

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.01.002

## 单向低频振动对铀尾矿库滩面氡析出影响的实验研究

袁劲帆<sup>1</sup>,李向阳<sup>1,2,3\*</sup>,洪昌寿<sup>1,2,3</sup>,刘永<sup>1,2,3</sup>,刘艳<sup>1</sup>,李苏哲<sup>1</sup>

(1.南华大学资源环境与安全工程学院,湖南衡阳421001;2.湖南省铀尾矿库退役治理技术工程技术研究中心,湖南衡阳421001;3.铀矿冶放射性控制技术湖南省工程研究中心,湖南衡阳421001)

**摘要:**我国地震多发且一般属于低频振动,其对铀尾矿库滩面具有影响。通过自制双向水平振动台氡析出测试装置,制作了 $\varphi 100\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ (250 mm铀尾砂加盖50 mm的红土)分层压实的铀尾矿库模拟滩面模型,分析对比了振动前后铀尾矿库滩面氡析出率变化规律。试验研究表明:在前后方向水平振动(10,20,30 Hz)条件下,滩面氡析出率总体呈现先上升后下降规律,左右水平振动条件下,滩面氡析出率呈现先下降后上升。红土覆盖层覆盖后,氡析出率有所降低。综上所述,低频振动对于铀尾矿库滩面氡析出的影响较大,试验结果可以为铀尾矿库退役治理提供一定的理论参考。

**关键词:**低频振动;铀尾矿库滩面;氡析出率;实验研究

中图分类号:X591 文献标志码:B 文章编号:1673-0062(2020)01-0009-07

## The Experimental Study on Single-direction Low-frequency Vibration of Uranium Tailings Pond Beach Face of Radon Exhalation Effect

YUAN Jingfan<sup>1</sup>, LI Xiangyang<sup>1,2,3\*</sup>, HONG Changshou<sup>1,2,3</sup>,  
LIU Yong<sup>1,2,3</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, LI Suzhe<sup>1</sup>

(1. School of Resource Environmental and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Province Engineering Technology Research Centre of Uranium Tailings Treatment Technology, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Hunan Province Engineering Research Centre of Radioactive Control Technology in Uranium Mining and Metallurgy, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** Quake occurs quite often in China, and it can simplify as low-frequency vibration, which has the great impact on the uranium tailings pond beach face. Two-direction

收稿日期:2019-11-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11875164);湖南省自然科学基金项目(2019JJ50489);湖南省教育厅科研项目重点项目(18A232)

作者简介:袁劲帆(1994-),男,硕士研究生,主要从事铀矿冶安全与退役治理技术方面的研究。E-mail: billyyuan@126.com。\*通信作者:李向阳(1962-),男,教授,主要从事铀尾矿库退役治理理论与技术方面的研究。E-mail: lcczlxxy@126.com

horizontal shaking table for testing radon exhalation, home-made device is used to make the simulated compressed uranium tailings pond beach face model ( $\varphi 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , included 250 mm uranium tailings and 50 mm red clay) and analyse the regulation of radon exhalation rate on uranium tailings pond beach face before and after vibration. The results have been showed as follows: (1) under the condition of back-forth direction horizontal vibration (10, 20, 30 Hz), the radon exhalation rate of beach face experience the process from incline to decline, and the radon exhalation rate of left-right shows the trend from decline to incline. (2) After covering by the soil overlying of red clay, the regulation on radon concentration of uranium tailings pond beach face declines. Overall, low-frequency vibration has great influence on the radon exhalation of uranium tailings pond beach face, and the result can provide theoretical reference for the decommissioning of uranium tailings pond.

**key words:** low-frequency vibration; uranium tailings pond beach face; radon exhalation rate; experimental study

## 0 引言

由于我国是一个矿业大国且能源分布与地震带具有较高的重合性,国内铀尾矿库基本处于地震带区域<sup>[1]</sup>。另外铀尾矿库是一个潜在重大危险源<sup>[2]</sup>,铀尾矿库滩面的氡析出对环境具有潜在的安全隐患。国内外开展了振动对尾矿库产生的液化导致结构破坏,进而导致土壤开裂影响,间接导致放射性核素迁移。如:蔡嗣经等<sup>[3]</sup>运用真三轴试验机开展尾砂动力学特性研究,表明振动会导致尾矿库材料疏松。蔡梓麒等<sup>[4]</sup>通过分析低频振动对高温类铀矿岩作用的影响,得出低频振动单因素作用氡析出率呈现先增大后减小的规律。吕淑然等人<sup>[5-6]</sup>通过尾矿砂开展爆破、振动试验研究,发现振动会导致尾砂在液化作用后导致其表层开裂。M. James and M. Aubertin<sup>[7]</sup>阐述振动尤其是地震作用下尾矿会有可能导致液化,通过添加内含物可能一定程度间隙水压力。C. Kamunda等<sup>[8]</sup>提出金属矿山的尾矿库的铀的活度含量远高于安全控制区的铀的活度含量,且在发生地震等情况下可能析出放射性核素。P. Parvin等<sup>[9]</sup>放射性核素氡可以进行监测地震的情况,核素迁移情况获得自然灾害的情况。H. Yoshida等<sup>[10]</sup>研究了十年相关的地下水的相关岩土情况,地震等外加应力条件下,水文条件和地下水地质化学均有受到影响,尤其是放射性废物处置。覆土厚度、材料对于尾矿库氡析出方面研究以及相关覆盖层的性质厚度对于降低氡析出率的影响,又如:黄建兵等<sup>[11]</sup>对某铀矿山废石场及尾砂库氡污染进行调查,发现当覆盖层厚度到达0.15 m处

时,累积氡析出率可降低84%以上。谭凯旋等<sup>[12]</sup>学者通过对红土砂、废石、砂与红土混合物、废石与红土混合物等五种不同覆盖层进行降低铀尾矿库氡析出率效果进行试验研究,最终发现红土进行降低氡析出率效果最佳。目前,低频振动对铀尾矿库滩面氡析出研究相对较少,对于地震频发的国家,研究振动条件下对尾矿库滩面氡浓度变化规律是需要的。

总之,本篇论文研究内容为运用室内试验研究方法,分析低频振动对铀尾矿库滩面氡析出影响,为铀尾矿库退役治理技术提供理论技术参考。

## 1 实验原理

本实验主要通过等时间间隔法<sup>[13-15]</sup>测量低频振动条件下(0~30 Hz)对模拟铀尾矿库滩面模型氡析出变化情况。主要原理如下:

若取等时间间隔为 $\Delta t$ ,土的初始取样前氡浓度为 $C(0)$ ,则下一次氡浓度 $C(1)$

$$C(1) = \frac{JS}{\lambda_e V}(1 - e^{-\lambda_e \Delta t}) + C(0)e^{-\lambda_e \Delta t} \quad (1)$$

由此可推,第 $n$ 次取样时的氡浓度为 $C(n)$ :

$$C(n) = \frac{JS}{\lambda_e V}(1 - e^{-\lambda_e \Delta t}) + C(n-1)e^{-\lambda_e \Delta t} \quad (2)$$

其中, $C(n)$  ( $n=0, 1, \dots$ )表示第 $n$ 次取样时氡浓度,  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ;  $J$ 为多孔射气介质表面氡析出率,  $\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\lambda_e$ 为等效衰变常数,  $(1/\text{s})$ ;  $V$ 为集氡空间的体积,  $\text{m}^3$ ;  $S$ 为集氡罩的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta t$ 为等距时间间隔,  $\text{s}$ 。

令

$$a = \frac{JS}{\lambda_e V}(1 - e^{-\lambda_e \Delta t}), b = e^{-\lambda_e \Delta t} \quad (3)$$

$$\lambda_e = -\frac{\ln b}{t} \quad (4)$$

据式(1)~式(4)得,最终测得氡析出率为

$$J = \frac{\lambda_e a V}{(b-1)S} \quad (5)$$

具体的最终结果,通过 MATLAB 软件进行编程,分别计算出不同方向振动频率(水平、前后方向 0~30 Hz)对红土覆盖层氡析出率变化情况。

## 2 实验方法

### 2.1 实验原材料

本实验选取南方某铀尾矿库滩面的铀尾砂作

为基础材料。通过使用 X 射线荧光光谱分析(X Ray Fluorescence, XRF)方法<sup>[16]</sup>,对铀尾砂检测,获得其矿物主要化学成分及质量百分比如表 1。其次,运用 RM2050- $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、X 射线辐射检测仪测量室内铀尾砂的  $\gamma$  辐射剂量率值,通过五次重复测量,获得其  $\gamma$  辐射剂量率均值为 0.8  $\mu$ Sv/h。再次,根据筛分法<sup>[17]</sup>,比重瓶法<sup>[18-19]</sup>等试验方法,获得铀尾砂颗粒组成、主要物理性能参数,如表 2、表 3 所示。最后,使用 DURRIGE-RAD 7 测氡仪,测量  $\phi 100$  mm $\times$ 250 mm 铀尾砂的氡浓度,通过 MATLAB 计算,获得氡析出率为 0.361 Bq/( $m^2 \cdot s$ ),拟合度( $R^2$ )为 0.915 98,结果如图 1 所示。

表 1 南方某铀尾砂矿物的主要化学成分质量百分比

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CrO <sub>2</sub>	TiO	FeO	CaO	U	K <sub>2</sub> O
质量百分比	83.024	10.925	2.255	1.335	1.2	0.561	0.339	0.155	0.126	0.068	0.013

表 2 铀尾矿砂样品颗粒组成表

砂样	颗粒级配/mm						有效 粒径 $d_{10}$ /mm	中值 粒径 $d_{30}$ /mm	限制 颗粒 $d_{60}$ /mm	不均匀 系数 $C_u$	曲率 系数 $C_c$
	>1	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.075~0.1	<0.075					
铀尾砂	1.923	20.290	41.052	26.742	6.025	3.967	0.1	0.225	0.391	3.91	1.295

表 3 铀尾砂试样主要物理性能参数

砂样	密度 $\rho/(g \cdot m^{-3})$	自然含水率/%	孔隙比 $e$	相对密度 $G_s$	干密度 $\rho_d/(g \cdot m^{-3})$
铀尾砂	1.35	8.19	0.918	2.70	1.48

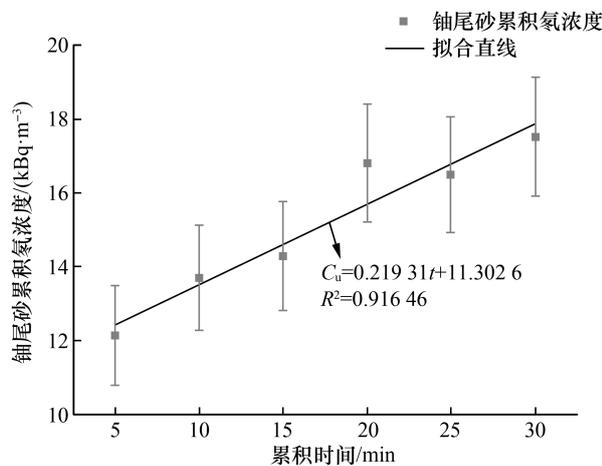


图 1 铀尾砂氡浓度  $C_u$  随累积时间  $t$  变化规律

Fig.1 The regulation between radon concentrations of uranium tailings  $C_u$  and accumulative time  $t$

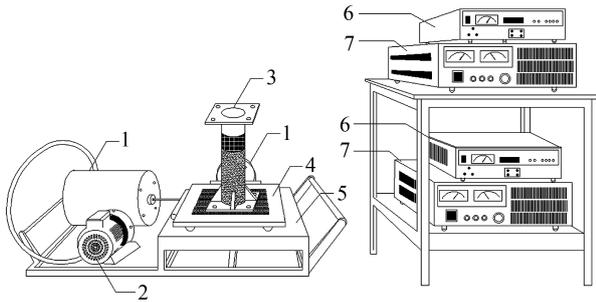
### 2.2 实验装置

本实验装置是一套模拟地震条件下对试样罐所在的振动平台施加前后和左右两个方向振动的系统,其可通过信号源、功率放大器与激振器联合作用下,对有机玻璃体的试样罐施加 10~30 Hz 的振动频率。该实验装置由试验台架、鼓风机、振动平台、双向水平激振器、扫频信号发生器和功率放大器组成,具体试验装置图如图 2、图 3 所示。

### 2.3 实验过程

将铀尾砂通过层层压实置入集氡装置内部,通过连接激振器、功率放大器、信号源装置对装置内部施加低频振动,运用 DURRIGE RAD-7 测氡仪分别测量铀尾砂以及铀尾矿库滩面的氡浓度,获得容器内振动前后内部氡析出率的变化情况。具体的实验测氡仪每次测量时间为 1 h。具体铀

尾矿砂具体实验步骤如下:



1—激振器(左右、前后各一个);2—鼓风机;3—有机玻璃柱体;  
4—振动台;5—试验平台;6—扫频信号发生器;7—功率放大器。

图2 双向水平振动氡析出实验装置图

Fig. 2 Apparatus of two-sided horizontal vibration radon exhalation



图3 双向水平振动氡析出实验装置实物图

Fig. 3 Figure of two-sided horizontal vibration radon exhalation apparatus

1) 管线连接及气密性检查。将有机玻璃柱体  $\varphi 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  (250 mm 的铀尾砂、50 mm 的红土和 100 mm 的集氡空间) 与集氡罩用法兰连接,再连接 RAD 7 测氡仪,使用密封胶泥在整个有机试样罐周围封一圈,并运用肥皂泡沫进行检查整套装置的气密性。若无气泡产生,整套装置气密性良好。

2) 氡浓度测量。将铀尾砂分层倒入有机玻璃柱体,压实至 250 mm 处,共静置时长约为 3 d<sup>[20]</sup>,然后测量铀尾砂的氡析出率。其次,将初始含水率为 20.59% 的红黏土压实至 50 mm 处,测量容器内的氡浓度情况,获得其氡浓度及氡析出率变化情况。再次,调节系统装置的扫频信号发生器分别施加前后、左右水平激振(10、20、30 Hz),时间间隔为 30 min<sup>[1]</sup>以及功率放大器的电压电流大小,使其频率趋于稳定,测量振动前后的氡浓度的变化,并通过误差棒的方式显示其氡浓度误差。

3) 氡析出率计算。打开 DURRIGE RAD 7 测氡仪,“Purge”20 min,清除测氡仪内的残余氡气及水分,使测氡仪腔体内的相对湿度低于 10%,再设定其参数“Cycle”数为 5 min,“Recycle”为 7 次,即可得到。

### 3 实验分析与结果

#### 3.1 前后单向水平低频振动对铀尾矿库滩面氡析出浓度研究

将覆土后模拟铀尾矿库滩面模型置于双向水平振动台前后水平振动,振动时间为 30 min,振动频率为 0 ~ 30 Hz。另外,使用 Origin 8.5 软件,分别对图 4 ~ 图 7 为不同前后水平方向振动频率下模拟铀尾矿库滩面氡浓度随时间的变化规律曲线图。

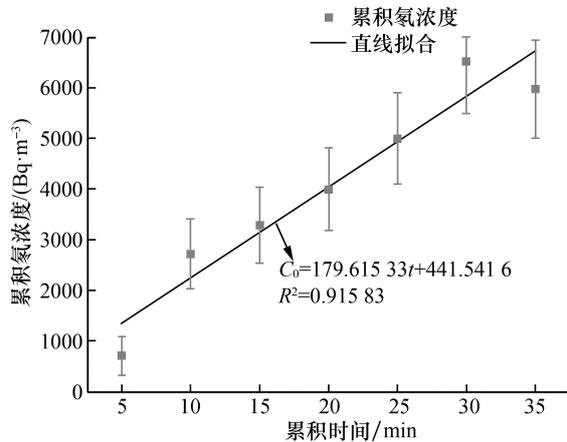


图4 空白组铀尾矿库滩面氡浓度  $C_0$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 4 The regulation between radon concentrations of blank group uranium tailings pond beach face  $C_0$  and accumulative time  $t$

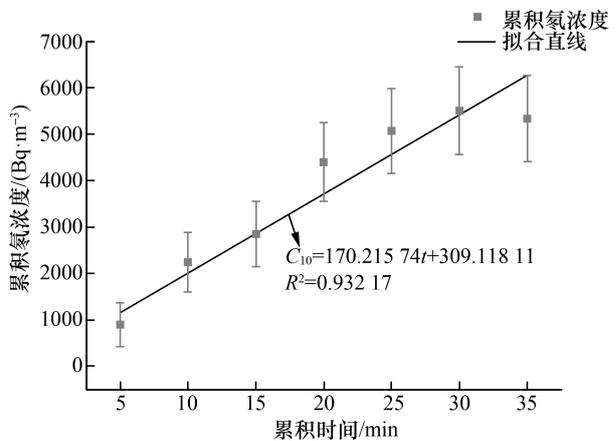


图5 10 Hz 在前后水平方向振动铀尾矿库滩面模型的氡浓度  $C_{10}$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 5 The regulation between radon concentrations of uranium tailings pond beach face simulated model  $C_{10}$  and accumulative time  $t$  under 10 Hz forth and back horizontal directions

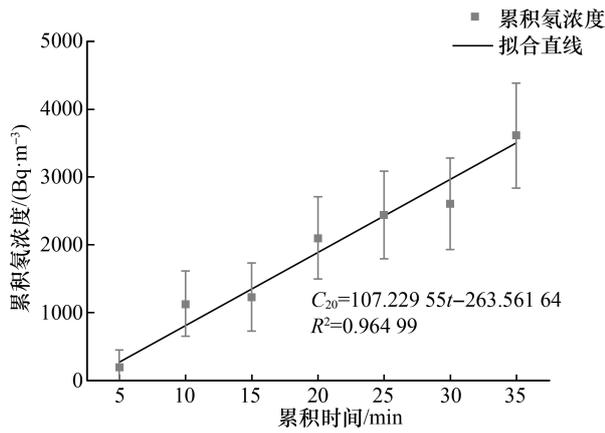


图 6 20 Hz 在前后水平方向振动下铀尾矿库滩面模型的氡浓度  $C_{20}$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 6 The regulation between radon concentrations of uranium tailings pond beach face simulated model  $C_{20}$  and accumulative time  $t$  under 20 Hz forth and back horizontal directions

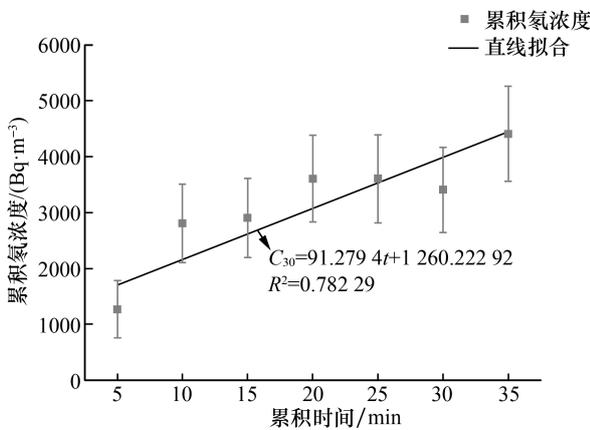


图 7 30 Hz 在前后水平方向振动铀尾矿库滩面模型的氡浓度  $C_{30}$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 7 The regulation between radon concentrations of uranium tailings pond beach face simulated model  $C_{30}$  and accumulative time  $t$  under 30 Hz forth and back horizontal directions

试验数据可得,在 0 ~ 30 Hz 的前后水平单向振动条件下,铀尾矿库滩面的氡析出率  $J_0$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$  分别为 0.255、0.284、0.178 和 0.152 Bq/( $m^2 \cdot s$ ),呈现先上升后下降趋势。由于在 10 Hz 条件下,前后方向水平振动对试样罐土壤内影响较小,则其氡析出率比未振前的氡析出率有所增加。自 20 Hz 以后,铀尾矿库滩面虽然频率增加了,但是增幅相对较小,其氡析出率相对较小。

### 3.2 左右单向水平低频振动对铀尾矿库滩面氡析出浓度研究

将覆土后模拟铀尾矿库滩面模型置于双向水

平振动台左右水平振动,振动时间为 30 min,振动频率为 10 ~ 30 Hz。图 8 ~ 图 10 为不同振动频率下模拟铀尾矿库滩面氡浓度的变化规律曲线图。

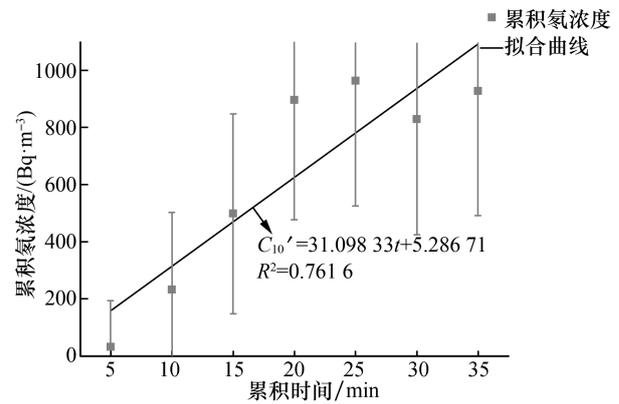


图 8 10 Hz 在左右水平方向振动下铀尾矿库滩面模型的氡浓度  $C_{10}'$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 8 The regulation between radon concentrations of uranium tailings pond beach face simulated model  $C_{10}'$  and accumulative time  $t$  under 10 Hz left and right horizontal direction

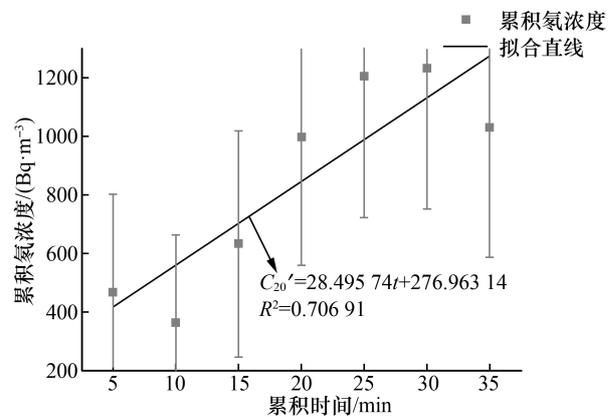


图 9 20 Hz 在左右水平方向振动铀尾矿库滩面模型的氡浓度  $C_{20}'$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 9 The regulation between radon concentrations of uranium tailings pond beach face simulated model  $C_{20}'$  and accumulative time  $t$  under 20 Hz left and right horizontal direction

通过使用 Origin 8.5 软件进行线性拟合,获得在 10 Hz、20 Hz、30 Hz 低频振动条件下,经过若干时间后,其对应的氡析出率  $J_4$ 、 $J_5$ 、 $J_6$  大约为: 0.052、0.047、0.349 Bq/( $m^2 \cdot s$ )。在 10 ~ 20 Hz 左右方向水平振动时,铀尾矿库模拟滩面氡浓度基本不受影响,而且也有可能氡存在被吸附情形。在 30 Hz 左右方向水平振动时,铀尾矿库模拟滩面中的孔隙结构发生了较为显著的变化,进而导致其氡析出率增加。

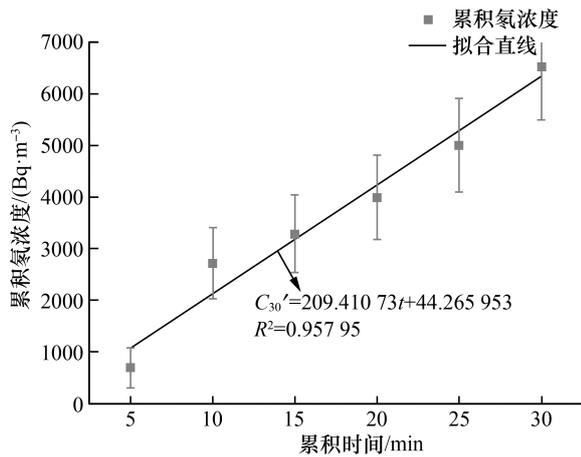


图 10 30 Hz 在左右水平方向振动下铀尾矿库滩面模型的氡浓度  $C_{30}'$  随累积时间  $t$  的变化规律

Fig. 10 The regulation between radon concentrations of uranium tailings pond beach face simulated model  $C_{30}'$  and accumulative time  $t$  under 30 Hz left and right horizontal direction

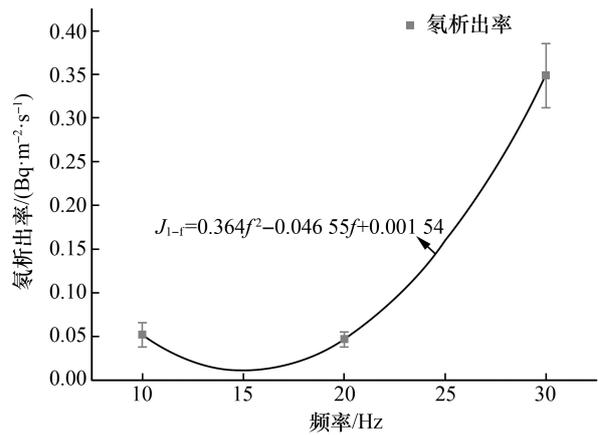


图 12 在左右方向水平振动条件铀尾矿库滩面模型氡析出率  $J_{l-r}$  随频率  $f$  变化规律

Fig. 12 The regulation between radon exhalation rate of uranium tailings pond beach face simulated model  $J_{l-r}$  and frequency  $f$  under left-right horizontal direction

### 3.3 结果与讨论

本论文的开展实验环境温度基本保持在 15℃, 空气中的相对湿度为 80%。在前后单向水平振动条件下, 铀尾矿库滩面的氡析出率的规律呈现先上升后降低, 这与前人<sup>[4,14]</sup>开展相关研究保持一致。导致在 10 Hz 水平方向振动频率条件下, 氡浓度上升的原因主要是因为在前期振动幅度较为显著, 影响了铀尾矿库滩面的孔隙, 呈现氡浓度上升趋势。在 20~30 Hz 水平方向振动时, 氡浓度逐渐下降的原因是增幅逐渐减小, 铀尾矿库滩面的孔隙减小, 继而导致氡浓度下降。然而在左右单向水平振动情况下, 铀尾矿库滩面的氡析出率规律呈现先下降后上升, 与前后方向水平振动的变化相反。他们的变化情况如图 11~图 12 所示。

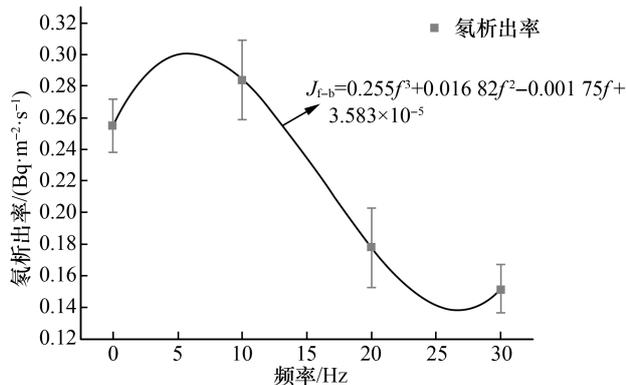


图 11 在前后方向振动条件铀尾矿库滩面模型氡析出率  $J_{f-b}$  随频率  $f$  变化规律

Fig. 11 The regulation between radon exhalation rate of uranium tailings pond beach face simulated model  $J_{f-b}$  and frequency  $f$  under forth-back horizontal direction

## 4 结论

通过将低频振动与铀尾矿库滩面有机结合, 模拟其滩面在地震条件下的环境实验, 对滩面的氡析出得到如下实验结果:

1) 铀尾矿库模拟滩面在前后方向水平振动的前后, 其氡析出率呈现先上升后降低; 在左右方向水平振动前后, 铀尾矿库模拟滩面氡析出率呈现先降低后上升。

2) 通过使用红土覆土层进行覆盖, 铀尾矿库滩面的氡析出率有所降低, 这与谭凯旋等人<sup>[12]</sup>研究的基本一致。

3) 实验结果表明, 低频振动对铀尾矿库滩面氡析出的影响较大。其分析结果可为铀尾矿库滩面退役治理提供一定的参考。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国. GB18306-2015: 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 2-52.
- [2] 张学礼, 徐乐昌, 张辉. 某铀尾矿库周围农田土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2018, 32(6): 76-83.
- [3] 蔡嗣经, 张栋, 何理. 地震中尾矿库液化失稳机理及数值模拟研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(2): 7-12.
- [4] 蔡梓麒, 李向阳, 雷波, 等. 低频振动对高温类铀矿岩氡析出规律的影响研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(4): 22-26.
- [5] 杨凯, 吕淑然. 振动台对尾矿砂振动性能试验研究[J]. 爆破, 2014, 31(4): 63-67.

- [6] 吕淑然,张媛媛,杨凯. 尾矿砂爆炸效应实验研究[J]. 爆破,2014,31(1):5-9.
- [7] JAMES M, AUBERTIN M. The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments[C]//Oakland, California, United States. GeoCongress 2012: State of the art and practice in geotechnical engineering, 2012:4166-4175.
- [8] KAMUNDA C, MATHUTHU M, MADHUKU M. The use of waste rock inclusions to improve the seismic stability of tailings impoundments[J]. International journal of environmental research and public health, 2016, 13(1):138.
- [9] PARVIN P, DAVOUD-ABADI G R, KARIMINEZHAD H. Radon monitoring for earthquake prediction using hybrid U(V) LIDAR-Phoswich system[C]//Proceedings of the 23rd International Laser Radar Conference. Nara, Japan, 2006.
- [10] YOSHIDA H, AOKI K, SEMBA T, et al. Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi Mine; relevance to radioactive waste disposal in Japan[J]. Engineering geology, 2000, 56(1/2):151-162.
- [11] 黄建兵. 某铀矿山废石场及尾砂库氡污染调查[J]. 环境监测管理与技术, 2001, 13(2):27-30.
- [12] 谭凯旋,胡寒桥,刘泽华,等. 不同覆盖物抑制铀尾矿氡析出的效果[J]. 矿物学报, 2012, 32(2):233-237.
- [13] 刘小松,丘寿康. 一种较准确而快速测量氡析出率的方法[J]. 辐射防护, 2007, 27(3):156-162.
- [14] 张忠相,李向阳,邓文辉,等. 温度对多孔射气介质氡析出影响试验研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(6):30-32.
- [15] 李诗珺. 土壤样品氡析出率室内测定方法研究[D]. 北京:中国地质大学, 2015:20-26.
- [16] WANG L, SUN W, LIU R Q, et al. Flotation recovery of vanadium from low-grade stone coal[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2014, 24(4):1145-1151.
- [17] 李元松. 岩土力学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2013:1-50
- [18] 马玉莹,雷廷武,庄晓晖. 测量土壤颗粒密度的体积置换法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15):130-139.
- [19] 倪成锦. 比重瓶法测物质密度[J]. 鞍山师范学院学报, 1991(3):54-55;97.
- [20] ISHIMORI Y, LANGE K, MARTIN P, et al. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues[R]. Vienna:IAEA, 2013.

(责任编辑:周泉)

(上接第8页)

- [20] 吴文浩. 圆管状多孔射气介质氡的迁移与析出规律研究[D]. 衡阳:南华大学, 2019:37-39.
- [21] CHAO C Y H, TUNG T C W, CHAN D W T, et al. Determination of radon emanation and back diffusion char-

acteristics of building materials in small chamber tests[J]. Building and environment, 1997, 32(4):355-362.

(责任编辑:扶文静)