

铀转化和铀浓缩设施液态流出物铀浓度 排放限值的监管研究

苗隆鑫 殷德健 姚永奎 杨震

(生态环境部 西北核与辐射安全监督站 兰州 730020)

摘要 铀转化和铀浓缩设施中含铀的液态流出物放射性核素排放浓度,是核安全监管液态流出物的重要内容。为深入理解含铀废水监测及其监管,有必要从放射性活度浓度限值、铀浓度限值及其相互关系进行研究分析。首先从该管理限值源头入手,分析国际原子能机构相关建议值,对比美国核管理委员会监管限值,结合我国辐射剂量管理限值指导原则进行推导,最后对比目前实施的废水 α 活度浓度与铀浓度限值的关系。通过以上研究分析,可以发现我国含铀废水监管要求与国际原子能机构的指导原则一致,且高于美国的监管要求,但也存在我国铀浓度管理限值与 α 活度浓度限值匹配性不够的问题。因此,结合监管实际,可得出我国含铀的液态流出物排放监管要求是安全可靠的,并提出放射性流出物排放监管中存在的问题及注意事项,提出相应标准的制修订建议。

关键词 铀转化和铀浓缩设施,流出物, α 活度浓度,铀浓度,核安全监管

中图分类号 TL25²

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0052

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0052

引用该文:

苗隆鑫,殷德健,姚永奎,等.铀转化和铀浓缩设施液态流出物铀浓度排放限值的监管研究[J].辐射研究与辐射工艺学报,2025,43(6):060602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0052.

MIAO Longxin, YIN Dejian, YAO Yongkui, *et al.* Regulatory study on uranium concentration discharge limits for liquid effluents from uranium conversion and uranium enrichment facilities[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(6): 060602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0052.



Regulatory study on uranium concentration discharge limits for liquid effluents from uranium conversion and uranium enrichment facilities

MIAO Longxin YIN Dejian YAO Yongkui YANG Zhen

(North-Western China Regional Office of Nuclear and Radiation Safety Inspection, Ministry of Ecology and Environment,
Lanzhou 730020, China)

ABSTRACT The radionuclide emission concentration in uranium-containing liquid effluents from uranium conversion and enrichment facilities constitutes a key aspect of nuclear safety supervision for liquid effluents. To gain an in-depth understanding of the monitoring and supervision of uranium-containing wastewater, it is necessary to conduct research and analysis on the radioactive activity concentration limit, uranium concentration limit, and

第一作者: 苗隆鑫,男,1996年2月出生,2020年6月于中北大学获硕士学位,现从事核安全监管工作

通信作者: 杨震,博士研究生, E-mail: yang.zhen@nwro.mee.gov.cn

收稿日期: 初稿 2025-06-20; 修回 2025-09-22

First author: MIAO Longxin (male) was born in February 1996, and obtained a master's degree from North University of China in June 2020. He is currently engaged in nuclear safety regulation work

Corresponding author: YANG Zhen, doctoral graduate student, E-mail: yang.zhen@nwro.mee.gov.cn

Received 20 June 2025; accepted 22 September 2025

their interrelationships. Starting from the origins of these regulatory limits, this study first analyzes the relevant recommended values of the International Atomic Energy Agency (IAEA), compares them with the regulatory limits of the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), and derives conclusions based on China's guiding principles for radiation dose management limits. Finally, it compares the relationship between the currently implemented alpha activity concentration limits and uranium concentration limits for wastewater. Through the above research and analysis, it can be found that China's regulatory requirements for uranium-containing wastewater are consistent with the guiding principles of the IAEA and more stringent than those of the United States. However, there remains an issue of insufficient alignment between China's uranium concentration management limits and alpha activity concentration limits. Therefore, considering the actual supervision practices, it can be concluded that China's regulatory requirements for the discharge of uranium-containing liquid effluents are safe and reliable. This study also identifies the problems and precautions in the supervision of radioactive effluent discharge, and puts forward suggestions for the formulation and revision of relevant standards.

KEYWORDS Uranium processing and enrichment facilities, Effluent, Alpha activity concentration, Uranium concentration, Nuclear regulatory

CLC TL252

铀转化和铀浓缩设施安全总目标是采取有效的纵深防御措施,保护人和环境的安全^[1]。其辐射防护目标是确保正常运行状态下核设施内及其流出物排放所产生的辐射照射为合理可行的尽量低水平^[2-3],且低于国家规定的限值,并减少事故影响^[4]。根据《铀转化和铀浓缩设施的安全》^[5](HAD 301/06—2021)第3.7.3条“保护环境”要求,需要对流出物进行浓度和总活度的监测,以确保排放达标;第3.12.9条要求,铀浓缩和铀转化设施的液态流出物排放,其氟、铀等分别按照《污水综合排放标准》^[6](GB 8978—1996)和《铀加工与燃料制造设施辐射防护规定》^[7](EJ 1056—2018)的排放浓度要求执行。含铀液态流出物的排放限值是保障环境安全和公众健康的关键指标。当前,我国在该领域虽已建立相关标准体系,但不同标准间的限值匹配性存在问题,且与国际标准的对比分析有待深化。本研究的目的在于通过系统梳理国内外铀转化和铀浓缩设施液态流出物铀浓度排放限值标准,明确我国现有标准与国际标准的一致性和差异性,找出当前监管标准中存在的问题。其意义在于为我国相关标准的修订完善提供科学依据,优化铀浓度管理限值与 α 活度浓度限值的匹配性。针对含铀的液态流出物排放,部分相关法律法规标准:(1)根据《核安全法》第八条规定,我国核安全标准体系从高从严,核安全标准是强制标准。第十八条规定,核设施营运单位应确保有关人员辐射照射受控,且低于国家规定剂量限值,遵循合理、可行和尽量低水平的原则;(2)根据《民用核燃料循环设施安全规定》第5.3.3条,流出物排放的放射性核素浓度和总量,在运行

状态应符合批复限值要求并遵循合理、可行和尽量低水平的原则,且事故工况辐射剂量不超过可接受限值;(3)根据《核燃料循环放射性流出物归一化排放量管理限值》^[8](GB 13695—1992)要求,正常运行排放的含有放射性物质的废液和废气叫作放射性流出物,根据该标准折合生产能力可以算出核设施环境排放放射性核素的年度管理限值;(4)根据《核设施流出物监测规定》^[9](GB 11217—1989)要求,对大量放射性废水排放设施,若放射性废液的活度浓度很低(低于限值的1/10),则可以定期采样取代连续采样;(5)根据《铀加工与燃料制造设施辐射防护规定》(EJ 1056—2018),含铀废水排放监测项目可包括 α 活度浓度和铀浓度。

1 限值标准研究

对于铀转化和铀浓缩设施的液态流出物排放,只考虑铀排放浓度,即按液态流出物中的铀浓度考虑。对于含铀的液态流出物,一般年排放总量控制批复是按核燃料循环设施归一化排放限值计算得到。但对于每一批次的排放,也要遵循相关国家标准要求。在生态环境部(原国家环境保护局)发布的中华人民共和国国家标准的GB 8978—1996对废水排放总氟、总 α 和总 β 进行了要求。在国家国防科技工业局发布的核工业标准EJ 1056—2018,对液态流出物排放中铀的质量浓度进行了规定。GB 8978—1996引用了已废止的标准《辐射防护规定》(GB 8703—1988),EJ 1056—2018引用了《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)^[10],而GB 18871—2002是根据6个国际组织联合发布的

《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》^[11](国际原子能机构安全丛书 115 号,1996 年版)而修订的,其技术内容与上述国际组织标准等效。

因此,有必要从国外到国内针对相应限值标准进行梳理和研究,研究思路^[12-14]如图 1 所示。

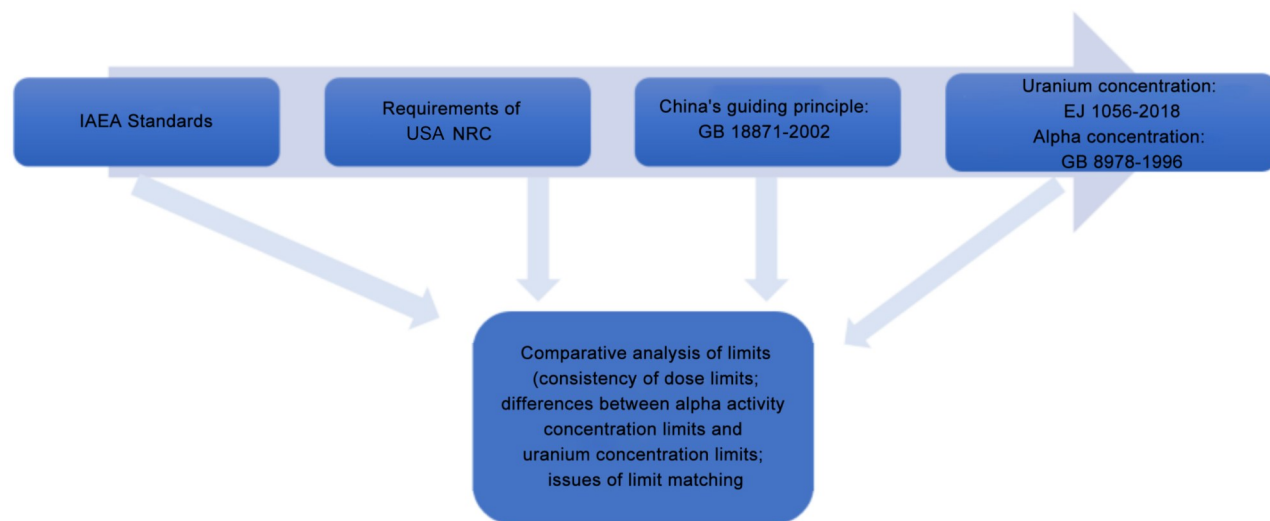


图 1 含铀的液态流出物标准研究思路

Fig.1 Research approach on standards for uranium-containing liquid effluents

1.1 国际原子能机构相关标准

根据最新的《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》(一般安全要求第三部分第 GSR Part3 号,2014 年版)要求 31“放射性废物和排放”,应拟定流出物的特性、活度、排放点和排放方法,应根据其排放的放射性核素的所有照射途径确保公众成员、代表人或环境照射受控。

根据其附录《一览 III 计划照射情况下的剂量限值》对公众照射的剂量限值要求:1 a 内有效剂量为 1 mSv;在特殊情况(例如导致照射短时间增加的许可、正当和计划的运行工况),可以按连续 5 a 内平均每年不超过 1 mSv 来适当提高某一年的有效剂量值;眼晶体当量剂量为 15 mSv;皮肤当量剂量为 50 mSv。其中,职业照射剂量限值按年龄段区分,如表 1 所示。

表 1 IAEA 职业照射剂量限值
Table 1 IAEA occupational exposure dose limits

年龄段 Age group	限值 Limits
18 岁以上 Above 18 years old	5 a 内平均每年不超过 20 mSv, 单年不超过 50 mSv No more than 20 mSv per year on average within 5 years, and no more than 50 mSv in a single year 5 a 内眼晶体平均每年不超过 20 mSv, 单年不超过 50 mSv No more than 20 mSv per year on average within 5 years, and no more than 50 mSv in a single year 一年内四肢(脚和手)或皮肤不超过 500 mSv No more than 500 mSv to the extremities (feet, hands) or skin within a year
16 至 18 岁的实习生 或学生 Trainees or students aged 16 to 18	一年内不超过 6 mSv No more than 6 mSv within a year 一年内眼晶体不超过 20 mSv No more than 20 mSv to the lens within a year 一年内四肢(脚和手)或皮肤不超过 150 mSv No more than 150 mSv to the extremities (feet, hands) or skin within a year

我国 GB 18871—2002 是参考《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》(1996 年版)进行修订的,其技术内容与该国际原子能标准是等效的。尽管该国际原子能标准已升版到 2014 年版,但其中

对公众和职业照射的剂量限值要求是不变的。

1.2 美国相关标准

根据美国联邦法规 10CFR^[15]第 20 部分附录 B——职业接触放射性核素的年度摄入限值(ALIs)

和导出空气浓度(DAC)、废水浓度、排放到下水道的浓度,废水排放月平均浓度适用于§20.2003的规定。浓度值是通过取最严格的职业随机食入吸收ALI除以 7.3×10^6 (mL)得出的。其中,参数 7.3×10^6 (mL)由“代表人”(该处代表人是指核设施工作人员)的年摄入量 7.3×10^5 (mL)和10的系数组成,即如果许可排放的污水是代表人1 a内摄入的唯一水源,则该浓度将导致5 mSv的许可有效剂量当量。查阅第20部分附录B的表3可知, ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 和 ^{238}U 活度浓度限值均为 3×10^{-6} $\mu\text{Ci/mL}$ (111 Bq/L)。对于流出物浓度,浓度值按相当于连续吸入或摄入的放射性核素浓度在1 a的过程中,将产生相当于0.05 rem (0.5 mSv)的总有效剂量计算。通过采用最严格的职业随机食入吸收ALI并除以 7.3×10^7 得出液态流出物的铀浓度。系数 7.3×10^7 (mL)包括以下组成部分:职业照射50 mSv的年剂量限值与公众1 mSv年剂量限值之比的系数50,调整职业值以适用于其他年龄组的系数2,以及“代表人”(该处代表人是指核设施工作人员)的年摄入量 7.3×10^5 (mL)。查阅第20部分附录B的表3可知, ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 和 ^{238}U 活度浓度限值均为 3×10^{-7} $\mu\text{Ci/mL}$ (11.1 Bq/L)。

1.3 我国相关标准

根据GB 18871—2002的要求,职业照射为任一年的有效剂量不超过50 mSv,公众照射为年有效剂量限值1 mSv。根据第8.6条,流出物排放所造成的公众照射应满足本标准附录B的限值要求。根据8.6.2条,流出物排放每月的总活度应不超过10 ALI_{min}(即职业照射的食入和吸入ALI中的较小值,具体数值见B1.3.4和B1.3.5),每次排放总活度不超过1 ALI_{min},且应在排放后用不少于3倍排放量的水冲洗。则铀元素对职业照射和公众照射的食入(水溶液中),核素 j 年摄入量限值 $I_{j,L}$,如式(1)所示。

$$I_{j,L} = \frac{D_L}{e_j} \quad (1)$$

式中: $I_{j,L}$ 为核素 j 年摄入量限值,Bq; D_L 为相应的年有效剂量限值,mSv; e_j 为对应途径核素 j 的单位摄入待积有效剂量,Sv/Bq。

本文研究对象为液态流出物,其主要排放去向为水体,公众暴露的核心途径是食入(如饮用受污染水、食用水生生物等),且液态流出物中铀的挥发性极低,通过挥发进入空气并被吸入的剂量贡献远低于食入途径,因此,聚焦铀元素对职业照射和公众照射的食入影响,未涉及吸入等途径。

(1)对于职业照射, $D_L=50$ mSv,吸入 e_j 为: ^{234}U 最大为 8.5×10^{-6} , ^{235}U 最大为 7.7×10^{-6} , ^{236}U 最大为 7.9×10^{-6} , ^{238}U 最大为 7.3×10^{-6} ;食入 e_j 为: ^{234}U 最大为 4.9×10^{-8} , ^{235}U 最大为 4.6×10^{-8} , ^{236}U 最大为 4.6×10^{-8} , ^{238}U 最大为 4.4×10^{-8} 。吸入 e_j 按 ^{234}U 计算,则 $I_{j,L}$ 为 5.88×10^3 Bq;食入 e_j 按 ^{234}U 计算,则 $I_{j,L}$ 为 1.02×10^6 Bq。考虑吸入效应,则按吸收ALI除以 7.3×10^2 (L)得出含铀的液态流出物活度浓度为8 Bq/L;考虑食入效应,则按吸收ALI除以 7.3×10^2 (L)得出含铀的液态流出物活度浓度为1 400 Bq/L。按取最小值为标准原则,限值浓度为8 Bq/L。

(2)对于公众照射, $D_L=1$ mSv,食入 e_j 为: ^{234}U 最大为 3.7×10^{-7} , ^{235}U 最大为 3.5×10^{-7} , ^{236}U 最大为 3.5×10^{-7} , ^{238}U 最大为 3.4×10^{-7} 。食入 e_j 按 ^{234}U 计算,则 $I_{j,L}$ 为2 700 Bq。考虑食入效应,则按吸收ALI除以 7.3×10^2 (L)得出含铀的液态流出物活度浓度为3.7 Bq/L。

EJ 1056—2018主要遵循GB 18871—2002的原则并规定:铀加工及燃料制造设施向环境释放的放射性物质,对公众成员关键人群组造成的年有效剂量约束值为0.2 mSv,且连续5 a内的平均值不大于0.2 mSv/a。食入 e_j 按 ^{234}U 计算,则 $I_{j,L}$ 为 5.4×10^2 Bq。考虑食入效应,则按吸收ALI除以 7.3×10^2 (L)得出含铀的液态流出物活度浓度为0.74 Bq/L。如表2所示。因此,GB 18871—2002的含铀液态流出物活度浓度标准是严于美国NRC的限值标准,而EJ 1056—2018的含铀液态流出物活度浓度标准又是远远严于GB 18871—2002的限值标准,仅为其1/5。因此,不同标准下含铀的液态流出物活度浓度限值存在差异,GB 18871—2002、EJ 1056—2018等标准对职业照射和公众照射的含铀的液态流出物活度浓度限值规定不同,反映出我国在不同层面的监管考量,也表明在实际监管中需综合多标准进行科学管控。另外,根据EJ 1056—2018要求,对于放射性废水排放,应采用槽式排放,且从废水处理设施排出口排出的液态流出物中总铀浓度应小于等于50 $\mu\text{g/L}$ 。同时,根据GB 8978—1996要求,第二类污染物最高允许排放一级标准(最严标准),氟化物为10 mg/L。第一类污染物最高允许排放浓度,总 α 放射性为1 Bq/L、总 β 放射性为10 Bq/L。其中,第一类污染物指不分行业和污水排放方式,也不区别受纳水体功能类别,一律在车间或车间处理设施排放口采样,其最高运行排放浓度必须达到本标准(尾矿坝出水口除外),如表3所示。

为直观呈现国际、美国及我国在铀转化和铀浓

缩设施液态流出物监管要求上的差异,汇总了不同体系下的核心限值指标,如表4所示。

表2 不同剂量限值计算对应的含铀的液态流出物活度浓度
Table 2 Activity concentration of wastewater corresponding to different dose limits

剂量约束值的目标人群 Target population for dose constraint value	含铀的液态流出物活度浓度限值 / (Bq·L ⁻¹) Activity concentration limit of uranium-containing liquid effluent
职业照射 (50 mSv/a, GB 18871—2002) Occupational Exposure (50 mSv/a, GB 18871—2002)	8.00
公众照射 (1 mSv/a, GB 18871—2002) Public Exposure (1 mSv/a, GB 18871—2002)	3.70
公众照射 (0.2 mSv/a, EJ 1056—2018) Public Exposure (0.2 mSv/a, EJ 1056—2018)	0.74

表3 第一类污染物最高允许排放浓度(节选)
Table 3 The maximum allowable emission concentration of the first type of pollutant

序号 Serial number	污染物 Pollutant	最高允许排放浓度 Maximum allowable emission concentration
7	总铅 Total lead	1.0 mg/L
8	总镍 Toal nickel	1.0 mg/L
10	总铍 Total beryllium	0.005 mg/L
12	总α放射性 Total α radioactivity	1 Bq/L
13	总β放射性 Total β radioactivity	10 Bq/L

表4 国际、美国及我国铀转化和铀浓缩设施液态流出物关键监管限值对比
Table 4 Comparison of key regulatory limits for uranium-containing liquid effluents from uranium conversion and enrichment facilities in IAEA, USA and China

监管体系 Regulatory system	法规/标准名称 Regulation/standard name	限值类型 Limit type	具体限值 Specific limit
IAEA	《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》(GSR Part3, 2014) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. (GSR-Part3, 2014)	剂量限值 dose limit	公众年有效剂量 1 mSv; 职业年有效剂量 5 a 内平均 20 mSv (单年≤50 mSv) 1 mSv for annual effective dose to the public; 20 mSv for average annual effective dose (within 5 years) for occupational exposure
美国 The United States of America	10CFR 第 20 部分(NRC)	铀活度浓度 Uranium activity concentration	职业相关: 111 Bq/L; 公众相关: 11.1 Bq/L 111 Bq/L for occupational - related; 11.1 Bq/L for public
中国 China	GB18871—2002	铀活度浓度 Uranium activity concentration	职业 8 Bq/L; 公众 3.7 Bq/L 8 Bq/L for occupational; 3.7 Bq/L for public
	EJ1056—2018	铀浓度/活度浓度 Uranium concentration/activity concentration	总铀≤50 μg/L; 公众活度浓度 0.74 Bq/L ≤50 μg/L for total uranium; 0.74 Bq/L for public activity concentration
	GB 8978—1996	总α活度 Gross α activity	1 Bq/L

2 分析与讨论

对于含铀的液态流出物,应按照总α活度来控

制。对于铀转化、铀浓缩和铀元件制造设施,其液态流出物排放的²³⁵U丰度是变化的,对于民用核设施

一般常使用2%~5%丰度铀。不同丰度铀的组成及比活度如表5所示。

表5 不同富集度铀同位素的放射性比活度(Bq/mg)
Table 5 Radioactivity of uranium isotopes with different enrichment levels (Bq/mg)

²³⁵ U质量丰度 / % ²³⁵ U mass abundance	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	总铀 Total U
0.711	12.4	0.55	0.016 7	12.4	25.4
2	25.2	1.59	0.033 3	12.1	38.9
4	64.2	3.17	0.066 7	11.8	79.3
5	107.2	4.03	0.919 0	11.8	123.9

分析前，首先需要由本文§1.3(2)获得公众照射食入剂量约束 $I_{j,L}$ 详细数据，如表6所示。

表6 公众照射食入 $I_{j,L}$
Table 6 Public exposure to ingestion of $I_{j,L}$

核素 Nuclides	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U
食入 e_j / (Sv·Bq ⁻¹)	3.7×	3.5×	3.5×	3.4×
Ingestion e_j	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
$I_{j,L}$ (Bq, EJ1056—2018)	540	571	571	588
$I_{j,L}$ (Bq, GB18871—2002)	2 700	2 857	2 857	2 941

根据中华人民共和国《公众成员的放射性核素年摄入量限值》(WS/T 613—2018)关于公众成员食入放射性核素年摄入量限值，如表7所示。

表7 WS/T 613—2018的公众照射食入 $I_{j,L}$ (Bq)
Table 7 Public exposure ingestion $I_{j,L}$ (in Bq) for WS/T 613—2018

年龄 Age	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U
≤1岁	2.7×10 ³	2.8×10 ³	2.8×10 ³	2.9×10 ³
≤1 year old				
1~2岁	7.6×10 ³	7.6×10 ³	7.6×10 ³	8.3×10 ³
1~2 years old				
2~7岁	1.1×10 ⁴	1.1×10 ⁴	1.1×10 ⁴	1.2×10 ⁴
2~7 years old				
7~12岁	1.3×10 ⁴	1.4×10 ⁴	1.4×10 ⁴	1.4×10 ⁴
7~12 years old				
12~17岁	1.3×10 ⁴	1.4×10 ⁴	1.4×10 ⁴	1.4×10 ⁴
12~17 years old				
>17岁	2.0×10 ⁴	2.1×10 ⁴	2.1×10 ⁴	2.2×10 ⁴
>17 years old				

因此，EJ 1056—2018对公众剂量约束限值是满足国家卫生健康委员会的要求的。且根据数据可知，WS/T 613—2018对1岁以内公众最严格的剂量约束限值与GB 18871—2002公众剂量约束推导值完全相同。

对于多铀同位素核素的计算，根据GB 18871—2002第B.1.3.3的计算公式并筛选需要的参

数，以不同丰度为条件，根据公众连续5 a内的平均值不大于0.2 mSv/a，可如式(2)求α浓度C，单位Bq/L。

$$\sum_j \frac{I_j}{I_{j,L}} \leq 1 \tag{2}$$

式中： I_j 为某核素j的实际摄入量，Bq； $I_{j,L}$ 为该核素的年摄入量限值，Bq。

0.711% 质量丰度铀，
$$\frac{730 \times C \times \frac{12.4}{25.4}}{540} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{0.55}{25.4}}{571} + \frac{730 \times C \times \frac{0.0167}{25.4}}{571} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{12.4}{25.4}}{588} = 1 \Rightarrow C = 0.763 \text{ Bq/L};$$

2% 质量丰度铀，
$$\frac{730 \times C \times \frac{25.2}{38.9}}{540} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{1.59}{38.9}}{571} + \frac{730 \times C \times \frac{0.0333}{38.9}}{571} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{12.1}{38.9}}{588} = 1 \Rightarrow C = 0.761 \text{ Bq/L};$$

4% 质量丰度铀，
$$\frac{730 \times C \times \frac{64.2}{79.3}}{540} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{3.17}{79.3}}{571} + \frac{730 \times C \times \frac{0.0667}{79.3}}{571} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{11.8}{79.3}}{588} = 1 \Rightarrow C = 0.752 \text{ Bq/L}$$

5% 质量丰度铀，
$$\frac{730 \times C \times \frac{107.2}{123.9}}{540} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{4.03}{123.9}}{571} + \frac{730 \times C \times \frac{0.919}{123.9}}{571} +$$

$$\frac{730 \times C \times \frac{11.8}{25.4}}{588} = 1 \Rightarrow C = 0.748 \text{ Bq/L}$$

因此,按剂量约束计算的活度浓度值随丰度变化不大,也符合§1.3(2)的推导,即食入 e_j 按 ^{234}U 计算,含铀的液态流出物活度浓度为0.74 Bq/L进行约束是可行的。若要求放宽至按GB 18871—2002的通用公众剂量约束值推导,则含铀的液态流出物浓度(为EJ 1056—2018剂量约束值的5倍)为3.7 Bq/L。

总铀按50 $\mu\text{g/L}$ 控制,铀为 α 放射性。则对于天然铀(0.711%),活度浓度为1.27 Bq/L;对于2%丰度铀,活度浓度为1.945 Bq/L;对于4%丰度铀,活度浓度为3.96 Bq/L;对于5%丰度铀,活度浓度为6.20 Bq/L。

因此,若总排口按照总 α 放射性为1 Bq/L控制,铀浓度限值计算如表8所示。

表8 不同富集度含铀的液态流出物排放控制限值
(总 $\alpha \leq 1$ Bq/L)

Table 8 Emission control limits for uranium containing wastewater with different enrichment levels
(total $\alpha \leq 1$ Bq/L)

^{235}U 质量丰度/%	总铀限值/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
^{235}U mass abundance	Total uranium limit
0.711	39
2	25
4	12
5	8

铀浓缩设施含铀的液态流出物排放采用槽式排放,因潜在风险小可以建造在居民区或水源地附近,总铀浓度按50 $\mu\text{g/L}$ 限值控制(总 α 采用年排放总量控制),虽然对公众剂量约束是远远满足国标要求的,但存在总 α 浓度超过1 Bq/L的可能,即EJ 1056—2018与GB 8978—1996两个行业标准不相互匹配。建议相关部门探索建立更合理的协调机制,统一两个标准在含铀的液态流出物排放监管方面的要求,以提高监管的有效性和准确性。

3 结论

本研究结果结合监管经验得出以下结论:(1)我国关于含铀的液态流出物排放的公众辐射防护限值与国际原子能机构指导原则的限值是一致的,我国关于含铀的液态流出物排放的控制标准比美国的标准更严格,且我国核工业制定的标准比我国国标及卫生健康委员会的相应标准更严格,环境辐射管理的安全度非常高;(2)《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)所引用标准已存在废止,

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)所参考的国际原子能机构文件已更新,建议及时修编,以更好规范核与辐射安全活动,例如本文涉及的含铀放射性废水排放;(3)在铀转化和铀浓缩设施液态流出物排放监管中,不仅要关注EJ 1056—2018规定的总铀浓度 ≤ 50 $\mu\text{g/L}$ 这一指标,还需关注GB 8978—1996中总 α 活度浓度 ≤ 1 Bq/L的要求,确保液态流出物排放同时满足总铀浓度与 α 活度浓度要求,避免单一指标监管的局限性。

作者贡献声明 殷德健、杨震提供本论文整体思路;殷德健、姚永奎、杨震负责对论文进行审阅修改;苗隆鑫完成了论文的撰写及修改工作。所有作者均已阅读并认可本论文的所有内容。

参考文献

- 冯鑫鑫,邱龙,张明星,等.偕胺肟基超高分子量聚乙烯纤维对含氟含铀溶液中铀的吸附性能研究[J].核技术,2020,43(2): 020301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.020301.
FENG Xinxin, QIU Long, ZHANG Mingxing, et al. Preparation of amidoxime-based ultra-high molecular weight polyethylene fiber for removing uranium from fluorine-containing wastewater[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(2): 020301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.020301.
- 刘华.核设施放射性流出物排放的优化控制研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2005.
LIU Hua. Study on optimal control of radioactive effluent discharge from nuclear facilities[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2005.
- 刘华.核设施放射性流出物排放控制值得关注的几个问题[C].全国放射性流出物和环境监测与评价研讨会论文集.北京:中国核学会,2003: 77-83.
LIU Hua. Several Issues Worth attention in the control of radioactive effluent discharge from nuclear facilities[C]. Proceedings of the national symposium on radioactive effluent and environmental monitoring and evaluation. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2003: 77-83.
- 国家核安全局.民用核燃料循环设施安全规定:HAF 102[S].北京:中国法制出版社,2004.
National Nuclear Safety Administration. Safety regulations for civil nuclear fuel cycle facilities: HAF 102 [S]. Beijing: China Legal Publishing House, 2004.
- 国家核安全局.铀转化和铀浓缩设施的安全:HAD 301/

- 06—2021[S]. 北京: 中国法制出版社, 2021.
- National Nuclear Safety Administration. Safety of uranium conversion and enrichment facilities: HAD 301/06—2021[S]. Beijing: China Legal Publishing House, 2021.
- 6 国家环境保护总局, 国家技术监督局. 污水综合排放标准: GB 8978—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- General Administration of Environmental Protection, the State Bureau of Quality and Technical Supervision. Integrated wastewater discharge standard: GB 8978—1996[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.
- 7 中国核工业集团公司. 铀加工与燃料制造设施辐射防护规定: EJ 1056—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- China National Nuclear Corporation. Radiation protection regulations for uranium processing and fuel fabrication facilities: EJ 1056—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- 8 国家环境保护总局, 国家核安全局. 核燃料循环放射性流出物归一化排放量管理限值: GB 13695—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- State Environmental Protection Administration, National Nuclear Safety Administration. Management limits for normalized discharge of radioactive effluents from nuclear fuel cycle: GB 13695—1992[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- 9 国家环境保护总局, 国家核安全局. 核设施流出物监测的一般规定: GB 11217—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- State Environmental Protection Administration, National Nuclear Safety Administration. Regulations for monitoring of effluents from nuclear facilities: GB 11217—1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- 10 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: GB 18871—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- 11 联合国粮食及农业组织, 国际原子能机构, 国际劳工组织, 经济合作与发展组织核能机构, 泛美卫生组织, 世界卫生组织. 国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准: IAEA 安全丛书 115 号[S]. 维也纳: 国际原子能机构, 1996.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Co-operation and Development, Pan American Health Organization, World Health Organization. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: IAEA safety series No. 115[S]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996.
- 12 高思旂, 谢树军, 张爱玲, 等. 对伴生放射性矿液态流出物排放限值确定的思考[J]. 核技术, 2024, 47(8): 080303. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080303.
- GAO Siyi, XIE Shujun, ZHANG Ailing, *et al.* Consideration on the determination of the discharge limit on liquid effluent from associated radioactive mines[J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(8): 080303. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080303.
- 13 高思旂, 杨春, 谢树军, 等. 我国伴生放射性矿辐射环境监管的思考[J]. 核技术, 2023, 46(1): 010001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010001.
- GAO Siyi, YANG Chun, XIE Shujun, *et al.* Consideration on radiation environmental supervision of associated radioactive mines[J]. Nuclear Techniques, 2023, 46(1): 010001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.010001.
- 14 宋大虎, 张弛, 杨丽丽, 等. 核与辐射安全标准体系结构研究初探[J]. 核安全, 2014, 13(3): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5360.2014.03.013.
- SONG Dahu, ZHANG Chi, YANG Lili, *et al.* A preliminary study on the design in architecture of nuclear and radiation safety standard system[J]. Nuclear Safety, 2014, 13(3): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5360.2014.03.013.
- 15 U. S. Nuclear Regulatory Commission. Regulations: 10 CFR[S/OL]. Washington, D. C. U. S. Government Publishing Office.