水基钻井固废生物处理资源化土壤利用效果分析

陈立荣[1] 文炜涛[1] 唐 伟[2] 冯永东[3] 蒋学彬[1] 蒋世金[4] 刘汉军[1] 陈世荣[1] 舒 畅[1]

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院；
2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司页岩气勘探开发项目经理部；
3. 中国石油西南油气田分公司勘探事业部；4. 中国石油西南油气田分公司蜀南气矿)

摘 要 为分析水基固废经长时间生物处理后做土壤利用的效果，对 6 口示范应用井的土壤样品浸出液、土壤重金属、植物中重金属和土壤养分进行监测分析。结果表明：6 口井水基钻井固废经生物处理所形成的土壤中有害重金属指标均不超过 GB 15618—2018(其他，pH>7.5，风险筛选值)和 HJ/T 332—2006 限值要求。土壤浸出液中的无机及重金属离子等指标均低于 GB 5084—2005(旱作)要求，除铁和个别点的总氮和总磷超标外，其他指标均不超过 GB 3838—2002 的Ⅴ类标准。土壤栽种植物中重金属含量较土壤中无明显增加，无重金属生物富集发生，除汞元素有轻微超标外，其他指标都符合 GB 2762—2012 中蔬菜及制品标准。土壤的养分相对较差，可以补充土壤营养物质以满足特定植物栽种的需求。水基钻井固废通过微生物处理资源化土壤利用不会对周边环境产生不利影响，是一种可行的资源化处置利用途径。

关键词 钻井固废；生物处理；资源化；土壤化利用

DOI：10.3969/j.issn.1005-3158.2022.05.006 **文章编号：** 1005-3158(2022)05-0028-05

Effect Analysis of Water-based Drilling Solid Waste Biological Treatment for Soil Resources Utilization

Chen Lirong[1] Wen Weitao[1] Tang Wei[2] Feng Yongdong[3] Jiang Xuebin[1]
Jiang Shijin[4] Liu Hanjun[1] Chen Shirong[1] Shu Chang[1]

(1. *Safety Environment Quality Supervision and Testing Research Inspection of CNPC CCDC*;
2. *Shale Gas Exploration and Development Department of CNPC CCDC*;
3. *Exploration Division of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company*;
4. *Southern Sichuan Gas District of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company*)

ABSTRACT In order to analyze the effect of soil use of water-based solid waste after long-term biological treatment, soil leaching solution, soil heavy metals, plant heavy metals and soil nutrients were monitored and analyzed from 6 demonstration wells. As shown in results, the indexes of harmful heavy metals in the soil do not exceed limits of GB 15618—2018 (others, pH>7.5, risk screening value) and HJ/T 332—2006. In addition, the indexes of inorganic and heavy metals in soil leaching solution were lower than the limit of GB 5084—2005 (dry farming). Although the indexes of nitrogen, phosphorus and iron in the leaching solution exceed the GB 3838—2002 Ⅴ class limit, others indexes accord the standard. The heavy metal content of plants growing on the soil was not significantly higher than that in the soil. In addition to Hg content has a slight exceed the standard with other indicators are in line with the GB 2762—2012 vegetable and product standards. Soil nutrients are relatively poor and can be replenished to meet the needs of specific

基金项目：中国石油油服科研项目“钻井岩屑与废弃油环保利用技术研究及试验”(2020T—008-001)；中国石油川庆钻探公司科研项目“协作钻井固废资源化处置利用的环保厕所降解菌筛选与处理技术研究”(CQ2020B-39-1-7)和“页岩气开发土壤污染风险评估与修复技术研究”(CQ2020B-45-2-7)；安检院院项目(CQ2020B-F-82-7)。

第一作者：陈立荣，2010 年毕业于西南交通大学环境工程专业，高级工程师，现在中国石油集团川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院从事油气田的环境污染治理及技术管理工作。通信地址：四川省广汉市绍兴路三段 11 号，618300。E-mail：clycly555@163.com。

通讯作者：文炜涛，2018 年毕业于中国石油大学(北京)环境科学专业，现在中国石油集团川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院从事油气田的环境污染治理及技术管理工作。通信地址：四川省广汉市绍兴路三段 11 号，618300。E-mail：wenwt_ajy@cnpc.com.cn。

plant planting. The water-based drilling solid waste is treated by microorganism and used as soil without adverse effect on the surrounding environment, and it is a more feasible way of resource disposal and utilization.

KEYWORDS drilling solid waste; biological treatment; resource utilization; soil resources utilization

0 引　言

西南油气田在钻井过程中产生大量的钻井固废,平均产生量为 0.35～0.40 m^3/m[1-2],这些固废组分复杂,包含钻井液中添加的化学物质、地层岩石中存在的重金属污染物、岩屑存放产生的有毒物质,具有一定的生物毒性,容易对周边环境产生污染,需要对其进行合理的处置[3-6]。

各大钻探公司主要采取固化填埋法、制备免烧砖、制备烧结砖等处置水基钻井固废,在特定时间段对污染防控起到积极作用[7-10]。但是,固化填埋法具有消耗大量固化材料、浪费土地资源、固化体长期浸泡存在环境污染风险、固化池地基不均匀沉降易发生局部破坏等缺点,不符合当前生态文明建设的要求而放弃使用[11]。水基固废制备免烧砖、烧结砖存在处置费用高、运输费成本高、固废添加量有限、砖厂烟气难达标、转运潜在环保风险高、制砖质量不稳定、存在易受地方制砖企业控制及抬高处置价格等问题[12],而使用受限。

为克服上述处置利用的缺陷,增加其资源化处置利用途径,自 2008 年起,中国石油川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院与相关院校等合作,先后立项开展了多个生物处理利用相关科研课题研究与示范应用[13],10 余年来,先后示范应用于川渝地区西南油气田的丹浅 001-8 井、莲花 000-X8 等 23 口井,共计处理利用水基钻井固废 16 555 m^3,恢复耕地面积 5 518 m^2,节约水泥 4 966 t,节能成效明显,社会及生态环境效益显著。本文对水基钻井固废生物处理效果进行追踪监测分析,评价其资源化土壤利用效果,为推广应用决策提供支撑。

1 追踪监测分析基本情况

1.1 监测分析机构

为确保监测数据客观公正性,委托第三方监测机构四川清蓝检测科技有限公司进行现场采样与检测分析。

1.2 监测分析井

选择了川渝不同地区的生物处理利用量较多的 6 口井(见表 1),各井的生物处理时长已达 4 年以上,通过相关数据监测分析,研究长时间生物处理后形成的土壤质量和所种植的植物生长情况,分析该技术对老井污染物治理修复效果。

表 1　监测分析井信息

序号	编号	地点	完钻时间	处理时间	固废处理量/m^3	备注
1	井 A	四川雅安市	2011.8	2011.11	520	/
2	井 B	重庆壁山县	2011.6	2011.8	1 218	/
3	井 C	重庆合江区	2015.3	2015.4	400	/
4	井 D	四川泸州市	2015.4	2015.5	945	/
5	井 E	重庆开州区	1988.3	2016.7	1 117	老井*
6	井 F	重庆开州区	1992.9	2016.8	923	老井*

注:* 指开发时间较早,未对钻井固废进行合理处置的部分钻井现场。

1.3 监测分析因素及因子的选择

为全面监测分析生物处理后的水基钻井固废用作土壤使用的安全性,选择了 8 个土壤重金属指标、17 个土壤浸出液指标、5 个植物中重金属指标、5 个土壤肥力指标,并根据参照的相关国家标准进行检测分析。

2 生物处理施工情况简述

2.1 生物处理工艺

将室内实验筛选出的具有安全优势的微生物(均属于 NY 1109—2006《微生物肥料生物安全通用技术准则》所规定的安全性第一级)降解菌株制备成液体或固体菌剂,用于现场具有高 COD、高有机物的水基钻井固废生物处置。先充分混均待处理的钻井固废,按一定比例直接加入微生物降解菌剂混均,然后根据待处理固废的含水量情况加入待处理固废量 0.5～2 倍的较细土壤,充分混匀后堆放,最后在其表面覆盖 2～5 cm 厚新鲜土壤,并播撒种植观赏或薪柴植物,形成钻井固废-微生物-植物联合降解体系[13]。

2.2 现场采样情况

水基钻井固废微生物处置施工现场如图 1 所示,处置现场使用水泥构筑深度为 2 m 的生物处理堆放池,并使用挖掘机对钻井固废、菌剂、土壤进行充分的

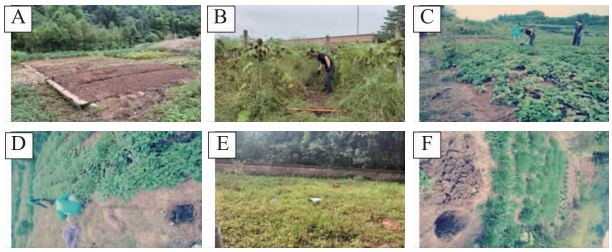
混合。

图 1 6 口井现场生物处置施工情况

3 采样情况及监测结果

3.1 布点情况

每个井点土样采集采用三点布点，三点混合样作为土壤分析样品，采样深度为 30～50 cm，采样过程如图 2 所示。



注：井 A 采样时间为 2020 年 9 月 9 日，井 B、C、D 采样时间为 2020 年 9 月 10 日，井 E、F 采样时间为 2020 年 9 月 11 日。

图 2 现场土壤样品采集情况

3.2 采样情况

植物样品采集处理物种植的当季农作物和附近旱地种植的相同农作物。

3.3 检测结果与分析

1）修复后渗滤液降解达标情况

样品浸出液检测结果如表 2 所示，调查分析 6 口井生物处理形成的土壤中浸出液中的 27 个无机及重金属等指标，除 6 口井的铁、个别井的总氮和总磷超过 GB 3838—2002《地面水环境质量标准》Ⅴ类标准外，其他指标均不超标，同时所有指标也低于 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》（旱作）标准。浸出液 COD 含量低，说明经过较长时间的处理（井 E 和井 F 处理 4 年，井 A 处理 10 年），钻井固废中的污染物基本被完全降解，说明生物处理时间越长，对污染物的降解效果越好。

2）修复后重金属达标情况

生物处理后形成的土壤中重金属的含量检测结果如表 3 所示，6 口井生物处理形成的土壤中的 8 个重金属指标均远小于 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（风险筛选值，其他，pH＞7.5）和 HJ/T 332—2006《食用农产品产地环境质量评价标准》限值要求。水基钻井固废生物处理后形成的土壤，可以作为农业用地和食用农产品用地（旱作）。

表 2 生物处理形成的土壤样品浸出液检测结果

检测项目	检测结果						标准	
	井 A	井 B	井 C	井 D	井 E	井 F	GB 3838	GB 5084
pH 值	7.91	8.12	8.01	8.22	8.21	8.10	6～9	5.5～8.5
高锰酸盐指数/(mg·L^{-1})	2.3	13.8	1.8	2.1	2.9	2.5	10	/
化学需氧量/(mg·L^{-1})	9	38	6	11	7	10	40	300
氨氮/(mg·L^{-1})	0.052	0.410	0.042	0.095	0.130	0.082	2.0	/
总氮/(mg·L^{-1})	2.76	2.83	1.56	1.82	3.51	1.91	2.0	/
总磷/(mg·L^{-1})	0.15	0.61	0.03	0.35	0.62	0.20	0.4	/
石油类/(mg·L^{-1})	0.99	0.70	0.42	0.87	0.99	0.06	1.0	10
氯化物/(mg·L^{-1})	3	＜2	＜2	＜2	＜2	2	250	/
粪大肠菌群/(个·L^{-1})	1.6×10^3	3.5×10^3	1.2×10^2	7.3×10^3	45	1.4×10^2	4.0×10^4	1.0×10^4
挥发酚/(mg·L^{-1})	＜0.01	0.019	＜0.01	0.014	＜0.01	＜0.01	0.1	1.0
硫化物/(mg·L^{-1})	＜0.005	0.007	＜0.005	0.005	＜0.005	0.008	1.0	1.0
氟化物/(mg·L^{-1})	1.34	0.89	1.02	1.11	0.44	0.66	1.5	0.5

续表 2

检测项目	检测结果						标准	
	井 A	井 B	井 C	井 D	井 E	井 F	GB 3838	GB 5084
总氰化物/(mg·L^{-1})	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.2	0.5
硫酸盐/(mg·L^{-1})	10	19	19	<8	<8	<8	250	/
硝酸盐氮/(mg·L^{-1})	0.15	0.22	0.03	0.37	0.36	0.27	10	/
阴离子表面活性剂/(mg·L^{-1})	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.3	/
汞/(μg·L^{-1})	<0.04	0.21	<0.04	0.12	0.86	0.28	1.0	1.0
砷/(μg·L^{-1})	12.2	19.1	12.5	21.0	27.8	5.0	100	100
硒/(μg·L^{-1})	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	20	/
铅/(mg·L^{-1})	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.1	1.0
镉/(mg·L^{-1})	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.01	0.005
铜/(mg·L^{-1})	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	1.0	1.0
锌/(mg·L^{-1})	<0.05	0.30	0.12	0.09	0.12	<0.05	2.0	/
铬/(mg·L^{-1})	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.1	0.1
苯/(mg·L^{-1})	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	/	2.5

注:标准参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》V 类水质和 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》(旱作)。

表 3　生物处理形成土壤中有害重金属监测结果　mg/kg

检测项目	检测结果						标准	
	井 A	井 B	井 C	井 D	井 E	井 F	GB 15618	HJ/T 332
汞	0.028	0.088	0.050	0.028	0.023	0.025	3.4	1.0
砷	5.26	3.20	4.95	4.67	4.48	3.09	25	25
铅	35.2	31.6	33.4	45.0	44.2	38.8	170	80
镉	0.12	0.10	0.12	0.12	0.12	0.11	0.6	0.7
铜	26	28	30	23	11	24	100	100
锌	42	78	103	63	38	70	300	300
镍	32	20	46	32	17	35	190	60
铬	73	82	68	56	36	48	250	250

注:标准参考土壤重金属标准依据 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(其他,风险筛选值,pH>7.5)和 HJ/T 332—2006《食用农产品产地环境质量评价标准》(旱作,pH>7.5)。

3)修复后土壤生长植物中重金属浓度分析

钻井固废通过播种观赏植物或薪柴植物,形成钻井固废-微生物-植物联合降解体系。但是,本次采样处理池由于处理时间较长,已被当地居民种植相关农作物,本次将对栽种农作物内的重金属进行检测分析。采集居民栽种的植物和对照点植物样品检测结果如表 4 所示,所有指标中,4 个样品中(井 B 一种食用植物丝瓜和其他 3 种非食用植物)的汞含量超 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中蔬菜及制品标准,其他均不超标。对比监测的植物中的重金属含量总体无显著性差异,4 个对照的植物样品中,2 个对照样汞元素含量超标,分析发现土壤检测分析时汞含量都符合相关标准,可能与植物对汞元素的吸收有关。

表 4　土壤栽种植物中主要重金属类含量　mg/kg

采样点	植物样品	砷	汞	铅	镉	铬
井 A	黄豆叶	0.041	<0.003	<0.02	0.018	0.049
井 B	丝瓜	<0.01	0.035	<0.02	0.002	0.032
井 b(对照)	丝瓜	<0.01	0.011	<0.02	<0.001	0.036
井 C	红薯叶	0.021	0.023	<0.02	0.011	0.078
井 c(对照)	红薯叶	0.018	<0.003	<0.02	0.003	0.076
井 D	红薯叶	<0.01	<0.003	<0.02	0.004	0.059
井 d(对照)	红薯叶	<0.01	0.031	<0.02	0.003	0.023
井 F	南瓜叶	<0.01	0.038	<0.02	0.008	0.038
井 f(对照)	南瓜叶	0.035	<0.003	0.034	0.008	0.050
标准		0.5	0.01	0.3	0.2	0.5

注:标准参考 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》。

4)修复后土壤养分含量分析

水基钻屑含有石英、方解石、铝硅酸盐黏土矿、赤铁矿等土壤成土矿物，具有转化为土壤资源的矿物质基础[14]，生物处理后土壤养分指标检测结果如表 5 所示。钻井固废生物处理后的土壤养分含量相对较差，养分分布不均匀。有机质、氮、磷含量较低，根据现场植物生长情况发现能满足植物生长。处理后土壤钾盐的含量较高，可能是深部钻井液中会添加一定量钾盐以提高钻井液防卡性，造成钻井固废生物处理后钾含量丰富。

表 5 土壤养分分级 g/kg

检测项目	井 A		井 B		井 C		井 D		井 E		井 F	
	含量	分级	含量	分级	含量	分级	含量	分级	含量	分级	含量	分级
有机质	13.40	中下	17.20	中下	11.40	中下	9.20	低	4.20	很低	5.60	很低
全磷	0.21	低	0.51	中下	0.20	低	0.21	低	0.15	很低	0.31	中下
全氮	0.96	中下	0.57	低	2.08	很高	0.69	低	1.08	中上	0.53	低
全钾	16.00	中上	21.80	高	21.80	高	19.80	中上	20.10	高	19.90	中上

注：根据《全国第二次土壤普查养分分级标准》对土壤养分进行分级。

4 结 论

1)水基钻井固废经生物处理所形成的土壤中的重金属指标均小于 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(风险筛选值，其他，pH>7.5)和 HJ/T 332—2006《食用农产品产地环境质量标准》限值要求。

2)水基钻井固废经生物处理所形成的土壤浸出液中的无机及重金属等指标均低于 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》(旱作)标准，除铁和个别点的总氮和总磷约超标外，其他指标均不超过 GB 3838—2002《地面水环境质量标准》Ⅴ类适用于农业用水区域的标准。

3)水基钻井固废经生物处理所形成的土壤栽种植物中无明显重金属生物富集或转移情况发生，微量级汞元素在个别点及背景点植物有轻微超标，可能与植物吸收有关，其他均符合 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中蔬菜及制品标准要求。

4)水基岩屑处理后形成的土壤营养物质较为匮乏，但能满足植物生长需要，钾盐丰富，可针对性地补充有机质、氮、磷，以满足进一步利用的需求。

5)水基钻井固废通过微生物处理资源化土壤利用是一种较可行的资源化处置利用途径，适用于有害重金属含量不超标的水基钻井固废处置利用。

参 考 文 献

[1] 闫伦江.我国页岩气开发钻井废物污染防治技术进展[J].油气田环境保护，2018，28(4)：1-3.

[2] 何天鹏，闫瑞景，舒畅，等.油气勘探钻井固体废弃物处理方法综述[J].石油化工安全环保技术，2018，34(6)：56-61.

[3] 陈立荣，何天鹏，贺吉安，等.钻井固废资源化处置利用技术综述[J].油气田环境保护，2018，28(2)：7-9.

[4] 杨庭，杨勇，郭兵，等.贮存钻井岩屑危害性分析及处理工程实践[J].环境工程，2019，37(12)：188-193.

[5] ISMAIL AR, ALIAS AH, WAN RWS, et al. Drilling fluid waste management in drilling for oil and gas wells [J]. Chemical engineering transactions, 2017, 56: 1351-1356.

[6] 谢水祥，邓皓，孙静文，等.油气田聚合物类钻井液添加剂分子结构与环境影响的相关性[J].环境工程学报，2017，11(12)：6477-6489.

[7] 万书宇，余思源，何天鹏，等.微生物处理水基钻井固废技术应用[J].油气田环境保护，2019，29(2)：33-36.

[8] 任雯，谢水祥，刘光全，等.聚磺钻屑资源化处理技术研究与应用[J].油气田环境保护，2017，27(1)：10-13.

[9] 关举忠.油田钻井废泥浆制备免烧砖的实验及应用[J].石油和化工设备，2015，18(7)：100-101.

[10] 王朝强，梅绪东，张春，等.页岩气水基钻屑制备烧结砖性能研究[J].非金属矿，2018，41(3)：43-45.

[11] ANTEMIR A, HILLS C D, CAREY P J, et al. Investigation of 4-year-old stabilised/solidified and accelerated carbonated contaminated soil [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 181(1-3): 543-555.

[12] 谭树成，贾虎，罗谦，等.页岩气水基钻屑改质制备烧结砖的研究[J].内蒙古科技与经济，2019(19)：72-75.

[13] 陈立荣，黄敏，蒋学彬，等.微生物—土壤联合处理废弃钻井液渣泥技术[J].天然气工业，2015，35(2)：100-105.

[14] 张思兰，张春，何敏，等.水基钻屑特性分析及其土地利用关键问题初探[J].安全与环境学报，2018，18(3)：1150-1154.

(收稿日期 2022-03-09)

(编辑 王 蕊)