

# 基于排放总量控制的核医学衰变池容量及 最小暂存时间计算

张琪<sup>1</sup> 葛云文<sup>2</sup>

1 (生态环境部辐射源安全监管司 北京 100006)

2 (华械集团有限公司 嘉兴 314000)

**摘要** 近年来,在核医学科建设加速发展过程中,含碘-131 放射性废水暂存时间、衰变池建设等成为医院、环评机构、生态环境监管部门等十分关心的问题。《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871)、《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188)、《关于核医学标准相关条款咨询问题的回函》规定了衰变池中放射性废水(主要核素为碘-131)的合规排放方式。本文通过理论推导,给出了在满负荷情况下、衰变池存满时碘-131 活度的理论计算公式;证明了含碘-131 放射性废水三种合规的排放方式中,按 GB 18871 规定的排放方式排放对医院核医学科运营最为有利;提出了 RJ 方程组,解决了含碘-131 放射性废水最小暂存时间和衰变池容量应如何确定的问题。4 家医院的实际监测数据结果表明,含碘-131 放射性废水暂存时间达到 RJ 方程组计算出的最小暂存时间后,总的碘-131 排放量符合国家生态环境标准要求。以上可对医院核医学科衰变池建设、废水排放管理以及监管部门的监督检查提供明确、具体的指导。

**关键词** 医院、衰变池、放射性废水、碘-131

中图分类号 TL77

DOI:

## Calculation of decay tank capacity and minimum storage time for the wastewater of nuclear medicine department based on the total emission control

Zhang Qi<sup>1</sup> Ge Yunwen<sup>2</sup>

*1(Department of Radiation Source Safety Regulation, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100006, China)*

*2(Huaxie Group Limited Company, Jiaxing 314000, China)*

**Abstract** In the process of accelerated development of nuclear medicine department in recent years, the construction of decay tanks and the storage time of radioactive wastewater containing I-131 have become issues of great concern for environmental regulatory agencies and hospitals. "Basic Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources" (GB 18871), "Radiation Protection and Safety Requirements for Nuclear Medicine" (HJ 1188), and "Reply to Consultation on Several Clauses of the Nuclear Medicine Standard" have stipulated the compliant discharge methods for radioactive wastewater containing I-131 from hospitals. This paper presents a theoretical calculation formula for the total activity of iodine-131 when a delay tank in a hospital is full. It demonstrates that among the three compliant disperse methods for radioactive wastewater containing

第一作者: 张琪, 男, 1992 年出生, 2018 年毕业于清华大学获硕士学位, 生态环境部辐射源安全监管司二级主任科员, 研究领域为放射性同位素和射线装置监管

通讯作者: 张琪, E-mail: tsinghuazhangqi@163.com

收稿日期: 20XX-00-00, 修回日期: 20XX-00-00

iodine-131 in the decay tank, the method specified in GB 18871 is advantageous for the operation of the nuclear medicine department in the hospital. The paper also introduces the RJ equation group, which addresses the calculation of minimum decay time and volume of the decay tank. The actual measured data from four hospitals demonstrates that when the temporary storage period for radioactive wastewater containing iodine-131 reaches the minimum time calculated by the RJ equations, the total discharge activity of iodine-131 complies with the national environmental protection standards. These findings provide clear and specific guidance for the construction of decay tanks in nuclear medicine departments and for the supervision and inspection conducted by regulatory authorities.

**Key words** Hospital, Decay tank, Radioactive Wastewater, Iodine-131

## 引言

近年来,我国甲状腺癌发病率呈现逐年上升趋势<sup>[1]</sup>。碘-131核素治疗因耐受性良好、操作方便、安全有效等优点,自上世纪中叶以来广泛用于甲亢和部分类型甲癌治疗<sup>[2][3]</sup>,21世纪初时约占到核医学科总治疗数的90%<sup>[4]</sup>。在接受碘-131治疗后的病人管理上,不同国家要求并不一致<sup>[5]</sup>。美国在20世纪末起不要求病人住院<sup>[6]</sup>,病人排泄物直接进入市政管道。中国和欧洲大多数国家则按照国际原子能机构等推荐,病人需住院直至体内碘-131水平达到出院标准<sup>[7][8]</sup>,住院期间随病人尿液等排泄物流出的碘-131需进入衰变池暂存至解控。

2021年,我国发布《医用同位素中长期发展规划(2021-2035)》<sup>[9]</sup>,提出到2035年,全国范围内将实现核医学“一县一科”。规划发布后,核医学科建设明显加速,很多新建核医学科计划开设碘-131治疗病房,治疗病区产生的放射性废水需在衰变池中暂存衰变后排放。当前,核医学科住院病人主要接受碘-131核素治疗,衰变池设计时主要考虑碘-131核素。2021年前,衰变池容量普遍按暂存80天(碘-131半衰期的10倍)后排放进行设计<sup>[10][11]</sup>;《核医学辐射防护与安全要求》(HJ 1188)<sup>[12]</sup>发布后,衰变池容量转按暂存180天设计,所需的容量大大提高,建设成本、用地需求随之上升,衰变池成为核医学科建设的制约因素之一。

2023年9月,生态环境部辐射源安全监管司发布《关于核医学标准相关条款咨询问题的复函》(辐射函(2023)20号)<sup>[13]</sup>,明确槽式衰变池中含碘-131放射性废水可以按照以下任何一种方式排放:

(一)根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》<sup>[14]</sup>第8.6.2条规定,经监管部门确认单次排入普通下水道的废水中碘-131活度不超过 $1ALI_{min}$ ( $9E+5$ 贝可),每月排放的废水中碘-131总活度不超过 $10ALI_{min}$ ( $9E+6$ 贝可)。

(二)暂存180天后,衰变池废水可以直接排放。

(三)暂存不满180天但监测结果表明碘-131活度浓度已降至不高于10贝可/升水平,也可直接排放。

以上三种方式中,建设单位、环评单位、生态环境主管部门等关注三个问题:一是医院应选择哪种方式排放?二是根据选择的排放方式,如何确定衰变池容量?三是为满足国家环境保护要求,衰变池内废水的最小暂存时间是多少?本文通过理论分析,推导出衰变池存满时池内碘-131总活度的理论公式,证明按GB 18871第8.6.2节规定的方式进行排放最有利于医院运营,并给出了最小暂存时间及衰变池容量的计算方法。

## 1 衰变池中碘-131活度及最小衰变时间

### 1.1 碘-131总活度

病人摄入的碘-131主要在前三天排出<sup>[15]</sup>。假设住院周期为3天,每个病人平均给药量为 $A$ ,病床数为 $N$ ,且医院无间隔连续运行、病床持续处于占满状态。以 $P_1, P_2, P_3$ 分别代表病人第一、二、三天随尿液等排出体外的碘-131活度与给药量之比, $\lambda$ 表示碘-131衰变常数。设运行 $T$ 天后,衰变池存满。病人第一天的排放,对衰变池存满时池中碘-131活度的贡献 $D_1$ 为:

$$D_1 = \sum_{j=1}^n P_1 NA \exp\{-\lambda[T - (3j - 2)]\} = \frac{P_1 e^{\lambda}}{e^{3\lambda} - 1} NA(1 - e^{-\lambda T})$$

在上式中,  $n=T/3$ , 代表在衰变池由空至满期间共经历了多少个住院周期。如衰变池运行 60 天存满, 则  $n$  的取值为 20。为计算方便, 首先假定  $T=3n$ ,  $n$  为整数。

用同样方法可以分析出, 病人第 2 天、第 3 天的排放对衰变池中碘-131 的活度贡献  $D_2$ 、 $D_3$  分别为:

$$D_2 = \sum_{j=1}^n P_2 NA \exp\{-\lambda[T - (3j - 1)]\} = \frac{P_2 e^{2\lambda}}{e^{3\lambda} - 1} NA(1 - e^{-\lambda T})$$

$$D_3 = \sum_{j=1}^n P_3 NA \exp\{-\lambda[T - 3j]\} = \frac{P_3 e^{3\lambda}}{e^{3\lambda} - 1} NA(1 - e^{-\lambda T})$$

碘-131 在细胞内的留存比例大小与细胞代谢活动有关<sup>[2]</sup>。通常情况下, 假定 30%的碘-131 留存体内, 70%随尿液排出<sup>[16][17]</sup>, 但进行辐射防护计算时应保守取值, 参考 ICRP 第 94 号报告,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  分别取为 55%、22%、6%<sup>[15][18]</sup>。碘-131 衰变常数为 0.0864/d。根据以上参数, 得到

$$D_1 = 2.02NA(1 - e^{-\lambda T})$$

$$D_2 = 0.88NA(1 - e^{-\lambda T})$$

$$D_3 = 0.26NA(1 - e^{-\lambda T})$$

衰变池存满时池内碘-131 理论活度  $D$  的计算公式为:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = kNA(1 - e^{-\lambda T}) = 3.16NA(1 - e^{-\lambda T})$$

$k$  值与住院周期、衰变池存满天数有关。在住院周期为 3、衰变池存满天数  $T = 3n$  的情况下,  $k$  值为 3.16。在绝大多数情况下,  $T \geq 30$  天,  $1 - \exp(-\lambda T)$  可近似视作 1, 碘-131 理论计算活度可近似为  $kNA$ 。

若衰变池存满时间  $T=3n+1$ , 衰变池中碘-131 总的活度可以认为是以下两部分之和:

- (一) 天数为  $3n$  时碘-131 活度衰变一天后的剩余活度;
- (二) 病人给药当天排出体外的碘-131 活度。

由此得到,  $T=3n+1$  时, 池内碘-131 总活度为

$$D = 3.16NA \times \exp(-0.864) + P_1 NA = 3.55NA$$

即  $T=3n+1$  时,  $k$  值为 3.55。表 1 给出了在不同住院周期、衰变池不同存满天数下  $k$  的取值。病人第 4、5 天的排放之和约占给药量的 85%。在计算住院周期为  $4n$  时  $k$  的值时, 保守认为病人第 4 天排放占给药量的 2%。

表 1 不同住院周期、不同存满天数下  $k$  值

Table 1 the corresponding  $k$  value for different hospitalization periods and different days to reach full coverage in the decay tank

住院周期 Hospitalization period/day	存满天数 Different days to reach full coverage/day	$k$ 值 $k$ value
1	$n$	6.63
2	$2n$	3.55
2	$2n+1$	3.81
3	$3n$	3.16
3	$3n+1$	3.45
3	$3n+2$	3.38

4	$4n$	2.35
4	$4n+1$	2.71
4	$4n+2$	2.70
4	$4n+3$	2.50

## 1.2 理论最小衰变天数（考虑年度限值）

按照 GB 18871 第 8.6.2 节的规定，全年碘-131 排放总量上限  $E$  为：

$$E = 10 \times 12 \times ALI_{\min} = 120 ALI_{\min}$$

根据 GB 18871 附录 B1.3.4 和 1.3.5 节， $ALI_{\min}$  的计算公式为：

$$ALI_{\min} = \frac{DL}{e_j}$$

其中， $DL$  为相应的有效剂量的年剂量限值，应取 20mSv。 $e_j$  为某种放射性核素  $j$  的单位摄入量所致的待积有效剂量的相应值。根据 GB 18871 表 B3，对于碘-131， $e_j$  应取  $2.2 \times 10^{-8} \text{Sv/Bq}$ 。代入计算得到，碘-131 核素的  $ALI_{\min}$  为  $9 \times 10^5 \text{Bq}$ 。相应推算出，排放总量上限为  $1.08 \times 10^8 \text{Bq}$  (3mCi)。

根据 1.1 推导结果，一年中，衰变池中碘-131 年累计总活度  $A_t$  可表示为：

$$A_t = \left( \left[ \frac{365W_1}{V} \right] + 1 \right) kNA$$

上式中， $W_1$  代表单日排入衰变池的废水量， $[\ ]$  代表向下取整， $V$  代表单个衰变池的容量。年末时，衰变池一般不会恰巧存满，在不满足状态下衰变池中碘-131 活度实际上小于  $kNA$ 。根据辐射防护计算的保守原则，将衰变池一年中的存满次数表示为  $\left[ \frac{365W_1}{V} \right] + 1$ 、碘-131 年累计总活度定为  $\left( \left[ \frac{365W_1}{V} \right] + 1 \right) kNA$ 。

最少暂存衰变时间  $T_{\min}$  应满足：

$$A_t e^{-\lambda T_{\min}} = E$$

$$T_{\min} = \frac{\ln(A_t/E)}{\lambda} \quad (1)$$

假设衰变池个数为  $M$ ，则衰变池容量  $V$  应满足

$$V \geq \frac{W_1 T_{\min}}{M-1} \quad (2)$$

$T_{\min}$  中的表达式中含有  $V$ ，②式取等号时，解出的  $V$  即为衰变池的最小容量。称公式①②为考虑年排放限值的情况下，确定衰变池容量和最小暂存时间的 RJ 方程组。

对于现有的核医学科， $W_1$ 、 $V$  均为定值，故  $\left( \left[ \frac{365W_1}{V} \right] + 1 \right) kNA$  也是定值。根据 RJ 方程组式①，可以计算出为满足监管要求，衰变池中放射性废水暂存衰变时间。对于拟建核医学科，利用 RJ 方程组，可以计算出为满足年排放限值要求所需的衰变池容量及最小暂存时间。

## 1.3 理论最小衰变天数（考虑月度限值）

根据 GB 18871 第 8.6.2 节，每月碘-131 排放量不得超过  $10 ALI_{\min}$  (0.25mCi)，用  $E_m$  表示每月排放量，含碘-131 废水最小暂存时间应满足

$$D e^{-\lambda T_{\min}} = E_m$$

$$T_{\min} = \ln\left(\frac{D/E_m}{\lambda}\right) \quad (3)$$

衰变池容量  $V$  应满足

$$V \geq \frac{W_1 T_{\min}}{M-1} \quad (4)$$

同时考虑到年度排放总量限值，衰变池容量  $V$  还需满足

$$V \geq \frac{365W_1}{12} \quad (5)$$

称公式④⑤⑥为考虑月排放限值的情况下，确定衰变池容量和最小暂存时间的 RJ 方程组。在放射性同位素辐射安全管理中，年排放总量限值比月排放总量更具普遍性，本文其余部分主要基于年排放总量限值进行计算和分析。

#### 1.4 按 GB 18871 排放最优

除按照 GB 18871 第 8.6.2 节规定的方式排放放射性废水外。衰变池中碘-131 活度浓度降至 10Bq/L 时，放射性废水也可进行排放。按 10Bq/L 计算，如排放量达到 1.08E+8 贝可（3mCi），则废水量为：

$$\frac{3mCi}{10Bq/L} = 1.11 \times 10^7 L = 1.11 \times 10^4 m^3$$

医院碘-131 治疗病房年废水产生量远低于  $1.11 \times 10^4 m^3$ ，故按 GB 18871 排放优于碘-131 活度浓度衰变至 10Bq/L 后再进行排放。

如医院选择暂存 180 天后才排放，假定排出的废水中碘-131 总活度为 1.08E+8 贝可（3mCi），则可推导出，衰变池中碘-131 年累计总活度为：

$$3mCi \times \exp(0.0864 \times 180) \approx 1.70 \times 10^4 Ci$$

单个医院核医学科年碘-131 用量远低于  $1.70 \times 10^4 Ci$ 。考虑到衰变因素，衰变池存满时碘-131 累计总活度  $A_t$  更低于  $1.70 \times 10^4 Ci$ 。因此，按 GB 18871 排放优于暂存 180 后再排放。

举例说明，如果病人数为 10，每个病人平均单次给药量为 200mCi，住院周期为 3 天，衰变池容量为 20 立方米，每个病人平均每日用水量 0.08 立方米，根据 RJ 公式可计算出：

（一）最小暂存时间  $T_{min} = 120$  天（小于第二种排放方式要求的 180 天）；

（二）排放时碘-131 活度浓度为 370Bq/L（大于第三种排放方式要求的 10Bq/L）。

通过以上分析可以得出，选择 GB 18871 规定的排放方式最有利于医院运行；故站在医院角度考虑，在确定衰变池容量时应按照 1.1 和 1.2、1.3 部分提出的 RJ 方程组确定。

## 2 实际测量结果

选取 4 家医院，按照《水、牛奶、植物、动物甲状腺中碘-131 的分析方法》（HJ841-2017）对衰变池存满时碘-131 活度浓度进行了实际监测，结果如表 2 所示。从表 2 可看出，

（一）衰变池存满时池内碘-131 实际活度低于理论计算值。

（二）在医院满负荷运转（如编号为 3 的医院）情况下，实际测量值与理论计算值比较接近。

（三）按照 RJ 方程组给出的衰变时间进行验证计算后，4 家医院年碘-131 排放量均低于限值。

**表 2：衰变池出口碘-131 活度浓度及预估的碘-131 排放量**

**Table 2: Measured Iodine-131 Activity Concentration at the Outlet of Decay Pool and Estimated Iodine-131 Emission Quantity**

医院编号 Hospital ID	1	2	3	4
甲癌床位数 Number of Beds for Thyroid Cancer	20	24	14	10
衰变池总容量/m <sup>3</sup> Total Decay Tank Capacity (m <sup>3</sup> )	780.2	110.7	80	115
单池容量/m <sup>3</sup> Individual Tank Capacity(m <sup>3</sup> )	195.05	36.9	20	37.5
实际收集容量/m <sup>3</sup> Actual Volume of decay tank(m <sup>3</sup> )	195.05	32.4	20	37.5

存满天数/d	37	23	31	44
Days Until Decay Tank is Full				
单张病床单日用水量( $W_0$ )/L	263.6	58.7	46.1	85.2
Daily Water Usage per Bed				
碘-131 实测活度浓度 (Bq/L)	4.87E+05	9.01E+04	1.20E+07	4.08E+05
Measured Activity Concentration of Iodine-131 (Bq/L)				
衰变池内碘-131 实测总活度/Ci	2.57	0.08	6.49	0.41
Total Measured Activity of Iodine-131 in Decay Tank (Ci)				
碘-131 理论总活度/Ci	9.39	11.27	6.57	4.70
Theoretical Total Activity of Iodine-131 in Curies (Ci)				
RJ 方程组计算出的理论最小暂存时间 ( $T_{min}$ )/天	119.9	126.7	117.9	110.7
Theoretical Minimum Temporary Storage Time ( $T_{min}$ ) Calculated by RJ Equations (in days)				
实测总活度是否低于 RJ 方程组计算出的总活度	是	是	是	是
Whether the Measured Total Activity is Lower than the Total Activity Calculated by RJ Equations				
暂存 $T_{min}$ 后碘-131 预估排放总量 (mCi)	0.81	0.02	2.93	0.26
Estimated Total Discharge of Iodine-131 when Temporary Storage Time attains $T_{min}$ (mCi)				
是否符合 GB 18871 要求 (小于 3mCi)	是	是	是	是
Whether is Compliance with GB 18871 Requirements (Less than 3mCi)				

在上表中, 单张病床单日用水量根据衰变池容量/存满天数求得; 碘-131 实测总活度通过活度浓度乘以衰变池体积得到; 暂存  $T_{min}$  后碘-131 预估排放总量的计算方法为: 实测总活度  $\times \exp(-0.0864 \times T_{min}) \times (365/\text{存满天数})$ 。

### 3 分析与讨论

根据以上分析和计算, 可以得到以下结论:

(一) 根据衰变池存满时池内碘-131 理论活度公式, 池内碘-131 总活度与病人数量、单个病人给药量成正比; 衰变池运行 50 天以上, 池内碘-131 总活度基本不再变化。另外, 理论活度是在医院满负荷运行、上一波病人与下一波病人接续、不存在任何间隔的情况下计算出的, 且在假定病人平均给药量、排出比例时均为保守取值<sup>[18]</sup>, 故该理论活度公式计算结果实际是池内碘-131 活度上限。

(二) 日排入衰变池的放射性废水量  $W_1$  扩大 2 倍, 衰变池容量  $V$  同步扩大 2 倍后, 一年内衰变池中碘-131 累计总活度  $A_t$ 、最小衰变时间  $T_{min}$  不变, 此时公式②中等号仍然成立。故在其他条件不变的情况下, 利用 RJ 方程组计算得到的需建设的衰变池容量  $V$  与  $W_1$  呈正比关系。

(三) 根据(二)中结论,  $V$  与  $W_1$  呈正比关系, 故  $W_1/V$  的值一定, 一年内衰变池中碘-131 累计总活度  $A_t$  与病人数量  $N$  呈正比关系; 根据公式①可得出, 放射性废水最小暂存时间  $T_{min}$  与  $\ln(N)$  呈正比关系。

(四) 假定单个病人用水量  $W_0$  一定, 则单日排入衰变池中的废水量  $W_1$  与病人数量  $N$  呈正比关系,  $T_{min}$  又与病人数量  $N$  呈对数关系, 故需建设的衰变池容量  $V$  与  $N \ln(N)$  近似呈正比关系。

当前, 环境影响评价文件及实际建设中, 环评编制单位、建设方普遍按照废水暂存 180 天的规定, 用下式计算衰变池容量:

$$V = \frac{W_1 \times 180}{M - 1}$$

不同医院、不同季节单张病床用水量差别非常大，表 3 给出了 8 家医院单日单张病床用水量的实际测量数据。根据实际测量结果，假定单日排入衰变池的放射性废水量  $W_0$  为  $0.11\text{m}^3/\text{床}$ ，衰变池数量为 3。甲癌病人给药量一般不超过  $150\text{mCi}$ ，从辐射防护保守角度考虑，假定单个病人给药量为  $200\text{mCi}$ ，表 4 给出了在上述假定下，利用 RJ 方程组计算出的衰变池容量及现有文献给出的方法计算出的衰变池容量。从中可以看出，利用 RJ 方程组计算出的衰变池容量显著小于现行方法。

表 3: 单张病床日用水量

Table 3: Daily Water Consumption Per Hospital Bed

医院编号 Hospital ID	1	2	3	4	5	6	7	8
衰变池容量/ $\text{m}^3$ Individual Tank Capacity( $\text{m}^3$ )	195.05	32.4	20	37.5	26	33	42.7	35
存满时间/d Days Until Decay Tank is Full(d)	37	23	31	44	91	61	83	82
单日单张病床 用水量/L Daily Water Consumption Per Hospital Bed(L)	263.58	58.70	46.08	85.23	35.71	180.33	128.61	53.35
平均值/L Average Value(L)	106.45							

表 4 几种典型情况下 RJ 方程组计算得到的衰变池容量（假定存满时间  $T=3n$ ）Table 2 the calculated volume of decay tank using RJ equation group( $T=3n$ )

病人数 Number of Patients	住院周期（天） hospitalization period/day	RJ 公式计算出的最 小暂存时间/天 $T_{\min}/\text{d}$	衰变池容量（RJ 方	衰变池容量（现行	RJ 方程组较传统方 法可节省的衰变池 容量 The difference of the two methods
			程组）/立方米 Volume of Needed Decay Tank ( Using RJ Equation Group )/ $\text{m}^3$	方法）/立方米 Volume of Needed Decay Tank ( Current Method)/ $\text{m}^3$	
5	3	104.62	28.68	49.50	42.06%
6	3	105.18	34.71	59.40	41.57%
7	3	106.97	41.18	69.30	40.58%
8	3	108.51	47.74	79.20	39.72%
10	3	111.10	61.10	99.00	38.28%
15	3	115.79	95.53	148.50	35.67%
20	3	119.12	131.03	198.00	33.82%

#### 4 结语

本文给出了衰变池存满时池内碘-131 理论活度公式，证明了按照 GB 18871 第 8.6.2 节规定的方式进行排放最有利于医院运营；提出了确定衰变池容量及废水最小暂存时间的 RJ 方程组。利用 RJ 方程组得出的衰变池容量显著小于当前按暂存 180 天计算得到的结果，可显著减少核医学科建设用地需求，降低建设门槛，节约投资，利于核医学科合规健康有序发展。

对于生态环境部门，确定病人数、住院周期、平均给药量、单日排入衰变池废水量、衰变池容量等因

素后, 可以根据 RJ 方程组确定出所需的衰变池量, 作为审批环境影响评价文件时拟建衰变池容量是否满足要求的依据; 也可计算出最小暂存时间。鉴于 RJ 方程组得到的理论活度是衰变池内碘-131 实际总活度的上限, 实际总活度往往显著低于 RJ 方程组计算值。故如放射性废水暂存时间大于计算出的最小暂存时间, 则无需监测数据也可从理论上证明, 该排放满足监管要求。4 家医院的实际监测结果也显示, 暂存时间达到 RJ 方程组理论推导出的最小暂存时间后, 总的碘-131 排放量符合 GB18871 排放要求。

**致谢** 感谢有关省级辐射站提供的监测数据支持。

**作者贡献声明** 张琪主要负责论文撰写、理论公式推导等工作; 葛云文主要负责编程、数值计算工作以及医院核医学科单日用水量等的调研工作。

### 参考文献

- 1 董芬, 张彪, 单广良. 中国甲状腺癌的流行现状和影响因素[J]. 中国癌症杂志, 2016, 26(1): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3969.2016.01.008.
- 2 Wyszmirska A. Iodine-131 for therapy of thyroid diseases. Physical and biological basis[J]. Nucl Med Rev Cent East Eur, 2012, 15(2): 120-123.
- 3 Sacks W, Waxman A D. Radioactive Iodine Therapy[J]. Springer US, 2012. DOI:10.1007/978-1-4614-0875-8\_13.
- 4 United N. 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes[J]. Sources, 2001.
- 5 Barquero R, Basurto F, Nunez C, et al. Liquid discharges from patients undergoing 131I treatments[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(10):1530-1534. DOI:10.1016/j.jenvrad.2007.12.010.
- 6 US Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 8.39, Release of Patients Administered Radioactive Materials. US Government Printing Office, Washington, DC, 1997.
- 7 International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. In: ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford, 1991.
- 8 Osborn S B. Radiological protection for medical exposure to ionizing radiation safety guide. Safety Standards Series No RS-G-1.5. IAEA, pp. 76, 2002 (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria), ISBN 92-0-111-302-1 The British Journal of Radiology [J].
- 9 国家原子能机构, 科技部, 生态环境部等八部委. 医用同位素中长期发展规划 (2021-2035)[EB/OL]. 北京, 2021.
- 10 邓飞, 周睿东, 蒋岚, 等. 核医学含碘废水排放管理的一些问题[J]. 辐射防护, 2018, 38(3): 6. DOI: CNKI:SUN:FSFH.0.2018-03-015.
- 11 卫生部. 医用放射性废物管理卫生防护标准: GBZ 133—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- 12 生态环境部. 核医学辐射安全与防护要求: HJ 1188—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- 13 生态环境部辐射源安全监管司. 关于核医学标准相关条款咨询问题的复函 (辐射函 (2023) 20 号)[EB/OL]. 北京, 2023.
- 14 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- 15 Driver I, Packer S. Radioactive waste discharge quantities for patients undergoing radioactive iodine therapy for thyroid carcinoma.[J]. Nuclear Medicine Communications, 2001, 22(10):1129. DOI:10.1097/00006231-200110000-00012.
- 16 Ward W F. Basic principles of radiation biology[J]. Henkin RE, Bova D, Dillehay GL et al. Nuclear Medicine. MOSBY ELSEVIER, Philadelphia, 2006: 507-522.
- 17 SEM C. Radioiodine therapy of the thyroid[J]. Nuclear Medicine in Clinical Diagnosis and Treatment, 1994: 833-845.
- 18 R,W,Barber.ICRP Publication 94: Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. International Commission on Radiological Protection[J]. British Journal of Radiology, 2005. DOI: 10.1016/j.icrp.2004.08.001.