

装备防护

放射性货包运输风险控制目标探讨

王学新¹, 孙树堂¹, 孟东原¹, 郝嘉欣¹, 李俊¹, 闫峰¹, 王雨萱²

(1. 中国辐射防护研究院, 太原 030006, 2. 南京师范大学, 南京 210023)

摘要: **目的** 提出制定我国放射性物质货包运输风险控制目标的初步建议, 可为相关风险评价工作提供决策参考。**方法** 通过借鉴核电厂及非反应堆核设施相关安全目标研究的宝贵经验, 对相关阈值划分和风险可接受边界进行讨论, 并针对放射性货包运输的特点展开分析, 提出以风险矩阵作为其风险目标的表达形式。**结果** 相关研究认为, 对放射性物质货包运输来说, 按照严重程度分类, 结合其事故发生率, 是一种较为合理的表征形式。**结论** 本文对放射性物质货包运输风险控制目标制定进行了初步的探索。要使得该风险矩阵能与实际运输活动的风险指引相适应, 最终起到指导运输风险管理的作用, 未来还需要更多研究成果的推动。

关键词: 放射性物质; 货包; 运输; 概率; 安全目标

中图分类号: TL93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)11-0317-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.037

Discussions on Risk Control Goals of Radioactive Material Transportation

WANG Xue-xin¹, SUN Shu-tang¹, MENG Dong-yuan¹, HAO Jia-xin¹,
LI Jun¹, YAN feng¹, WANG Yu-xuan²

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;

2. Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

ABSTRACT: The work aims to present preliminary suggestions on establishing the risk control goals of radioactive material transportation to provide decision-making reference for relevant risk evaluation. With the experience of safety research work on nuclear power plants and non-reactor nuclear facilities, the work analyzed the characteristics of radioactive material transportation. A risk matrix was proposed to be used as the risk goal for radioactive material transportation by the discussion of the acceptable boundary setting and the risk index values. Based on the research, the risk matrix was considered to be a reasonable presentation form for radioactive material transportation according to its classification of severity in combination with its accident rate. In the work, a preliminary exploration is made on the establishment of risk control goal for packaging and transportation of radioactive materials. Further works need to do before the risk matrix is applicable to the actual transportation activities and become the guidance of transport risk management at last.

KEY WORDS: radioactive material; packaging; transportation; probability; risk control goal

美国学者 Fell 等^[1]研究认为“可接受安全准则是连接风险分析和风险管理的重要一环”。安全分析的本质目的是要找到一个“可接受的”安全水平。无法最终判定其风险可接受水平或没有明确的安全目标

则安全分析工作将失去意义。风险指引 (Risk-Informed) 技术在核能等领域的应用推进了相关行业安全性的显著提高, 尤其在核电领域。随着相关技术的逐渐成熟, 英国、美国、荷兰、澳大

收稿日期: 2022-08-28

作者简介: 王学新 (1970—), 男, 本科。

利亚等一些国家均已逐步针对威胁设施制定了风险管理的一般指南,相继提出了一些可接受风险的相关准则。放射性货包运输领域中风险指引方面的应用较少。在放射性运输安全分析中主要是依据确定论方法进行事故后果估算,风险分析还停留在半定量阶段。

本文希望通过结合放射性运输的特点,提出针对于放射性物质运输风险目标的判别形式及相关阈值建议。在参考了国外相关经验基础上,提出拟用于放射性运输安全管理风险矩阵,并推荐各类严重程度的事故概率和后果的划分阈值,并对比国外的类似风险值进行探讨。

1 放射性物质运输安全的特殊性

核电厂采用概率安全分析(PSA)和风险指引(Risk-Informed)的方法对放射性物质运输风险目标的制定有非常好的指导和借鉴意义。核电厂提出的以“堆芯损坏频率(CDF)”来反映系统失效和“大规模放射性释放频率”反映包容屏障失效的双指标形式作为其概率安全目标的方法^[2-4],却并不适用于放射性物质运输的风险目标的制定。

我国放射性运输安全分析更多的是停留在确定论下的事故后果估算层面。国际上针对放射性物质运输风险目标的研究工作也开展较少,鲜有见到相关研究进展和成果发布。究其原因,一方面,PSA研究需要大量研究经费支持和可靠性基础数据支撑;另一个原因则是放射性运输有自己鲜明的特点,就是不同货包类型间内容物、源项、辐射类型等差别巨大,事故工况下辐射后果存在数个量级的差距。这也是国际原子能机构(IAEA)提出对放射性货包“分类管理”思想的一个主要原因。

放射性物质运输安全很大程度上依靠运输容器的安全设计来保障,以实现放射性内容物的临界安全、屏蔽、传热、包容等方面的控制。IAEA发布的专门安全要求《Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material》(No.SSR-6)以及GB 11806中对不同类型货包其包装的设计基准提出了不同要求,并要求相应的试验验证。例如,对于装载低比活度物质(LSA)和表面污染物体(SCO)的工业型货包(IP),其设计上仅需满足正常运输条件下遇到的一些事件:喷水试验、(1m)自由下落试验、堆积试验、(落棒)贯穿试验,因此该类货包不需要在隔热、包容等方面提出严格的设计要求。装载乏燃料、一类放射源等的B型货包,除了要满足正常运输条件的验证能力外,还需要满足表征基准事故工况载荷的考虑。它包括:9m自由下落试验或9m压碎试验、(1m)贯穿试验、火烧试验(30min、800℃)、水浸没试验等严苛的考验。如果同时属于易裂变货包,则还需要

开展泄漏试验。对装载内容物活度超过 10^5 的A2值并用于空运的C型货包还应该满足更严苛的要求,即需进行200m深强化水浸没试验、击穿-撕裂试验和1h强化耐热试验。

虽然在运输容器设计中会基于各自的设计准则要求提高容器应对各种事故工况的能力,但由于不同类货包关注的安全问题不同,其设计或侧重于屏蔽,或侧重于包容,或侧重于临界控制。就整个放射性货包安全分析来说,难以找到类似CDF和LERF的指标来反映各型货包的安全水平。因此要如核电厂般的给出单一指标的概率安全目标明显是不合适的,这是放射性运输安全不同于核电厂的主要特点。

放射性运输安全的另一个特点是,严重事故下的总释放源项远低于核设施事故的。故IAEA在核事故威胁分类时将放射性运输活动划入第IV类威胁^[5]。因此对放射性运输活动制定风险可接受准则时不应过分保守。但运输事故地点不确定,没有安全边界,纵深防御能力不如核设施,存在直接影响公众和环境的可能。

2 放射性物质运输风险可接受判别形式的初步构想

2.1 放射性物质运输风险目标的构成形式

IAEA将放射性货包分为工业货包(IP)、A型货包、B型货包和装载限值更高的C型货包等,是按照装载不同货包内容物假想事故下的潜在威胁分类的。放射性运输风险则应按照货包事故后果大小和发生率综合分级。如果某种运输活动造成的事故后果严重,且事故发生期望值大,则其潜在风险水平高;反之则属于低风险活动。

据此分析,风险矩阵(表1)应是一种适用于放射性物质运输风险可接受度(或称风险目标)的判别形式。美国核管会(NRC)和美国能源部(DOE)对非反应堆核设施就是采用该判别形式进行设施安全水平的威胁分类。

表1 风险矩阵的基本构成形式
Tab.1 Basic form of risk matrix

事故发生率	事故后果轻	事故后果严重
事故频率高	中等风险	高风险
事故频率低	低风险	中等风险

2.2 事故严重程度表征指标和相关阈值探讨

2.2.1 国外对辐射事故严重程度的划分

风险矩阵构成的2个维度是后果和概率。其中事故后果严重度如何表述是值得讨论的一个问题。严重

程度常以金钱、生命等指标来表述,但由于不同损失与金钱的换算关系不统一,以及地区间经济发展的不均衡,均会对以金钱作为衡量标尺带来影响。因此以生命损失作为严重程度的指标的广泛性更高。绝大多数事故严重性采用死亡人数定性,少数引入生命损失方面的估算指标。

辐射事故中,急性致死率是一种量化指标,但其辐射遗传效应同样是非常重要的事故后果指标,且存在非常大的社会影响。因此辐射事故严重程度中仅考虑“急性照射致死”后果而忽略遗传效应的贡献是不保守的。在“癌症致死”方面存在多个相关指标参数,如:可归因致死癌概率、非致死癌加权概率、严重遗传效应加权概率、损伤寿命损失率等。要综合考虑这些因素,但其加权推导所引入的误差是难以评判的。

美国 NUREG-1520^[6]对核设施威胁分类中直接采用辐射剂量作为事故严重程度的划分依据,见表 2。NUREG-1520 中将事故后果分为“轻微”“中等”和“严重”3 类,并以场外公众辐射剂量 (R_D) 为指标,将核设施事故导致场外公众遭受大于 250 mSv 剂量的划为严重事故,公众个人所受剂量小于 50 mSv 的事故则属于轻微事故。

NUREG-1520 的事故严重程度划分思路值得借鉴,其优点在于该指标容易通过事故分析和后果估算得到,减少了各指标间换算的误差引入,有利于核行业间的事故后果比较。但该分类阈值是基于核设施事故后果制定的,毕竟核设施事故的源项及后果比放射性运输要大得多。因此放射性运输事故的后果划分阈值应考虑其适用度。例如,当发生运输事故导致事故点附近公众受到 50 mSv 的辐射后,对应的事故划定为轻微事故是否可被公众接受?

表 2 NUREG-1520 中对各类事故的辐射剂量严重程度的划分

Tab.2 Classification of radiation dose for accident severity in NUREG-1520

后果严重度 (等级)	工作人员	场外公众
严重事故后果 (3 级)	$R_D > 1 \text{ Sv}$	$R_D > 0.25 \text{ Sv}$
中等事故后果 (2 级)	$0.25 \text{ Sv} < R_D \leq 1 \text{ Sv}$	$0.05 \text{ Sv} < R_D \leq 0.25 \text{ Sv}$
轻微事故后果 (1 级)	$R_D > 0.25 \text{ Sv}$	$R_D > 0.05 \text{ Sv}$

美国能源部发布的 DOE-STD-3009^[7]中,根据事故对人员或环境的影响以“可忽略”“较小”或“明显”等差别,将事故后果划分为“无影响、低严重度、中等严重度、高严重度”等 4 类。在如何区分事故影响程度方面,DOE-STD-3009 的定义是笼统的,定性表述在实际应用中难以操作,分类结果因人而异。

2.2.2 对放射性运输事故严重程度的阈值讨论

我国 GB 6249—2011《核动力厂环境辐射防护规定》^[8]中规定:“发生极限事故(后果为大量放射性物质释放),非居住区边界上公众在事故后 2 h 内以及规划限制区外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 100 mSv 以下”。极限事故为发生频率极低(预计每年为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$)的事故,这类事故的后果包含了大量放射性物质释放的可能性。可以理解为我国国标将事故后果辐射剂量 100 mSv 作为核设施严重事故后果的划分阈值,超过该剂量阈值则可认为是不可接收的严重事故。该阈值相较于 NUREG-1520 中提出的 250 mSv 更保守些。但考虑到核设施事故源项和后果严重程度远大于货包的释放源项,因此需要重新考虑对放射性运输的严重事故划分阈值。

根据 IAEA 发布的《International Nuclear and Radiological Event Scale-INES's Manual 2008 Edition》^[9]第 4 章中建议的事故分类可知,对包括放射运输货包发生丢失被盗、屏蔽减弱及货包安全防护失效(如事故性泄漏)等事故工况给出对应的纵深防御级别和事故分级,其中将各类放射性运输事故的后果对应划定在 INES 事故级别的 2~4 级事故范畴。再结合表 3 中 2~4 级事故对应的受照剂量水平表述:“有一名公众成员所受照射的有效剂量超过 10 mSv,或有一名工作人员受到的照射超过法定年剂量限值”,可知即使考虑了放射性运输事故中最严重的工况“内容物泄漏”,辐射后果也应在 100 mSv 以下的量级水平。由此可认为,IAEA 对放射性运输事故辐射后果的认知也基本在该量级水平。

作为放射性运输领域的纲领性标准 IAEA-SSR6 的配套咨询解释文件“IAEA SSG-26”附录 I 中^[10]明确指出,作为 IAEA 放射性货包分类的基础假设条件是,基于发生事故后“货包附近受照射人员所受的有效剂量或预期有效剂量不会超过 50 mSv 的参考剂量”。这可以理解为,IAEA 认为放射性货包严重事故下的辐射后果应能控制在 50 mSv 水平附近。因此本文建议将以“50 mSv”作为判别是否达到严重事故的辐射剂量阈值。

放射性运输货包分类的核心是基于 IAEA 提出的“Q 体系”思想。Q 体系通过典型剂量学模型来推导货包内容物的限值^[11]。基本定义为以装载内容物活度量小于 A_1 (或 A_2 值)的货包命名为 A 型货包,而 A 型货包被定义为在早期假想事故(即“基准事故”)下的货包损伤后果是可接受的一类货包。这一假想事故最终的后果定义为“在损伤货包距离 3 m 处 3 h 所受的全身剂量不大于 30 mSv”^[10]。则基于 IAEA TECDOC-953 对“货包受损类事故”的隔离距离取 30 m 的建议值,采用简单的剂量外推方式,可导出在 30 m 隔离边界处的人员全身剂量约为 3 mSv。本文中建议以 3 mSv

作为设计基准事故下辐射剂量的判别阈值。

通常认为,中等事故可能出现货包受损和人员超剂量限值的照射;而轻微事故通常来自于运输过程中等车辆刮擦故障等,一般不会导致货包的损伤,对人员带来的辐射剂量不在预期内,但能控制在个人剂量限值内。因此,本文建议以 GB 18871—2002 中公众年个人剂量限值 1 mSv 作为轻微事故剂量的判别阈值。

2.3 事故概率的分级划分探讨

澳大利亚其发布的《风险评价导则》中,对各种事件发生概率通过定性表述给予区分(见表 3)。它对概率量级的判断依据也将为我国对事故发生频率的划分提供借鉴。

表 3 《风险评价导则》对各事件发生概率的定性表述
Tab.3 Qualitative description of accident probability in "Risk Assessment Guidelines"

概率量级	判断依据	定性描述
10^{-1}	已发生过一起类似事故	非常可能的
10^{-2}	如不采取措施,可能会发生的事故	可能的
10^{-3}	其他地方最近曾发生过	不太可能
10^{-4}	其他地方曾发生过	非常不太可能
10^{-5}	类似事故有记录,但不完全一样	非常不可能
10^{-6}	类似事故见到发生	几乎不可能

美国能源部 2006 年发布的安全标准 DOE-STD-3009,将事故发生频率分为 4 类,并给出用于不同事故概率的划分阈值。各类事故概率的定义如表 4 所示。

我国对事故概率可接受程度的边界还没有出台一个明确的划定标准。通常在核安全分析领域,普遍将低于 10^{-7} 的发生概率认为是不可信的,但对其他事故发生频率的意义和判断并没有明确的定义和划分,也缺乏相关标准或导则作为指导。

从对前述各国外机构在事故概率分级方法的对照分析可知,DOE 发布的安全标准 DOE-STD-3009 中,对发生事故可能性等级的划分更加细化,与类似频率事故的描述有较好的相似性,更符合公众对事故发生率的认知程度。因此,可借鉴其作为制定放射性运输风险矩阵中的事故率划分。

2.4 对放射性物质运输风险目标——风险矩阵的建议

鉴于放射性运输活动中内容物源项差别大、容器固有安全性不同、货包类型多等特殊性,采用单一指标的风险控制目标难以反映不同类型货包的安全水平。因此,建议以风险矩阵的形式,分类判定其风险目标是否可接受。

综合前述分析,本文给出对放射性物质运输风险矩阵的初步建议如表 5 所示。该风险矩阵由不同程度的事故后果和事故发生率分布共同构成。通过对不同事故的严重程度分类,再结合其事故发生率来判断该类事故风险是否可以接受。

表 4 DOE-STD-3009 用于事故概率划分的依据
Tab.4 Basis of accident probability division in DOE-STD-3009

年发生概率	描述	定义
$10^{-1}>P\geq 10^{-2}$	寿期内可能发生数次的事件(通常发生的事件)	有预期发生的概率
$10^{-2}>P\geq 10^{-4}$	寿期内不期望发生的事故,该概率水平的自然现象如:美国通用规范水平中提出的地震、百年一遇洪水和最大风暴的期望值	不太可能发生的概率
$10^{-4}>P\geq 10^{-6}$	寿期内可能不会发生的事故,该等级包括设计基准事故	极不可能发生的概率
$10^{-6}>P$	其他事故	比极不可能的可能性更低的概率

表 5 对放射性物质运输事故风险矩阵的建议
Tab.5 Recommendation for risk matrix of radioactive material transport accidents

年事故发生率	事故后果			
	轻微事故 ($H<1\text{ mSv}$)	中等事故 ($1\text{ mSv}<H\leq 3\text{ mSv}$)	设计基准事故 ($3\text{ mSv}<H\leq 50\text{ mSv}$)	严重事故 ($H>50\text{ mSv}$)
$10^{-1}>P\geq 10^{-2}$	可接受	不可接受	不可接受	不可接受
$10^{-2}>P\geq 10^{-4}$	可接受	边界	不可接受	不可接受
$10^{-4}>P\geq 10^{-6}$	可接受	可接受	边界	不可接受
$10^{-6}>P$	可接受	可接受	可接受	边界

事故严重性拟由轻到重依次分为 4 级。矩阵中事故严重程度的分级,以事故点隔离边界的公众个人所受剂量划分。之所以未以工作人员剂量作为事故后果的判定标准是考虑到对现场事故应急人员后果评估时,往往考虑很多防护措施的影响,例如剂量分担、呼吸保护等措施。这种理想化的干预结果,往往使工作人员的辐射后果难以与事故的严重度保持正相关,而隔离区边界公众剂量相对更能直接反映事故的严重程度。

事故发生率的分类方面,风险矩阵拟采用与 DOE-STD-3009 相同的概率划分方法。因为 DOE-STD-3009 在事故概率等级划分方面更加细化,与 NUREG-1520 相比略保守,如 NUREG-1520 将 P 低于 10^{-5} /年事故作为概率等级中最不可能发生的一级;DOE-STD-3009 则以概率在 $10^{-4}>P>10^{-6}$ 事故作为设计基准事故水平,将 P 低于 10^{-6} /年的事故作为概率级别最低的超设计基准的严重事故,这与我国相关标准中的认知更为接近。

3 放射性物质运输风险可接受边界的探讨

3.1 各国间对风险可接受度的异同

世界各国对风险水平方面的认识总体趋近但存在差异,这与各国间政治、经济及意识形态等因素相关。

英国安全健康委员会(HSE)以家中触电年死亡率和交通事故年死亡率为基础展开研究。采用触电和交通为参照的原因是任何人对意外造成的伤害总是高估的并难以接受,而对常见事故伤害的预期是易于接受的。HSE 提出的不同类型活动的风险接受水平^[12]如下: 10^{-3} 为所有行业工人在职业年限内可容忍的死亡风险水平; 10^{-4} 为公众最大可容忍的常规电站年致死风险水平; 10^{-5} 为公众最大可容忍的新建核电站年致死风险水平; 10^{-6} 为无须进一步安全改进的可接受的年致死风险水平。

在 1953 年,荷兰曾针对洪水危害提出个人溺水死亡的风险水平为 10^{-6} ^[13],并写入相关法规中。随着对风险研究的深入,研究人员认为风险不应是针对所有个人的,而是根据所处区域来决定。此外,考虑到风险可接受度与公众意愿关系密切,荷兰防洪技术委员会(TAW)提出:对主动意愿强的活动及不情愿的活动分别设定个人风险可接受标准范围为 10^{-3} /年~ 10^{-6} /年^[14],即致死率低于 10^{-6} /年是可接受的,大于 10^{-3} /年则被认为是不可接受的。

在 20 世纪 60 年代,美国癌症患病率研究中提出以 10^{-8} /年为可接受的安全水平。1977 年,在考虑了社会、科学和经济等因素后将其修改为 10^{-6} /年,该数值在随后一直被视作可接受风险水平的标准^[15]。针

对核电厂事故风险,NRC 早期定量健康目标(EQHO)为“反应堆事故对附近个人急性死亡的平均风险不应超过由其他事故而致急性死亡风险的 0.1%”,则由美国其他事故急性死亡风险为 5×10^{-4} /年可导出核电站个人急性死亡风险目标约为 5×10^{-7} /年。

我国在风险评价方面的结论相对较少,胡二邦^[16]在其著作《环境风险评价实用技术和方法》中提出了对不同风险水平可接受程度的定义(表 6)。

表 6 我国一些风险可接受程度的研究成果
Tab.6 Some research results of risk acceptability in China

风险值 (死亡/年)	危险性描述	可接受程度
10^{-3}	高操作危险性	不可接受,立即采取措施改进
10^{-4}	中等操作危险性	应采取改进措施
10^{-5}	类似游泳和煤气中毒事故的量级	对此关心,并愿意采取措施
10^{-6}	类似于地震和天灾的风险	并不担心该类事故发生
$10^{-7}\sim 10^{-8}$	类似于陨石坠落伤人几率	没人愿为该类事故的预防而投资

3.2 放射性运输风险矩阵的适用性探讨

针对表 5 提出的放射性货包运输风险矩阵,本文尝试性地对不同事故严重程度给出对应的风险可接受边界进行讨论。矩阵中提出的严重放射性运输事故与设计基准事故之间的辐射风险可接受度边界为 0.05×10^{-6} Sv/年,该类事故范畴被认为是涵盖乏燃料或高放废物等本身具备高辐射危害的放射性运输活动风险。以国际放射防护委员会(ICRP)60 号出版物建议的辐射所致标称癌症致死危险系数为 4.0×10^{-2} Sv⁻¹^[11],可导出该可接受边界阈值对应的癌症致死风险为 2×10^{-9} /年;同样假设事故辐射剂量均由急性照射贡献,并取 5 Gy 作为全身急性照射的致死剂量阈值^[17],可导出严重事故可接受边界的急性辐射致死风险为 1×10^{-8} /年。

可以看出风险矩阵中严重事故可接受边界较前述各国的可接受水平基本接近,略保守一个量级。这是由于公众对各类核活动的风险认可度是更为谨慎苛刻的。此外,放射性货包运输活动缺乏核设施周界隔离和纵深防御下安全设施的缓解能力,一旦发生事故,内容物通常会直接暴露到环境并面对公众,因此对其提出更高的风险可接受度是合适的。

4 结语

放射性物质运输的风险可接受度研究在国际开展甚少,更多的风险指引方法主要用于核电厂安全管理方面。鉴于放射性运输活动的特殊性,直接采用核

电厂现有安全目标明显是不适用的。

本文首次针对放射性物质运输的风险可接受度展开了探讨,根据放射性物质运输中内容物不同、容器固有安全性不同、后果严重性不同等特点,提出采用风险矩阵作为放射性运输风险指引和可接受度的判别依据,是制定放射性运输风险控制目标管理方向是一种尝试。

本文仅对放射性货包运输的风险目标进行初步探讨,其风险可接受程度的认知受到不同社会、经济、文化及行业特殊性等诸多因素的影响。未来如何真正用于指导放射性运输的核安全风险,还需进行更深入的分析 and 研究。

参考文献:

- [1] FELL R, CORORNINAS J, BONNARD C, et al. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk-Zoning for Land Use Planning[J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 85-98.
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Modified Reactor Safety Goal Policy Statement[R]. USA: NRC, 2001.
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission. White Paper on Options for Risk Metrics for New Reactors[R]. USA: NRC, 2009.
- [4] INSAG-12, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants[S].
- [5] International Atomic Energy Agency. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency[R]. Vienna: IAEA-TECDOC-953, IAEA, 1997.
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Fuel Cycle Facility[R]. NUREG-1520, NRC, 2002.
- [7] DOE-STD-3009-94, Preparation Guide for U.S Department of Energy Nonreactor Nuclear Facility Documented Safety Analyses[S].
- [8] GB 6249—2011, 核动力厂环境辐射防护规定[S].
- GB 6249—2011, Environmental Radiation Protection Regulations for Nuclear Power Plants[S].
- [9] PLANER R S. INES _ the International Nuclear and Radiological Event Scale, User's Manual, 2008 Edition IAEA[M]. Vienna: IAEA, 2009.
- [10] SSG-26, Advisory Material for the IAEA Regulations Fou the Safe Teansport of Radioactive Material (2012 Edition)[S].
- [11] MACDONALD H F, GOLDFINCH E P. Dosimetric Aspects of Type a Package Contents Limits under the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials - Supplementary List of Isotopes[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1981, 1(3): 199-202.
- [12] HSE. Reducing Risks: Protecting People-HSR's Decision Making Process[R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 2001: 21-52.
- [13] BOTTELBERGHS P H. Risk Analysis and Safety Policy Developments in the Netherlands[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71(1/2/3): 59-84.
- [14] 高建明, 王喜奎, 曾明荣. 个人风险和社会风险可接受标准研究进展及启示[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(3): 29-34.
- GAO Jian-ming, WANG Xi-kui, ZENG Ming-rong. The Research Development and Indication of the Acceptable Standard of Individual Risk and Social Risk[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007, 3(3): 29-34.
- [15] KELLY K E P H. The Myth of 10^{-6} as a Definition of Acceptable Risk[J]. EPA Watch, 1994, 17(3): 4-8.
- [16] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- HU Er-bang. Practical Techniques and Methods of Environmental Risk Assessment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2000.
- [17] ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection[R]. ICRP Publication, 2007.

责任编辑: 曾钰婵