

页岩气开采钻井固体废物的污染特性

吴娜^{1,2}, 聂志强^{2*}, 李开环², 孙英杰¹, 蔡洪英³, 张曼丽³, 周琼³, 黄启飞² (1.青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2.中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室/土壤与固体废物环境研究所, 北京 100012; 3.重庆市固体废物管理中心, 重庆 401147)

摘要: 选取重庆某地区 3 个页岩气田作为研究对象, 研究了 5 个钻井平台页岩气开采过程中废水基和油基钻井岩屑中重金属、多环芳烃(PAHs)和石油烃的污染特性。结果表明, 两类钻井岩屑中 Ba 元素平均含量明显高于其他重金属, 废水基钻井岩屑的重金属以 Zn、Ba、Cr、Ni、Cu、Pb 为主, 油基钻井岩屑中的重金属以 Ni、Cu、Zn、Pb、Ba、As、Cr 为主且 Ni、Cu、Zn、Pb 平均含量超过《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)标准限值。废水基和油基钻井岩屑中 PAHs 的范围分别为 1.74~14.8mg/kg 和 302~595mg/kg, 均未超过 GB5085.6-2007 标准限值。油基钻井岩屑石油烃含量为 112~213g/kg, 远超 GB5085.6-2007 标准限值。同时, 废水基和油基钻井岩屑中 BaP 超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)标准限值; 油基钻井岩屑中部分 PAHs(BaP、BbF、BkF、DahA)浓度超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)中筛选值, 岩屑中石油烃含量远超管制值。

关键词: 页岩气; 固体废物; 重金属; PAHs; 石油烃; 污染特性

中图分类号: X54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2019)03-1094-07

Pollution characteristics of solid waste in shale gas mining drilling. WU Na^{1,2}, NIE Zhi-qiang^{2*}, LI Kai-huan², SUN Ying-jie¹, CAI Hong-ying³, ZHANG Man-li³, ZHOU Qiong³, HUANG Qi-fei² (1.School of Environmental and Municipal Engineer, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Soil and Solid Waste Environmental Research Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3.Chongqing Solid Waste Management Center, Chongqing 401147, China). *China Environmental Science*, 2019,39(3): 1094~1100

Abstract: Three shale gas fields in Chongqing were selected. The pollution characteristics of heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and petroleum hydrocarbons in wastewater-based and waste oil-based drilling cuttings from the shale gas mining of five drilling platforms were studied. The concentration of Ba in wastewater-based and waste oil-based drilling cuttings was significantly higher than that of other heavy metals. Zn, Ba, Cr, Ni, Cu and Pb were the main heavy metals in the wastewater-based drilling cuttings. While Ni, Cu, Zn, Pb, Ba, As, Cr were the main heavy metals in the waste oil-based drilling cuttings and among which the concentration of Ni, Cu, Zn and Pb exceeded the corresponding limit. The concentration of PAHs in wastewater-based and waste oil-based drilling cuttings were 1.74~14.8mg/kg and 302~595mg/kg, respectively, which did not exceed the limit of the identification standards for hazardous wastes-identification for toxic substance content. The concentration of the petroleum hydrocarbon in waste oil-based drilling cuttings was 112~213g/kg, which was much higher than the limit of the identification standards for hazardous wastes-identification for toxic substance content. At the same time, the concentration of BaP in the wastewater-based and waste oil-based drilling cuttings was higher than the limit of the soil environmental quality-risk control standard for soil contamination of agricultural land; the concentration of BaP, BbF, BkF and DahA in the waste oil-based drilling cuttings were higher than the screening values of the soil environmental quality-risk control standard for soil contamination of development land and the concentration of the petroleum hydrocarbons in the drilling cuttings were much higher than the intervention values.

Key words: shale gas; solid waste; heavy metals; PAHs; petroleum hydrocarbons; pollution characteristics

重庆地区页岩气资源丰富,可开采储量约 2.05 亿方^[1],而页岩气在勘探开发过程中会产生大量的固体废物。据测算,典型单井清水钻、水基钻井共产生普通岩屑量约为 1085m³,产生油基岩屑约为 215m³,产生废钻井泥浆和污泥约为 48.1m³。截至目前,重庆某地区的页岩气田累计产生钻井固体废物已超过 43 万 m³^[2],这些固体废物主要来自于钻井过

程中的废弃泥浆及岩屑,含无机盐、有机化合物、重金属离子及石油烃类等污染物。国内外钻井岩屑处理处置方法主要有直接排放法、固化处理法、

收稿日期: 2018-08-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2018YSKY-009); 北京市自然科学基金资助项目(8172048)

* 责任作者, 副研究员, niezq@craes.org.cn

土地耕作法、焚烧处理法、热解法、萃取技术、密封填埋法和化学清洗法等。目前,大多研究以油气田开采产生的固体废物污染特性为主^[3-6]。例如,研究发现油气田钻井过程中产生的固体废物主要包括废气泥浆、钻井岩屑和生活垃圾,污染物主要有石油类、COD 及部分重金属^[3];张鲜等^[4]研究了某大型气田固体废物对环境的影响,发现其中含有的石油类、挥发酚、有机物、重金属、盐离子和碱性物等污染物对人体和环境有不同程度的损害。然而,目前针对页岩气开采钻井固体废物污染特性的研究较少,有研究发现有机物、重金属和碱性物质是油基钻井中的三类毒性物质,其中重金属以 Zn、As、Hg、Cd 四种元素为主^[7]。由于页岩气属于非常规天然气,在开采过程所采用的工艺、固体废物产生及污染特性、固体废物处理处置方法均较常规油气田的开采有所不同。因此,为控制页岩气开采固体废物对环境 and 人类健康所产生的影响^[8-9],对页岩气开采固体废物污染特性的研究亟待开展。

本研究选取具有代表性的重庆市某地区的 3 个页岩气田作为研究对象,采集 5 个钻井平台钻井阶段产生的废水基钻井岩屑、废油基钻井岩屑样品,对其中重金属、PAHs、石油烃含量进行了分析测定,明确固体废物的污染特性,以期为页岩气开采的污染控制提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究的废钻井岩屑来源于重庆某地区页岩气开采所产生,页岩气钻井阶段采用三开钻井方式,分别采集了 A、B、C、D、E 5 个平台的废钻井岩屑,各钻井平台为不同位置的钻井岩屑综合处置场。其中在 D、E 钻井平台采集废水基钻井岩屑,废水基钻井岩屑产生于钻井平台的二开斜井段,采用水基钻井液钻井工艺;在 A、B、C 和 E 钻井平台采集废油基钻井岩屑,废油基钻井岩屑产生于钻井平台的三开水平井段,采用油基钻井液钻井工艺。废水基和油基钻井岩屑样品按照《工业固体废物采样制样技术规范》(HJ/T20-1998)^[10]进行采集,其中废水基钻井岩屑采集泥浆池、固相控制设备筛下岩屑,岩屑呈暗灰色,泥状固液混合物;废油基钻井岩屑采集振动筛和集中贮存池中岩屑,岩屑为黑色黏稠状。采集后

的样品均置于洁净广口棕色旋盖玻璃瓶中,运回实验室后于 4℃ 冷藏保存。

1.2 样品的测定

1.2.1 重金属含量测定 依据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB5085.3-2007)^[11](附录 A 固体废物 元素的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法)测定样品中各种重金属的含量。首先,称取 0.2g 样品放入 25mL 聚四氟乙烯消解罐中,加入 2mL 盐酸、8mL 硝酸、2mL 氢氟酸和 2mL 双氧水,盖上聚四氟乙烯盖,放置电热板上 175℃ 加热(在对废油基钻井岩屑进行消解时可适当添加双氧水,有研究表明双氧水可以破坏废油基钻井岩屑中的有机物和聚合物,提高消解效果^[12])。消解完成后冷却至室温,然后将消解罐放置 150℃ 电热板上加热赶酸,至内溶物近干。最后冷却至室温,用去离子水溶解内溶物,将溶液定容至 50mL。消解液采用电感耦合等离子体质谱仪(赛默飞 ICAP7200DUO),测试重金属 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Be、Ba、Ni、Ag、Se、Hg、V、Mn、Co、Sb、Tl、As 的含量。

1.2.2 样品 PAHs 的测定 参照《土壤和沉积物多环芳烃的测定高效液相色谱法》(HJ784-2016)^[13]测定样品中 PAHs 的含量。首先,称取 2g 样品于 50mL 离心管中,加入二氯甲烷和正己烷(1:1)30mL,30℃ 下在超声波清洗器中提取并用台式离心机离心 10min,离心速度 3500r/min,将上清液转移至鸡心瓶中,重复提取 3 次后用旋转蒸发仪浓缩。然后,在玻璃层析柱中依次加入无水硫酸钠、硅胶吸附剂、中性氧化铝和无水硫酸钠,再加入 25mL 二氯甲烷淋洗、40mL 正己烷洗脱,接着将浓缩后的提取液移至硅胶层析柱,并加入二氯甲烷和正己烷(1:1)40mL 洗脱,洗脱液旋蒸后转移至玻璃离心管。最后,采用氮吹法浓缩约 2mL 后加入乙腈转换溶剂并定容到 1mL,转移至样品瓶 4℃ 遮光密封保存待测。PAHs 提取液采用高效液相色谱仪(安捷伦 ISWM-1003)测定 16 种 EPA 限制的 PAHs:萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(An)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、蒎(Chy)、苯并(a)蒽(BaA)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、茚并(1,2,3-cd)芘(InP)、二苯并(a,h)蒽(DahA)、苯并(g,h,i)芘(BghiP)。

1.2.3 石油类测定 石油类的测定参照《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)^[14]

(附录 O 固体废物 可回收石油烃总量的测定 红外光谱法)用傅里叶变换红外光谱仪(天津港东 FTIR-650)进行测定.

1.3 质量控制

实验过程中的质量控制/质量保证(QA/QC)参照 GB5085.3-2007 和 HJ784-2016 方法,包括平行样测定、加标回收率测定等,同时每隔 5 个样品,进溶剂空白、标准溶液以及过程空白.重金属检出限范围为 0.12~0.48 $\mu\text{g/L}$,平均加标回收率范围为 90%~105%;PAHs 检出限范围为 0.001~0.006 $\mu\text{g/L}$,平均加标回收率范围为 81%~101%.

2 结果与讨论

2.1 重金属污染特征

2.1.1 废水基钻井岩屑重金属污染特性 D、E 钻井平台废水基钻井岩屑中的重金属平均含量测定结果如图 1 所示,所测重金属平均含量均未超过《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)^[14]标准限值,同时未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[15]和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)^[16]中规定含量.但 Zn、Ba、Cr 的平均含量相对较高,为废水基钻井岩屑中的主要重金属污染物,Ni、Cu、Pb 的平均含量相对较少,其他重金属均未检出.D 平台废水基钻井岩屑中 Cr、Ni、Cu、Zn 含量小于 E 平台,但 Pb、Ba 的含量大于 E 平台.原因可能是 D 平台废水基钻井岩屑采集于固控设备筛下岩屑,未浓缩;E 平台采集于泥浆池内,由于蒸发浓缩可能导致浓度变高,同时,由于地层影响,部分重金属可能来源于地层.D 和 E 平台废水基钻井岩屑中 Ba 元素平均含量明显高于其他重金属,最高含量分别为 4668mg/kg 和 3654mg/kg,原因可能是钻井过程中为增加钻井泥浆密度,通常加入加重材料重晶石(主要成分 BaSO_4),而典型工业重晶石大约包含 53%Ba 元素所致^[17].吴明霞^[18]对水基钻井液的组分和毒性进行了研究,发现水基钻井液的大部分组分无毒难降解,但是其中重晶石粉、氢氧化钾及氧化钙具有化学毒性.

页岩气属于非常规油气,开采过程以及工艺与石油天然气具有一定差异.D 和 E 钻井平台废水基钻井岩屑重金属平均含量与部分地区石油天然气

开采过程中废水基钻井岩屑具有一定差异.塔里木油田塔北地区废水基钻井岩屑中 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 元素与 D 和 E 钻井平台含量相当,同时检测出 As^[19].而 D 和 E 钻井平台废水基钻井岩屑 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Ba、As 元素平均含量均低于四川大巴山某气田和 Alaskan Arctic 地区钻井所产生的水基钻井泥浆^[20-21].

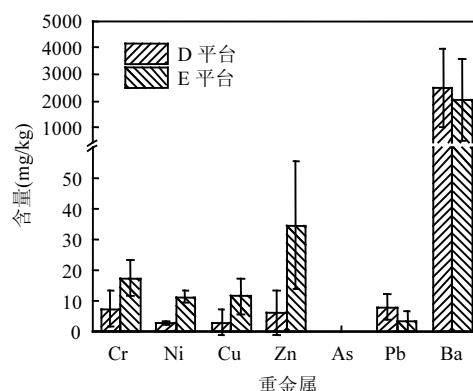


图 1 废水基钻井岩屑重金属含量

Fig.1 Wastewater-based drilling cuttings heavy metal content

2.1.2 废油基钻井岩屑重金属污染特性 废油基钻井岩屑主要以岩屑为主,同时含有少量的油基钻井液,重金属主要来源于油基钻井液和井下地层,图 2 显示各平台废油基钻井岩屑不同重金属含量.根据《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)^[14],所测的重金属中 Ni、Cu、Zn、Pb 4 种重金属平均含量超过标准限值,Ba 的平均含量较高但没有超过标准限值,Cr、As 的平均含量相对较低,其它重金属元素均未检出.A 平台 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Ba 元素平均含量较其他平台均为最高,分别为 42.0,56.7,35.4,186,83.2,2292mg/kg,不同平台之间 Cr、Ni、Cu、As 的差异较小,Zn、Pb、Ba 差异较大.Ba 的平均含量差异较大,主要可能是由于不同钻井深度具有不同的地层压力,根据地层压力钻井液中加入不同量的重晶石粉来稳定和调节钻井液密度.先前的研究表明钻井液所添加的添加剂,一般会导致钻井液中 Zn、Pb 等金属元素含量的增加^[22],因此 Zn、Pb 差异较大主要来源于不同钻井条件下添加剂影响.同一平台钻井岩屑不同重金属含量差异也较大,整体而言,Ba 元素平均含量最大,其次是 Zn 元素, Cr、Ni、Cu 含量相当.根据上述分析,Zn、Pb、Ba 主要受到添加剂影响,Cr、Ni、Cu、

As 主要来源于深井地层。

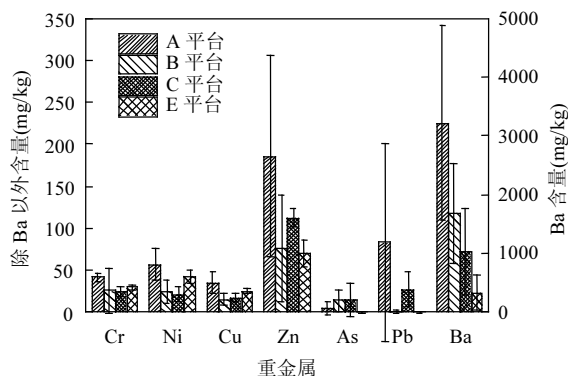


图2 废油基钻井岩屑不同重金属含量

Fig.2 Waste oil-based drilling cuttings with different heavy metal content

由于页岩气开采工艺特殊,以及地层环境的不同,本研究的废油基钻井岩屑重金属平均含量与其他油气田开采地区差异较大,Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 平均含量均明显高于西南某页岩气废油基钻井岩屑中含量(2.41,2.46,1.19,5.92,0.53,2.12mg/kg)^[23],但均未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[15]和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)^[16]中规定浓度。

2.2 PAHs 污染特征

2.2.1 废水基钻井岩屑 PAHs 污染特性 废水基钻井岩屑主要以岩屑、水、黏土(主要用膨润土)、以及各种有机和无机材料组成,废水基钻井岩屑中的 PAHs 主要来源于添加剂,包括润滑剂、降滤失剂等。如图 3 所示,E 钻井平台的废水基钻井岩屑 Σ PAHs 浓度明显高于 D 平台,分别为 14.8 和 1.74mg/kg。E 平台废水基钻井岩屑采集于泥浆池内,泥浆池内废水基钻井岩屑经过加药、絮凝、沉淀、浓缩,上清液回收利用配置水基钻井液,在整个钻井阶段泥浆池内的废水基钻井岩屑不断进行浓缩,D 平台废水基钻井岩屑采集于固控设备筛下岩屑,尚未经过浓缩,因此导致 E 钻井平台的废水基钻井岩屑中 Σ PAHs 浓度明显高于 D 钻井平台。废水基钻井岩屑中 Σ PAHs 含量均未超过《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)^[14]标准限值。

D 和 E 钻井平台的废水基钻井岩屑中不同环数

的 PAHs 的组成结构相似,均以 4 环 PAHs 为主,所占百分比分别为 41.9%和 46.8%,2~3 环 PAHs 浓度最低,所占百分比分别为 22.1%和 22.2%,5~6 环 PAHs 所占百分比分别为 36.0%和 31.0%。这与潘峰等^[24]研究结果相似,可能与小分子 PAHs 容易通过挥发和淋溶作用迁移,而高环数的 PAHs 不易降解有关。

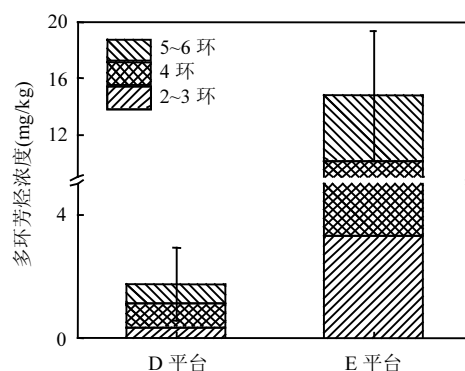


图3 D、E 钻井平台废水基钻井岩屑 Σ PAHs 及 2~3 环、4 环、5~6 环 PAHs 浓度

Fig.3 D, E drilling platform wastewater based drilling debris Σ PAHs and 2~3 ring, 4 ring, 5~6 ring PAHs concentration

D、E 钻井平台废水基钻井岩屑中 16 种 PAHs 浓度分布如图 4 所示。D 钻井平台 Fla 含量为最高,约占总量的 18%,其次,Phe、Pyr、BbF 含量也较高,为岩屑中主要污染物。而 E 平台 Pyr 含量最高,约占总量的 17%,其次是 Phe。其中 E 钻井平台中 BaP 浓度超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[15]中规定的 0.55mg/kg,但两平台 Σ PAHs 浓度均未超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)^[16]中第二类用地的筛选值。

2.2.2 废油基钻井岩屑 PAHs 污染特性 A、B、C、E 钻井平台内废油基钻井岩屑中的 Σ PAHs 及 2~3 环、4 环、5~6 环 PAHs 浓度如图 5 所示,不同钻井平台之间 Σ PAHs 浓度差异较大,从高到低为 C 平台>B 平台>A 平台>E 平台。C 平台浓度最高,为 595mg/kg,高于原油储罐底泥中 Σ PAHs 的浓度 550mg/kg^[25],E 平台浓度最低,为 302mg/kg。A、B、C 三个平台废油基钻井岩屑中 Σ PAHs 浓度均低于中原油田原始油泥和干油泥中含量(1953~4112mg/kg)^[26]。废油基钻井岩屑中 Σ PAHs 含量均未超过《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)^[14]标准限值。

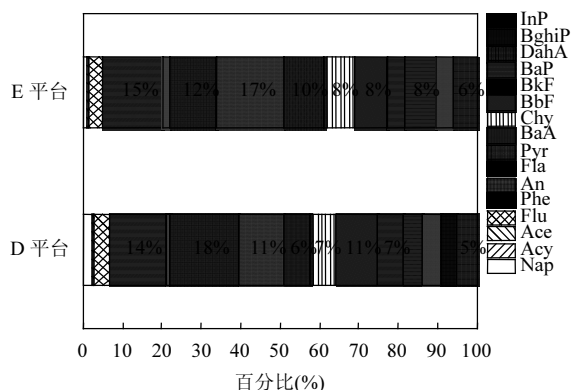


图4 D、E钻井平台废水基钻井岩屑中 PAHs 各同系物浓度分布

Fig.4 Concentration distribution of PAHs in the cuttings of D and E drilling platforms

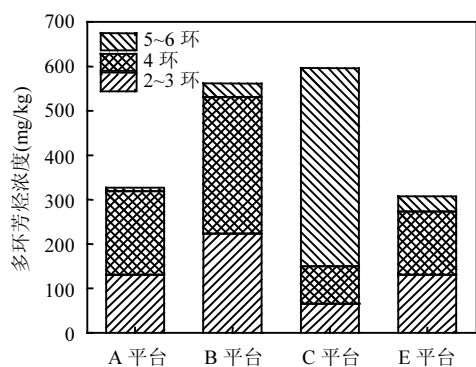


图5 A、B、C、E钻井平台废油基钻井岩屑ΣPAHs及2~3环、4环、5~6环PAHs浓度

Fig.5 A, B, C, E drilling platform waste oil-based drilling debris Σ PAHs and 2~3 ring, 4 ring, 5~6 ring PAHs concentration

不同环数的 PAHs 含量不同.A、B、E 钻井平台废油基钻井岩屑都以 4 环 PAHs 为主,分别占 Σ PAHs 的 47.5%、57.2%、54.5%,其次是 2~3 环 PAHs,分别占 Σ PAHs 的 40.7%、40.6%、39.8%,5~6 环 PAHs 含量最少,E 钻井平台仅为 11.8%,A 和 B 钻井平台所占比例均不到 10%.而 C 钻井平台的废油基钻井岩屑中 PAHs 以 5~6 环为主(74.5%),4 环 PAHs 含量最少(11.0%).

相关研究发现 PAHs 来源分为热转化和成岩作用.热转化是化石、非化石燃料在高温厌氧环境下生成,而成岩作用则主要来自原油形成过程^[27].研究发现高环(4 环及 5~6 环)的 PAHs 主要来源于热转化过程,低环(2~3 环)PAHs 则主要来源于成岩作用^[28-29].通常利用低环(LMW)/高环(HMW)比例来判断来源,当 $LMW/HMW < 1$ 时,说明 PAHs 来源

于热转化,反之则来源于成岩作用^[30].本次研究中 A、B、C、E 钻井平台废油基钻井岩屑 LMW/HMW 比值分别为 0.687、0.682、0.660、0.124,均小于 1,而且在深井地层由于地热和摩擦的作用,导致油基钻井液温度较高,具备热转化的条件,所以 PAHs 主要来源于热转化.

如图 6 所示,A、B、E 钻井平台废油基钻井岩屑中 Fla 浓度最大,其次是 Phe,为岩屑中的主要污染物,而 C 钻井平台废油基钻井岩屑中 BkF 浓度最大,占到 PAHs 总量的 69.3%.4 个平台的 BaP 浓度均超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)^[15]中规定的 0.55mg/kg,同时四个平台的 BaP,C 平台的 BbF、BkF 和 E 平台的 BbF、DahA 浓度也超过《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)^[16]中第二类用地的筛选值,但都未超过管制值.

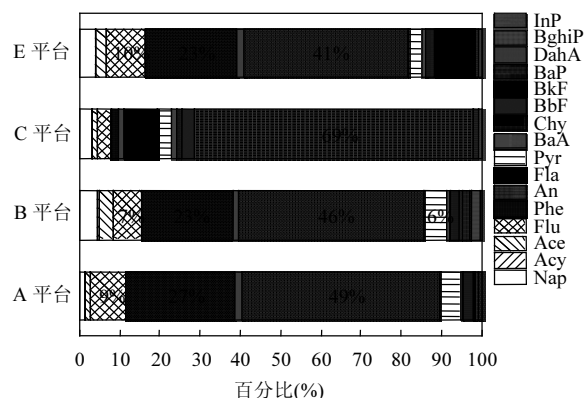


图6 A、B、C、E钻井平台废油基钻井岩屑中 PAHs 各同系物浓度分布

Fig.6 Concentration distribution of PAHs in the cuttings of waste oil-based drilling in A, B, C and E drilling platforms

2.3 石油烃污染特征

含油污泥是油田开发过程中产生的主要污染源,被《国家危险废物名录》(2016)^[31]列为危险废物进行管理.含油污泥来源于罐底泥、浮渣和落地原油等^[32],其石油烃含量一般在 10%(干重)以上,部分高达 20%~30%,因此石油烃是含油污泥中的主要污染物.

黄晓英等^[33]采用四氯化碳对含油污泥进行振荡提取 120min,用红外分光光度法测定石油烃含量,含量为 0.074~14.6g/kg.王小雨等^[34]对莫莫格湿地油田进行开采,油田开采 20 年时周围土壤中石油烃含量最高可达 50g/kg.美国得克萨斯州把石油烃浓度

10g/kg 作为油田开采区污染管理标准^[35]。本次研究中页岩气开采产生的废油基钻井岩屑石油烃含量为 112~213g/kg,远远超过《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB5085.6-2007)^[14]标准限值和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB36600-2018)^[16]中规定的 9g/kg,浓度最大的为 B 平台废油基钻井岩屑,浓度最低的为 A 平台。

废油基钻井岩屑石油烃的含量与钻井过程中油基钻井液的使用量有关,由不同的地层环境和钻井深度决定,同时还与钻井平台的废油基钻井岩屑固液分离装置分离效果有关,不同的分离装置,在进行固液分离时分离效果也不同,导致石油烃含量差距也较大。本研究平台在进行废油基钻井岩屑处理前需要对暂存池内的钻井岩屑进行调和,包括固液比,石油烃含量等,以保证设备的最佳运行状态,所以通常还会添加一部分分离出的钻井液,控制废油基钻井岩屑的粘稠度、固液比等。因此 B 和 C 平台内的废油基钻井岩屑很有可能已经添加部分分离出的钻井液,导致石油烃含量较高。

3 结论

3.1 废水基钻井岩屑中 Zn、Ba、Cr 的平均含量相对较高,废油基钻井岩屑中 Ba 元素平均含量明显高于其他重金属,且 A 钻井平台 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Ba 元素平均含量较其他平台均为最高。

3.2 废水基钻井岩屑中 PAHs 的组成均以 4 环为主,PAHs 浓度范围为 1.74~14.8mg/kg, E 钻井平台的 PAHs 浓度明显高于 D 平台。废油基钻井岩屑中 A、B、E 钻井平台都以 4 环 PAHs 为主, C 钻井平台以 5~6 环为主, PAHs 浓度从高到低为 C 平台>B 平台>A 平台>E 平台,浓度范围为 302~595mg/kg。

3.3 废油基钻井岩屑石油烃含量范围为 112~213g/kg,其中 B 钻井平台废油基钻井岩屑浓度最大, A 钻井平台浓度最低。

参考文献:

- [1] 闫力源,卢培利,张 虹,等.重庆页岩气资源潜在开发区生态环境特征分析及相关保护建议 [C]//中国环境科学学会年会论文集.深圳:中国环境科学学会,2015:5518-5522.
Yan Li-yuan, Lu Pei-li, Zhang Hong, et al. Chongqing shale gas resource potential development zone ecological environment characteristics and related protection suggestions [C]//China

- Environmental Science Association Annual Meeting. Shenzhen: Chinese Society of Environmental Sciences, 2015:5518-5522.
- [2] 许 坤,李 丰,姚 超,等.我国页岩气开发示范区进展与启示 [J]. 石油科技论坛, 2016,(1):44-49.
Xu Kun, Li Feng, Yao Chao, et al. Progress and enlightenment of China's shale gas demonstration zone [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2016,(1):44-49.
- [3] 朱 维.油气田勘探开发污染及防治 [J]. 环境保护与治理, 2015, 15(12):31-33.
Zhu Wei. Investigation and development pollution and prevention of oil and gas fields [J]. Environmental Protection and Remediation, 2015,15(12):31-33.
- [4] 张 鲜,刘 丹,叶宣宏.浅析气田开发钻井固体废物对环境的影响及处置措施 [J]. 四川环境, 2011,30(4):88-91.
Zhang Xian, Liu Dan, Ye Xuan-hong. Effect of solid waste and disposal of drilling in gasfield development on environment [J]. Sichuan Environment, 2011,30(4):88-91.
- [5] 沈晓莉,杨金忠,徐天有,等.典型地区油气田水基钻井岩屑污染特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2017,39(5):480-483.
Shen Xiao-li, Yang Jin-zhong, Xu Tian-you, et al. Research on pollution characteristic of water-based drilling cuttings of typical oil-gas fields [J]. Environmental Pollution and Control, 2017,39(5): 480-483.
- [6] 李 龙,沙依绕,陈 鹏.新疆油田稠油开发固体废物对环境的影响及处置措施 [J]. 油气田环境保护, 2007,17(1):34-36.
Li Long, Sha Yi-rao, Chen Peng. Environmental impacts of solid waste development in Xinjiang oilfield and its disposal measures [J]. Environmental Protection of Oil and Gas Fields, 2007,17(1):34-36.
- [7] 陈则良.页岩气油基钻井的污染特性和蒸汽浸洗研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2017.
Chen Ze-liang. Study on pollution characteristics and pressurized hot water extraction of shale gas oil-based drill cuttings [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [8] Centner T J, Petetin L. Permitting program with best management practices for shale gas wells to safeguard public health [J]. Journal of Environmental Management, 2015,163:174-183.
- [9] Soeder D J, Sharma S, Pekney N, et al. An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States [J]. International Journal of Coal Geology, 2014,126:4-19.
- [10] HJ/T20-1998 工业固体废物采样制样技术规范 [S].
HJ/T20-1998 Technical specifications on sampling and sample preparation from industry solid waste [S].
- [11] GB5085.3-2007 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别 [S].
GB5085.3-2007 Identification standards for hazardous wastes- Identification for extraction toxicity [S].
- [12] 黄 海,屈 展,周立辉,等.废弃钻井液重金属检测及其污染性评价 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2012,40(5):52-55.
Huang Hai, Qu Zhan, Zhou Li-hui, et al. Detection and evaluation of heavy metal in abandoned drilling fluid [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2012,40(5):52-55.
- [13] HJ784-2016 土壤和沉积物多环芳烃的测定高效液相色谱法 [S].
HJ784-2016 Soil and sediment-Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons-High performance liquid chromatography [S].

- [14] GB5085.6-2007 危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别 [S].
GB5085.6-2007 Identification standards for hazardous wastes-
Identification for toxic substance content [S].
- [15] GB15618-2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
GB15618-2018 Soil environmental quality risk control standard for
soil contamination of agricultural land (Trial) [S].
- [16] GB36600-2018 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准
(试行) [S].
GB36600-2018 Soil environmental quality Risk control standard for
soil contamination of development land (Trial) [S].
- [17] Trefry J H, Trocine R P, McElvaine M L, et al. Total mercury and
methylmercury in sediments near offshore drilling site-s in the Gulf of
Mexico [J]. *Environmental Geology*, 2007,53(2):375-385.
- [18] 吴明霞. 废弃水基钻井液环境影响及固化处理技术研究 [D]. 大庆:
东北石油大学, 2012.
Wu Ming-xia. *Environmental Impact and Solidification of Water-
based Drilling Fluid* [D]. Daqing: Northeast Petroleum University,
2012.
- [19] 杜春蕾. 油田钻井废弃泥浆中重金属分布特征与污染评价-以中石
油塔里木分公司塔北井区为例 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
Du Chun-lei. *Research on distribution characteristics and pollution
evaluation of heavy metals in abandoned drilling mud in oil field-case
in Tabei Field of Tarim branch of Petro China* [D]. Urumqi: Xinjiang
University, 2015.
- [20] Zhang A, Li M, Lv P, et al. Disposal and reuse of drilling solid waste
from a massive gas field [J]. *Procedia Environmental Sciences*,
2016,31:577-581.
- [21] Trefry J H, Dunton K H, Trocine R P, et al. Chemical and bi-ological
assessment of two offshore drilling sites in the Al-askan Arctic [J].
Marine Environmental Research, 2013,86(3):35-45.
- [22] 卢邦俊. 页岩气钻屑中的重金属成分研究 [J]. *能源环境保护*, 2015,
29(6):20-60.
Lu Bang-jun. *Studies on the content of heavy metals in drilling chips
from exploitation of shale gas* [J]. *Energy Conservation*, 2015,29(6):
20-60.
- [23] 孙根行, 王丽芳, 符 丹, 等. 废弃油基钻井岩屑焚烧处理基础 [J]. 钻
井液与完井液, 2017,34(3):59-65.
Sun Gen-xing, Wang Li-fang, Fu Dan, et al. *Burning of drill cuttings
from wells drilled with waste oil base drilling fluid* [J]. *Drilling Fluid
& Completion Fluid*, 2017,34(3):59-65.
- [24] 潘 峰, 耿秋娟, 楚红杰, 等. 石油污染土壤中多环芳烃分析及生态风
险评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011,27(5):42-47.
Pan Feng, Geng Qiu-juan, Chu Hong-jie, et al. *Analysis of polycyclic
aromatic hydrocarbons in petroleum contaminated soils and its
ecological risk assessment* [J]. *Journal of Ecology and Rural
Environment*, 2011,27(5):42-47.
- [25] Bojes H K, Pope P G. Characterization of EPA's 16priority pollutant
polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tank bottom solids and
associated contaminated soils at oil exploration and production sites in
Texas [J]. *Regul Toxicol Pharmacol*, 2007,47(3):288-295.
- [26] 匡少平, 孙东亚, 孙玉焕, 等. 中原油田油泥及周边土壤中 PAHs 的污
染特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2008,27(3):855-861.
Kuang Shao-ping, Sun Dong-ya, Sun Yu-huan, et al. *Pollution
characteristics of PAHs in oily sludge and around soils of Zhongyuan
Oil Field* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008,
27(3):855-861.
- [27] 何 燕. 重庆市主城区水中多环芳烃的污染状况分析及环境行为初
步研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.
He Yan. *Primary Study on polycyclic aromatic hydrocarbons in
surface water of Chongqing District* [D]. Chongqing: Southwest
University, 2008.
- [28] Mai B, Fu J, Sheng G, et al. Chlorinated and polycyclic aromatic
hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River
Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2002,117:457-474.
- [29] Kucuksezgin F, Pazi I, Gonul L. Marine organic pollutants of the
Eastern Aegean: aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in
Candarli Gulf surficial sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012,
64:2569-2575.
- [30] Kucuksezgin F, Pazi I, Gonul L. Marine organic pollutants of the
Eastern Aegean: Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in
Candarli Gulf surficial sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*,
2012,64(11):2569-2575.
- [31] 国家危险废物名录(2016) [S].
National Hazardous Waste Directory (2016) [S].
- [32] 王万福, 何银花, 刘 颖. 含油污泥的热解处理与利用 [J]. *油气田环
境保护*, 2006,16(2):15-18.
Wang Wan-fu, He Yin-hua, Liu Ying. *Pyrolysis treatment and
utilization of oily sludge* [J]. *Environmental Protection of Oil and Gas
Fields*, 2006,16(2):15-18.
- [33] 黄晓英, 白鹤鸣, 潘文启. 含油污泥石油类测定方法研究 [J]. *油气田
环境保护*, 2015,25(3):54-56.
Huang Xiao-ying, Bai He-ming, Pan Wen-qi. *Study on the
determination method of petroleum sludge in oily sludge* [J].
Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2015,25(3):54-56.
- [34] 王小雨, 冯 江, 王 静. 莫莫格湿地油田开采区土壤石油烃污染及
对土壤性质的影响 [J]. *环境科学*, 2009,30(8):2394-2401.
Wang Xiao-yu, Feng Jiang, Wang Jing. *Petroleum hydrocarbon
contamination and impact on soil characteristics from oilfield momoge
wetland* [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009,30(8):
2394-2401.
- [35] Railroad Commission of Texas (RRC). Clean up of soil
contaminated by a crude oil spill [R]. Austin: TX.

作者简介: 吴 娜(1995-), 女, 山东青岛人, 青岛理工大学硕士研究生,
主要从事固体废物利用处置与风险控制研究方向。