

基于生命周期评价的贫化六氟化铀转化设施环境影响分析

王彦, 杨洁, 廉冰, 赵杨军, 康晶

中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

摘要: **目的** 研究贫化六氟化铀(DUF_6)转化设施整个生命周期中环境影响的主要类型以及相应的影响过程。**方法** 运用生命周期评价(LCA)方法对 DUF_6 转化设施进行生命周期环境影响评价。**结果** DUF_6 转化设施整个生命周期中,一次能源消耗对环境影响(约占89.85%)的贡献在各类环境影响类别中最大,运营期的环境影响(约占81.54%)大于建设期(约占18.46%)。**结论** 通过减少氮气生产、工艺用水和混凝土生产中一次能源的消耗,可有效降低 DUF_6 转化设施整个生命周期对环境的影响。

关键词: DUF_6 转化设施; 生命周期评价; 环境影响

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2019)03-0328-05

Environmental impact analysis of depleted uranium hexafluoride conversion facilities based on life cycle assessment

WANG Yan, YANG Jie, LIAN Bing, ZHAO Yangjun, KANG Jing

China Institute for radiation protection, Taiyuan 030006 China

Abstract: **Objective** To study the main types of environmental impacts and impact processes during the entire life cycle of depleted uranium hexafluoride (DUF_6) conversion facilities. **Methods** Use Life Cycle Assessment (LCA) method to assess the life cycle environmental impact of the DUF_6 conversion facility. **Results** During the life cycle of the DUF_6 conversion facility, the contribution of primary energy consumption (about 89.85%) is the largest among various environmental impact categories, and the environmental impact in the operation period (about 81.54%) is greater than that in the construction period (about 18.46%). **Conclusion** By reducing the primary energy consumption in nitrogen production, process water and concrete production, the environmental impact of the entire life cycle of the DUF_6 conversion facility can be effectively reduced.

Key words: DUF_6 Conversion Facility; Life Cycle Assessment; Environmental Impact

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种对产品、工艺或活动从最初的资源开采、原料生产,到产品生产、运输、使用、回用、维护,以及最终处置等整个生命周期阶段有关的环境负荷进行评价的过程。LCA通过辨识和量化整个生命周期过程中能量和物质的消耗和环境释放,并对其进行全面评价,进而识别出潜在的环境改善机会,为达到产品的生态最优化提出改进建议。国际标准化组织(ISO)给出了LCA的定义:对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[1]。相对而言,传统的环境影响评价只是针对建设项目或规划本身对环境的影响进行评价,因此,可以说LCA是站在一个更高、更全面的角度进行评价,可以对产品整个生命周期所涉及到的整体环境进行全局评价。

国外LCA经过三十多年的应用和发展,在工业产品及其工艺的设计、废弃物管理、环境影响评价,以及制定环境政策等方面得到广泛应用,并已成为环境影响评价、环境管理、制定工业发展战略的重要工具^[2]。国内在工业、农业、能源、化工、运输、废物处理等领域也已经应用LCA开展了一些研究和应用^[3-12]。

DUF_6 是铀浓缩过程中产生的尾料,随着铀浓缩的生产, DUF_6 产生量也会相应增加。我国正在积极推进 DUF_6 的转化,《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标》^[13]中提出“推动贫化六氟化铀再利用和稳定化处理”。本文根据LCA的基本概念和研究框架,对 DUF_6 转化设施进行LCA评价,为我国今后建设相应设施提供参考。

1 材料与方法

作者简介: 王彦(1982-),男,山西省洪洞县人,硕士,副研究员,主要从事核设施环境安全与环境影响评价方面的研究工作。E-mail: wangyan_5945@163.com

1.1 生命周期评价的基本框架 根据 ISO 14040 标准的定义,生命周期评价过程包含目标与范围的定义、生命周期清单分析、生命周期影响评价和结果解释四个组成部分,如图 1 所示。

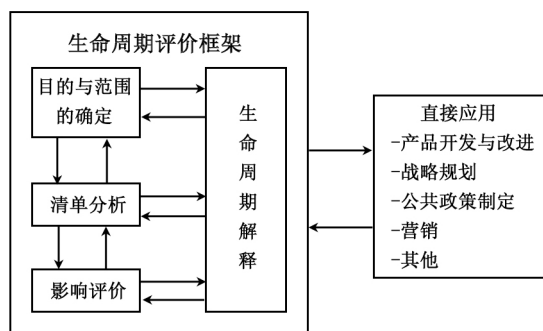


图 1 生命周期评价的基本结构

1.1.1 目标与范围的定义 LCA 评价首先需要确定评价目标和范围。通过确定 LCA 的评价目标,进而界定评价对象的功能、功能单位、系统边界、环境影响类型等。

1.1.2 清单分析 清单分析是进行 LCA 评价的基础,通过收集研究范围内的系统与功能单位相关的所有投入和产出数据,形成产品系统投入和产出的数据清单。

1.1.3 生命周期影响评价 生命周期影响评价是对清单分析中所确定环境负荷进行定量或定性的影响评价。LCA 的核心内容是生命周期影响评价,包括定性研究和定量评价,评价步骤通常包括影响分类、特征化、量化评价和结果解释。

(1) 影响分类

按环境影响的类型将投入和产出的清单分析数据进行分类,环境影响类型通常包括资源消耗、人体健康影响和生态影响三大类。

(2) 特征化

特征化是即以某影响类型中某一种影响因子为基准,将其影响潜力视为 1,然后将等量的影响因子与其比较,从而得出各类影响因子的相对影响潜力大小即当量系数,进而计算出各种影响类型的环境影响潜值。

(3) 量化评价

如果需要对各环境影响类型进行综合评价,需要对特征化结果进行归一化加权。

(4) 结果解释

生命周期解释是对影响评价结果做出分析解释,识别出产品的薄弱环节和潜在改善机会,为达到产品的生态最优化目的提出改进建议。

1.2 DUF₆ 转化设施 LCA 评价 目前,共有五条商业化运行的 DUF₆ 转化生产线,其中法国两条、美国两

条、俄罗斯一条,其采用的转化工艺相同。本文以美国朴茨茅斯(Portsmouth) DUF₆ 转化设施为例,对该设施进行 LCA 评价。

1.2.1 评价范围和目标 朴茨茅斯 DUF₆ 转化设施采用的是干法连续转化工艺,DUF₆ 经蒸发气化后,与水蒸气和氢气在流化床内反应,转化产生铀氧化物混合物(主要是 U₃O₈)和氢氟酸。DUF₆ 转化设施的转换能力为 13 500 吨 DUF₆/年,设施寿命为 18 年。由于设施操作物料的放射性水平较低,其运行所致厂址周围最大个人有效剂量仅为 2.1×10^{-7} mSv/a^[14],远低于我国规定的公众个人有效剂量限值(1 mSv/a)。在 LCA 评价中,主要考虑辐射影响外的其它影响类型。

本文以 DUF₆ 转化设施的建设期和运营期为研究对象开展 LCA 评价,主要目的是了解不同环境影响类型的相对贡献,为进一步改善环境影响提出建议。

1.2.2 清单分析 DUF₆ 转化设施生命周期中的系统投入主要包括化石燃料、电力、水资源、化工原料、建筑材料等;系统产出主要包括废气、废水和固体废物。整个 DUF₆ 转化设施生命周期的投入产出数据见表 1。

1.2.3 环境影响类型 环境影响类型筛选,综合考虑了国内外政策关注的重点,尤其是我国国民经济与社会发展规划纲要和环境保护规划中的相关要求,并根据设施的清单分析结果最终确定分析的环境影响类型。投入的化石燃料、电力、化工原料、建筑材料、水资源,在其生产过程中会涉及到“一次能源消耗(PED)”、“中国非生物资源消耗(CADP)”和“淡水消耗(water use)”,设施的废气排放对应的是“全球变暖(GWP)”、“可吸入无机物(RI)”和“酸化(AP)”类型,废水排放对应的是“富营养化(EP)”类型,固体废物对应的是“固体废弃物(waste solids)”类型。

1.2.4 特征化 在数据清单特征化过程中,采用国内开发的 LCA 软件 eBalance 建立 LCA 模型,计算出 DUF₆ 转化设施的生命周期清单,并对不同环境影响类型的清单数据进行了特征化,见表 2。eBalance 软件内置有中国生命周期基础数据库 CLCD(Chinese Reference Life Cycle Database)、欧盟生命周期基础数据库 ELCD(European Reference Life Cycle Database)、及瑞士的 Ecoinvent 商业数据库。

1.2.5 量化评价 表 3 为对表 2 中特征化结果进行归一化的结果,表 4 为各单元过程对不同环境影响类型贡献比例。归一化基准值是根据中国环境统计年鉴^[15]和国际应用系统分析研究所^[16]统计的中国排放或消耗总量数据计算得到的。

表 1 DUF₆ 转化设施生命周期的投入产出数据^[14]

生命周期阶段	投入			产出		
	物质名称	数量	单位	物质名称	数量	单位
建设期	工艺用水	1.51×10^4	t	SO ₂	1.70×10^0	t
	电力	1.50×10^3	MWh	NO _x	2.49×10^1	t
	柴油	2.36×10^5	kg	CO	1.68×10^1	t
	混凝土	1.75×10^4	t	VOCs	7.00×10^0	t
	钢	5.11×10^2	t	PM ₁₀	1.83×10^1	t
	液化石油气	3.29×10^4	kg	PM _{2.5}	4.80×10^0	t
				废水	3.80×10^6	L
				生活废水	1.10×10^7	L
				固体废物	7.00×10^2	m ³
运营期	电力	3.11×10^4	MWh	SO ₂	1.81×10^{-1}	t
	汽油	8.23×10^3	kg	NO _x	3.32×10^0	t
	天然气	9.06×10^5	kg	CO	1.46×10^0	t
	工艺用水	1.14×10^5	t	VOCs	2.62×10^{-1}	t
	饮用水	1.14×10^4	t	PM ₁₀	1.87×10^{-1}	t
	石灰石	1.40×10^1	t	F	5.66×10^1	kg
	氨	5.10×10^2	t	生活废水	5.50×10^6	L
	氢氧化钾	6.00×10^0	t	工业固废	4.90×10^1	m ³
	氮气	7.80×10^6	kg			

表 2 生命周期特征化结果

生命周期阶段	单元过程	环境影响类型							
		AP (kg SO ₂ eq)	CADP (kg Coal - R eq.)	PED (kgce)	EP (kg PO ₄ ⁻³ eq)	GWP (kg CO ₂ eq)	RI (kg PM _{2.5} eq)	Waste Solids (kg)	Water Use (kg)
建设期	电力	8.05×10^3	1.48×10^6	6.86×10^5	5.31×10^2	1.52×10^6	2.35×10^3	2.92×10^5	5.09×10^6
	水	2.54×10^1	5.55×10^5	3.59×10^7	1.07×10^1	9.46×10^3	3.43×10^0	6.19×10^3	1.51×10^7
	柴油	9.08×10^2	8.42×10^6	4.33×10^5	1.36×10^2	2.10×10^5	1.43×10^2	6.76×10^3	1.65×10^6
	混凝土	4.29×10^3	9.88×10^7	8.14×10^9	6.65×10^2	2.12×10^6	7.21×10^2	6.99×10^6	3.22×10^6
	液化石油气	9.81×10^1	7.37×10^5	3.81×10^4	1.52×10^1	1.96×10^4	1.46×10^1	6.94×10^2	1.50×10^5
	钢	4.24×10^3	1.53×10^7	3.73×10^5	4.04×10^2	1.09×10^6	2.65×10^3	2.66×10^6	8.34×10^6
	设施建设	1.91×10^4	0	0	3.24×10^3	0	1.79×10^4	7.00×10^5	0
运营期	电力	1.67×10^5	3.07×10^7	1.42×10^7	1.10×10^4	3.15×10^7	4.87×10^4	6.05×10^6	1.06×10^8
	饮用水	1.92×10^1	4.19×10^5	2.71×10^7	8.06×10^0	7.14×10^3	2.59×10^0	4.67×10^3	1.14×10^7
	天然气	1.31×10^3	5.90×10^8	9.29×10^7	2.60×10^2	4.17×10^5	1.56×10^2	8.52×10^4	1.39×10^4
	汽油	3.91×10^1	3.14×10^5	1.62×10^4	5.95×10^0	8.50×10^3	5.92×10^0	2.84×10^2	6.28×10^4
	氨	2.16×10^4	3.38×10^6	1.18×10^6	4.06×10^3	2.67×10^6	3.29×10^3	3.25×10^5	3.28×10^7
	石灰石	1.58×10^0	3.79×10^2	3.38×10^1	2.61×10^{-1}	7.68×10^1	4.18×10^{-1}	2.38×10^3	2.42×10^2
	氮气	4.80×10^3	5.35×10^7	3.13×10^{10}	1.94×10^2	6.89×10^5	5.74×10^2	2.58×10^6	1.80×10^6
	工艺用水	2.17×10^3	7.52×10^7	1.45×10^{10}	4.63×10^2	7.43×10^5	3.05×10^2	1.82×10^6	1.16×10^8
	转化	2.51×10^3	0	0	4.32×10^2	0	7.25×10^2	4.90×10^1	0

表 3 各环境影响类型的归一化结果

生命周期阶段	单元过程	环境影响类型							
		AP	CADP	PED	EP	GWP	RI	Waste Solids	Water Use
建设期	电力	2.21×10^{-7}	9.58×10^{-8}	2.33×10^{-7}	1.41×10^{-7}	1.45×10^{-7}	1.25×10^{-7}	6.49×10^{-5}	8.41×10^{-9}
	水	6.97×10^{-10}	3.59×10^{-8}	1.22×10^{-5}	2.84×10^{-9}	8.97×10^{-10}	1.82×10^{-10}	1.38×10^{-6}	2.50×10^{-8}
	柴油	2.49×10^{-8}	5.45×10^{-7}	1.47×10^{-7}	3.63×10^{-8}	1.99×10^{-8}	7.59×10^{-9}	1.50×10^{-6}	2.73×10^{-9}
	混凝土	1.18×10^{-7}	6.39×10^{-6}	2.76×10^{-3}	1.77×10^{-7}	2.01×10^{-7}	3.83×10^{-8}	1.55×10^{-3}	5.32×10^{-9}
	液化石油气	2.69×10^{-9}	4.77×10^{-8}	1.29×10^{-8}	4.04×10^{-9}	1.86×10^{-9}	7.73×10^{-10}	1.54×10^{-7}	2.48×10^{-10}
	钢	1.16×10^{-7}	9.90×10^{-7}	1.26×10^{-7}	1.07×10^{-7}	1.04×10^{-7}	1.41×10^{-7}	5.91×10^{-4}	1.38×10^{-8}
	设施建设	5.25×10^{-7}	0	0	8.61×10^{-7}	0	9.52×10^{-7}	1.56×10^{-4}	0
运营期	电力	4.58×10^{-6}	1.98×10^{-6}	4.82×10^{-6}	2.93×10^{-6}	2.99×10^{-6}	2.59×10^{-6}	1.34×10^{-3}	1.74×10^{-7}
	饮用水	5.26×10^{-10}	2.71×10^{-8}	9.17×10^{-6}	2.15×10^{-9}	6.78×10^{-10}	1.38×10^{-10}	1.04×10^{-6}	1.89×10^{-8}
	天然气	3.60×10^{-8}	3.81×10^{-5}	3.15×10^{-5}	6.92×10^{-8}	3.96×10^{-8}	8.29×10^{-9}	1.89×10^{-5}	2.29×10^{-11}
	汽油	1.07×10^{-9}	2.03×10^{-8}	5.49×10^{-9}	1.58×10^{-9}	8.07×10^{-10}	3.15×10^{-10}	6.31×10^{-8}	1.04×10^{-10}
	氨	5.92×10^{-7}	2.19×10^{-7}	3.99×10^{-7}	1.08×10^{-6}	2.53×10^{-7}	1.75×10^{-7}	7.23×10^{-5}	5.42×10^{-8}
	石灰石	4.33×10^{-11}	2.45×10^{-11}	1.15×10^{-11}	6.94×10^{-11}	7.29×10^{-12}	2.22×10^{-11}	5.29×10^{-7}	4.00×10^{-13}
	氮气	1.32×10^{-7}	3.46×10^{-6}	1.06×10^{-2}	5.16×10^{-8}	6.54×10^{-8}	3.05×10^{-8}	5.74×10^{-4}	2.97×10^{-9}
	工艺用水	5.96×10^{-8}	4.86×10^{-6}	4.92×10^{-3}	1.23×10^{-7}	7.05×10^{-8}	1.62×10^{-8}	4.04×10^{-4}	1.92×10^{-7}
	转化	6.88×10^{-8}	0	0	1.15×10^{-7}	0	3.85×10^{-8}	1.09×10^{-8}	0

表 4 各单元过程对不同环境影响类型贡献比例

生命周 期阶段	单元 过程	环境影响类型							
		AP	CADP	PED	EP	GWP	RI	Waste Solids	Water Use
建设期	电力	3.41%	0.17%	0.00%	2.48%	3.71%	3.03%	1.36%	1.69%
	水	0.01%	0.06%	0.07%	0.05%	0.02%	0.00%	0.03%	5.02%
	柴油	0.38%	0.96%	0.00%	0.64%	0.51%	0.18%	0.03%	0.55%
	混凝土	1.82%	11.24%	15.03%	3.11%	5.15%	0.93%	32.49%	1.07%
	液化石油气	0.04%	0.08%	0.00%	0.07%	0.05%	0.02%	0.00%	0.05%
	钢	1.80%	1.74%	0.00%	1.88%	2.67%	3.42%	12.35%	2.77%
	设施建设	8.11%	0.00%	0.00%	15.11%	0.00%	23.11%	3.25%	0.00%
运营期	电力	70.68%	3.49%	0.03%	51.38%	76.85%	62.79%	28.10%	35.03%
	饮用水	0.01%	0.05%	0.05%	0.04%	0.02%	0.00%	0.02%	3.79%
	天然气	0.56%	67.14%	0.17%	1.21%	1.02%	0.20%	0.40%	0.00%
	汽油	0.02%	0.04%	0.00%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.02%
	氨	9.14%	0.39%	0.00%	18.93%	6.50%	4.24%	1.51%	10.89%
	石灰石	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%
	氮气	2.04%	6.09%	57.81%	0.91%	1.68%	0.74%	12.01%	0.60%
	工艺用水	0.92%	8.55%	26.83%	2.16%	1.81%	0.39%	8.44%	38.51%
	转化	1.06%	0.00%	0.00%	2.01%	0.00%	0.93%	0.00%	0.00%

表 5 为各环境影响类型的权重因子,该因子是第二届中国生命周期管理会议期间,根据与会专家对环境影响类型的重要性打分并对结果进行层次分析法 (AHP) 分析得出的结果。

表 5 各环境影响类型的权重因子

环境影响类型	AP	CADP	PED	EP	GWP	RI	Waste Solids	Water Use
权重因子	1.03×10^{-1}	2.03×10^{-1}	2.03×10^{-1}	1.12×10^{-1}	1.74×10^{-1}	7.80×10^{-2}	8.50×10^{-2}	1.66×10^{-1}

表 6 各环境影响类型的加权值及其贡献值

生命周 期阶段		环境影响类型								合计
		AP	CADP	PED	EP	GWP	RI	Waste Solids	Water Use	
建设期	加权值	1.04×10^{-7}	1.64×10^{-6}	5.62×10^{-4}	1.49×10^{-7}	8.21×10^{-8}	9.87×10^{-8}	2.01×10^{-4}	9.20×10^{-9}	7.65×10^{-4}
	贡献值	0.01%	0.21%	73.43%	0.02%	0.01%	0.01%	26.30%	0.00%	100.00%
运营期	加权值	5.63×10^{-7}	9.89×10^{-6}	3.16×10^{-3}	4.90×10^{-7}	5.96×10^{-7}	2.23×10^{-7}	2.05×10^{-4}	7.33×10^{-8}	3.38×10^{-3}
	贡献值	0.02%	0.29%	93.57%	0.01%	0.02%	0.01%	6.08%	0.00%	100.00%
合计	加权值	6.67×10^{-7}	1.15×10^{-5}	3.72×10^{-3}	6.39×10^{-7}	6.78×10^{-7}	3.21×10^{-7}	4.07×10^{-4}	8.25×10^{-8}	4.14×10^{-3}
	贡献值	0.02%	0.28%	89.85%	0.02%	0.02%	0.01%	9.81%	0.00%	100.00%

2 结果

由表 4 可以看出,对于全球变暖、富营养化、酸化和可吸入无机物指标,主要贡献都来自运营期的发电过程,这是因为对于这几种指标的主要贡献物质 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等大部分都是在燃煤发电过程中产生的,这是我国以煤为主要电力能源的实际情况决定的。对于可吸入无机物指标,设施建设过程对其贡献是除电力过程外的主要影响因素,但建设期相对较短,其影响在短期内可消失。对于中国资源消耗指标,主要贡献来自天然气生产过程,此外混凝土生产、工艺用水生产和氮气生产也有部分贡献。对于一次能源消耗指标,最大贡献来自氮气生产,其次为工艺用水生产和混凝土生产。对于固体废弃物指标,主要贡献来自混凝土生产、发电过程和氮气生产过程。对于淡水消耗指标,主要贡献来自发电过程、工艺用水生产和氮气生产过程。

由表 6 可知,对于整个生命周期而言,运营期的环境影响要高于建设期,对于各类环境影响类别而言,一次能源消耗指标的贡献最大,固体废弃物指标也占一定比例。

综上所述,通过减少氮气生产、工艺用水生产和混凝土生产中一次能源的消耗,对于混凝土生产、发电过程和氮气生产过程中产生的固体废弃物进行综合利用,可有效降低 DUF_6 转化设施整个生命周期对环境的影响。

3 讨论

LCA 为国际公认的一种较权威的环境评价方法,在国外各领域得到迅速发展,国内工业领域研究较多,而对于核设施 LCA 尚未开展相关研究。本文借鉴国内外相关成果,尝试对 DUF_6 转化设施开展 LCA 评价,通过评价,找出了 DUF_6 转化设施生命周期中环境影响的主要影响类型以及相应的影响过程。LCA 作

为一种环境影响分析方法和工具,不仅可以识别对环境影响最大的过程和生命周期阶段,而且可以对能耗、物耗进行全面平衡,既可降低产品成本,又可帮助改进设计^[1,17-48]。本文只是对 DUF₆ 转化设施进行了初步生命周期评价,今后还将利用 LCA 开展更详细、全面的评价,为不断提高核设施的环境效益和社会的可持续发展作出贡献。

参考文献

- [1] Institution B S. BS EN ISO 14040: 2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework [M]. 2006.
- [2] Thmos D Foust. Environmental life cycle assessment. Cincinnati: The McGraw-Hill Companies. 1996: 5-15.
- [3] 刘伟. 典型蓄电池生命周期评价研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [4] 郭金花. 典型设施蔬菜生产系统水肥、农药投入及环境影响的生命周期评价 [D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [5] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [6] 项东. 煤制烯烃过程技术经济分析与生命周期评价 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] 谢小天, 孙荃, 张培栋, 等. 城市生活垃圾处理方式生命周期评价的比较研究 [J]. 环境污染与防治, 2015, 37(4): 106-110.
- [8] 黄希望, 罗小勇, 李轶, 等. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析 [J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 90-94.

- [9] 杨洁, 王洪涛, 周君. 铁路运输生命周期评价初探 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(9): 1029-1034.
- [10] 罗小勇, 黄希望, 王大伟, 等. 生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述 [J]. 环境工程, 2013, 31(4): 118-122.
- [11] 钱宇, 杨思宇, 贾小平, 等. 能源和化工系统的全生命周期评价和可持续性研究 [J]. 化工学报, 2013, 64(1): 133-147.
- [12] 洪竞科, 王要武, 常远. 生命周期评价理论及在建筑领域中的应用综述 [J]. 工程管理学报, 2012, 26(1): 17-22.
- [13] 环境保护部(国家核安全局), 国家发展和改革委员会, 财政部等. 核安全与放射性污染防治“十三五”规划及 2025 年远景目标 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [14] U. S. Department of Energy. Final environmental impact statement for construction and operation of a depleted uranium hexafluoride conversion facility at the portsmouth, Ohio, site [R]. DOE/EIS-0360, 2004
- [15] 国家统计局. 环境统计数据 [OL]. <http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjl/2010/>
- [16] International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Energy and carbon emissions inventories database [OL]. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/TransitiontoNewTechnologies/EnergyCarbonDatabase.cn.html>.
- [17] 肖汉雄, 杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用 [J]. 城市与环境研究, 2018, 5(1): 88-105.
- [18] 韩润平, 魏爱卿, 陆雍森. 环境影响评价的工具——生命周期评价 [J]. 郑州大学学报(理学版), 2003, 35(2): 83-88.

收稿日期: 2018-12-16

(上接第 327 页)

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. CJ/T 206—2005 城市供水水质标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [2] 国家环境保护总局. HJ/T 61—2001 辐射环境监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [3] 国家环境保护总局. HJ/T 164—2004 地下水环境监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [4] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GB 5750.13—2006 生活饮用水标准检验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. HJ 700—2014 水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [7] 中华人民共和国环境保护部. GB/T 11713—2015 高纯锗 γ 能谱分析通用方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [8] 中华人民共和国环境保护部. HJ 813—2016 水中钍-210 的分析方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [9] 赵新春, 马一龙, 雷家杰, 等. 某总 α 超标井水所致居民年剂量及卫生学评价 [J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(5): 539-541.
- [10] United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects

of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation [R]. UNSCEAR 2008 Report. New York: 2008.

- [11] World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed [M]. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2011.
- [12] 林莲卿, 马永忠. 对我国《生活饮用水卫生标准》GB 5749—85 中放射性指标的几点看法 [J]. 辐射防护, 1999, 19(3): 190.
- [13] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国水体中天然放射性核素浓度调查 [J]. 辐射防护, 1992, 12(2): 158-159.
- [14] 潘自强. 辐射安全手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation [R]. UNSCEAR 2000 Report. New York: 2000.
- [16] 北京市环境保护局. 北京市辐射环境质量报告书 [R]. 北京: 2001-2017.
- [17] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [18] 北京市地质矿产局. 北京市区域地质志 (1991 年一版一印) [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [19] World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality, 3rd ed [M]. World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2004.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14848—2017 地下水质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

收稿日期: 2019-02-01