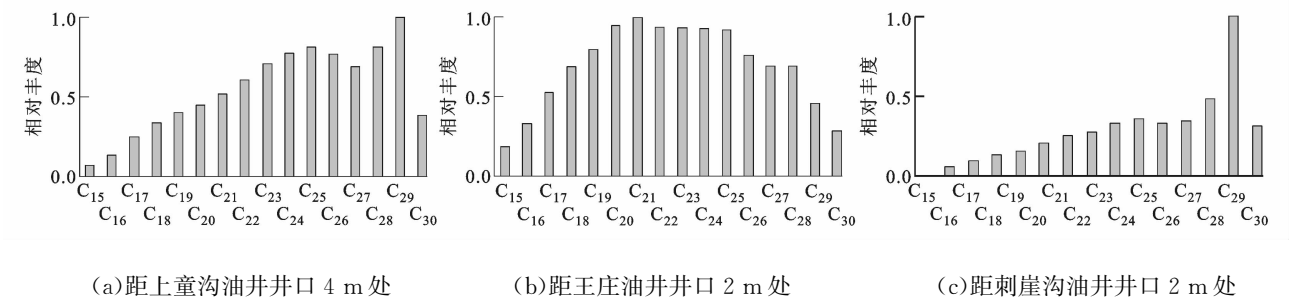


图 1 表层土中典型的正构烷烃碳数分布

表 3 表层土壤样品参数表

距井口的距离	$d_1=2\text{ m}$	$d_1=4\text{ m}$	$d_1=6\text{ m}$	$d_2=2\text{ m}$	$d_2=4\text{ m}$	$d_2=6\text{ m}$	$d_3=2\text{ m}$	$d_3=6\text{ m}$
$r(Pr/Ph)$	0.62	0.70	0.74	0.90	0.47	0.55	0.73	0.82
$r(Pr/nC_{17})$	0.45	0.46	0.81	0.36	0.27	0.21	1.44	2.02
$r(Ph/nC_{18})$	0.48	0.49	0.62	0.30	0.40	0.33	1.24	1.54
CPI1	0.98	1.06	1.11	1.04	1.02	0.99	1.02	1.04

注: d_1 表示距上童沟油井井口的距离; d_2 表示距王庄油井井口的距离; d_3 表示距刺崖沟油井井口的距离。

第二类为单峰态,代表样品为距王庄油井井口 2、4、6 m 处及距刺崖沟油井井口 6 m 处的土壤(见图 1b)。主要特征为:碳数呈正态分布,主峰碳为 C_{21} ,无明显奇偶优势;CPI1 分布范围为 0.99~1.04, $r(Pr/Ph)$ 为 0.47~0.90,具有植烷优势。由于主峰碳数较少,CPI1 接近于 1, $r(Pr/nC_{17})$ 和 $r(Ph/nC_{18})$ 相对较小,表明饱和烃输入源的成熟度较高,正构烷烃主要来源于成熟原油和石化燃料的燃烧。

第三类峰型与第一类类似,代表样品为距刺崖沟油井井口 2 m 处的土壤(见图 1c)。高碳数部分的主峰非常明显,次主峰碳群近似正态分布,表明样品正构烷烃为石油和生物质的混合物,但生物质中的高等植物蜡贡献较大。

对调查地区表层土壤中正构烷烃的研究结果表明,土壤中烃类污染物主要为原油和高等植物蜡的混合物。各采样点正构烷烃次主峰碳的碳数呈正态

分布,无明显奇偶优势,主要来自成熟原油及其衍生物.上童沟油井和刺崖沟油井周围土壤中正构烷烃的峰碳群存在主峰,主要来自高等植物蜡及其分解产物.

3 结 论

(1)经土壤样品中可溶有机质含量和总烃类含量及分布特征的研究结果表明:原油开采可导致土壤的可溶有机质含量升高,其中距刺崖沟油井井口 4 m 处的可溶有机质含量最高,最高达 46 725 mg/kg,距王庄油井井口 2 m 处浅表层土有机质含量最低,上童沟油井各采样点的可溶有机质含量差别不大;原油开采可导致土壤石油烃污染,其中上童沟油井周围总体烃类污染最为严重,石油烃含量最高为 13 488 mg/kg,是土壤背景值的 27 倍,而王庄油井和刺崖沟油井周围石油烃的最高含量分别为 10 850 mg/kg 和 7 901 mg/kg,是土壤背景值的 21 倍和 16 倍.与已有文献研究结果相比,本文调研区域的黄土石油污染在有机质含量、总烃含量及生态毒性等方面均达到重度污染水平.

(2)经表层土壤中正构烷烃组成及分布特征的研究结果表明,油井周围土壤中烃类污染主要来源于成熟原油及其衍生物.距上童沟油井和刺崖沟油井井口 2 m 处的土壤中烃类污染物主要来源于原油和高等植物蜡,原油对烃类污染的贡献较大;距王庄油井和刺崖沟油井井口 6 m 处的土壤中烃类污染物主要来源于石油.

参考文献:

[1] KO J Y, DAY J W. A review of ecological impacts of oil and gas development on coastal ecosystems in the Mississippi Delta [J]. Ocean Coast Manage, 2004, 47 (11/12): 597-623.

[2] LIN Q, MENDELSSOHN I A. The combined effects of phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands [J]. Ecol Eng, 1998, 10 (3): 263-274.

[3] ZHOU Q X, SUN F H, LIU R. Joint chemical flushing of soils contaminated with petroleum hydrocarbons [J]. Environment International, 2005, 31(6): 835-839.

[4] 黄廷林,史红星,任磊.石油类污染物在黄土地区土壤中竖向迁移特性试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报, 2001, 33(2): 108-120.

HUANG Tinglin, SHI Hongxing, REN Lei. An experimental study on transferring process of petroleum pollutants in soils of loess plateau [J]. Journal of Xi'an Univ of Arch & Tech, 2001, 33(2): 108-120.

[5] 何良菊,魏德洲,张维庆.土壤微生物处理石油污染的研究 [J]. 环境科学进展, 1999, 7(3): 110-115.

HE Liangju, WEI Dezhou, ZHANG Weiqing. Research of microbial treatment of petroleum contaminated soil [J]. Advances in Environmental Science, 1999, 7(3): 110-115.

[6] LIN Q, MENDELSSOHN I A. A comparative investigation of the effects of south Louisiana crude oil on the vegetation of fresh, brackish and salt marshes [J]. Mar Pollut Bull, 1996, 32(2): 202-209.

[7] 李小利,刘国彬,许明祥.陕北油田土壤和地表水石油污染特征 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 145-148.

LI Xiaoli, LIU Guobin, XU Mingxiang. Features of oil pollution of soil and surface water in northern Shaanxi oilfield, China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 145-148.

[8] 张佳音.延河-清涧河地表水污染调查评价 [D]. 西安: 西北大学, 2009: 57-60.

[9] 黄廷林,解岳,王晓昌,等.延河沉积物的石油污染调查与分析 [J]. 环境工程, 2000, 18(4): 62-64.

HUANG Tinglin, XIE Yue, WANG Xiaochang, et al. An investigation and analysis of petroleum contaminated river sediments of Yanhe River [J]. Environment engineering, 2000, 18(4): 62-64.

[10] 徐金兰,黄廷林,唐智新,等.高效石油降解菌的筛选及石油污染土壤生物修复特性的研究 [J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 622-628.

XU Jinlan, HUANG Tinglin, TANG Zhixin, et al. Isolation of petroleum degradation bacteria and its application to bioremediation of petroleum 2 contaminated soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27 (4): 622-628.

[11] 黄廷林,任磊.黄土地区石油类污染物的径流污染模拟及模型预测 [J]. 中国环境科学, 2000, 20(4): 345-348.

HUANG Tinglin, REN Lei. Simulating and modeling of the runoff pollution of petroleum pollutants in loess plateau [J]. China Environmental Science, 2000, 20 (4): 345-348.

[12] 黄廷林,徐金兰,唐智新,等.生物菌剂对石油污染土壤生物修复作用的研究 [J]. 环境科学, 2009, 30 (6): 1838-1843.

HUANG Tinglin, XU Jinlan, TANG Zhixin, et al. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated

- soil by bioaugmentation products [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(6): 1838-1843.
- [13] MILLS M A, MCDONALD T J, BONNER J S, et al. Method for quantifying the fate of petroleum in the environment [J]. *Chemosphere*, 1999, 39 (14): 2563-2582.
- [14] SUGIURA K, ISHIHARA M, HARAYAMA S T. Physicochemical properties and biodegradability of crude oil [J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(1): 45-51.
- [15] 俞元春, 陈静, 朱剑禾. 红外光度法测定土壤中总萃取物、石油类、动植物油及其准确度之方法研究 [J]. *中国环境监测*, 2003, 19(6): 6-7.
- YU Yuanchun, CHEN Jing, ZHU Jianhe. Determination of oil content in petroleum, animal and vegetable oils in soil by ultrasonic extraction infrared photometric method [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2003, 19(6): 6-7.
- [16] 刘现明, 徐学仁, 张笑天, 等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究 [J]. *环境科学学报*, 2001, 21(4): 507-509.
- LIU Xianming, XU Xueren, ZHANG Xiaotian, et al. A preliminary study on PAHs in the surface sediment samples from Dalian bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4): 507-509.
- [17] 田侠, 张松林, 郑庆柱, 等. 玉门市老君庙油田土壤石油污染状况调查 [J]. *科技导报*, 2009, 27(12): 71-74.
- TIAN Xia, ZHANG Songling, ZHENG Qingzhu, et al. The petroleum pollution in the soil of Laojunmiao oilfield of Yumen City [J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(12): 71-74.
- [18] 何欣, 陈硕, 全燮. 盘锦地区油井口处石油污染调查与分析[C]//第五届全国环境化学大会文集. 大连: 大连理工大学, 2009: 675.
- [19] 李春荣, 王文科, 曹玉清, 等. 石油污染土壤对向日葵生长的影响 [J]. *地球科学与环境学报*, 2006, 28(4): 97-99.
- LI Chunrong, WANG Wenke, CAO Yuqing, et al. Influences of petroleum-contaminated soil on growth of sunflower [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2006, 28(4): 97-99.
- [20] 吕志萍, 程龙飞. 石油污染土壤中石油含量对玉米的影响 [J]. *油气田环境保护*, 2001, 11(1): 36-37.
- LÜ Zhiping, CHENG Longfei. The Influence on corn growth caused by petroleum concentration of soil contaminated by petroleum [J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Field*, 2001, 11(1): 36-37.
- [21] 张枝焕, 陶澍, 叶必雄, 等. 土壤和沉积物中烃类污染物的主要来源与识别标志 [J]. *土壤通报*, 2004, 35(6): 793-797.
- ZHANG Zhihuan, TAO Shu, YE Bixiong, et al. Pollution sources and identification of hydrocarbons in soil and sediment using molecular markers [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6): 793-797.
- [22] 张枝焕, 陶澍, 彭正琼, 等. 天津表层土中饱和烃污染物的组成及分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2003, 23(6): 602-605.
- ZHANG Zhihuan, TAO Shu, PENG Zhengqiong, et al. Composition and distribution characterization of saturated hydrocarbon pollutant in Tianjin surface soil [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(6): 602-605.
- [23] 张枝焕, 陶澍, 吴水平, 等. 天津地区河流沉积物中中等分子量正构烷烃的分布特征 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 632-638.
- ZHANG Zhihuan, TAO Shu, WU Shuiping, et al. Composition and distribution of middle-molecular weight normal alkane compounds in sediments from some rivers in Tianjin, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25 (4): 632-638.
- [24] 张枝焕, 陶澍, 沈伟然, 等. 天津地区主要河流表层沉积物中饱和烃的组成和分布特征 [J]. *地球化学*, 2004, 33(3): 291-300.
- ZHANG Zhihuan, TAO Shu, SHEN Weiran, et al. Characterization of saturated hydrocarbon in surface sediments from rivers in Tianjin, China [J]. *Geochimica*, 2004, 33(3): 291-300.
- [25] 张枝焕, 陶澍, 吴水平, 等. 天津地区表层土壤和河流沉积物中正构烷烃化合物的成因分析 [J]. *地球与环境*, 2005, 33(1): 15-22.
- ZHANG Zhihuan, TAO Shu, WU Shuiping, et al. Genetic analysis of normal alkane contaminants in the surface soils and fluvial sediments from Tianjin region [J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(1): 15-22.

(编辑 苗凌)