doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.08.019

禾本植物对覆土铀尾矿库滩面温度与氡析出的影响

李向阳[1,2],陈振兴[1,2],汪弘[1,2],洪昌寿[1,2],刘洪龙[1,2],张站源[1,2]

(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)

摘要:铀尾矿库属于特殊核设施,是核工业铀矿冶系统最主要的环境辐射污染源,铀尾矿库滩面控氡一直是生态环境修复的重大难题。采用堆砌物理模型进行对照试验,分析覆土植被修复后铀尾矿库滩面氡析出及温湿度特征,并采用 R/S 分析法分析植被覆盖对滩面温度变化及氡析出率的影响。结果表明:植被修复后铀尾矿库滩面温度变化程度降低,氡析出率降低,植被覆盖后氡析出率维持在0.31 Bq/(m^2·s)以下,相较于单层红土覆盖氡析出率峰值下降 74%,相较于多层覆土覆盖,氡析出率峰值下降 45%,氡析出率波动程度降低,单层红土覆盖层、多层覆土覆盖层氡析出率标准差分别为 0.345、0.123 Bq/(m^2·s);植被培养至平均株高 17cm、30cm 时氡析出率标准差为 0.027、0.062 Bq/(m^2·s),氡析出率震荡区间减小,稳定性增加。该研究从铀尾矿库滩面度温度变化和氡析出率震荡程度两个方面分析植被覆盖对铀尾矿库滩面的影响,可以对铀尾矿库生态修复方案提供技术支撑。

关键词:铀尾矿库;植被修复;氡析出率;温湿度;R/S 分析

中图分类号:X591　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7545(2022)08-0113-08

Effects of Grass on Beach Surface Temperature and Radon Exhalation of Uranium Tailings Pond Covered by Soil

LI Xiang-yang[1,2], CHEN Zhen-xing[1,2], WANG Hong[1,2], HONG Chang-shou[1,2], LIU Hong-long[1,2], ZHANG Zhan-yuan[1,2]

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;
2. Hunan Uranium Tailings Pond Decommissioning Treatment Technology Engineering Technology Research Center, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: Uranium tailings pond belongs to special nuclear facilities and is the main environmental radiation pollution source of uranium mining and metallurgy system of nuclear industry. Radon control in beach surface of uranium tailings pond has always been a major problem in ecological environment restoration. A stack physical model was used to analyze the characteristics of radon exhalation and temperature and humidity on beach surface of uranium tailings pond after soil covering and vegetation restoration, and effects of vegetation cover on temperature change and radon exhalation rate on beach surface were analyzed by R/S analysis method. The results show that after vegetation restoration, both

收稿日期:2022-04-08

基金项目:国防科工局“十三五”技术基础科研项目(JSZL2018403B001);国家自然科学基金资助项目(11875164);2021 年度湖南省环保科研项目(HBKT-2021024)

作者简介:李向阳(1962-),男,学士,教授;**通信作者**:汪弘(1988-),男,博士生,实验师

the change of beach surface temperature of uranium tailings pond and radon exhalation rate drop. After vegetation coverage, the radon exhalation rate remains below 0.31 Bq/(m^2·s), which the peak value of radon exhalation rate drops by 74% and 45% compared with single-layer laterite coverage and multi-layer laterite coverage respectively. The fluctuation degree of radon exhalation rate drops, and the fluctuation degree of single-layer laterite coverage and the standard deviation of radon exhalation rate of multi-layer soil overburden is 0.345 and 0.123 Bq/(m^2·s) respectively. When the average plant height is 17 cm and 30 cm, the standard deviation of radon exhalation rate is 0.027 and 0.062 Bq/(m^2·s) respectively. The fluctuation range of radon exhalation rate drops and the stability rises. This study analyzes the impact of vegetation cover on the beach surface of uranium tailings pond from two aspects, i.e., the temperature change of beach surface of uranium tailings pond and the fluctuation degree of radon exhalation rate, so as to provide technical support for ecological restoration scheme of uranium tailings pond.

Key words: uranium tailings pond; vegetation restoration; radon exhalation rate; temperature and humidity; R/S analysis

铀矿在开采加工过程中,产生的铀尾砂一般在尾矿库就地进行堆积存储。目前世界范围内铀尾矿库达200多座,废弃铀矿山300多处。国内形成的铀尾矿库40余座,其放射性废物储量大、成分复杂、滩面控氡难度极大。国际原子能机构(IAEA)要求铀尾矿库“环境修复必须达到可接受水平”,生态修复铀尾矿库取得了成效,如法国的Gouzon、Champs等几个退役铀尾矿库已成为当地社区体育及生态公园。

生态恢复的关键在于滩面的控氡,取决于植被修复后滩面覆盖层氡析出率的影响机制。1996年侯兰欣最先报道了不同植被种类对放射性核素的耐受性数据[1]。通过对在含放射性的稀土矿区的植被放射性核素分布测定,研究了放射性核素对植被生长的影响[2]。研究表明,植被覆盖后氡在大气中的扩散距离缩短,伴随植被覆盖率的提升铀尾矿库下风向氡气浓度不断下降[3]。在铀尾矿库的氡浓度测量方面,铀尾矿库及原料堆场附近土壤及水体重金属污染及放射性核素高于安全值,加大覆土层厚度及生态修复是防止放射性核素扩散的有效手段[4]。铀尾矿库滩面氡气浓度在时空上呈现非周期性震荡变化,氡气浓度受外界环境因素影响较大[5],其中温度变化对红土覆盖铀尾矿滩面氡析出率的影响明显,氡析出率随温度升高而增加[6]。大气温度及湿度、大气压强、覆土层土壤含水率等环境综合因素对氡析出率的复合影响较大[7]。2003年Dushenkous最先对切尔诺贝利大面积放射性土壤进行生态修复研究,报道了反枝苋(*Amaranthus retroflexus L*)对含放射性核素土壤的良好适应及修复特性[8]。上述研究表明,铀尾矿库覆盖层氡析出受到环境和土壤温湿度影响较大,为维持土壤温湿度稳定,田野条件下对裸露土壤进行植被覆盖可减少极端土壤温度情况的发生概率,自然条件下乔草混合可减弱土壤温度的变化幅度,夏季尤为明显[9];同时植被覆盖后可延长土壤湿度对降水的响应时间,维持土壤湿度[10]。目前铀尾矿库滩面不同覆盖层结构对氡析出的影响、生态修复对氡气在大气中的扩散的影响都已有相关报道,对于植被本身对铀尾矿库滩面氡析出率的影响及铀尾矿库生态修复应选取的植被类群等研究较少。

本研究通过堆砌铀尾矿库滩面物理模型,对比单层红土覆盖层与红土腐殖土覆盖层及植被覆盖与裸露滩面控氡效果差异,分析植被覆盖对铀尾矿库滩面温度变化和氡析出率的影响,为生态修复铀尾矿库工程应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料采集与分析

铀尾砂采集自我国华南某铀尾矿库,该铀尾矿库为亚洲最大规模铀尾矿库,其中滩面面积约1.3 km^2。该铀尾矿库于1994年退役,滩面表层采用单层红土覆盖处理,红土黏性较高,饱和体积含水率约为35%。

模拟试验选取了本地红壤作为覆盖层,为使植被充分发育,使用腐殖土进行土壤改良。铀尾砂样品采集后干燥,采用XRF分析其主要矿物成分,并依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行铀尾砂样品物理特性测试,其矿物成分含量和物理特性见表1~2。对红土与腐殖土主要养分特征及pH进行测试,结果见表3。

表1　尾矿砂矿物成分

Table 1　Mineral composition of tailings　/%

名称	SiO_2	Al_2O_3	MnO	MgO	Fe_2O_3	CrO_2	TiO	FeO	CaO	U	K_2O
质量分数	83.07	10.92	2.25	1.33	1.21	0.56	0.33	0.15	0.13	0.02	0.01

表2　尾矿砂物理特性

Table 2　Physical properties of tailings

砂样	密度/(kg·m^{-3})	体积含水率/%	孔隙比	相对密度	干密度/(g·cm^{-3})	氡浓度/(Bq·m^{-3})
铀尾砂	1 350	8.19	0.91	2.70	1.48	11.2

表3　红土、腐殖土养分及pH测定结果

Table 3　Measurement results of nutrients and pH value of laterite and humus soil

名称	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	有机碳/(g·kg^{-1})	pH
红土	0.28	0.61	17.67	2.44	8.25
腐殖土	11.13	0.82	20.08	117.28	8.01

1.2　试验模型与仪器

试验堆砌铀尾矿库滩面模型3个，模型示意图如图1所示，1号箱为试验组，2号箱、3号箱为对照组。模型箱采用1.2 m×1.2 m×1.2 m的透明亚克力板材制作。1号箱底部为30 cm厚的铀尾砂和5 cm厚的覆土层，上部覆盖3 cm腐殖土及3 cm覆土，并进行植被培养，模拟生态修复后铀尾矿库滩面；2号箱底部为30 cm厚的铀尾砂和5 cm厚的覆土层，上部覆盖3 cm腐殖土及3 cm覆土，模拟铀尾矿库滩面多层覆盖处理；3号箱模型依次为30 cm铀尾砂及5 cm覆土模拟铀尾矿库滩面单层红土覆盖；模型静置20天后开始试验。

试验使用环境综合传感器(工业级无线智能感知设备GS-1-AL2G，大连云动力科技有限公司)对土壤和空气温湿度、环境光照情况进行记录；使用测氡仪(RAD7，美国Durridge公司)、集氡罩(采用镀锡钢板自制，尺寸40 cm×40 cm×35 cm)对氡析出率进行测量。

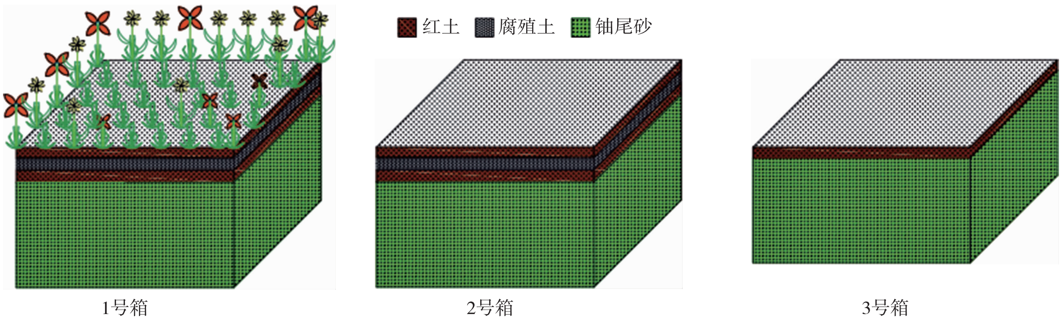


图1　试验模型

Fig. 1　Experimental model

1.3　植被养护与测量

铀尾矿库滩面原生植被较为稀少，主要为禾本科植被，以依靠风力传播自然生长的杂草为主，夹杂部分低矮灌木幼苗，植被平均高度约50～70 cm，因此本次试验采用了生态修复工程中常用的禾本植物大麦草(*Hordeum brevisubulatum* (Trin.) Link)为主，圆叶牵牛(*Pharbitis purpurea* (L.) Voisgt)、百日菊(*Zinnia elegans* Jacq)、黄秋英(*Cosmos sulphureus* Cav)混合播种。禾本植物根系发达，环境适应性强[9]。试验开始前，将1～3号箱内滩面模型浇水浸湿。将种子浸泡8 h，种皮膨胀后，播撒于1号箱，播撒密度约3粒/cm^2。正常养护过程模拟降水过程对其进行浇灌，于每日傍晚浇灌一次，浇灌量为1.5 L/m^2。观测并记录植被生长发育情况，同时对2、3号箱进行相同浇灌。

使用环境综合传感器GS-1-AL2G对试验期间光照、空气湿度及土壤温湿度进行监测，选取监测时段为9：00至17：00，该时段光照充分。测试时间为7天。采用RAD7与集氡罩对试验组与对照组进行氡浓度测量(图2)，每次采样总时长8 h，采样间隔30 min。

1.4　数据分析方法

1.4.1　氡析出率计算方法

试验采用的是密闭法测氡析出率，依据式(1)对试验组与对照组的累积氡浓度进行处理，计算其氡

图 2　现场氡浓度测量

Fig. 2　Field radon concentration measurement

析出率：

$$J=\frac{\Delta CAH}{St}=\frac{C-C_0}{t}H \qquad (1)$$

式中，J 表示氡析出率($Bq\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)；$C$ 为 t 时刻气罩内氡浓度(Bq/m^3)；C_0 为初始氡浓度(Bq/m^3)；A 为被测区域面积(m^2)；H 为氡集气罩的高度(m)；S 为集氡气罩底面积(m^2)；t 为集气时间(s)。

1.4.2　R/S 分析法氡析出趋势分析

采用 R/S 分析法(Hurst 指数)进行时间序列下的氡析出趋势分析，Hurst 指数(h)介于 0～1，用来判断时间序列上波动数据的趋势性，对氡析出率 n，将一段时间等分为等长子区间$\{x_t\}$：

$$X_{t,n}=\sum_{u=1}^{A}(x_u-M_n) \qquad (2)$$

$$R=Max(x_t,n)-Min(x_t,n) \qquad (3)$$

$$R/S=K\times n^h \qquad (4)$$

$$\lg(R/S)_n=h\lg n+\lg k \qquad (5)$$

式中，M_n 为第 n 个区间氡析出率 x_n 的平均值(($Bq\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$))；$S$ 为氡析出率 x_n 时间序列的标准差($Bq\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)。

对 $\lg n$ 与 $\lg(R/S)_n$ 进行最小二乘法回归，得 h 值。当 $0<h<0.5$ 时，表示数据具有反向规律性质，预示未来趋势与过去趋势相反；$0.5<h<1$ 时，表示数据延续当前趋势，具有持续性；当 $h=0.5$ 时，数据呈现不规律性。

2　结果与分析

2.1　植被发育过程

植被播种之后 7 天左右充分萌发，21 天时发育至平均株高 17 cm，36 天左右平均株高为 30 cm，随后进入花期，测试期间植被生长过程如图 3 所示。7 至 36 天内，衡阳地区进入连续阴雨天气时段，该时段内植被平均高度由 7 cm 快速发育至 30 cm，试验组植被生长状况良好，植株生长速度快，植被枝叶充分覆盖模拟铀尾矿库滩面，在连续阴雨天气条件下生长稳定，大麦草等禾本植物对弱光环境具有良好适应性[11]，试验表明混合植被对铀尾矿库滩面环境状况具有良好适应性。

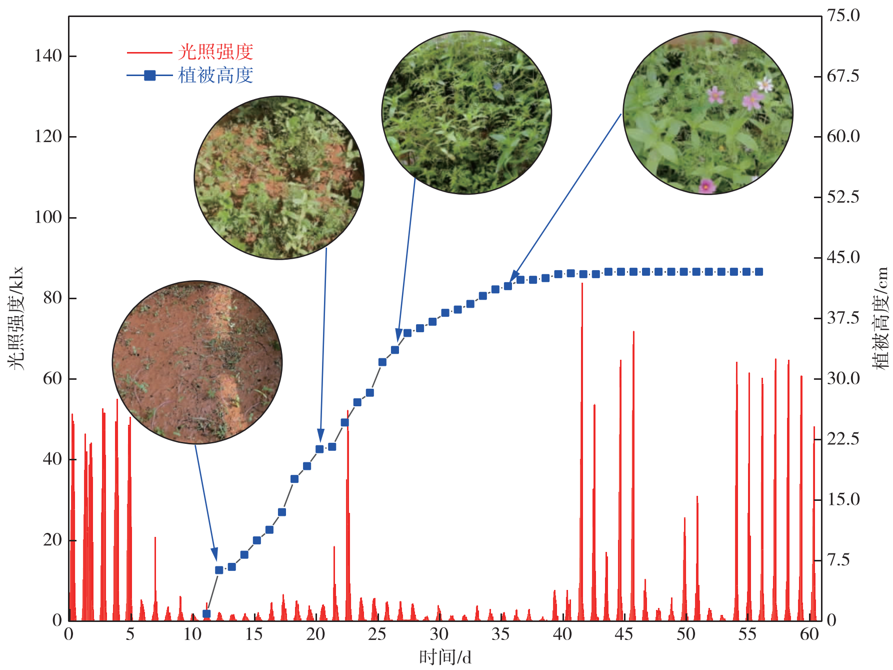


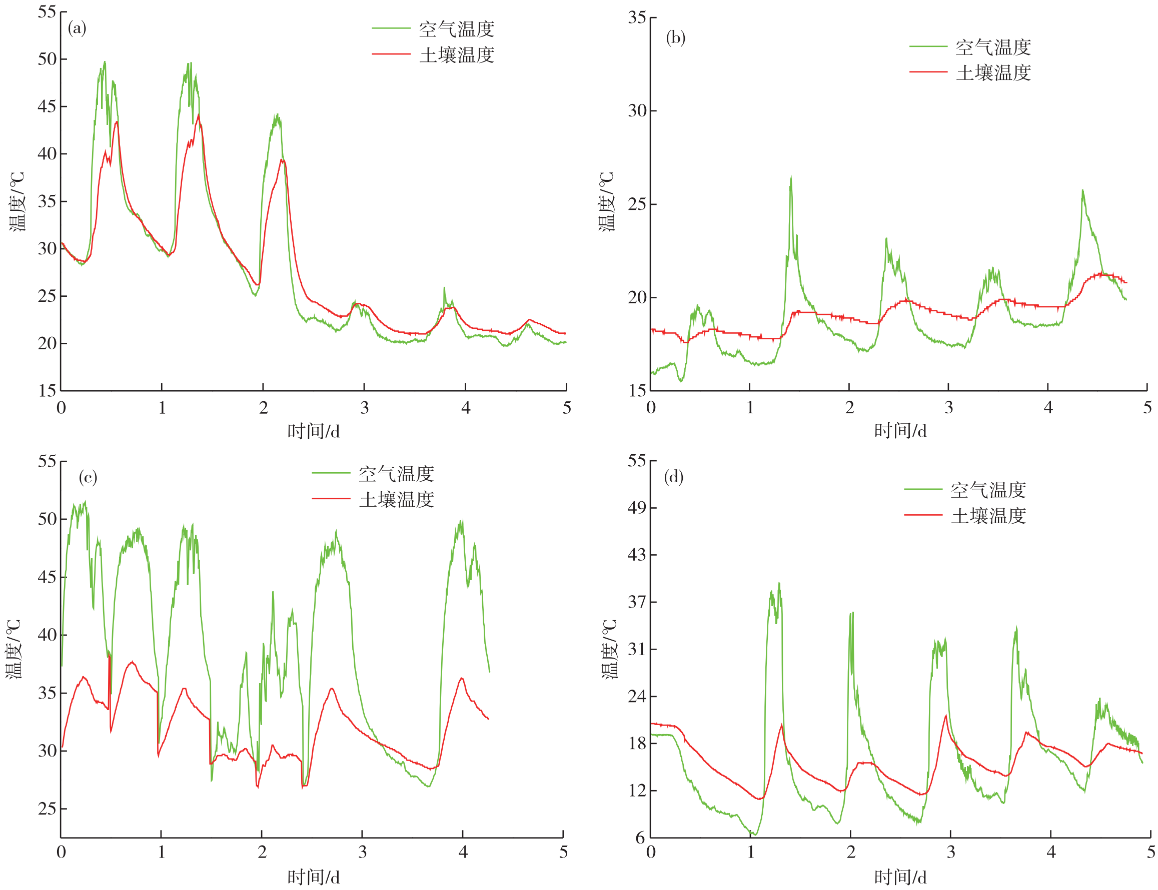
图 3　植被发育过程

Fig. 3　Vegetation development process

2.2　土壤温度变化

温度波动对铀尾矿库滩面氡析出率影响明显，在一定的温度范围内，铀尾矿库滩面氡析出率随温度升高而上升[12]，植被能有效减少阳光对铀尾矿库滩面的直接照射，减少铀尾矿库滩面升温。

研究表明裸露土壤生态修复后表层土壤温度受自然条件变化的影响减弱[13]，由图 4 可以看出，植被覆盖后的覆盖层土壤温度对气温变化的响应程度明显减弱。



(a)单层红土；(b)多层覆土；(c)17 cm 植被；(d)30 cm 植被

图 4　模型温度变化

Fig. 4 Temperature change of model

为进一步量化植被对土壤温度的影响，选取四组试验中温度波动均较大的时间区间 1～2 天内，使用公式(6)计算其波动变化，分析土壤温度对气温变化的响应程度。

$$E=\frac{k_{\max}-k_{\min}}{K_{\max}-K_{\min}} \tag{6}$$

式中，E 为土壤温度对空气温度变化响应度；K、k 分别为空气和土壤温度(℃)。

在 1 至 2 天内，单层红土 $E_1=0.70$，多层覆土 $E_2=0.72$，17 cm 植被组 $E_3=0.28$，30 cm 植被组 $E_4=0.24$。土壤温度对空气温度响应剧烈程度排序为：多层覆土＞单层红土≫17 cm 植被组＞30 cm 植被组。植被覆盖后铀尾矿库滩面表层土壤温度对气温变化的响应程度相对植被覆盖前下降约 63%。在相同光照条件下对照组滩面升温幅度高于植被组滩面。单层红土、多层覆土表层土壤温度随气温上升而迅速增加，夜间随气温下降又迅速回落，昼夜土壤温差大；植被覆盖后覆土层土壤温度对气温变化的响应程度下降。

2.3　氡析出结果分析

每 30 min 进行一次累积氡浓度测试，记为一个测点，结果见图 5。图 5 表明，各试验组的氡析出率呈现了较为明显的规律，氡析出率均围绕累积平均线非周期性震荡，宏观表现为铀尾矿库滩面氡气浓度在时空上呈现非周期性震荡变化[5]。无植被覆盖的裸露滩面氡析出率震荡程度高于植被组，植被覆盖后氡析出率维持在 0.31 Bq/(m^2·s)以下，单层红土和多层覆土覆盖模型的氡析出率分别围绕 1.2 和

0.9 Bq/(m² · s)震荡。平均株高 30 cm 时氡析出率略高于平均株高 17 cm,表明伴随植被过度生长会导致铀尾矿库滩面覆盖控氡效果下降。通过分析各试验组(80个测点)氡析出的标准差和极差值,分析氡析出的波动大小和氡析出稳定性,结果如表4所示。植被覆盖后 17 cm 时其氡析出率极差值和标准差均最小,分别为 0.148 和 0.027 Bq/(m² · s),单层红土覆盖层最大,分别为 1.351 1 和 0.345 Bq/(m² · s),具有植被的覆盖层其氡析出率极差值和标准差明显小于无植被的试验模型,表明植被覆盖后滩面氡析出率趋于稳定。

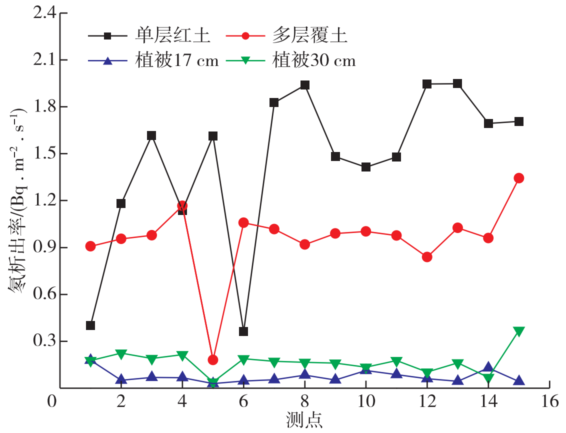


图5　平均氡析出率

Fig. 5　Average radon exhalation rate

对氡析出率波动趋势进行分析并绘制其累积平均线,得到氡析出率随时间变化如图6所示。单层红土、多层覆土、17 cm 试验组、30 cm 试验组氡析出率 h 值分别为 0.918、0.808、0.685、0.789(图7)。h 值均大于 0.5,表明氡析出率呈现明显正向规律,即各组氡析出率未来将重复之前规律,继续围绕其累积平均线非周期性震荡。单层红土、多层红土及植被 30 cm 氡析出率累积平均线斜率小,植被 17 cm 时累积平均线斜率较大,氡析出率有上升趋势,其 h 指数为 0.685,短时间内氡析出率维持上升趋势,此时植被处于快速发育阶段,氡析出率伴随植被发育有上涨趋势;植被 30 cm 时,植被高度稳定,氡析出率累积平均线平缓,氡析出率围绕累积平均线非规律性震荡,与铀尾矿库实地取样测试规律相符[14]。

表4　数据监测结果

Table 4　Data monitoring results　/(Bq · m⁻² · s⁻¹)

名称	最大值	最小值	中位数	平均值	极差	标准差
单层红土	1.531	0.092 0	0.247	0.363	1.351 1	0.345
多层覆土	0.592	0.012 7	0.327	0.315	0.579	0.123
植被 17 cm	0.149	0.001 0	0.023	0.028	0.148	0.027
植被 30 cm	0.334	0.000 5	0.095	0.109	0.333	0.062

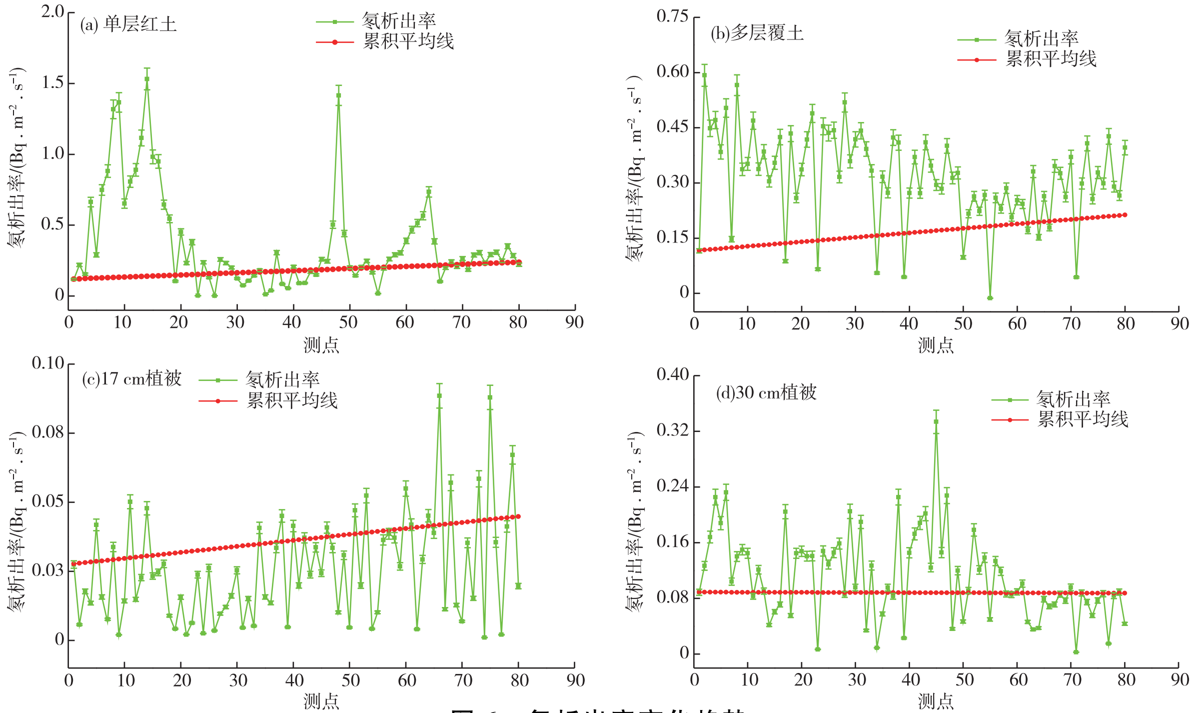
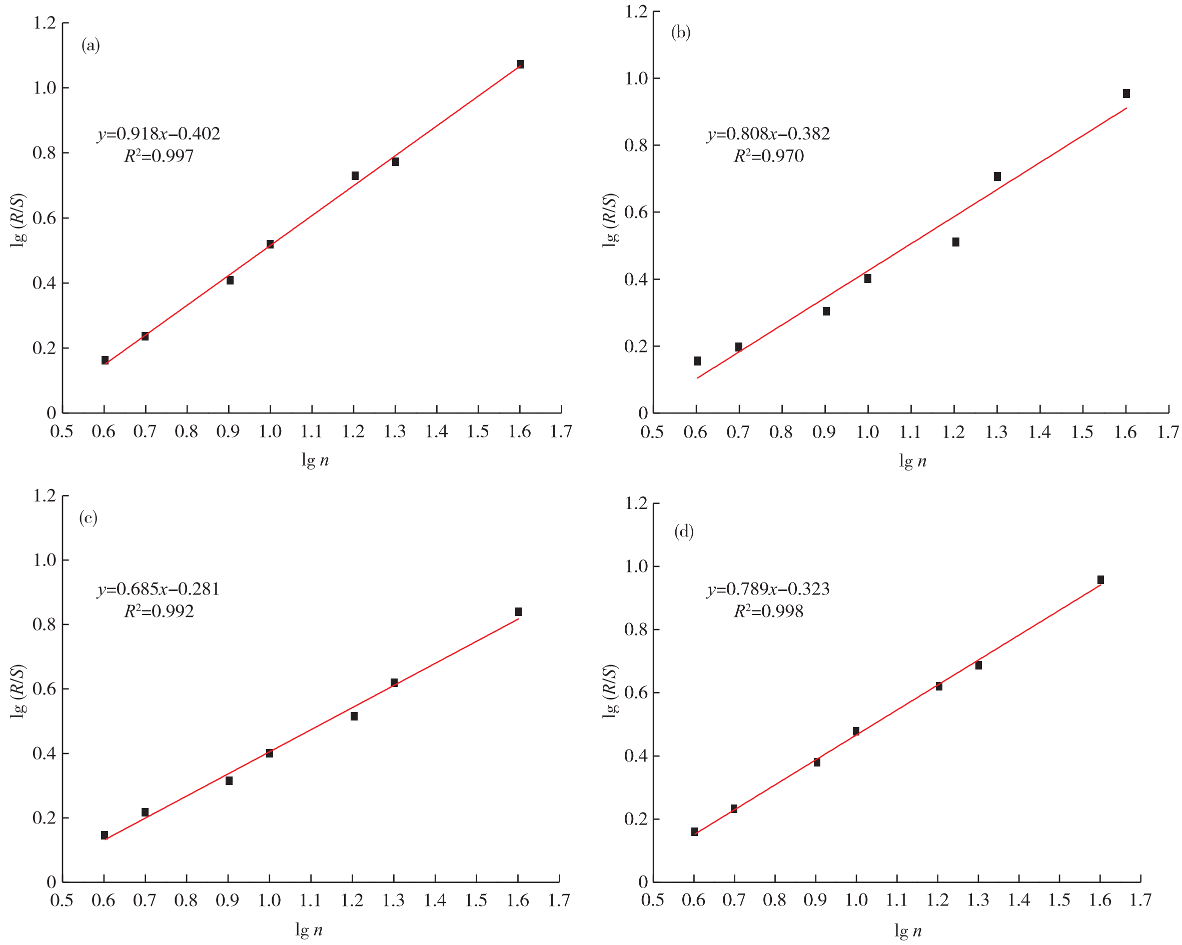


图6　氡析出率变化趋势

Fig. 6　Variation trend of radon exhalation rate



(a)单层红土;(b)多层覆土;(c)17 cm 植被;(d)30 cm 植被

图 7　*R*/*S* 分析结果

Fig. 7　*R*/*S* analysis results

3　结论

1)黄秋英、百日菊及大麦草等园艺植被能够较好地适应铀尾矿库滩面环境,维持正常生长。植被平均高度达 17 cm 左右时可以充分减弱滩面升温幅度。

2)腐殖土改良覆土并进行植被修复后滩面氡析出率明显下降。单层红土覆盖层氡析出率围绕 1.2 Bq/(m^2 · s)震荡,多层覆土覆盖层氡析出率围绕 0.9 Bq/(m^2 · s)震荡,植被覆盖铀尾矿库滩面后氡析出率稳定维持于 0.31 Bq/(m^2 · s)以下,相较于单层红土覆盖氡析出率峰值下降 74%,相较于多层覆土覆盖,氡析出率峰值下降 45%。

3)植被覆盖铀尾矿库滩面后氡析出率受环境影响的波动程度减小,单层红土覆盖层氡析出率标准差为 0.345 Bq/(m^2 · s),多层覆土覆盖层氡析出率标准差为 0.123 Bq/(m^2 · s),植被覆盖后 17 cm 时氡析出率标准差为 0.027 Bq/(m^2 · s),植被平均高度达到 30 cm 时氡析出率标准差为 0.062 Bq/(m^2 · s),氡析出率震荡区间减小,稳定性增加。

参考文献

[1]　侯兰欣,徐世明,赵文虎,等. 植物对土壤中^{137}Cs 浓集能力的筛选[J]. 核农学通报,1996(6):281-282,287.
HOU L X,XU S M,ZHAO W H,et al. Screening of ^{137}Cs concentration ability of plants in soil[J]. Bulletin of Nuclear Agronomy,1996(6):281-282,287.

[2]　于晓燕,宋宇辰,魏光普,等. 轻稀土矿区土壤和植物中铀和钍核素的分布特征[J]. 有色金属(冶炼部分),2021(3):109-115.
YU X Y,SONG Y C,WEI G P,et al. Distribution characteristics of uranium and thorium nuclides in soil and plants in light rare earth mining areas [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2021(3):109-115.

[2] 谢清芳,彭小勇,万芬,等.植被覆盖对铀尾矿库氡大气扩散影响的数值模拟[J].安全与环境学报,2013,13(6):264-268.
XIE Q F, PENG X Y, WAN F, et al. Numerical simulation of the effect of vegetation cover on radon atmospheric diffusion in uranium tailings pond[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(6): 264-268.

[4] 施宸皓.某废弃铀矿重金属和天然放射性物质的复合污染水平及修复研究[D].长沙:湖南大学,2017.
SHI C H. Study on compound pollution level and remediation of heavy metals and natural radioactive substances in a waste uranium mine[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

[5] 张学礼,徐乐昌.某铀尾矿库附近空气^{222}Rn浓度时空分布及分形特征[J].环境工程,2016,34(增刊1):799-803,806.
ZHANG X L, XU L C. Temporal and spatial distribution and fractal characteristics of air ^{222}Rn concentration near a uranium tailings pond[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(S1): 799-803, 806.

[6] 曹众为.压力梯度和温度对多孔射气介质氡析出率影响的试验研究[D].衡阳:南华大学,2013.
CAO Z W Experimental study on the influence of pressure gradient and temperature on radon exhalation rate in porous gas emitting medium[D]. Hengyang: Nanhua University, 2013.

[7] 叶勇军,文汉冠,李向阳,等.铀尾矿滩面氡析出率与环境因素的灰色关联度分析[J].工业安全与环保,2018,44(4):96-98,103.
YE Y J, WEN H G, LI X Y, et al. Grey correlation analysis between radon exhalation rate and environmental factors on uranium tailings beach[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(4): 96-98, 103.

[8] DUS HENKOV S. Trends in phytoremediation of radionuclides[J]. Plant and Soil, 2003(7): 167-175.

[9] 李招弟,刘中华,冯慧敏,等.不同植被覆盖条件下黄土土壤温度的变化规律[J].山西农业科学,2019,47(11):2015-2019.
LI Z D, LIU Z H, FENG H M, et al. Variation law of loess soil temperature under different vegetation coverage[J]. Shanxi Agricultural Science, 2019, 47(11): 2015-2019.

[10] 孙智妍,周秋文,罗雅雪,等.黄壤径流小区植被覆盖度对土壤湿度的影响[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):39-46.
SUN Z Y, ZHOU Q W, LUO Y X, et al. Effect of vegetation coverage on soil moisture in yellow soil runoff plot[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4): 39-46.

[11] 贾希洋,马红彬,周瑶,等.不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落数量分类和演替[J].草业学报,2018,27(2):15-25.
JIA X Y, MA H B, ZHOU Y, et al. Quantitative classification and succession of typical grassland plant communities in Loess Hilly Region of Ningxia under different ecological restoration measures[J]. Journal of Prataculture, 2018, 27(2): 15-25.

[12] 万茂科,苗洪利,程广壮,等.光强和光周期对大麦草生长速率的影响[J].照明工程学报,2020,31(4):145-151.
WAN M K, MIAO H L, CHENG G Z, et al. Effects of light intensity and photoperiod on the growth rate of barley grass[J]. Journal of Lighting Engineering, 2020, 31(4): 145-151

[13] 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.
ZHANG Z X, LI X Y, DENG W H, et al. Experimental study on the effect of temperature on radon emission from porous gas emitting medium[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(6): 30-32.

[14] 邓翠,吕茂奎,曾敏,等.红壤侵蚀区植被恢复对土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J].土壤学报,2019,56(1):135-145.
DENG C, LYU M K, ZENG M, et al. Effects of vegetation restoration on soil respiration and temperature sensitivity in red soil erosion area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 135-145.

[15] 胡寒桥,谭凯旋,吕俊文,等.铀尾矿氡析出率的Hurst指数与分形特征[J].南华大学学报(自然科学版),2010,24(4):5-10.
HU H Q, TAN K X, LYU J W, et al. Hurst index and fractal characteristics of radon exhalation rate from uranium tailings[J]. Journal of Nanhua University (Natural Science Edition), 2010, 24(4): 5-10.