

# 氡子体气溶胶多孔撞击式采样器的设计与实现

谭至宇 陈凌 程卫亚 陈亮平 马天赐

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 氡子体气溶胶粒径是氡子体内照射剂量转换系数关键参数,研制氡子体气溶胶粒径测量装置开展对环境氡子体气溶胶粒径分布测量是必要的。惯性冲击器是一种广泛应用的颗粒物分级采样器,本文分析了几类常见的惯性冲击器,基于空气动力学理论与相关研究基础,设计了一种切割粒径为 $1\ \mu\text{m}$ 的多孔撞击式采样器。利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析软件Fluent以及离散相模型对多孔撞击式采样器结构的收集板直径、收集板与内壁距离、喷嘴距离、喷嘴与收集板距离、喷嘴高度等设计参数进行模拟与分析,得到了一组优化设计参数,并在实验室用GRIMM11-D空气动力学粒度仪进行了标定。结果表明:多孔撞击式采集器的喷嘴距离( $D$ )、喷嘴高度( $T$ )、喷嘴到收集板的距离( $S$ )与喷嘴直径( $W$ )的关系在 $D/W=1.5\sim 3.5$ 、 $T/W=1\sim 5$ 、 $S/W=1$ 范围内,实验标定结果为 $d_{p50}=(1\pm 0.07)\ \mu\text{m}$ , $\sigma_{g1}=1.33$ , $\sigma_{g2}=1.35$ 与CFD数值模拟的结果基本吻合,该冲击器切割粒径满足实际应用需求。

**关键词** 氡子体, 惯性冲击器, 参数设计, 模拟验证

中图分类号 X837

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050401

## Design and implementation of a porous impingent sampler for radon progeny aerosoll

TAN Zhiyu CHEN Ling CHENG Weiya CHEN Liangping MA Tianci

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** [Background] Aerosol particle size of radon progeny is the key parameter of the radiation dose conversion coefficient in radon progeny. It is necessary to develop a measuring device for the aerosol particle size of radioactive aerosol to measure the aerosol particle size distribution of environmental radon progeny. Inertial impactor is a kind of widely used particulate classification sampler. [Purpose] This paper aims to design and implement an impactor applicable to radon progeny aerosol with a cutting size of  $1\ \mu\text{m}$ . [Methods] First of all, several kinds of inertial impactors were analyzed on the basis of aerodynamic theory, the design parameters of the impactation sampler structure, such as the diameter of the collecting plate, the distance between the collecting plate and the inner wall, the distance between the nozzle and the collecting plate, the height of the nozzle, were simulated by using computational fluid dynamics (CFD) analysis software Fluent and discrete phase model. Then, based on simulation results, a set of optimized design parameters were obtained and a porous impingent sampler was implemented for radon progeny aerosol. Finally, this impactor was calibrated by a GRIMM11-D aerodynamics particle size analyzer in a laboratory. [Results] The optimized design parameters show that the nozzle distance  $D$ , the nozzle height  $T$ , the distance  $S$  from the nozzle to the collecting plate, and the nozzle diameter  $W$  have relationship of  $D/W=1.5\sim 3.5$ ,  $T/W=1\sim 5$ ,  $S/W=1$ .

第一作者: 谭至宇, 男, 1995年出生, 2020年于清华大学获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事辐射防护研究

通信作者: 陈凌, E-mail: chenling@ciae.ac.cn

收稿日期: 2023-01-14, 修回日期: 2023-02-13

First author: TAN Zhiyu, male, born in 1995, graduated from Tsinghua University with a master's degree in 2020, doctoral student, focusing on the radiation protection research

Corresponding author: CHEN Ling, E-mail: chenling@ciae.ac.cn

Received date: 2023-01-14, revised date: 2023-02-13

The experimental calibration results of designed porous impingent sampler are basically consistent with that of CFD numerical simulation with  $d_{p50}=(1\pm 0.07)\ \mu\text{m}$ ,  $\sigma_{g1}=1.33$ ,  $\sigma_{g2}=1.35$ , and the cutting particle size of the impactors meets the practical application requirements. [Conclusions] This paper focuses on the design of an impactor sampler. Through simulation and comparison tests with ELPI<sup>+</sup> instrument, the effective cutting of 1  $\mu\text{m}$  particle size is realized, which provides convenience and ideas for the further optimization design and online particle size fractional measurement of radioactive aerosol.

**Key words** Radon progeny, Impactor, Parameter design, Simulation and verification

氡是天然辐射照射的主要来源,国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第50号出版物估计公众肺癌中10%可归因于氡及其子体的照射<sup>[1]</sup>。氡子体的剂量贡献占了主要部分,且内照射剂量转换系数主要取决于氡子体气溶胶粒子活度粒径分布,基于氡子体的物理形态和防护地位,需要对氡子体气溶胶进行分级采样。氡子体气溶胶粒子一般按两种方式采集:一种是总浓度采样,不区分粒子大小;另一种为粒度分离采样,按照粒度大小分成若干个粒径段在各类粒径分级采样器中。德国Prostendorfe等<sup>[2-3]</sup>发现粒径大于1  $\mu\text{m}$ 的氡子体气溶胶活度占比仅在0%~10%,考虑后续仪器并联分级设计,本文主要针对氡子体放射性气溶胶粒度分离采样,介绍几类常见的惯性冲击式粒度分级采样器,并分析了其工作原理,设计了一种切割粒径 $d_{p50}=1\ \mu\text{m}$ 的多孔撞击式采样器。

## 1 惯性冲击器的分类

放射性气溶胶具有一切非放射性气溶胶类似的性质与特征<sup>[4]</sup>,氡子体气溶胶粒度分级采样主要借鉴气溶胶粒径分级采样方法的技术经验,结合其自身特殊性进行有针对性的调整和优化。最常用的是根据流体力学的惯性碰撞原理设计的冲击式采样器(Impactor),冲击式采样器最早是由莫塞尔设计,并用于铀矿山测量<sup>[5]</sup>。冲击式采样器装置主要分为:撞击式粒子采样器、向心式粒子采样器、旋风分离式采样器。

### 1.1 撞击式粒子采样器

撞击式粒子采样器如图1所示,冲击喷嘴可选择圆形或是矩形,其原理是利用惯性分离技术,通过调整进气速率,使得较大粒径的氡子体气溶胶粒子经过喷嘴因惯性撞击在冲击板上被采集,而小于该粒径的粒子跟随流线继续运动。为防止撞击板采集粒子的反弹和滑落,可将喷嘴由单孔设计为多孔撞击式粒子采样器,甚至可通过旋转收集板使得粒子收集得更加均匀。

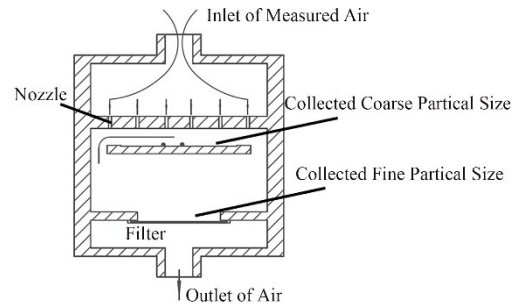


图1 多孔撞击式粒子采样器示意图

Fig.1 Diagram of porous impact-type particle sampler

### 1.2 向心式粒子采样器

向心式粒子采样器如图2所示,采样分级器由一个一定孔径的喷嘴和锥形采集板组成,同时采集板底部为有适当阻力的捕集滤膜作为粒子捕集介质,当一定速度的放射性气溶胶粒子群经过喷嘴,惯性足够大,截止距离足够长的粒子将冲击到锥形采集板中,最后捕集在滤纸上。采集板底部的滤膜有一定气流通过,使得冲击进喷嘴的粒子能顺利到达捕集滤膜上。

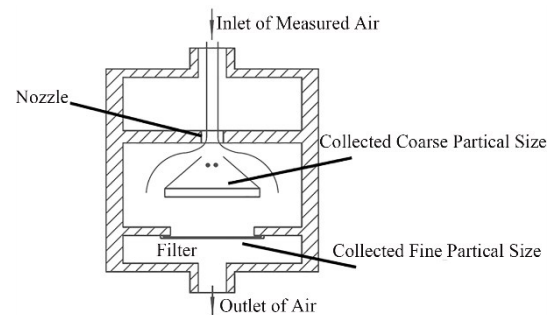


图2 向心式粒子采样器示意图

Fig.2 Diagram of centripetal-type particle sampler

### 1.3 旋风分离式采样器

旋风分离采样器如图3所示,该采样器由一个旋风体以及上方的小粒径收集板与下方大粒径收集板组成。其原理为放射性气溶胶粒子从螺旋式的气流口进入旋风体后,围绕轴向的中心管柱形成螺旋式的螺旋运动,由于离心力的作用,粗大的粒子落入下方收集板中。而细小粒子随气流而被带走,进而捕集在气流出口上方的收集板中。

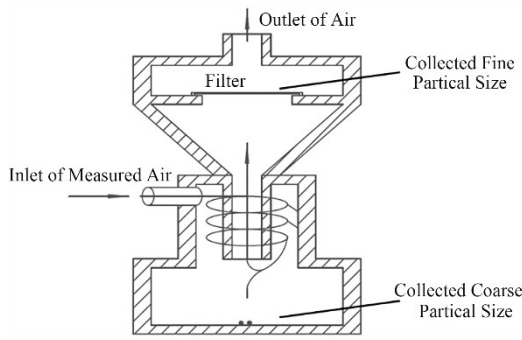


图3 旋风分离采样器示意图  
Fig.3 Diagram of cyclone separation sampler

撞击式采样器无论喷嘴为单孔或多孔,粒子的滑脱和反弹问题不可避免,对粒子的分离特性有一定影响。为克服撞击式收集板的滑脱和反弹现象,向心式采样器克服了撞击式的滑脱现象,使得各个分离机捕集的气溶胶粒子比较多,适合长时间、大流量的粒度分布采样,但向心式喷嘴为单孔,各级的捕集效率曲线、切割特性不如撞击式好且分级不宜太多,部分粒子会黏附、沉积在管嘴的内外壁而造成损失。旋风分离采样器只能按照大小分离成两部分进行粒度采样,且捕集的细小粒子也会产生滑脱现象<sup>[5]</sup>。针对粒径为微米及亚微米级氦子体气溶胶粒子,捕集效率曲线、切割特性直接决定采样器性能,结合各类惯性冲击式采样器优缺点,选用多孔撞击式采样器并对其进行研究。而采样器的设计尤为重要,采样系统的好坏直接影响整个气溶胶监测系统的性能,提高氦子体气溶胶粒子的捕集效率。

## 2 圆形多孔撞击式采样器参数设计

采样器的喷嘴部分采用圆形的多喷嘴(孔)形式,根据放射性气溶胶颗粒尺寸的大小(空气动力学直径)实现对空气中 $1\ \mu\text{m}$ 以下的放射性气溶胶粒子收集,其原理简化模型如图4所示。假定入口气流在喷嘴处的流动是均匀的,沿流线运动的氦子体气溶胶颗粒受离心力使颗粒向冲击板运动。采样器的参数设计,主要遵循两个设计准则<sup>[6]</sup>:一是喷嘴和收集板的距离( $S$ )、喷嘴高度( $T$ )与喷嘴直径( $W$ )的比值 $S/W$ 、 $T/W$ 范围;二是雷诺数 $Re$ 范围。首先根据冲击器捕集结构原理得到主要参数之间关系,并通过设计准则( $1 \leq S/W \leq 5$ ,  $1 \leq T/W \leq 5$ ,  $500 \leq Re \leq 3\ 000$ )及迭代优化确定 $Re$ 、质量流量 $Q_m$ 、切割粒径 $d_{p50}$ 、喷嘴孔数 $N$ 、喷嘴直径 $W$ 等具体参数值,后续根据已知参数建模,对该冲击器模型进行多次模拟仿真,确定冲击器收集板直径 $R$ 收集板与壁距离 $L$ 、喷嘴距离 $D$ 、喷嘴高度 $T$ 、喷嘴到收集板的距离 $S$ 等模拟参数并得到最后的结构设计方案。

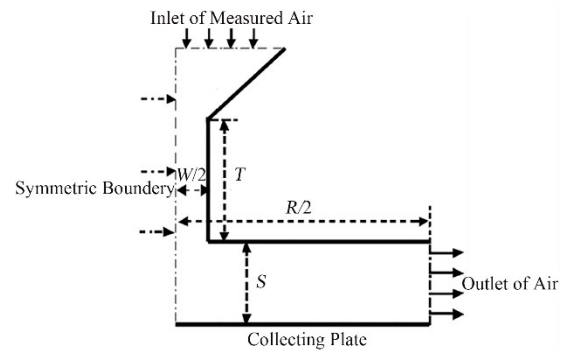


图4 多孔撞击式粒子采样器简化物理模型图  
Fig.4 Simplified physical model diagram of porous impact-type particle sampler

### 2.1 影响采样器性能主要参数及关系

影响冲击器性能的结构与物性参数主要有 $Re$ 、 $Q_m$ 、 $d_{p50}$ 、 $N$ 、 $W$ 等。理论及实验研究发现,冲击器切割特性是受流体的速度流场所控制,速度场是冲击器的物理性状。并且得到流体通过喷嘴时 $Re$ 的函数,以喷嘴直径所表示的 $Re$ 可由式(1)定义<sup>[7-8]</sup>:

$$Re = \frac{4Q_m}{\pi N \mu W} \quad (1)$$

式中: $N$ 为喷嘴个数,个; $W$ 为喷嘴直径,cm; $Q_m$ 为各喷嘴总的的质量流量, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\mu$ 为黏滞系数, $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ 。

根据质量守恒定理,冲击器各处的质量流量都应相同,一般情况下气体的 $Q_m$ 不易测出,则体积流量 $Q_v$ 与质量流量 $Q_m$ 的关系为:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho_g \quad (2)$$

式中: $Q_v$ 为各喷嘴总的体积流量, $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\rho_g$ 为空气密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

$\sqrt{STK_{50}}$ 的定义为捕集效率为50%的微粒的 $\sqrt{STK_{50}}$ 值,与其相应的为捕集效率为50%空气动力学直径 $d_{p50}$ ,它通常用作冲击器的设计及判断操作性好坏的主要指标。根据理论计算可以发现,采样器中各级冲击板都有自己的临界捕集直径 $d_{p50}$ ,它与斯托克准数关系为<sup>[9]</sup>:

$$d_{p50} = \left[ \frac{9\pi N \mu \rho_g W^3}{4Q_m \rho_p C_c} STK_{50} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_{p50}} \left( 2.514 + 0.8 \exp \left( -0.55 \frac{d_{p50}}{\lambda} \right) \right) \quad (4)$$

式中: $\rho_p$ 为颗粒密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; $C_c$ 为滑移修正系数,无量纲; $\lambda$ 为空气平均自由程,cm。

在 $T_0=293.15\ \text{K}$ 、 $P_0=101\ 325\ \text{Pa}$ 时,空气密度 $\rho_g=1.293\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,黏滞系数 $\eta_0=1.81 \times 10^{-5}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$ ,空气平均自由程 $\lambda=0.065\ 3\ \mu\text{m}$ ,则在其他温度 $T$ 、压强 $P$ 处可表示为:

$$\rho_g = \rho_{g_0} \frac{P T_0}{P_0 T} \quad (5)$$

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.7} \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_0 \frac{P_0 T}{P T_0} \quad (7)$$

根据式(1)和式(3),消去喷嘴直径 $W$ ,可得到喷嘴孔数 $N$ 与 $Re, Q_m, d_{p50}$ 之间的关系:

$$N = \frac{12Q_m}{\pi \left( \frac{\rho_p}{STK_{50}} \right)^{0.5} \left( \frac{Re}{\rho_g} \right)^{1.5} \mu \rho_g \sqrt{C_c} d_{p50}} \quad (8)$$

根据式(1)和式(5),消去 $Q_m$ 和 $N$ ,可得到喷嘴直径 $W$ 与 $Re, d_{p50}$ 之间的关系:

$$W = \sqrt{\frac{\rho_p \cdot Re}{9 \cdot \rho_g \cdot STK_{50}}} \sqrt{C_c} d_{p50} \quad (9)$$

## 2.2 采样器的参数设计

根据上述冲击器参数之间关系,通常先明确切割粒径 $d_{p50}$ ,再设置 $Q_m, Re$ ,得到喷嘴个数 $N$ 与喷嘴直径 $W$ ,然后再反推 $Re$ ,根据设计准则进行验证,若未在设计准则的推荐范围内,需进行参数迭代优化,即将 $Re$ 再次代入式(8)、(9)重新进行迭代计算,直到设计参数在设计准则的推荐范围内。采样器的性能才能保持相对稳定<sup>[10-12]</sup>。

参数迭代优化过程中发现,由于后续实际加工的限制,喷嘴个数 $W, Re$ 都为正整数,则可通过先设置喷嘴数与 $Re$ 为正整数并限定其范围:喷嘴个数在1~100内, $Re$ 在500~3 000内,通过输入 $Q_m$ 来迭代得到最终的结构参数,根据设计要求切割粒径 $d_{p50}$ 为1  $\mu\text{m}$ 找到合适的结果,使用喷嘴个数 $N=6$ 的相关结构参数,如表1所示。

表1 多孔撞击式粒子采样器结构与物性参数  
Table 1 Structure and physical parameters of porous impingent particle sampler

基本参量 Basic parameters	数值 Values
切割粒径 Cut size $d_{p50} / \mu\text{m}$	1
喷嘴个数 Nozzle number $N / \text{个}$	6
喷嘴直径 Nozzle diameter $W / \text{cm}$	0.08
雷诺数 $Re$ (无量纲)	1 426
Reynolds $Re$ (dimensionless)	
质量流量 Flow mass $Q_m / \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	0.10

后续根据表1结构与物性参数对采样器建模,并使用Fluent软件模拟仿真,确定冲击器收集板直径 $R$ 收集板与壁距离 $L$ 、喷嘴距离 $D$ 、喷嘴高度 $T$ 、喷嘴到收集板的距离 $S$ 等模拟参数。

## 3 CFD模拟与结构设计

Fluent软件是国际上比较流行的商业计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件包,专用于流体力学分析<sup>[13]</sup>。在软件仿真前,利用ANSYS前端处理软件进行建模和网格化。为研究不同粒径颗粒在流体中的运动规律,探讨冲击器 $R, L, D, T, S$ 对冲击器切割特性(捕集效率和切割锐度)的影响,根据表1多孔撞击式粒子采样器结构与物性参数,利用Fluent软件进行冲击器内部流场的CFD模拟。

### 3.1 多嘴冲击式采样器的CFD模拟

多孔撞击式采样器装配关系如图5所示。主要共包含4部分:入口部分由两个不同半径的圆柱体组成,喷嘴部分由6个流道组成,收集板部分由一个空心圆柱与三个长方体支撑板组成,出口部分仅由一个圆柱体组成。

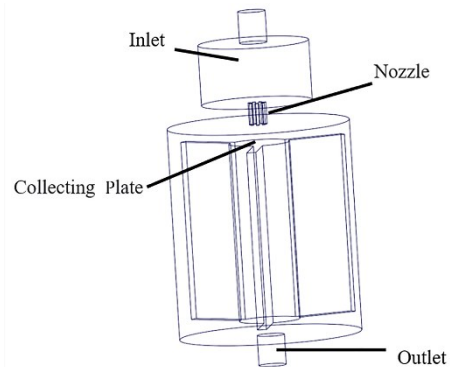


图5 多孔撞击式采样器模型示意图  
Fig.5 Diagram of porous impact sampler model

完成建模后,利用Fluent软件对模型进行流体力学仿真。仿真计算采用的是离散相流体力学模型,边界条件设置见表2。图6为1  $\mu\text{m}$ 粒子的运动轨迹,其中局部放大图显示了部分1  $\mu\text{m}$ 粒子撞击到了收集板的轨迹。

表2 采样器仿真边界条件  
Table 2 Sampler simulates boundary conditions

边界 Boundary	条件 Condition
进气 In	速度入口 Velocity-inlet
出气口 Out	压力出口 Pressure-outlet
收集板 Trap	粒子捕获 Scape
壁 Wall	粒子反射 Reflect

### 3.2 模拟结果及分析

#### 3.2.1 $R$ 对捕集效率的影响

考虑 $R$ 对捕集效率的影响,固定其他结构参数,取 $L=20 \text{ mm}, D=1.6 \text{ mm}, T=1.6 \text{ mm}, S=0.8 \text{ mm}$ ,仿真

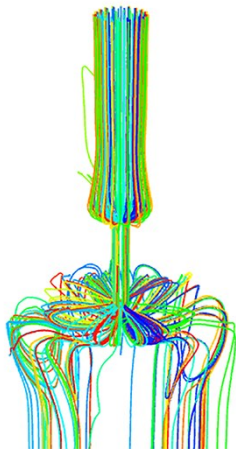


图6 仿真 1 μm 粒子的运动轨迹  
Fig.6 Simulation of 1 μm particle trajectories

了在不同收集板直径  $R$  的情况下粒子运动轨迹,统计得到一组捕集效率曲线如图7所示。从捕集效率曲线可以看出,通过改变收集板直径  $R$ ,其曲线的几何偏差和  $d_{p50}$  参数基本没有变化,可认为  $R$  在 15~55 mm 时采集器性能保持稳定且对捕集效率曲线无影响。

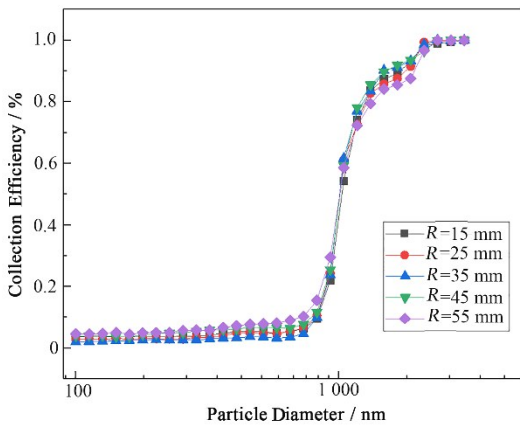


图7 收集板直径  $R$  的捕集效率曲线  
Fig.7 Capture efficiency curve of collector plate diameter  $R$

### 3.2.2 $L$ 对冲击效率的影响

考虑  $L$  对冲击效率的影响,固定其他结构参数,取  $R=25$  mm,  $D=1.6$  mm,  $T=1.6$  mm,  $S=0.8$  mm, 仿真了在不同  $L$  的情况下粒子运动轨迹,统计得到一组捕集效率曲线如图8所示。从搜捕曲线可以看出,通过改变收集板与内壁的距离  $L$ ,其曲线的几何偏差与  $d_{p50}$  无较大差异,可认为  $L$  在 10~50 mm 时采集器性能保持稳定且对捕集效率曲线无影响。

### 3.2.3 $D$ 对捕集效率的影响

考虑到  $D$  对捕集效率的影响,固定其他结构参数,取  $R=25$  mm,  $L=20$  mm,  $T=1.6$  mm,  $S=0.8$  mm,  $D$  与  $W$  不同倍数的情况下粒子运动轨迹,统计得到一组捕集效率曲线如图9所示。从曲线可以看出,当  $D$  与  $W$  关系为 1.5~3.5 倍时,其捕集效率曲线与  $d_{p50}$

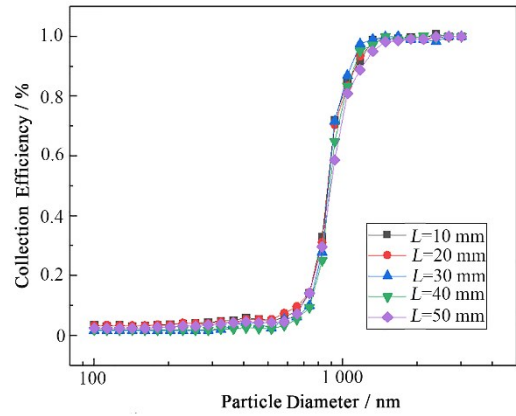


图8 收集板与内壁的距离  $L$  的捕集效率曲线  
Fig.8 Capture efficiency curve of the distance  $L$  between the collector plate and the wall

无较大差异,当大于 3.5 倍时  $d_{p50}$  随着倍数增大而减少,且捕集效率曲线随着倍数增大而变缓。根据多孔撞击式采样器是多股射流同时冲向收集板,当粒子进入喷嘴随流线运动发生转向时,不同粒径的粒子偏离流线程度不同,若孔距太小,粗粒径在脱离流线时互相扰动,若孔距太大,细颗粒在跟随流线时互相扰动,所以认为  $D$  与  $W$  的关系  $D/W=1.5\sim 3.5$  倍时,模拟采集器符合要求。

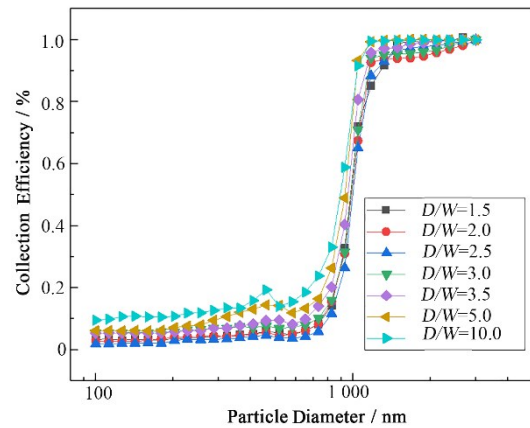


图9 喷嘴距离  $D$  的捕集效率曲线  
Fig.9 Capture efficiency curve of nozzle distance  $D$

### 3.2.4 $S$ 与捕集效率的影响

考虑  $S$  对捕集效率的影响,固定其他结构参数,取  $R=25$  mm,  $D=1.6$  mm,  $L=20$  mm,  $T=1.6$  mm, 仿真了  $S/W$  值不同的情况下粒子运动轨迹,统计得到一组捕集效率曲线如图10所示。从曲线可以看出,采样器的切割半径随着喷嘴到冲击面的距离的增大而增大。当  $S$  增加时,虽然气体黏性力作用在粒子上的时间变长,粒子撞击到冲击板上的概率减小,但是同时冲击面上方气流向两侧的流速会减小,对粒子运动轨迹的影响会削弱,又使粒子撞击到收集板上的概率又增大。所以认为当切割粒径要求  $d_{p50} =$

1  $\mu\text{m}$  时,  $S$  与  $W$  的关系  $S/W=1$  时, 模拟采集器符合要求。

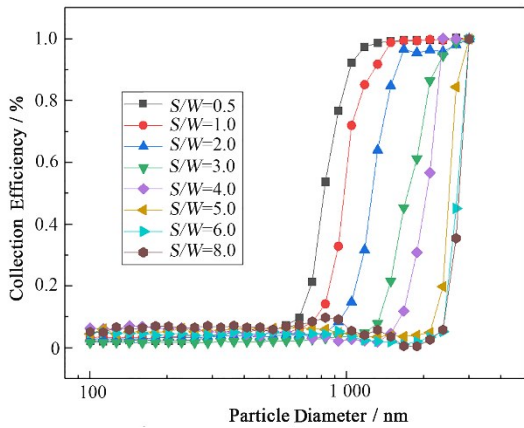


图10 喷嘴到收集板距离  $S$  的捕集效率曲线  
Fig.10 Capture efficiency curve of the distance  $S$  from nozzle to collector plate

### 3.2.5 $T$ 与捕集效率的影响

考虑到  $T$  与捕集效率的影响, 固定其他结构参数, 取  $R=25\text{ mm}$ ,  $D=1.6\text{ mm}$ ,  $L=20\text{ mm}$ ,  $S=0.8\text{ mm}$ ,  $T$  不同的情况下粒子运动轨迹, 统计得到一组捕集效率曲线如图11所示。从曲线可以看出, 无论是曲线的几何偏差与  $d_{p50}$  无较大差异, 可认为  $T$  在设计准则  $1 \leq T/W \leq 5$  内时采集器性能保持稳定且对捕集效率曲线无影响。

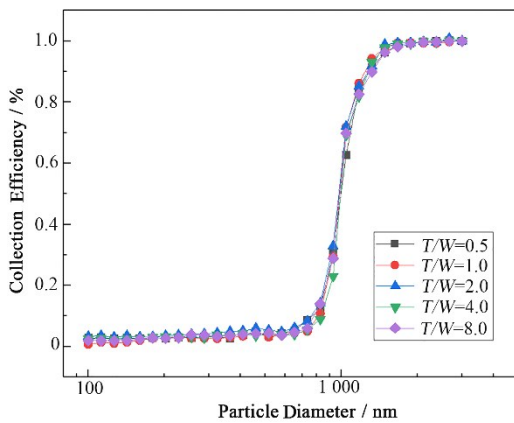


图11 喷嘴高度  $T$  的捕集效率曲线  
Fig.11 Capture efficiency curve of nozzle height  $T$

### 3.2.6 冲击器的结构设计

根据上述对冲击器的CFD模拟结果, 可得出冲击器  $R$ 、 $L$ 、 $D$ 、 $T$ 、 $S$  的结构参数, 如表3所示, 加工成样机进行模型实验, 冲击器结构如图11所示, 当氦子体气溶胶随流线经过喷嘴后, 大于  $1\text{ }\mu\text{m}$  的粒子被收集在采集板上, 小于  $1\text{ }\mu\text{m}$  的粒子随气流而被滤膜捕集。

表3 多孔撞击式粒子采样器结构参数  
Table 3 Structural parameters of porous impingent particle sampler

基本参量 Basic parameters	数值 Values
收集板直径 Collection plate diameter $R$ / mm	25
收集板与内壁的距离 Distance between collecting plate and inner wall $L$ / mm	20
孔距 Nozzle distance $D$ / mm	1.6
喷嘴与收集板距离 Distance between nozzle and collector plate $S$ / cm	0.08
喷嘴高度 Nozzle height $T$ / cm	0.16

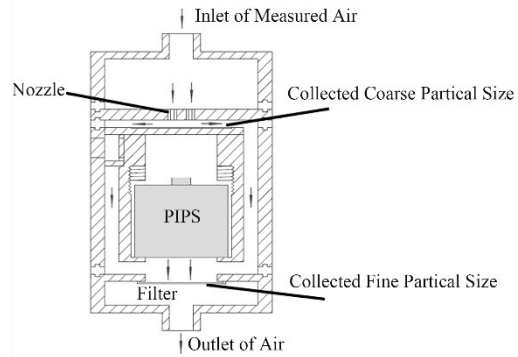


图12 多孔撞击式采样器设计图  
Fig.12 Design diagram of the porous percussive sampler

## 4 实验验证

捕集效率曲线特性是衡量多孔撞击式采样器性能的重要指标, 主要参照《HJ 93—2013 环境空气颗粒物  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  采样技术要求及检测方法》使用分流测试法, 利用自制多分散的气溶胶对采样器进行标定。将稳定的氦子体气溶胶粒子通入多孔撞击式采样器中, 再用气溶胶粒度谱仪 Grimm11-D 分别测量采样器上(源项)、下游的氦子体气溶胶浓度  $C_{in}$  和  $C_{out}$ , 建立图13所示的多孔撞击式采样器性能测试系统。而多孔撞击式采样器的性能指标通过与商用 ELPI+ 仪器进行质量比对实验, 结果表明: 多孔撞击式采样器满足对氦子体气溶胶的采集要求。

### 4.1 捕集效率曲线分析

撞击式采样器捕集曲线主要以单分散颗粒物标定方法为主, 但实际验证过程中对亚微米级别氦子体气溶胶, 产生的单分散性气溶胶可能会不理想, 且产生的单分散气溶胶容易在验证过程中附壁或结合, 导致测量结果不准确<sup>[14]</sup>。参考国内外文献的做法, 利用自制多分散的气溶胶对采样器进行标定。与单分散气溶胶标定法相比, 该方法可在较短时间内获得采样器的切割性能, 在三类不同氦子体气溶胶浓度的源项条件下, 多孔撞击式采样器上(源项)、

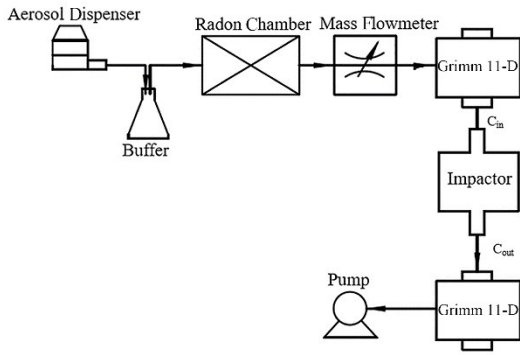


图 13 多孔撞击式采样器性能测试装置示意图

Fig.13 Schematic diagram of performance test device for multi-hole percussive sampler

下游的氦子体气溶胶浓度  $C_{in}$  和  $C_{out}$  如图 14 所示, 再通过式(10)计算得氦子体气溶胶捕集效率  $\eta$ 。

$$\eta(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

多分散气溶胶发生器以洁净的高纯氮(99.999%)作为载气, 将油滴通过雾化喷嘴以一定的压力和流量喷射出来, 粒子进入混合室, 形成多分散气溶胶颗粒。通入氦室, 在恒温状态下( $< \pm 1^\circ\text{C}$ )保持气溶胶发生器开启 3 h 以后, 氦及氦子体浓度达到衰变平衡, 得到稳定的多分散氦子体气溶胶源项。不改变泵的流量, 即在压强稳定的条件下, 调节油滴进入速率, 得到不同氦子体气溶胶浓度源项。根据图 13 建立测试系统, 多分散氦子体气溶胶通入多孔撞击式采样器, 并将滤膜置于在收集板上, 为防止粒子在滤膜上反弹, 使用 L 型阿皮松脂涂于膜上, 待稳定后用 Grimm11-D(测量粒径  $0.253 \sim 35.150 \mu\text{m}$ ) 测量不同  $C_{in}$  与下游  $C_{out}$  处的氦子体气溶胶浓度, 结果如图 14 所示。

衡量捕集效率曲线特性的指标为几何标准差  $\sigma_g$  和切割器在捕集效率为 50% 时的粒子空气动力学直径  $d_{p50}$ 。  $\sigma_g$  有两种表述方法:  $\sigma_{g1} = d_{p50}/d_{p16}$ ,  $\sigma_{g2} = d_{p84}/d_{p50}$ , 其中  $d_{p16}$  和  $d_{p84}$  为捕集效率 16% 与 84% 时对应的粒子空气动力学直径<sup>[15]</sup>。根据式(10)计算出不同浓度源项条件下的捕集效率曲线, 结果如图 16 所示。

通过拟合得出三类源项的  $d_{p50}$ 、 $\sigma_{g1}$ 、 $\sigma_{g2}$  并对比 CFD 模拟值, 见表 1。改变上游  $C_{in}$  的氦子体气溶胶

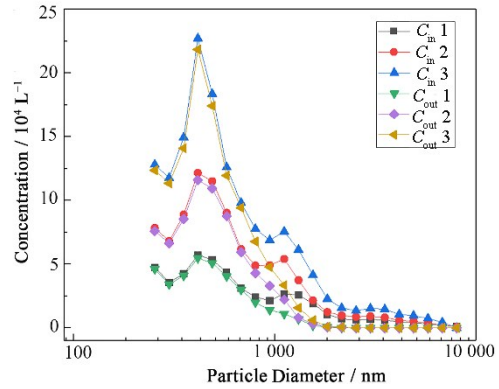


图 14 不同源项多孔撞击式采样器下游  $C_{in}$  氦子体气溶胶浓度

Fig.14 Aerosol concentration of  $C_{in}$  radon daughter upstream of different source items sampler

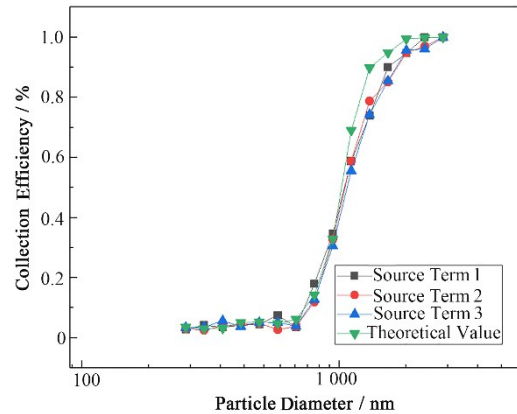


图 15 多孔撞击式采样器 CFD 计算值与实验值比较

Fig.15 Comparison of CFD calculation and experimental values of porous impingement sampler

浓度, 不会影响多孔撞击式采样器的捕集效率曲线。多孔撞击式采样器的切割粒径  $d_{p50} = (1 \pm 0.07) \mu\text{m}$  理论模拟值偏差 6.9%,  $\sigma_{g1} = 1.33$ ,  $\sigma_{g2} = 1.35$ , 与理论模拟值分别偏差 5.8% 与 8%, 从实验验证与理论模拟值对比来看, 多孔撞击式采样器对不同源项皆达到预期效果, 可实现  $1 \mu\text{m}$  粒径分离。

## 4.2 与 ELPI<sup>+</sup>仪器对比

ELPI<sup>+</sup>工作原理基于荷电、低压撞击、电荷测量三个部分。颗粒物被荷电器充上一定水平的电荷, 其后在低压串联的撞击器内依照空气动力学粒径分级收集。串联撞击器间绝缘, 并各自连接灵敏静电计, 测量其收集颗粒物产生的电流值<sup>[15-17]</sup>。每一级

表 4 不同源项与理论模拟值的捕集效率验证指标对比结果

Table 4 Comparison of capture efficiency verification indexes of different source items and theoretical simulation values

验证指标 Validation index	源项 1 Source term 1	源项 2 Source term 2	源项 3 Source term 3	平均值 Average value	理论值 Theoretical value	结果偏差 Result deviation / %
$d_{p50} / \text{nm}$	1 060	1 062	1 085	1 069	1 000	6.9
$d_{p50}/d_{p16}$	1.34	1.32	1.34	1.33	1.26	5.6
$d_{p84}/d_{p50}$	1.36	1.33	1.35	1.35	1.25	8

电流值与颗粒物粒子数成正比。ELPI<sup>+</sup>分为15级,其切割粒径依次为10 μm、6.8 μm、4.4 μm、2.5 μm、1.6 μm、1.0 μm、0.64 μm、0.26 μm、0.170 μm、0.108 μm、0.060 μm、0.030 μm、0.017 μm、0.006 μm。

质量分布是衡量冲击器性能的重要指标,使用滤膜采集ELPI<sup>+</sup>的10~15级,即切割粒径为1 μm以上氦子体气溶胶,与多孔撞击式采样器进行质量对比,分别采样10 min、20 min、30 min后,利用精度为

电子分析天平(精度为0.001 mg)进行称重,考虑到这两种仪器的流量不同,必须对质量归一化。两种采样器归一质量后结果如表2所示,结果发现,采样时间为10 min、20 min和30 min时多孔撞击式采样器与ELPL<sup>+</sup>的偏差皆大于10%,分别为9.3%、8.1%和8.8%,质量分布基本一致。说明多孔撞击式采样器能对1 μm氦子体气溶胶进行有效切割。

表5 不同采样时间多孔撞击式采样器与ELPI<sup>+</sup>质量分布对比结果

Table 5 Comparison of mass distribution between porous impinged sampler and ELPI<sup>+</sup> at different sampling times

采样时间 Sampling time / min	多孔撞击式采样器 Homemade sampler results / g			平均值 Average value / g	ELPI <sup>+</sup> ELPI <sup>+</sup> result / g			平均值 Average value / g	结果偏差 Result deviation / %
10	0.004 3	0.004 0	0.004 6	0.004 3	0.004 1	0.003 8	0.003 9	0.003 9	9.3
20	0.008 7	0.008 5	0.008 3	0.008 5	0.007 6	0.007 9	0.008 1	0.007 9	8.1
30	0.013 4	0.012 2	0.013 8	0.013 1	0.012 4	0.011 8	0.012 0	0.012 1	8.8

## 5 结语

本文针对粒径范围亚微米级氦子体气溶胶粒子,设计了一种放射性气溶胶采样器,结合各类惯性冲击式采样器优缺点,选用多孔撞击式采样器并对其进行研究。首先根据采样器捕集结构原理得到参数之间关系,并通过设计准则及迭代优化确定 $Re$ 、 $Q_m$ 、 $d_{p50}$ 、 $N$ 、 $W$ 等参数值。其次根据上述参数对采样器建模,运用Fluent软件对采样器模拟仿真,分析得 $R$ 在15~55 mm内、 $L$ 在10~50 mm内、 $T$ 在设计准则 $1 \leq T/W \leq 5$ 内时,采集器性能保持稳定且对捕集效率曲线无影响。 $D$ 与 $W$ 的关系 $D/W=1.5\sim 3.5$ 倍、 $S$ 与 $W$ 的关系 $S/W=1$ 时,模拟采集器符合要求,最终在此基础上研制出了一种切割粒径为1 μm的多孔撞击式采样器。对多孔撞击式采样器进行性能测试,采用分流测试法得到其捕集效率曲线,并与模拟值和ELPI<sup>+</sup>仪器进行对比。结果表明:该采样器收集效果良好, $d_{p50}=(1 \pm 0.07) \mu\text{m}$ , $\sigma_{g1}=1.33$ , $\sigma_{g2}=1.35$ ,实现了对1 μm粒径粒子的有效切割,多孔撞击式采样器的实测结果与仿真结果基本吻合。本文重点设计了一种多孔撞击式采样器,通过模拟并与ELPI<sup>+</sup>仪器对比试验验证,实现了对1 μm粒径粒子的有效切割,为后续进一步优化、设计多级采样器并开展对氦子体气溶胶在线粒径分布测量研究提供便利与思路。

**致谢** 衷心感谢陈凌教授和单健教授对本文整体流程及内容所做的贡献支持。

**作者贡献声明** 谭至宇负责研究的提出及设计,数据的收集和整理,文章的起草和最终版本的修订;陈凌负责文章的修订,项目的监督和管理;程卫亚负责

实验过程的讨论,项目的监督和管理;陈亮平、马天赐负责数据的收集。

## 参考文献

- 1 Yu K N, Guan Z J, Cheung T T K. Validity of a single-sampler bronchial dosimeter for radon progeny[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(29): 4935 - 4940. DOI: 10.1016/s1352-2310(99)00283-6.
  - 2 Gründel M, Porstendörfer J. Differences between the activity size distributions of the different natural radionuclide aerosols in outdoor air[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(22): 3723 - 3728. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.01.043.
  - 3 Wasiolek P T, James A C. Unattached fraction measuring technique and radon lung dose[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2000, 51(1): 137 - 151. DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00049-7
  - 4 Tokonami S, Fukutsu K, Yamada Y, et al. Particle size measurement of radon decay products using MOUDI and GSA[J]. International Congress Series, 2005, 1276: 278 - 280. DOI: 10.1016/j.ics.2004.09.049.
  - 5 刘运席,陈旭,杨复沫,等. 新型多级冲击采样器切割粒径的标准粒子实验分析[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006(5): 138 - 141. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-9108. 2006.05.032.
- LIU Yunxi, CHEN Xu, YANG Fumo, et al. Experimental analysis of standard particle cutting size with multistage impact sampler[J]. Technology and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006(5): 138 - 141.



- DOI: [10.3969/j.issn.1673-9108.2006.05.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9108.2006.05.032).
- 6 Skubacz K, Wołoszczuk K. Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the short-lived radon progeny[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, **18**(2): 61 - 66. DOI: [10.1016/j.jsm.2019.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.006).
  - 7 Fleischer R L, Giard W R, Mogro-Campero A, *et al.* Dosimetry of environmental radon: methods and theory for low-dose, integrated measurements[J]. *Health Physics*, 1980, **39**(6): 957 - 962. DOI: [10.1097/00004032-198012000-00009](https://doi.org/10.1097/00004032-198012000-00009).
  - 8 Milani A, Chesley S R, Boattini A, *et al.* Virtual impactors: search and destroy[J]. *Icarus*, 2000, **145**(1): 12 - 24. DOI: [10.1006/icar.1999.6324](https://doi.org/10.1006/icar.1999.6324).
  - 9 Michaud D, Picard P, Baril M. A versatile flat-deposit impactor-type aerosol collector Part 1: design and qualitative study[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1999, **31**(5): 323 - 337. DOI: [10.1080/027868299304057](https://doi.org/10.1080/027868299304057).
  - 10 Marple V A, Liu B Y H, Whitby K T. Fluid mechanics of the laminar flow aerosol impactor[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1974, **5**(1): 1 - 16. DOI: [10.1016/0021-8502\(74\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0021-8502(74)90002-0).
  - 11 汪庆华, 陈旭, 陈玉鑫, 等. 多级冲击采样器截止直径与出口压强的关系 [J]. *真空*, 2000(4): 23 - 26. DOI: [10.13385/j.cnki.vacuum.2000.04.008](https://doi.org/10.13385/j.cnki.vacuum.2000.04.008).  
WANG Qinhu, CHEN Xu, CHEN Yuxin, *et al.* Relationship between cutoff diameter and outlet pressure of multistage impact sampler[J]. *VACUUM*, 2000(4): 23 - 26. DOI: [10.13385/j.cnki.vacuum.2000.04.008](https://doi.org/10.13385/j.cnki.vacuum.2000.04.008).
  - 12 Marple V A, Liu B Y H, Kuhlmeier G A. A uniform deposit impactor[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1981, **12**(4): 333 - 337. DOI: [10.1016/0021-8502\(81\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0021-8502(81)90022-7).
  - 13 Bogodage G. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution[J]. *Powder Technology*, 2015, **286**: 488 - 506. DOI: [10.1016/j.powtec.2015.08.023](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.023).
  - 14 John A C, Kuhlbusch T A J, Fissan H, *et al.* Development of a PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> cascade impactor and in-stack measurements[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, **32**: 967 - 968. DOI: [10.1016/s0021-8502\(21\)00434-1](https://doi.org/10.1016/s0021-8502(21)00434-1).
  - 15 Marjamäki M, Keskinen J, Chen D R, *et al.* Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI) [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2000, **31**(2): 249 - 261. DOI: [10.1016/s0021-8502\(99\)00052-x](https://doi.org/10.1016/s0021-8502(99)00052-x).
  - 16 Skubacz K, Wołoszczuk K. Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the short-lived radon progeny[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, **18**(2): 61 - 66. DOI: [10.1016/j.jsm.2019.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.006).
  - 17 Skubacz K, Wojtecki L, Urban P. The influence of particle size distribution on dose conversion factors for radon progeny in the underground excavations of hard coal mine [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, **162** - **163**: 68 - 79. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2016.05.020](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.020).