

苏南某焦化厂场地土壤和地下水特征污染物分布规律研究

尹 勇, 戴中华, 蒋 鹏, 张 华*, 陈莉娜

(常州市环境科学研究院, 江苏 常州 213022)

摘 要:以苏南某焦化厂为研究对象,在对污染区域初步识别的基础上,采集了 0~4.5 m 深的 22 个土壤样品和 2 个地下水样品,利用 GC/MS 等检测了多环芳烃类、总石油烃、苯系物、重金属、总氰化物、挥发酚、硫化物的含量,并研究了其在不同功能区土壤和地下水中的特征分布。结果表明:(1)该焦化场土壤和地下水受到了不同程度的污染,其中炼焦炉周边、焦油和洗油储罐区、焦油和粗苯加工车间是污染最严重的区域;(2)土壤中主要超标污染物是多环芳烃、总氰化物、总石油烃、单环芳香烃、二苯呋喃、苯胺、硫化物、挥发酚和一些苯酚类化合物;(3)地下水重点污染区域粗苯车间受到总氰化物、苯胺、苯酚类、萘、总石油烃、单环芳香烃的严重污染,污水处理站区域地下水主要污染物包括总氰化物、萘、总石油烃、苯。

关键词:土壤污染;地下水污染;焦化厂;多环芳烃;苯

中图分类号:X833;X832 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)08-1525-07

Characteristic Distributions of Typical Contaminants in the Soils and Groudwater of a Coking Plant in the South of Jiangsu Province, China

YI Yong, DAI Zhong-hua, JIANG Peng, ZHANG Hua*, CHEN Li-na

(Changzhou Research Academy of Environment Sciences, Changzhou 213022, China)

Abstract: On the basis of preliminary identification of contaminated zone of a coking plant in the south of Jiangsu Province, the sampling plan was decided, and 22 soil and 2 groundwater samples were collected. The concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), total petroleum hydrocarbons (TPH), volatile organic compounds, monocyclic aromatic hydrocarbons (MAH), total cyanide, heavy metals, sulphide, phenols and so on were analyzed by a gas chromatography equipped with mass spectrometry (GC-MS) and other instruments, and their characteristic distributions in the soils and groundwater of different functional areas were discussed. Results showed that: (1) Soils and groundwater around the coking plant were contaminated, especially the coke oven, tank area of coal tar and cleaning oil, the coal tar and crude benzene processing workshop; (2) The main pollutants in the soils were PAHs, total cyanide, TPH, MAH, dibenzofuran, aniline, sulfide, phenols, and in the no-disturbed soil samples PAHs were accumulated in the topsoil and rapidly decreased with depth; (3) The main pollutants in the groundwater of crude benzene processing workshop were total cyanide, aniline, phenols, naphthalene, TPH, MAH. The main pollutants in the groundwater of sewage treatment station were total cyanide, naphthalene, TPH, benzene. The groundwater of crude benzene processing workshop was contaminated more serious than sewage treatment station.

Keywords: soil pollution; groundwater pollution; coking plant; polycyclic aromatic hydrocarbons; benzene

中国是世界焦炭生产大国,2003 年焦炭产量占世界焦炭总产量的 45.2%,焦炭出口量占世界焦炭出

口贸易总量的 52.6%以上,中国已成为全球焦炭的生产和供应中心^[1]。焦炭需求的急剧增长,给环境带来了极大的压力。随着各地产业结构调整 and 城市化进程的加快,特别是 2008 年《焦化行业准入条件》修订后,提高了行业准入门槛,炼焦和钢铁等一些重污染企业搬离了城区,在城市中留下了大量的污染场地,其中不少场地的污染状况十分复杂,污染物种类繁多,且土

收稿日期:2012-02-02

基金项目:常州市社会发展科技计划项目(CS20100014);江苏省环保科研计划项目(201015)

作者简介:尹 勇(1976—),男,江苏扬州人,工程师,主要从事污染场地环境管理、环境影响评价。E-mail:cztrxf@163.com

* 通讯作者:张 华 E-mail:david-frela@163.com

壤和地下水均受到严重污染^[2-5]。在污染场地的再开发过程中,由于保护措施准备不足和安全防护不到位等原因,导致建设工人暴露于有害气体和有毒化学物质,对工人的健康形成威胁。由于公众对于在污染场地上建设的住宅可能带来的健康风险产生了担忧,造成了大量的污染场地的废弃和闲置,对于这些经历了长期严重污染的焦化场地,有必要对其土壤和地下水的污染状况进行调查和评估^[6-7]。

目前国内外对炼焦过程中对大气环境影响的研究较多,主要有炼焦过程产生的废气和颗粒物中典型化合物,特别是多环芳烃^[8-13]、挥发性有机物^[14-15]的归趋特征。然而,国内外对焦化场地土壤和地下水的污染状况研究较少,主要研究土壤中多环芳烃的分布研究及风险评价^[2,5,16],目前国内只有王培俊等^[17]对焦化场地土壤中典型污染物的分布作了一定的研究,并没有考虑地下水的污染,且由于各个焦化厂的工艺差异,例如熄焦方式的不同,是否有副产品的加工等,产生的土壤和地下水污染特征分布也不尽相同。本文通过对拆迁前的苏南某焦化场地土壤和地下水污染区

域的初步识别,筛选出潜在的污染区域和污染因子,布设土壤和地下水采样点,研究不同工段土壤和地下水中典型污染物的特征分布,以期对焦化污染企业场地调查、健康风险评估、拆迁管理、污染防治和土地再利用等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域简介

本研究选择苏南某焦化厂场地作为研究区域,该厂于 1994 年建成投产,占地面积为 44.58 hm²,地块内包括原老厂区以及 2007 年后征用的用作露天堆场的区域,该厂停产前年产冶金焦 25 万 t、煤气 30 万 m³、冶金活性石灰 20 万 t 以及焦油、粗苯等化工产品。本研究开展时,该厂已经停产,但还未拆迁。

1.2 污染区域识别

该焦化厂焦化工序主要包括备煤、装煤、煤的高温干馏、推焦、熄焦、破碎筛分、荒焦炉煤气净化、化学品回收(包括焦油、粗苯、脱硫)及其废水处理等多步环节。该厂具体的工艺布局见图 1。

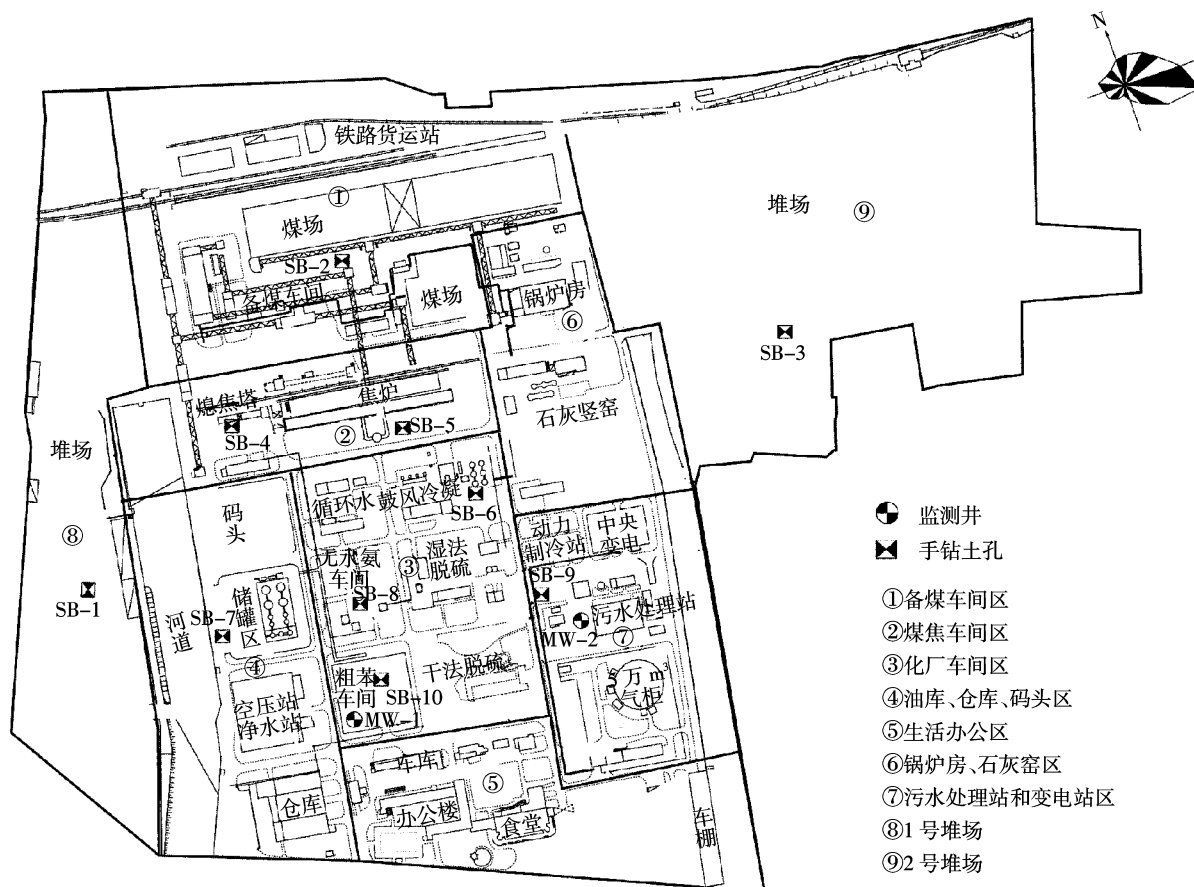


图 1 苏南某焦化厂厂区平面布置图和场地采样点位图

Figure1 Map of factory layout and sampling sites of a coking plant

焦化生产过程中产生的废气、废水和废渣污染非常严重。包括备煤过程产生的煤尘、选煤废水、煤堆渗滤液,装煤过程产生的烟气,炭化室泄露的荒煤气,湿法熄焦产生的烟气、熄焦废水,荒煤气净化、焦油、粗苯精加工产生的烟气、焦化废水和固体废弃物等,其中炼焦炉周边、荒煤气净化车间、焦油和粗苯加工车间是焦化厂污染最严重的区域^[8]。

1.3 采样方案的确定

根据对该焦化厂生产工艺的分析结果和场地的前期调查,按照分区布点原则,重点对生产中可能导致场地污染的环节、区域进行布点采样。该焦化厂分为9个区域(图1)。重点筛选出土壤可能污染的区域包括备煤车间区,煤焦车间区,化厂车间区,油库、仓库和码头区,污水处理站区和堆场区等子区域,地下水可能污染较重的区域为化厂车间区,油库、仓库和码头区,污水处理站区等子区域。在上述几个筛选出的可能污染区域进行初步布点采样,共设置了12个采样点(布设情况见图1),其中地下水监测井2口,手钻土孔10个,地下水监测井在钻探的过程中也采集相应深度的土壤样品,通过场地调研,在识别场地潜在关注区的基础上,按照HJ/T 166—2004土壤环境监测技术规范共采集了22个土样,包括5个表层土壤(0~20 cm以上)、5个亚表层土样(20~80 cm)和12个深层土样(80 cm以下);采用HJ/T 164—2004地下水环境监测技术规范安置了2口地下水监测井,井深为10 m,采集2个地下水样品,为第一承压层水。采用贝勒管采集地下水样品,从监测井中采集水样前,先抽汲超过井内水体积2倍以上的水量,采样深度在地下水水面0.5 m以下,每口监测井配备专用贝勒管。

土壤样品采集前和采样间隔应对所有取样工具进行彻底清洗以防止交叉污染。所有样品均测试了设定的监测物质,样品采集过程中选取了4个土壤平行样品,1个地下水平行样品,1个水样运输空白样(实验室提供)。在实验室样品测定过程中也设置了相应的空白、重复与标准样品。王培俊等^[8]研究发现炼焦生产过程中产生的废气、废水和废渣通过沉降、泄露、淋溶、扩散等过程最终进入到土壤和地下水中,其中所含的多环芳烃、酚类、氰化物、重金属等物质会对土壤和地下水造成污染。结合本焦化场地实际情况,涉及到焦油和粗苯等产品,本焦化场地选取的分析项目包括:重金属(包括汞、砷、铅、锌、铜等共15项),总氰化物、挥发酚、硫化物、多环芳烃类

(包括萘、蒽、菲、荧蒽、芘、苯并[a]芘等共21项)、总石油烃($C_6\sim C_{36}$)、单环芳香烃(苯、甲苯、乙苯、二甲苯、三甲苯)。

1.4 分析方法

重金属15项的分析方法为USEPA 6020A和USEPA 7470A;总氰化物的分析方法为GB/T 5750.5—2006(4)生活饮用水标准检验方法无机非金属指标;挥发酚的分析方法为GB/T 5750.5—2006(9)生活饮用水标准检验方法无机非金属指标;硫化物的分析方法为GB/T 5750.5—2006(6.1,6.2);多环芳烃的分析方法参照USEPA 8270D;总石油烃($C_6\sim C_{36}$)的分析方法参照USEPA 8260C和USEPA 8015C;单环芳香烃的分析方法参照USEPA 8260C。

1.5 评估方法

对监测出的关注污染物进行评估,由于我国目前还没有用于评价商业和居住用地的土壤环境质量标准,评估依据是将相应的污染物浓度与《美国通用筛选值》^[9]相比较,污染物超出筛选值的将被筛选出,作为潜在的关键污染物进行评估。

2 结果与讨论

2.1 场地污染物分析结果

根据该场地监测报告,平行双样测定结果的误差、实验室质控样品加标回收率在HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》和HJ/T 164—2004《地下水环境监测技术规范》中允许误差范围和回收控制限之内,水空白样分析结果也表明样品在运输过程中未受到污染,这都说明本次场地调查的采样、运输和实验室分析过程都能够保证出具数据的可靠性和有效性。

由于该场地拟规划为居住用地,将场地污染数据与《美国通用筛选值》中居住用地标准相比较,《美国通用筛选值》没有相应标准的,采用《荷兰土壤和地下水环境质量标准(DIV,2009)》的干预标准值,污染物超出居住用地筛选值的土壤和地下水中的污染物分析数据以及重金属检出数据见表1。从表1、表2的数据可知:12个土壤采样点中9个土壤采样点位超标,超标率为75%,22个土壤样品中13个样品超标,超标率为59%;2个地下水监测点位都检出超标污染物,超标率为100%。

根据场地污染的数据超标情况,可知该场地土壤和地下水已经受到了一定程度的污染。该场地具体的各区域超出参考标准的污染物清单见表2。

表 1 苏南某焦化厂场地土壤和地下水的污染状况
Table 1 Soil and groundwater pollution of a coking plant site in the south of Jiangsu Province

土壤				地下水			
分析项目	浓度范围/ mg·kg ⁻¹	美国通用 筛选值/mg·kg ⁻¹	超标点位	分析项目	浓度范围/ μg·L ⁻¹	美国通用筛 选值/μg·L ⁻¹	超标点位
pH 值	7.1~9.7	/	—	pH 值	7.2~7.5	/	—
挥发酚 *	1~87	/	—	挥发酚	0~18 200	/	—
锑	0.6~6.6	31	—	锑	2~4	15	—
砷	4~19	60*	—	铬	1~4	/	—
镉	0.6~7.4	70	—	铜	1~2	1500	—
铬	3.9~50.4	/	—	钼	2~4	180	—
铜	6.1~118	3100	—	镍	7~17	730	—
铅	11.7~333	400	—	硒	7~16	180	—
镍	2.7~55.3	1500	—	锌	10~37	11 000	—
锌	10.9~1780	23 000	—	总氰化物 *	12 300~24 300	1500	MW-1,MW-2
可溶性硫化物 *	2~109	/	—	苯胺	0~938	12	MW-1
总氰化物 *	1~836	20	SB-4、SB-6	甲基苯酚 *	0~5050	200	MW-1
二苯呋喃	0.6~611	78	SB-6、MW-1	2,4-二甲基酚	0~915	730	MW-1
萘	0.1~1330	3.6	SB-2、SB-6、SB-7、SB-8、SB-10、MW-1	萘	154~7100	0.14	MW-1,MW-2
荧蒽	0.2~4320	2300	SB-6	2-甲基萘	36~644	150	MW-1
芘	0.1~3180	1700	SB-6	二苯呋喃	29~266	37	MW-1
苯并(a)蒽	0.4~1490	0.15	SB-1、SB-5、SB-6、SB-7、MW-1	总石油烃 *	1040~167 230	600	MW-1,MW-2
蒎	0.5~1430	15	SB-6	苯	3.7~22 800	0.41	MW-1,MW-2
苯并(b)荧蒽	0.7~1550	0.15	SB-1、SB-5、SB-6、SB-7、MW-1	甲苯	1.0~2640	2300	MW-1
苯并(k)荧蒽	0.2~426	1.5	SB-6、SB-7	乙苯	0.2~16.7	1.5	MW-1
苯并(a)芘	0.7~1680	0.015	SB-1、SB-5、SB-6、SB-7、MW-1	1,2,4-三甲基苯	0.2~21.2	15	MW-1
茚并(1,2,3-cd)芘	0.5~1050	0.15	SB-1、SB-5、SB-6、SB-7				
二苯并(a,h)蒽	0.2~235	0.015	SB-1、SB-5、SB-6、SB-7				
总石油烃 *	60~201 100	5000	SB-2、SB-4、SB-6、MW-1				
苯	0.02~61.1	1.1	SB-6、SB-7、SB-10、MW-1				

注:“/”表示无相应的筛选值;“—”表示无相应评价标准或无超标点位;“*”表示采用《荷兰土壤和地下水环境质量标准(DIV,2009)》的干预标准值。

2.2 土壤污染数据评估

从表 1、表 2 的数据可知,该焦化厂土壤主要超标污染物是多环芳烃、总氰化物、总石油烃和单环芳香烃,还有些杂环类物质如二苯呋喃、苯胺等物质超标,有些区域还检出了硫化物、挥发酚和一些苯酚类化合物。特别从表 1、表 2 的数据可知,炼焦炉周边(SB-4/表层、SB-5/表层)、焦油和洗油储罐区(SB-7/0.5 m、SB-7/1.5 m)、焦油回收车间(SB-6/表层)和粗苯加工车间(MW-1/1.0 m、MW-1/3.0 m)检出的污染物类型最多,污染物浓度也较高。炼焦炉周边、焦油和洗油储罐区、焦油和粗苯加工车间是该焦化厂污染最严重的区域。

所检测的重金属(包括汞、砷、铅、锌、铜等共 15 项)在所有的采样点土壤中都达到了美国通用筛选值

的标准,大部分点位重金属浓度水平相近,且浓度较低,这与该焦化厂生产年限较短有关。只有焦油车间(SB-6/表层)点位处重金属浓度较高,例如锌的浓度达 1780 mg·kg⁻¹,铅的浓度为 333 mg·kg⁻¹,可能是焦油回收时的泄漏导致的。

总氰化物在部分采样点土壤中被检出,在 22 个土壤采样点中共有 2 个采样点超过荷兰土壤干涉值的标准。超标点分别位于熄焦塔(SB-4/表层)、焦油车间(SB-6/表层)。总氰化物超标的原因是该焦化厂采用湿法熄焦,而熄焦废水中总氰化物浓度较高,从而导致熄焦塔附近及推焦线路总氰化物超标;焦油回收车间废水采用未作规范防渗的暗渠收集,存在一定的渗漏,焦油收集作业的不规范,导致现场地面和排水沟中都有一定的焦油泄漏,这些导致了焦油车间 SB-

表 2 各区域超过参考标准污染物清单

Table 2 List of pollutants exceeding the reference standards in the different regions

区域/点位	样品介质	参数
A、备煤车间区域		
SB-2/表层	土壤	总石油烃、萘
B、煤焦车间区域		
SB-4/表层	土壤	总氰化物、总石油烃
SB-5/表层	土壤	苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽
C、污水处理站和变电站区域		
MW-2-W	地下水	总氰化物、萘、总石油烃、苯
D、油库、仓库、码头区域		
SB-7/0.5m	土壤	萘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、苯
SB-7/1.5m	土壤	萘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽、苯
E、化厂车间区域		
SB-6/表层	土壤	总氰化物、二苯呋喃、萘、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽、总石油烃、苯
SB-8/0.5 m	土壤	萘
SB-8/1.5 m	土壤	萘
SB-10/1.0 m	土壤	苯、萘
MW-1/1.0 m	土壤	二苯呋喃、萘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、总石油烃、苯
MW-1/3.0 m	土壤	二苯呋喃、萘、苯
MW-1/5.5 m	土壤	萘、苯
MW-1-W	地下水	总氰化物、苯胺、甲基苯酚、2,4-二甲基酚、萘、2-甲基萘、二苯呋喃、总石油烃、苯、甲苯、乙苯、1,2,4-三甲基苯
F、后征用露天堆场区域		
SB-1/表层	土壤	苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽

6 点位处的总氰化物超标。

从多环芳烃类(包括萘、芴、蒽、菲、荧蒽、芘、苯并[a]芘等共 21 项)的检测结果来看,超标污染物主要有萘、荧蒽、芘、苯并(a)蒽、屈、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽,超标主要集中在表层土壤,随着深度的增加而急剧减少。萘超标的点位有备煤车间的机修区(SB-2/表层)、焦油和洗油储罐区的物料出口下方(SB-7)、化厂车间区域(SB-6、SB-8、SB-10、MW-1),其中焦油回收车间 SB-7 点位浓度超过土壤筛选值 368.4 倍。苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘超标的点位有 1 号堆场(SB-1)、焦炉烟囱下方(SB-5 表层)、化厂车间区域(SB-6/表层、MW-1/表层)、焦油和洗油储罐区的物料出口下方(SB-7),其中最高浓度点位都是焦油回收车间的 SB-6/表层。此外,荧蒽、芘、蒽、苯并(k)荧蒽、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)蒽也存在严重超标的现象,主要位于化厂车间区域、煤焦车间区域、焦油和洗油的储罐区、1 号堆场。焦化厂以煤为主要原料,其各个商场车间内化石燃料的不完全燃烧以及焦油、煤气等化工产品的加工过程都可能导致多环芳烃类

物质的排放^[20]。冯嫣等^[2]对北京市某废弃焦化厂进行的研究显示,该厂不同车间表层土壤(0~20 cm)总 PAHs (ΣPAHs)的残留量介于 672.8~144 814.3 ng·g⁻¹ 之间;污染程度排序为回收车间>老粗苯车间>焦油车间>炼焦车间>水处理车间>制气车间;该厂未受扰动的土壤样品显示 PAHs 主要聚集在表层土壤,并随着土壤深度的增加而迅速减少;焦化厂土壤 PAHs 污染主要集中在 3 环和 4 环的 PAHs 单体上。

单环芳香烃(苯、甲苯、乙苯、二甲苯、三甲苯)在多数采样点土壤中被检出,但是只有苯超标。苯超标点位主要位于焦油和洗油的储罐区(SB-7)、化厂车间区域(SB-6、SB-10、MW-1),其中粗苯车间(SB-7/1.0 m)处浓度最高,超过土壤筛选值 54.5 倍。这说明粗苯提炼车间在环保措施不到位的情况下,土壤很容易受到苯的污染。

从表 1、表 2 还可以看出,部分点位土壤中总石油烃(C₆~C₃₆)超标较严重。超标点位主要集中在备煤车间的机修区(SB-2/表层)、熄焦塔(SB-4/表层)、焦油回收车间(SB-6/表层)、粗苯车间(MW-1/1.0 m)。这说明炼焦生产会导致部分区域土壤受到总石油烃

的污染,包括机械维修区的油类污染、提炼粗苯及粗焦油等产品中、湿法熄焦过程产生的废水、产品的淋溶等都会导致该区域土壤中总石油烃的超标。

2.3 地下水污染数据评估

本研究只在粗苯车间和污水处理站区域设置了两口监测井。从表 1、表 2 的数据可知该焦化厂主要超标污染物包括多环芳烃、总氰化物、总石油烃和单环芳香烃,还有些杂环类物质如苯胺、二苯呋喃等物质超标,粗苯车间点位还检出了挥发酚和一些苯酚类化合物。粗苯车间的污染要比污水处理站区域重,检出的超标污染物种类多。这与该厂污水处理站建设标准较高,使用时间较短,防渗和处理效果较好有关,所以该厂区地下水处理站区域污染相对较轻。

粗苯车间区域的 MW-1 点位检出的超标污染物包括总氰化物、苯胺、甲基苯酚、2,4-二甲苯酚、萘、2-甲基萘、二苯呋喃、总石油烃、苯、甲苯、乙苯、1,2,4-三甲基苯。总氰化物浓度超过荷兰地下水干涉值 15.2 倍;萘浓度超过美国筛选值的 50 713.3 倍;苯超过美国筛选值的 50 668.8 倍;总石油烃超过荷兰地下水干涉值 277.7 倍;其余超标污染物也都存在严重超标的现象。

地下水处理站区域的 MW-2 点位检出的超标污染物包括总氰化物、萘、总石油烃、苯。总氰化物浓度超过荷兰地下水干涉值 7.2 倍;萘浓度超过美国筛选值的 1 099 倍;苯超过美国筛选值的 8 倍;总石油烃超过荷兰地下水干涉值 0.7 倍。

3 结论

(1)虽然该焦化场地只有 15 a 的生产历史,但已经使得场地土壤和地下水受到不同程度的污染。其中炼焦炉周边、焦油和洗油储罐区、焦油和粗苯加工车间是该焦化厂污染最严重的区域。

(2)焦化厂土壤中主要超标污染物是多环芳烃、总氰化物、总石油烃、单环芳香烃、二苯呋喃、苯胺等,有些区域还检出了硫化物、挥发酚和一些苯酚类化合物。

(3)粗苯车间区域地下水受到总氰化物、苯胺、甲基苯酚、2,4-二甲苯酚、萘、2-甲基萘、二苯呋喃、总石油烃、苯、甲苯、乙苯、1,2,4-三甲基苯的严重污染。污水处理站区域地下水超出筛选值的污染物包括总氰化物、萘、总石油烃、苯。

参考文献:

[1] 郑文华. 中国炼焦工业现状及其发展趋势[J]. 中国煤炭, 2004, 30

(10):11-20.

ZHENG Wen-hua. Current conditions and development tendency of China coke industry[J]. *China Coal*, 2004, 30(10):11-20.

[2] 冯 嫣,吕永龙,焦文涛,等.北京市某废弃焦化厂不同车间土壤中多环芳烃(PAHs)的分布特征及风险评价[J].生态毒理学报,2009,4(3):399-407.

FENG Yan, LÜ Yong-long, JIAO Wen-tao, et al. Distribution and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from different workshops of an abandoned coking factory in Beijing[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2009, 4(3):399-407.

[3] 赵 丹,廖晓勇,闫秀兰,等.不同化学氧化剂对污染场地多环芳烃的修复效果[J].环境科学,2011,32(3):857-863.

ZHAO Dan, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, et al. Chemical oxidants for remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons at a coking site[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3):857-863.

[4] 卢晓霞,李秀利,马 杰,等.焦化厂多环芳烃污染土壤的强化生物修复研究[J].环境科学,2011,32(3):864-869.

LU Xiao-xia, LI Xiu-li, MA Jie, et al. Enhanced bioremediation of coking plant soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(3):864-869.

[5] 李合莲,陈家军,吴 威,等.焦化厂土壤中多环芳烃分布特征及淋洗粒级分割点的确定[J].环境科学,2011,32(4):1154-1158.

LI He-lian, CHEN Jia-jun, WU Wei, et al. Distribution patterns of PAHs in soils from coking plant and the particle-size cut points of soil washing[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4):1154-1158.

[6] 谢 剑,李发生.中国污染场地的修复与再开发的现状分析[J].世界环境,2011(3):58-61.

XIE Jian, LI Fa-sheng. Overview of the current situation on brownfield remediation and redevelopment in China[J]. *World Environment*, 2011(3):58-61.

[7] 龚宇阳.国际经验综述:污染场地管理政策与法规框架[R].世界银行.可持续发展:东亚及太平洋地区研究报告,2010.

GONG Yu-yang. International experience in policy and regulatory frameworks for brownfield site management[R]. The World Bank. Sustainable Development: East Asia and Pacific Region, 2010.

[8] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, et al. Chemical constituents in particulate emissions from an integrated iron and steel facility[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(1-2):111-119.

[9] Choi S D, Baek S Y, Chang Y S. Influence of a large steel complex on the spatial distribution of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) determined by passive air sampling using membrane-enclosed copolymer (MECOP)[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(29):6255-6264.

[10] 刘大锰,王 玮,李运勇.首钢焦化厂环境中多环芳烃分布赋存特征研究[J].环境科学学报,2004,24(4):746-749.

LIU Da-meng, WANG Wei, LI Yun-yong. Distribution and occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons from the Shougang coking plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4):746-749.

[11] 王福生,唐 锐,李恩科,等.焦化厂环境粉尘中多环芳烃污染危害分析[J].中国安全生产科学技术,2010,6(1):58-62.

WANG Fu-sheng, TANG Rui, LI En-ke, et al. Study on the pollution hazard of PAHs in the dust from the coking environment[J]. *Journal of*

- Safety Science and Technology*, 2010, 6(1):58–62.
- [12] 李鹏宾, 严 琼, 曹 民. 某焦化厂气态和颗粒物中多环芳烃水平和成分谱特征分析[J]. 中国职业医学, 2010, 37(3):211–213.
LI Peng-bin, YAN Qiong, CAO Min. Analysis on the PAH level and source profile characteristics in the air and particulate of a coke plant [J]. *China Occupational Medicine*, 2010, 37(3):211–213.
- [13] 王 静, 朱利中, 沈学优. 某焦化厂空气中 PAHs 的污染现状及健康风险评估[J]. 环境科学, 2003, 24(1):135–138.
WANG Jing, ZHU Li-zhong, SHEN Xue-you. PAHs pollution in air of coke plant and health risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(1):135–138.
- [14] Ciaparra D, Aries E, Booth M J, et al. Characterisation of volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of steelworks[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(12):2070–2079.
- [15] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, et al. Volatile organic compound constituents from an integrated iron and steel facility[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 157(2–3):569–578.
- [16] Li H L, Chen J J, Wu W, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in different size fractions of soil from a coke oven plant and its relationship to organic carbon content[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 176(1–3):729–734.
- [17] 王培俊, 刘 俐, 李发生, 等. 西南某焦化场地土壤中典型污染物的特征分布[J]. 煤炭学报, 2011, 36(9):1587–1592.
WANG Pei-jun, LIU Li, LI Fa-sheng, et al. Characteristic distribution of typical contaminants in the soil of a coking plant site in the south-west of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(9):1587–1592.
- [18] 王培俊, 刘 俐, 李发生, 等. 炼焦过程产生的污染物分析 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(12):114–118.
WANG Pei-jun, LIU Li, LI Fa-sheng, et al. Analysis on pollutant occurred from coking process[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(12):114–118.
- [19] US EPA. Regional screening level(RSL) summary table[EB/OL]. http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rb-concentration_table/Gener-ic_Tables/pdf/master_sl_table_run_NOV2011.pdf.
- [20] 智红梅. 焦化工业与环境保护[J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(24):119–121.
ZHI Hong-mei. Coking industry and environmental protection [J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2005, 15(24):119–121.