

## DGT 装置管道吹扫后的剂量率评估

吴昊坤, 陈凌, 骆志平, 毕远杰, 郭金森

中国原子能科学研究院, 北京 102413

**摘要:** 目的 评估 DGT 装置在运行结束后, 经过清洁吹扫后, 不同条件下管道内粉尘残余量, 并给出剂量率结果, 为 DGT 装置的后续设计提出辐射防护建议。方法 采用 Rock'n'Roll 再悬浮模型评估管道被清洁吹扫的过程, 最后结合粉尘的携带放射性活度, 使用 Microshield 对管道剂量进行估算。结果 氩气吹扫对粉尘的清除率最大, 可去除 30% 左右的粉尘, 但粒径较小的粉尘清除率仍然不佳, 管道粉尘所致的剂量率在操作距离 50 cm 处可达到较低的水平。结论 吹扫可一定程度上清除粘附在管壁的粉尘, 但无法作为清除粘附粉尘的主要手段。

**关键词:** DGT; Rock'n'Roll; 剂量评估; 粉尘

中图分类号: R144.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2020)04-0352-05

## Dose rate assessment for pipeline purge of DGT

WU Haokun, CHEN Ling, LUO Zhiping, BI Yuanjie, GUO Jinsen

China Institute Atomic Energy, Radiation Safety Department, Beijing 102413 China

**Abstract:** **Objective** To evaluate the residual dust in the pipeline under different conditions after the operation of DGT device and after cleaning and purging, to give the result of dose rate, and to propose radiation protection suggestions for the subsequent design of DGT. **Methods** The Rock'n'Roll resuspension model was used to evaluate the process of pipeline cleaning and purging. Finally, the pipeline dose was estimated in combination with the radioactive activity of dust using Microshield. **Results** Argon purge has the highest dust removal rate, which can remove about 30% of the dust. However, the dust removal rate is still not good when the particle size is small, and the dose rate caused by pipeline dust can reach a low level at the operating distance of 50 cm. **Conclusion** Purging can remove the dust adhered to the pipe wall to a certain extent, but it cannot be used as the main method to remove the dust adhered to the pipe wall.

**Key words:** DGT; Rock'n'Roll; Dose Assessment; Dust

颗粒流散裂靶(Dense Granular flow Target, 以下简称 DGT 装置)是中国科学院近代物理研究所提出的一种新型散裂靶, 它结合了液态金属靶和固态旋转靶的优点, 具有良好的冷却换热和稳定性能, 能够承载高功率的束流。DGT 装置的靶材料为钨合金颗粒, 提升机驱动靶颗粒进入漏斗形靶容器, 在重力的作用下靶颗粒流经散裂反应区, 与束流发生反应<sup>[1]</sup>。概念图如图 1 所示。

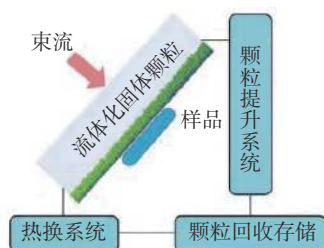


图 1 密集颗粒流靶

在 DGT 装置工作时, 由于颗粒之间的相互摩擦导致产生大量粉尘, 这些粉尘将在装置的管道内悬浮或在内壁上大量粘附<sup>[2]</sup>, 由于长期照射靶颗粒的束流能量很高(束流能量为 1 GeV, 流强为 1 mA), 粉尘来自于靶颗粒, 因而粉尘带有一定的放射性。在运行结束后, 在排空固体颗粒后, 需要通过气体吹扫的方式清洁管道。吹扫操作主要是为了去除管道内悬浮的粉尘和放射性气体, 而管道内壁的粉尘可能也会被吹扫气体带走一部分。而未能被吹扫清除的粉尘, 即粘附在管壁的粉尘将对进场的工作人员造成剂量。因此, 需要通过计算了解经过吹扫后最终残留在管道内的粉尘, 以便详细的考虑管道的剂量, 评价吹扫方案的优劣性, 同时也为后续的管道切割、运输等作业提供参考<sup>[3]</sup>。气流吹扫管道粘附粉尘的过程是粉尘脱离管道壁面再悬浮的过程, 所以本文利用再悬浮模型分

析这一过程。

## 1 材料与方法

**1.1 吹扫方案** DGT 装置拟采用惰性气体对管道进行吹扫, 主要考虑氦气、氮气、氩气三种方案, 吹扫气流速度 20 m/s, 吹扫时间待定。管内粉尘为钨粉尘, 表面势能 4.4 J/m<sup>2</sup>[4], 粒径为 1 μm, 2 μm, 5 μm, 10 μm, 假设粉尘均匀分布在管道内壁。DGT 装置中存在部分变径管道或弯管, 但整体上看主要是直管道, 初步研究中, 工作人员靠近 DGT 装置时, 主要受到来自 DGT 装置中某一段管道的照射, 本文仅考虑一段 3 m 长的直管道, 见表 1。

表 1 粉尘的质量

粒径/μm	1	2	5	10	总计
单位长度管道附着粉尘的质量/g	2.70	6.75	44.625	90.75	144.825

**1.2 Rock'n'Roll 模型** 再悬浮模型中, 目前受到认可较多的是 Rock'n'Roll 模型(图 2)[5]。Rock'n'Roll 是由 Reeks 和 Hall 开发的一种考虑气流特性、粉尘粒子特性、时间多个因素在内的细化模型。他们对于再悬浮过程的描述是, 再悬浮是由粉尘粒子在转轴点 P 附近的振荡引起的, 受气流和物体表面的综合影响粒子绕转轴点 P 振荡, 直到粒子滚动, 而且气流本身对粉尘粒子带有曳力和升力的双重作用。

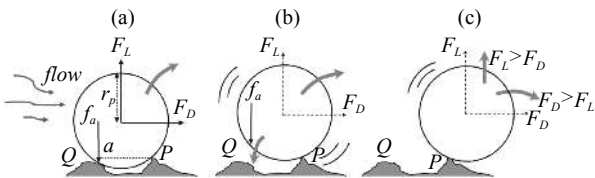


图 2 Rock'n'Roll 模型

根据 Rock'n'Roll 模型的理论, 再悬浮率常数可由下式给出:

当  $f_a - \bar{F} \geq 0.75 \sqrt{\bar{f}^2}$  时:

$$p = n_\theta \exp\left(\frac{-(f_a - \bar{F}^2)}{-2\bar{f}^2}\right) / \left(\frac{1}{2}(1 + \operatorname{erf}(f_a - \bar{F})) / \sqrt{2\bar{f}^2}\right) \quad (1)$$

当  $f_a - \bar{F} < 0.75 \sqrt{\bar{f}^2}$  时:

$$p = n_\theta \quad (2)$$

其中,  $f$  为气体脉动力,

$$f = 0.2\bar{F} \quad (3)$$

$n_\theta$  为粉尘粒子和气流间的共振频率

$$n_\theta = 0.00658 \frac{u^{*2}}{\nu} \quad (4)$$

$F_L$  为气体对粉尘粒子的升力,

$$F_L = 4.2\rho v^2(d_p^+)^{2.31} \quad (5)$$

$F_D$  为气体对粉尘粒子的曳力,  $\nu$  为气体的运动粘度,

$$F_L = 8.01\rho v^2(d_p^+)^2 \quad (6)$$

$d_p^+$  为粉尘粒子的无量纲直径,

$$d_p^+ = \frac{d_p u^*}{\nu} \quad (7)$$

$d_p$  为粉尘粒子的粒径。  $u^*$  为气流的摩擦速度[6], 是湍流切应力做功的度量

$$u^* = u_m \sqrt{f/2} \quad (8)$$

$u_m$  为管道内气流的主流速度,  $f$  为摩擦因子由下式求得

$$f = 0.158\operatorname{Re}^{-0.25} \quad (9)$$

则粉尘粒子所受到的气动力为:

$$F = \frac{1}{2}F_L + \frac{r}{a}F_D = 2.1\rho v^2(d_p^+)^{2.31} + 801\rho v^2(d_p^+)^2 \quad (10)$$

根据 Reeks & Hal 的假设, 物理表面由于粗糙凸起分布不均, 对粉尘粒子的粘附力符合对数正态分布, 即:

$$\varphi(f'_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{f'_a \ln(\sigma'_a)} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(f'_a/\bar{f}_a)}{\ln(\sigma'_a)}\right)^2\right) \quad (11)$$

$f_a$  为表面对粉尘粒子的粘附力, 根据 Biasi 修正的结果[7]:

$$\langle f'_a \rangle = 0.016 - 0.0023r^{0.545} \quad (12)$$

$$\sigma'_a = 1.8 + 0.136r^{1.4} \quad (13)$$

$f'_a$  为无量纲粘附力, 是粗糙壁面对粉尘粒子的真实粘附力与 JKR 粘附模型[8] 光滑壁面对粉尘粒子的理想粘附力的比值。在现实中, 粗糙平面的粘附力通常都小于 JKR 粘附力, 其中:

$$f'_a = f_a / F_{JKR} \quad (14)$$

$$F_{JKR} = \frac{3}{4}\pi\gamma d_p \quad (15)$$

$\gamma$  为粉尘粒子的表面势能, 则某时刻  $t$  时的再悬浮率可得:

$$\lambda(t) = \int_0^\infty df'_a \varphi(f'_a) p(f'_a) \exp(-p(f'_a)t) \quad (16)$$

此时间段  $t$  内, 未悬浮, 即残留率可得:

$$f_R(t) = \int_0^\infty \varphi(f'_a) \exp(-p(f'_a)t) df'_a \quad (17)$$

1.3 粉尘携带的放射性 粉尘的放射性来源于受照的靶颗粒, 评估粉尘所致的外照射剂量还需要了解靶颗粒中残余核素的活度, 并求出比活度。这里采用陈建琪<sup>[9]</sup> 计算的结果, 见下表 2。

表 2 残余核素及活度

残余核素	活度/( $\times 10^6$ Bq/g)	残余核素	活度/( $\times 10^6$ Bq/g)
$^{187}\text{W}$	49.48	$^{176}\text{W}$	8.71
$^{185}\text{W}$	20.14	$^{178}\text{Ta}$	12.07
$^{179}\text{W}$	18.06	$^{177}\text{Ta}$	14.79
$^{178}\text{W}$	9.90	$^{176}\text{Ta}$	12.52
$^{177}\text{W}$	10.04	$^{175}\text{Ta}$	9.45

1.4 剂量率计算 结合残余粉尘的质量和活度, 可由快速剂量计算软件 Microshield 计算管道粉尘的剂量, 该软件能够通过输入几何模型、核素及活度、参考点的位置信息等计算出参考点的剂量。对靠近管道操作的工作人员, 因粉尘的厚度在微米级别, 相对于管道厚度可忽略不计, 所以可将管道粉尘源项视为一个长 3 m 的圆柱面源, 圆柱半径为管道半径, 圆柱面源外包裹 0.5 cm 厚的管道钢材料。

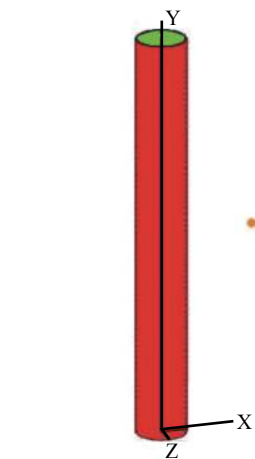


图 3 几何模型

## 2 结果与分析

2.1 粉尘残余率 由 Rock'n'Roll 模型可知, 残余率是关于时间、气流速度、粉尘粒径以及气体粘度、密度等参数的函数。在气流速度一定的情况下, 粒径越大, 吹扫时间越长, 残余率越少。利用 Rock'n'Roll 模型(图 3)计算了不同方案下粉尘的残余率。不同吹扫条件下, 粉尘残余率随时间的变化如下图 4、5、6 所示。

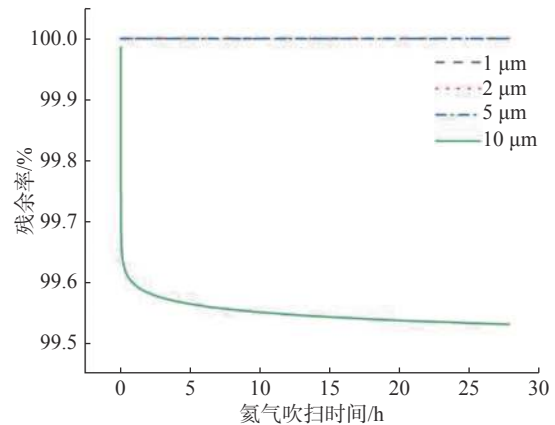


图 4 氦气吹扫后粉尘残余率

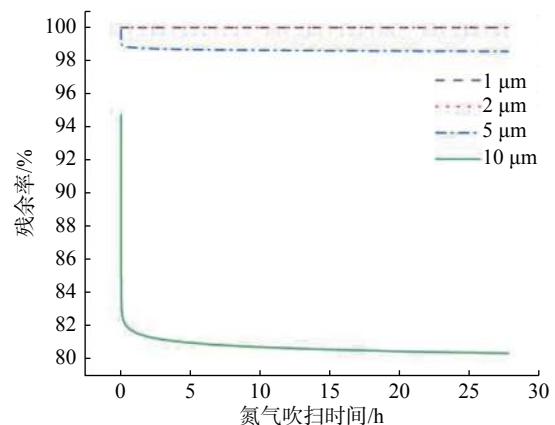


图 5 氦气吹扫后粉尘残余率

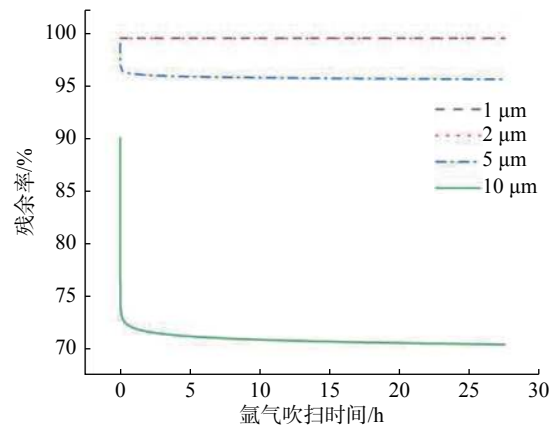


图 6 氦气吹扫后粉尘残余率

结合图 4、图 5、图 6 可以看出, 三种方案中, 使用氦气吹扫后效果相对最好, 氦气几乎没有带走粘附在管壁的粉尘, 这是因为氦气相对于其他气体的密度和粘度都较大所致。但氦气在此流速条件下, 也仅能带走 30% 左右的粒径为 10 μm 的粉尘和极少量的粒径为 5 μm 的粉尘, 而粒径为 1 μm 和 2 μm 的粉尘几乎无法被带走, 这是因为粉尘粒子受到物体表面的粘附力与其受到的气动力的之间的相对差距随着粉尘粒径的减少而增加。从吹扫时间的角度来说, 在吹扫过程初期, 气流就能够带走大部分粉尘, 随着时间的延长, 残余率的变化非常有限。

当考虑使用氩气对管道进行吹扫后,粉尘质量变化见表 3,吹扫  $t$  时间后粉尘的残余质量可由下式计算:

$$M_R = (M_{1\mu m} + M_{2\mu m} + M_{5\mu m} + M_{10\mu m}) \times f_R(t) \quad (18)$$

表 3 氩气吹扫后粉尘质量变化

吹扫时间/h	0	1	5	10	24
残余粉尘质量/g	144.825	108.11	107.04	106.61	106.07

2.2 剂量率 吹扫过程结束后,管道残余粉尘所致剂量率如图 7, 图 8, 图 9。图 7 为因不同吹扫时间而导致的剂量率变化, 图 8 为未经过衰变的初始时刻剂量率随不同操作距离的变化, 图 9 为距管道 50 cm 处剂量率随衰变时间的变化。

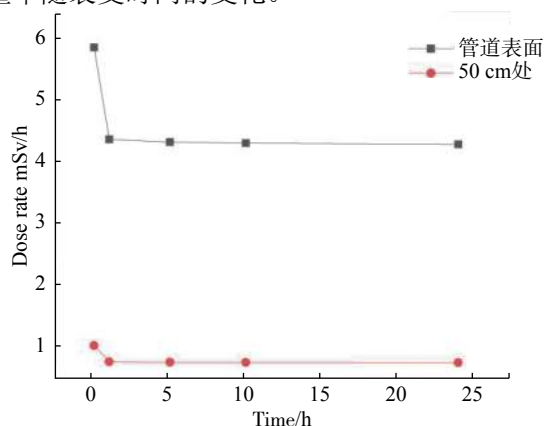


图 7 剂量率随吹扫时间的变化

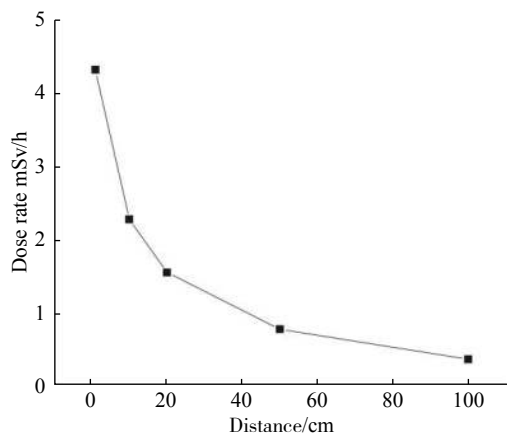


图 8 剂量率随操作距离的变化

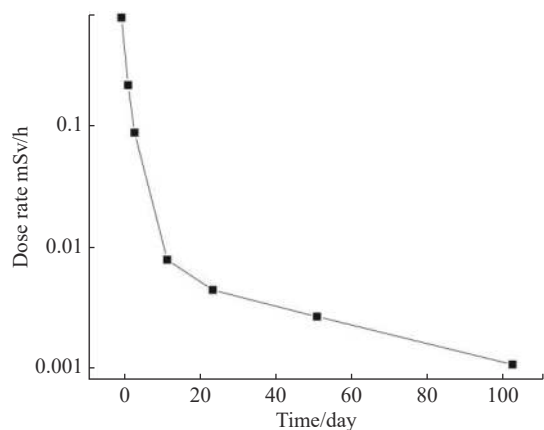


图 9 剂量率随时间的变化

根据表 3 列出的残余粉尘质量,可得到残余粉尘的活度,由此计算得到不同情况下的剂量率。从图 7 可以看出,当使用氩气对管道进行吹扫后,可以带走部分粉尘,所以一定程度上降低了表面剂量率,但剂量率仍在同一数量级之间变化。图 8 说明随操作距离增加,剂量率有一定程度的降低,在现实情况中,工作人员通常距管道 50 cm 处进行操作,初始时刻此处的剂量率为 0.77 mSv/h。从图 9 可知,随着衰变时间的增加,剂量率下降最为明显,从开始到两个月后下降了近三个数量级,可达 1.08  $\mu$ Sv/h,低于触手水平。此外,管道壁本身有一定屏蔽作用。

### 3 讨论

本研究利用再悬浮模型,计算得到了粉尘的残余率,并结合粉尘携带的放射性,对经过吹扫后的管道中粉尘所致的剂量率进行了评估。初步结果来看,吹扫方案中,氩气吹扫有一定效果,但粒径较小的粉尘清除率较差,且不能作为降低管道剂量率的主要手段,吹扫时间的确定以管道内悬浮粉尘的浓度为参考依据。当经过氩气吹扫后,在 50 cm 操作距离处,管道剂量率可达到较低水平,且剂量率水平随时间增加可明显降低。所以衰变时间是降低工作人员受照的最主要因素。为了减少工作人员的受照,可尽量延迟进场。但在实际操作时,如遇到某些紧急情况,无法增加等待时间,可考虑使用远程刷擦操作清除管壁残余的粉尘<sup>[10]</sup>。

颗粒流散裂靶的粉尘问题是目前该装置设计中辐射防护方面必须考虑的问题,除了考虑对该装置进行吹扫清洁处理外,还应研究粉尘本身的性质问题,如管道和粉尘在束流照射的过程中,是否会发生一些形态的变化,这些都可能影响到粉尘清洁的工艺,未来应更深入的进行这一方面的研究。另外,出于辐射防护的角度考虑,对于流动可更换的靶型,为了防止粉尘在场内的释放和扩散,还应制定操作和维修、检修的程序,换靶程序,事故情况下应急程序,靶颗粒储存和放射性废物处置措施,辐射监测计划,进行安全设备定期检查计划等<sup>[11]</sup>。

### 参考文献

- [1] 詹文龙, 杨磊, 闫雪松, 等. 加速器驱动先进核能系统及其研究进展[J]. 原子能科学技术, 2019, 53 (10): 1809-1815.
- [2] 麻礼东. 密集颗粒流靶中几个关键科学问题的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.



- [3] 刁垒, 赵宇航. 某核设施安全关闭的辐射防护实践[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 ( 5 ) : 538-542.
- [4] Rondeau A, Peillon S, Roynette A, et al. Characterization of dust particles produced in an all-tungsten wall tokamak and potentially mobilized by airflow[J]. *J Nucl Mater*, 2015, 463: 873-876.
- [5] Reeks M W, Hall D. Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: theory and measurement[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32 ( 1 ) : 1-31.
- [6] Frank, M. W., 1999. Fluid Mechanics, fourth ed. WCB/McGraw-Hill, New York, USA.
- [7] Biasi L, de los Reyes A, Reeks M W, et al. Use of a simple model for the interpretation of experimental data on particle resuspension in turbulent flows[J]. *J Aerosol Sci*, 2001, 32 ( 10 ) : 1175-1200.
- [8] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. *Proc R Soc Lond A*, 1971, 324 ( 1558 ) : 301-313.
- [9] 陈建琪, 张雅玲, 张勋超, 等. 应用蒙特卡罗方法对比研究ADS颗粒靶和块状靶(英文)[J]. *原子核物理评论*, 2016, 33 ( 3 ) : 330-335.
- [10] Ueno K, Aburadani A, Saito M, et al. Dust removal experiments for ITER blanket remote handling system[J]. *Plasma Fusion Res*, 2014, 9: 1405012.
- [11] 张伟军. 辐射防护系统设计应注意的几个方面[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25 ( 3 ) : 306-307.
- 收稿日期: 2020-02-19 责任编辑: 李海亮

(上接第 351 页)

射诊疗设备的配置现状以及医疗照射频度水平, 为今后放射诊疗发展提供参考, 为进一步开展放射卫生工作打下基础。

#### 参考文献

- [1] 郑钧正. 放射诊疗的蓬勃发展亟需强化医疗照射防护[J]. *医学研究杂志*, 2012, 41 ( 10 ) : 2-4.
- [2] 梁婧, 张庆召, 朱卫国. 2016年我国诊断频度调查的组织和实施[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2019, 39 ( 5 ) : 321-324.
- [3] 郑钧正. 国际基本安全标准关于医疗照射防护的新要求[J]. *辐射防护*, 1996, 16 ( 6 ) : 401-413.
- [4] 衡水市统计局. 衡水市统计年鉴(2016)[R]. 2017.
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 report. Sources and effects of ionizing radiation[R]. New York: United Nations, 2010.
- [6] 国家卫生计生委. 2017中国卫生和计划生育统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2017.
- [7] 高峰, 郭常义, 郑钧正, 等. 上海市“十一五”期间医疗照射水平调查[J]. *环境与职业医学*, 2009, 26 ( 6 ) : 528-531.
- [8] 张京战, 沈爱国, 高艳辉, 等. 河北省医疗照射应用频度调查[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2019, 39 ( 5 ) : 331-337.
- [9] 马恩红, 方玉梅, 王春波, 等. 滦南县2016年度放射诊疗频度调查与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 ( 3 ) : 257-261.
- [10] 郝欣欣. 天津市放射诊疗设备配置现状与对策[J]. *中国公共卫生管理*, 2016, 32(6): 911-912.
- [11] 高峰, 郭常义, 沈耀芳, 等. 上海市放射诊疗设备资源调查和分析[J]. *中国辐射卫生*, 2007, 16 ( 3 ) : 321-322.
- [12] Hayton A, Wallace A, Marks P, et al. Australian per caput dose from diagnostic imaging and nuclear medicine[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2013, 156 ( 4 ) : 445-450.
- [13] 刘春旭, 牛振, 张继勉, 等. 天津市十家医院诊断医疗照射频度调查结果分析[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2018, 36 ( 11 ) : 830-833.
- [14] 沈爱国, 孙国安, 芦振吉, 等. 河北省放射治疗医疗照射水平调查[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2000, 20 ( S1 ) : s109-s110.
- [15] 尹俊清, 史立波, 齐林, 等. 河北省临床核医学医疗照射水平调查[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2000, 20 ( S1 ) : s96.
- 收稿日期: 2020-02-16 责任编辑: 赵婉兵