

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20170504002

杜金秋, 王震, 林武辉, 等. 放射性核素水环境质量标准研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(5): 27-36

Du J Q, Wang Z, Lin W H, et al. Research progress of the water quality standards on radionuclides [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(5): 27-36 (in Chinese)

## 放射性核素水环境质量标准研究进展

杜金秋<sup>1,2,#</sup>, 王震<sup>1</sup>, 林武辉<sup>3</sup>, 关道明<sup>1,2</sup>, 姚子伟<sup>1,\*</sup>

1. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023

2. 中国海洋大学, 青岛 266100

3. 广西大学, 南宁 530004

收稿日期: 2017-05-04 录用日期: 2018-03-20

**摘要:** 地球环境中广泛存在的放射性核素对人类和其他物种产生辐射安全风险, 成为水环境质量的重要指标之一。随着人类生活水平和环境保护意识的提升, 以及核与辐射安全复杂的国际形势, 放射性核素水环境质量标准的关注度越来越高。饮用水水质标准中的放射性核素限值基于个人辐射剂量标准, 评估方法已经建立, 并在世界卫生组织、美国、加拿大和日本等国际组织和国家的饮用水水质标准中得到广泛应用。水环境质量标准中的放射性核素限值基于辐射环境、参考生物、个体单位时间内的辐射剂量限值, 对此各国际组织和国家相继开展了放射性核素的生态风险评价研究, 并逐步制定相关标准。与国际水平相比, 我国水环境质量标准存在放射性核素指标数量少、修订频率滞后、科学适用性有待提升等问题。在我国核能发展与生态文明建设的新形势下, 加强放射性核素的健康风险和生态风险评价研究, 建立健全水环境质量标准中放射性核素指标体系成为我国水环境研究的紧迫任务。

**关键词:** 放射性核素; 水环境质量标准; 风险评价; 辐射剂量

文章编号: 1673-5897(2018)5-027-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Research Progress of the Water Quality Standards on Radionuclides

Du Jinqiu<sup>1,2,#</sup>, Wang Zhen<sup>1</sup>, Lin Wuhui<sup>3</sup>, Guan Daoming<sup>1,2</sup>, Yao Ziwei<sup>1,\*</sup>

1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

2. Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Guangxi University, Nanning 530004, China

Received 4 May 2017 accepted 20 March 2018

**Abstract:** Widespread radionuclides in environment produce radiation risk to human and other living beings, which have been considered as one of key indicators of water quality. With the increasing risks of radionuclides to humans and ecological environments, and the severe situations of international nuclear and radiation safety, radionuclide index in water quality standards is attracting more and more attention. The calculation methods of radionuclides limits in drinking water quality standards have been developed based on individual radiation dose rate, and

**基金项目:** 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室开放课题(SKLEC-KF201712); 国家海洋局海洋沉积与环境地质重点实验室开放基金资助项目(MASEG201709); 国家海洋局海洋生态环境科学与工程重点实验室开放基金资助项目(MESE-2017-03)

**作者简介:** 杜金秋(1984-), 女, 博士, 工程师, 研究方向为海洋放射污染生态化学, E-mail: jinqiu609@163.com;

\* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zwyao@nmemc.org.cn

# 共同通讯作者 (Co-corresponding author), E-mail: jinqiu609@163.com

applied widely by international organizations, as well as the United States, Canada and other countries. According to the radiation exposure, reference organisms and biological radiation dose, the radionuclides standards of water quality have been established gradually by several organizations and countries. Research progresses of water quality standards on radionuclides in China fall behind the other developed countries, and there exist many problems, such as the lack of radionuclide indicator and the lag in revision frequency and applicability. Under the new situation of nuclear energy development and ecological civilization construction in China, the urgent tasks are to enhance the health risk and ecological risk assessment of radionuclides, and to improve and perfect the radionuclide index system of water quality.

**Keywords:** radionuclides; water quality standards; risk assessment; radiation dose

水是生命之源,水的质量直接关系到人类和非人类物种的健康与生存。为此,各个国家和国际组织相继制定了保护人类健康和环境安全的各类水环境质量标准,并对应开展健康与生态风险评价研究。放射性污染与微生物污染和化学污染并列,成为影响水环境质量的三大因素之一,因此放射性核素已经成为水环境质量标准的重要指标<sup>[1-2]</sup>。水中的放射性核素包含天然和人工来源两类,天然放射性核素包括<sup>40</sup>K、天然钍、铀及其衰变产物,其中<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th、<sup>234</sup>U、<sup>238</sup>U和<sup>210</sup>Pb等由自然过程(例如从土壤中吸收)或涉及天然放射性物质的工艺过程(例如矿物开采和加工,以及磷肥生产等)产生,在水环境中普遍存在;人工放射性核素是人类核利用活动的产物,其中<sup>3</sup>H、<sup>137</sup>Cs、<sup>90</sup>Sr和<sup>239-240</sup>Pu等通过核燃料设施的循环排放,常规或突发的制造和利用过程排放(放射性核素在医学或工业中的生产和使用),以及核泄漏事故等进入水循环体系,在部分水环境中有所检出。

放射性核素水环境质量标准制定最为全面的是关系人类健康的饮用水水质标准。除饮用水外,其他水环境质量标准中的放射性核素指标还不够完善,然而放射性核素水平是水环境质量监测的重要工作之一,因此基于调查深入探究放射性核素对非人类物种的影响机制与效应,有效开展放射性核素生物辐射剂量限值和生态风险评价研究,对于科学制定放射性核素水环境质量标准意义重大<sup>[3]</sup>。我国关于放射性核素的水环境质量标准制定起步较晚,相关法规和标准与国际水平相比存在一定差距。随着我国核能源需求与开发日益增长,以及公众对生活质量与生态环境要求的日益提升,水环境中的放射性核素逐渐成为公众关注的一个焦点。建立健全放射性核素水环境质量标准体系,对我国公众健康、环境安全和社会的发展具有重要的现实意义。本文针对水环境质量标准中的放射性核素限值研究进展进

行综述,以期对我国放射性核素水环境质量标准制定提供参考与借鉴。

## 1 放射性核素饮用水水质标准

### 1.1 个人辐射剂量与健康风险评价

饮用水中的放射性核素对人类产生健康风险,摄入放射性核素超标的饮用水,会通过内照射严重影响人类健康。研究证据表明人类受到的辐射剂量超过100 mSv时,患癌症的风险明显增加<sup>[4]</sup>,低于该剂量值时,通过流行病学的研究尚未确定风险程度。国际癌症研究机构(IARC)对通过饮用水途径导致的有毒物质的风险评价建立了放射性核素通过饮用水所致的平均个人健康风险评价模型<sup>[5-6]</sup>,评价方法如公式(1)所示:

$$R_i = 1.25 \times 10^{-2} \times D_i \quad (1)$$

$$D_i = \Delta C_i \times u^a \times g^a$$

式中, $R_i$ 为放射性核素*i*通过饮用水途径产生的平均个人致癌年风险, $y^{-1}$ ;  $D_i$ 为放射性核素*i*通过饮用水途径所产生的年有效剂量, $Sv \cdot y^{-1}$ ;  $1.25 \times 10^{-2}$ 为辐射诱发人体癌症死亡的概率, $Sv^{-1}$ ;  $u^a$ 为*a*年龄组个人饮用水年摄入量, $L \cdot y^{-1}$ ;  $g^a$ 为*a*年龄组通过饮用水途径的剂量转换因子, $Sv \cdot Bq^{-1}$ ;  $\Delta C_i$ 为放射性核素*i*在饮用水中的活度, $Bq \cdot L^{-1}$ 。

由于不同地区不同个体饮食偏好、饮用水摄入量、生活方式等方面的差异,导致放射性核素引起的健康风险存在区域和个体差异。基于健康风险评价结果,WHO评估摄入食品和饮用水而导致的辐射水平年有效剂量为0.1 mSv,由此得出饮用水中放射性核素的最高活度<sup>[7]</sup>。Gharbi等<sup>[8]</sup>利用上述评估方法对突尼斯桶装矿泉水中<sup>234</sup>U和<sup>238</sup>U活度水平进行监测,得出2种核素的活度低于WHO推荐的最高水平。Fatima等<sup>[9]</sup>对巴基斯坦的11种销售桶装水中的放射性核素进行监测,发现不同年龄组对不同核素的有效

剂量不同,均低于 WHO 推荐的  $0.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ 。根据模型给出的辐射剂量和健康风险之间的线性关系,那么只有控制在安全阈值以下才可避免风险,长期研究表明, $0.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ 的辐射剂量导致的致癌风险水平非常低,预期不会对人类产生任何明显的不利健康影响<sup>[10-11]</sup>,因此  $0.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ 通常作为个人辐射剂量标准( $D$ )用于放射性核素饮用水水质标准的制定<sup>[12]</sup>。

### 1.2 饮用水水质标准中放射性核素限值

放射性核素饮用水水质标准基于个人辐射剂量标准,评估方法已经建立,可追溯于最早的放射性防护法规和标准中。各国际组织和国家饮用水相关法规和标准在公众辐射剂量基础上制定了不同种类的标准限值,具体包括最大允许浓度(MPC)、最大接受浓度(MAC)、指导值(GL)、行动值(AL)、干预值(IL)、导出干预值(DIL)、最大污染值(MCL)、最大接受值(MAV)等,不同种类限值的推导方法基本相同,以核素  $i$  的 MPC 推导为例,计算方法如公式(2)所示<sup>[13]</sup>:

$$\text{MPC}_i = \frac{D}{f_i \cdot \text{FI} \cdot \text{DC}_i} \quad (2)$$

式中,MPC 为最大允许浓度,  $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $D$  为每个个体单位时间内的最大辐射剂量,或称辐射剂量,  $\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ ;  $f$  为污染水摄取分数(范围为  $0.01 \sim 1.00$ ); FI 为

单位时间内摄取水的量,  $\text{L}\cdot\text{y}^{-1}$ ; DC 为剂量转换因子,  $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ 。

#### 1.2.1 世界卫生组织(WHO)饮用水水质准则

最新版 WHO 饮用水水质准则<sup>[7]</sup>(第四版第一次修订)中放射性核素的筛选和指导值均基于国际辐射防护委员会(ICRP)的最新建议<sup>[12]</sup>,采用  $0.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ 作为个人辐射剂量标准(IDC),基于 IDC 值要求,WHO 设定了两层标准,一是适用于非常低水平的辐射情况,其中总  $\alpha$  活度不高于  $0.5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ,总  $\beta$  活度不高于  $1.0 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ;二是当辐射水平较高时,针对具体放射性核素给出的限值,包括环境中普遍存在的天然放射性核素以及人类核利用活动排放进入环境的人工放射性核素共 17 种<sup>[7]</sup>。标准限值的设定,以  $^{137}\text{Cs}$  为例,  $D = 0.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ ,  $f_i = 1$ ,  $\text{DC} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ,  $\text{FI} = 730 \text{ L}\cdot\text{y}^{-1}$ (WHO 标准消耗率:  $2 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ ),利用公式(2)计算指导值(GL)可得,

$$\begin{aligned} \text{GL}_i &= \frac{D}{f_i \cdot \text{FI} \cdot \text{DC}_i} = \frac{0.1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}}{1 \times 730 \text{ L}\cdot\text{y}^{-1} \times 1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}} \\ &= 10.5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

由此计算获得的放射性核素限值列于表 1,该指导值适用于正常暴露情况,不适用于放射性核素泄漏导致的紧急暴露情况。

表 1 WHO 饮用水水质准则中放射性核素限值(单位:  $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Table 1 Radionuclides limits in Drinking Water Guidelines of WHO ( $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ )

类别 Items	放射性核素 Radionuclides	指导值 GL
天然放射性铀 Natural radioactive uranium	$^{238}\text{U}$	10
	$^{234}\text{U}$	1.0
天然放射性铀衰变系 Natural radioactive uranium decay system	$^{230}\text{Th}$	1.0
	$^{226}\text{Ra}$	1.0
	$^{210}\text{Pb}$	0.1
	$^{210}\text{Po}$	0.1
天然放射性钍 Natural radioactive thorium	$^{232}\text{Th}$	1.0
天然放射性钍衰变系 Natural radioactive thorium decay system	$^{228}\text{Ra}$	0.1
	$^{228}\text{Th}$	1.0
人工放射性核素,核反应堆和核试验 Artificial radionuclides, nuclear reactors and nuclear tests	$^{134}\text{Cs}$	10
	$^{137}\text{Cs}$	10
	$^{90}\text{Sr}$	10
人工放射性核素,核反应堆、核试验、核医疗 Artificial radionuclides, nuclear reactors, nuclear tests, nuclear medicine	$^{131}\text{I}$	10
人工放射性核素,核反应堆、核试验、宇宙射线 Artificial radionuclides, nuclear reactors, nuclear tests, cosmic rays	$^3\text{H}$	10 000
天然放射性核素,宇宙射线 Natural radionuclides, cosmic rays	$^{14}\text{C}$	100
人工放射性核素,核反应堆、核试验、铀矿 Artificial radionuclides, nuclear reactors, nuclear tests, uranium mines	$^{239}\text{Pu}$	1.0
人工放射性核素,核反应堆 Artificial radionuclides, nuclear reactors	$^{241}\text{Am}$	1.0

执行 WHO 饮用水水质准则,评估和管控饮用水中放射性核素的健康风险,首先要求满足  $0.1 \text{ mSv} \cdot \text{y}^{-1}$  的 D 值标准,其次是对总  $\alpha$  和总  $\beta$  进行筛选,如果筛选值符合标准限值,无需采取任何行动,如果筛选值超标,要求对具体放射性核素进行分析,并与指导值比较,基于进一步评估的结果决定是否需要采取措施,通过控制输入和改变水源地等途径有效降低辐射剂量。

### 1.2.2 饮用水水质标准中放射性核素限值比较

各个国家和国际组织针对饮用水水质标准中放射性核素限值的推导方法相同,但不同国家或地区面临的辐射环境不同,导致饮用水水质标准中放射性核素限值存在差异。针对普遍关注的总  $\alpha$ 、总  $\beta$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$  对部分国际组织和国家饮用水水质标准限值进行比较,结果列于表 2,其中总  $\alpha$  活度范围为  $0.1 \sim 1.0 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ,总  $\beta$  活度范围为  $0.5 \sim 1.0 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ , $^{226}\text{Ra}$  活度范围为  $0.19 \sim 20 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ , $^{90}\text{Sr}$  活度范围为  $0.3 \sim 10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ , $^{137}\text{Cs}$  活度范围为  $2.0 \sim 200 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总  $\alpha$  和总  $\beta$  标准限值最为全面,各个国际组织和国家基本处于同一水平,而具体放射性核素的标准限值差异显著,天然放射性核素  $^{226}\text{Ra}$  和人工放射性核素  $^{137}\text{Cs}$  的最高值与最低值均相差 2 个数量级。

世界卫生组织和欧盟等国际组织,以及美国、日本、加拿大等国家的饮用水水质标准代表了当今世界的最高水平,伴随着国际形势与环境问题的发展与需求还在不断地修订完善。2011 年日本福岛核泄漏事故以后,水中的放射性污染成为世界范围的

焦点问题,对常规和突发情况下的标准限值提出了新的要求。针对福岛核事故泄漏,国际原子能机构 (IAEA) 明确饮用水中放射性核素的干预值 (IL) 采用更高的数值,其中  $^{137}\text{Cs}$  活度由原来的  $200 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  调整为  $2000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,该值是基于  $10 \text{ mSv} \cdot \text{y}^{-1}$  的最大剂量获得的,适用于核与辐射应急的早期行动<sup>[21]</sup>。

## 2 放射性核素水环境质量标准

### 2.1 生物辐射剂量与生态风险评价

水环境中的放射性核素对非人类物种安全产生威胁,随着社会生态环境保护意识的加强,放射性核素对非人类物种影响的关注度随之上升。研究表明许多生物由于生活习性不同,受到的辐射剂量明显大于人类,而部分生物对辐射的敏感度也高于人类,因此需要针对不同水环境中的不同生物开展生物辐射剂量限值与生态风险评价研究。早在 1976 年国际原子能机构 (IAEA) 就开展了电离辐射对水生生态系统影响的研究<sup>[22]</sup>,20 世纪 80 年代末,美国、加拿大等国开始关注电离辐射对非人类物种的影响评价与防护管理问题,美国国家辐射防护与测量委员会 (NCRP) 在第 109 号报告中给出了水生生态系统的辐射剂量推荐值<sup>[23]</sup>。20 世纪 90 年代末,在可持续发展理念的引导下,联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR)、国际辐射防护委员会 (ICRP)、欧盟等国际组织陆续开展电离辐射对非人类物种的生物辐射剂量限值与生态风险评价研究,发布了评价电离辐射对非人类物种影响的框架<sup>[24]</sup>,并建立了生态风险评价模型和方法,其中欧盟开发的 ERICA 工具应用最为广泛<sup>[25-26]</sup>。

表 2 饮用水水质标准中放射性核素限值比较 (单位:  $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Table 2 Comparison of radionuclides limits in drinking water quality standards ( $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ )

组织/国家 Organizations/countries	总 $\alpha$ Total Alpha	总 $\beta$ Total Beta	$^{226}\text{Ra}$ Radium-226	$^{90}\text{Sr}$ Strontium-90	$^{137}\text{Cs}$ Cesium-137	备注 Remark
世界卫生组织 <sup>[7]</sup> WHO <sup>[7]</sup>	0.5	1.0	1.0	10	10	GL
欧盟 <sup>[14]</sup> EU <sup>[14]</sup>	0.1	1.0	0.5	4.9	11	DC
美国 <sup>[15]</sup> USA <sup>[15]</sup>	0.56	—	0.19	0.3	7.4	MCL
加拿大 <sup>[16]</sup> Canada <sup>[16]</sup>	0.5	1.0	0.5	5.0	10	MAC
日本 <sup>[17]</sup> Japan <sup>[17]</sup>	1.0	—	20	—	200	GL
乌克兰 <sup>[18]</sup> Ukraine <sup>[18]</sup>	—	—	—	2.0	2.0	AL
新西兰 <sup>[19]</sup> New Zealand <sup>[19]</sup>	0.1	0.5	—	—	—	MAV
中国 <sup>[20]</sup> China <sup>[20]</sup>	0.5	1.0	—	—	—	GL

注:GL、DC、MCL、MAC、AL、MAV 分别代表指导值、指令浓度、最大污染值、最大接受浓度、行动值、最大接受值。

Note:GL, DC, MCL, MAC, AL, MAV represent Guideline Level, Directive Concentration, Maximum Contaminant Level, Maximum Acceptable Concentration, Action Value, Maximum Acceptable Value, respectively.

放射性核素的生物辐射剂量限值基于生物辐射效应,生物辐射效应不仅与生物种类、生物最大辐射剂量( $D$ )有关,同时还受到辐射类型的影响,即涉及到剂量转换因子(DC),不同水环境对应的参考生物不同,不同生物单位时间内的最大辐射剂量( $D$ )和剂量转因子(DC)存在差异,导致了放射性核素的生物辐射剂量限值研究的复杂性。通过 Monte-Carlo 方法计算可以得出不同形体生物对  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  射线的吸收比例,再结合放射性核素的辐射能量即可获得不同放射性核素对于不同参考生物的量转换因子(DC)<sup>[27]</sup>。在获得内外剂量转换因子基础上,ERICA 工具根据参考生物和水环境中放射性核素活度,利用公式(3)和(4)计算获得不同放射性核素对不同参考生物的内外照射的辐射剂量<sup>[28]</sup>。

$$D_{int} = \sum C_b \cdot DC_{int} \quad (3)$$

$$D_{ext} = \sum v_z \cdot \sum C_{ref} \cdot DC_{ext} \quad (4)$$

式中,  $D_{int}$  和  $D_{ext}$  分别表示内外照射的辐射剂量,  $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $C_b$  和  $C_{ref}$  分别表示生物和水环境中放射性核素活度,  $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $v$  表示参考生物在水环境中的暴露时长与生命时长的比例。

由于放射性核素导致电离辐射效应的特殊性,生物辐射剂量限值与生态风险评估研究一直受到限制,直至 ERICA 项目的顺利完成,实现了对非人类物种辐射剂量所致的评估,当生物无辐射效应时,对应的辐射剂量即为安全限值<sup>[26]</sup>。参考生物一般分为陆地生态系统、淡水生态系统和海洋生态系统三大类,要求具有代表性,能够为每一类的生物辐射剂量计算提供基础,同时对参考生物辐射剂量的计算要求能够定性和定量反映辐射生物效应的强度<sup>[25]</sup>。ERICA 的评估模块分为 3 层,每层相互独立,并且在输入数据的要求、评估程序的复杂程度、评估终点的评价方法、评估结果的保守程度等方面各不相同<sup>[28]</sup>。在第一层中,利用公式(5)计算放射性核素的风险商数 RQ,

$$RQ = \sum \frac{M_n}{EMCL_n} \quad (5)$$

$M_n$ 表示放射性核素活度,  $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $EMCL_n$ 表示水环境中放射性核素活度限值。如果  $RQ < 1$ ,表明放射性核素的生态风险在安全范围内,如果  $RQ > 1$ ,表明某种放射性核素对生态环境安全构成了威胁,将转入第二层评估。在第二层中,使用者获得更多权限,包括添加数据库以外的放射性核素和参考生物,修改参数富集因子(CR)和分配系数( $K_d$ )的数值等,同时定义风险商数  $RQ_{org}$ ,利用公式(6)计算,

$$RQ_{org} = \frac{DR_{org}}{SDR} \quad (6)$$

$DR_{org}$ 表示生物辐射剂量,  $SDR$ 表示生物辐射剂量限值。输入数据后,ERICA 工具自动计算出  $RQ_{org}$  的期望值和保守值。如果所有待评估生物的保守  $RQ_{org} < 1$ ,表明生物辐射剂量超过限值的概率非常小,如果保守  $RQ_{org} > 1$ ,而期望  $RQ_{org} < 1$ ,表明生物辐射剂量超过限值的 1% ~ 5%,系统建议修改条件重新评估;如果期望  $RQ_{org} > 1$ ,表明生物体辐射剂量超过限值,将转入第三层评估。在第三层中,使用者在第二层权限的基础上,允许定义添加变量的概率分布函数,同时生物辐射剂量限值不再是评估的终点,评估结果也不是简单的是或否,而是允许使用者访问 ERICA 数据库中关于生物辐射效应的所有文献,参照相关数据,并在资深专家或学者的协助下对生物辐射剂量的预测结果做出判断。

根据参考生物受到辐射途径的不同,陆生生物一般仅考虑由饮水引起的内照射辐射剂量,由此 ERICA 工具对陆生生物给出的辐射剂量限值为  $0.25 \text{ mGy} \cdot \text{d}^{-1}$ <sup>[29]</sup>;水生生物则需考虑内照射和外照射所致的总辐射剂量,部分国际组织和国家针对不同的水环境开展研究,给出了部分物种的辐射剂量安全限值,结果列于表 3,其中国际原子能机构(IAEA)和联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)对水生生物的建议辐射剂量限值均为  $10 \text{ mGy} \cdot \text{d}^{-1}$ ,美国能源部同时给出了海洋植物和海洋动物的辐射剂量限值,比较可见海洋生物的辐射剂量限值低于其他水生生物,表明放射性核素对海洋生物的辐射效应更加显著。

表 3 水生生物辐射剂量限值(单位: $\text{mGy} \cdot \text{d}^{-1}$ )  
Table 3 Aquatic biological dose rate limits ( $\text{mGy} \cdot \text{d}^{-1}$ )

组织/国家	水生生物	水生动物	海洋植物	海洋动物
Organizations/countries	Aquatic organism	Aquatic animal	Marine plant	Marine animal
国际原子能机构(IAEA) <sup>[30]</sup>	10	—	—	—
联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR) <sup>[31]</sup>	10	10	—	—
美国能源部(USDOE) <sup>[32]</sup>	—	10	2.7	0.27

进一步的研究针对不同物种展开,指出生物辐射剂量限值为水鸟<远洋鱼类<底栖鱼类<底栖软体动物<浮游植物,可见生物辐射效应与生物营养级结构有关,并表现出随营养级放大的效应<sup>[29]</sup>。同时,由于不同水环境的辐射条件不同,不同生物对不同放射性核素的富集因子和分配系数不同,导致不同区域不同水环境中不同放射性核素的风险商值不同,其中生态风险普遍较高的为天然放射性核素<sup>226</sup>Ra、<sup>210</sup>Po、<sup>238</sup>U和<sup>234</sup>U,以及人工放射性核素<sup>90</sup>Sr、<sup>14</sup>C、<sup>137</sup>Cs和<sup>3</sup>H<sup>[33]</sup>。

## 2.2 水环境质量标准中放射性核素限值

基于水环境涉及生物种类的多样性,放射性核

素进入水环境后迁移转化的复杂性,不同放射性核素半衰期性质的特异性,以及辐射所致电离辐射效应的特殊性,放射性核素水环境质量标准研究与化学污染物相比进展较为缓慢。各国对水环境的分类不同,不同水环境根据用途及生物类群关注的放射性核素种类不同,各国水环境质量标准设定放射性核素指标情况不一,本文仅就美国地表水、地下水和排放污水中放射性核素的标准限值情况进行整理,结果列于表4,比较可见,不同水环境质量标准的放射性核素指标数量和种类不同,其中排放污水涵盖比较全面;同时,同一放射性核素指标在不同水环境中的标准限值差异显著。

表4 美国水环境质量标准中放射性核素限值(单位:Bq·L<sup>-1</sup>)  
Table 4 Radionuclides limits in water quality standards of USA (Bq·L<sup>-1</sup>)

水环境质量标准 Water quality standards	放射性核素 Radionuclides	限值 Limits	备注 Remark
地下水 <sup>[34]</sup> Ground water <sup>[34]</sup>	总 α Total α	555	—
	<sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra	185	辐射剂量 Sv·y <sup>-1</sup> Radiation dose, Sv·y <sup>-1</sup>
	<sup>90</sup> Sr	0.04	—
	<sup>230</sup> Th	185	—
	<sup>3</sup> H	0.04	辐射剂量 Sv·y <sup>-1</sup> Radiation dose, Sv·y <sup>-1</sup>
地表水 <sup>[35]</sup> Surface water <sup>[35]</sup>	总 U Total U	30	μg·L <sup>-1</sup>
	总 α Total α	555	—
	总 β Total β	1 850	—
	<sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra	185	辐射剂量 Sv·y <sup>-1</sup> Radiation dose, Sv·y <sup>-1</sup>
	<sup>226</sup> Ra	111	—
	Rn	1.11×10 <sup>4</sup>	—
	<sup>3</sup> H	7.4×10 <sup>5</sup>	—
	<sup>90</sup> Sr	296	—
	<sup>3</sup> H	3.7×10 <sup>4</sup>	—
	<sup>14</sup> C	1.11×10 <sup>4</sup>	—
排放污水 <sup>[36]</sup> Discharge of sewage <sup>[36]</sup>	<sup>60</sup> Co	111	每周 Every Week
	<sup>90</sup> Sr	18.5	每天 Every Day
	<sup>131</sup> I	37	每天 Every Day
	<sup>134</sup> Cs	33.3	每天 Every Day
	<sup>137</sup> Cs	37	每天 Every Day
	<sup>226</sup> Ra	2.22	每周 Every Week
	<sup>232</sup> Th	1.11	每周 Every Week
	<sup>235</sup> U	11.1	每天 Every Day
	<sup>238</sup> U	11.1	每天 Every Day
	<sup>238</sup> Pu/ <sup>239</sup> Pu	0.74	每周 Every Week
<sup>241</sup> Am	0.74	每周 Every Week	

当前,针对水环境中的放射性核素相关研究尚处于含量与分布的监测调查、不同介质间迁移转化、以及生态风险评价等研究阶段,而水环境质量标准的制定是水环境管理的基础,是科学研究与经济发展需求和环境保护目标等相结合的产物,加之放射性核素污染的特殊性,因此各个国家放射性核素水环境质量标准研究与制定仍在逐步发展完善,部分发达国家的先进技术与经验为当前我国放射性核素水环境质量标准体系的建立健全提供了科学参考与借鉴。

### 3 我国放射性核素水环境质量标准现状与展望

我国水环境质量标准体系于 20 世纪 80 年代开

始建立,并逐步与国际接轨发展完善,然而关于放射性核素水环境质量标准限值研究与制定进展较为缓慢。我国水环境质量标准体系根据来源与用途划分为地表水、地下水、海水、饮用水、城市用水、农田灌溉用水、渔业用水等,分类细致合理,然而其中仅部分标准涉及到放射性指标,从指标种类和数量情况比较来看,我国放射性核素水环境质量标准与国际水平存在一定差距,部分标准尚未设定放射性相关指标,部分标准仅设定了总  $\alpha$  和总  $\beta$  放射性活度限值,而无具体放射性核素指标和限值,例如《地下水质量标准》(GBT 14848—2017)<sup>[37]</sup>和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)<sup>[20]</sup>等只设定了总  $\alpha$  和总  $\beta$  限值,《海水水质标准》(GB 3097—1997)设定了 5 种

表 5 我国水环境质量标准中放射性核素限值(单位:  $Bq \cdot L^{-1}$ )  
Table 5 Radionuclides limits in water quality standards in China ( $Bq \cdot L^{-1}$ )

标准 Standards	放射性核素 Radionuclides	限值 Limits	备注 Remark
地表水环境质量标准(GB3838—2002) <sup>[39]</sup> Environmental quality standards for surface water <sup>[39]</sup>	—	—	—
农田灌溉水质标准(GB5084—2005) <sup>[40]</sup> Standards for irrigation water quality <sup>[40]</sup>	—	—	—
饮用净水水质标准(CJ94—2005) <sup>[41]</sup> Water quality standard for fine drinking water <sup>[41]</sup>	—	—	—
渔业水质标准(GB11607—89) <sup>[42]</sup> Water quality standard for fisheries <sup>[42]</sup>	—	—	—
地下水质量标准(GB/T 14848—2017) <sup>[37]</sup> Quality standard for ground water <sup>[37]</sup>	总 $\alpha$ Total $\alpha$	0.5	III 类 Third Level
	总 $\beta$ Total $\beta$	1.0	III 类 Third Level
	<sup>60</sup> Co	0.03	—
海水水质标准(GB3097—1997) <sup>[38]</sup> Sea water quality standard <sup>[38]</sup>	<sup>90</sup> Sr	4.0	—
	<sup>106</sup> Ru	0.2	—
	<sup>134</sup> Cs	0.6	—
	<sup>137</sup> Cs	0.7	—
生活饮用水卫生标准(GB5749—2006) <sup>[20]</sup> Standards for drinking water quality <sup>[20]</sup>	总 $\alpha$ Total $\alpha$	0.5	指导值
	总 $\beta$ Total $\beta$	1.0	Guideline Level
	<sup>226</sup> Ra	1.1	—
饮用天然矿泉水(GB8537—2008) <sup>[43]</sup> Drinking natural mineral water <sup>[43]</sup>	总 $\beta$ Total $\beta$	1.50	—
	总 $\alpha$ Total $\alpha$	0.5	限于以地表水或地下水为生产用源水加工的包装饮用水 Packaged drinking water using surface water or groundwater as raw water for production
食品安全国家标准-包装饮用水(GB 19298—2014) <sup>[44]</sup> Food safety standard- packaging drinking water <sup>[44]</sup>	总 $\beta$ Total $\beta$	1.0	—
	总 $\alpha$ Total $\alpha$	1.0	—
污水综合排放标准(GB8978—1996) <sup>[45]</sup> Integrated wastewater discharge standard <sup>[45]</sup>	总 $\beta$ Total $\beta$	10	—
城市供水水质标准(CJ/T 206—2005) <sup>[46]</sup> Water quality standards for urban water supply <sup>[46]</sup>	总 $\alpha$ Total $\alpha$	0.1	—
	总 $\beta$ Total $\beta$	1.0	—

人工放射性核素( $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{60}\text{Co}$  和  $^{106}\text{Ru}$ )的限值<sup>[38]</sup>,具体见表 5,已经无法满足水环境中天然和人工放射性核素普遍存在的实际需求。从修订频率与执行措施来看,我国放射性核素水环境质量标准与国际水平差距更为明显,国际组织和发达国家通常根据科学技术发展和人类生活质量提高的需求,相关标准在实施一段时间后,将进行复审修订,例如美国的国家标准每隔 3 年复审修订一次,而我国部分 20 年前的标准还在沿用,已经无法满足我国快速发展与社会法制化建设的需求。

近年来我国核工业发展迅速、成果丰硕,放射性核素正悄然影响着我们的生活,国务院批复的《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及 2025 远景目标》明确要求至 2025 年核安全监管水平大幅提升,同时有效保障核安全、环境安全和公众健康,确保我国辐射环境质量保持良好<sup>[47]</sup>。该目标的设定对我国放射性核素相关标准提出了新的要求,尤其是水环境质量标准将面临新的挑战,如何从对人类健康和环境安全的影响角度,对标准的放射性核素指标进行合理规划与设置,提升水环境放射性核素生态风险评价研究与安全阈值的科学性与适用性,推进我国放射性核素水环境质量标准制定与修订成为我国水环境研究迫切需要解决的问题。

针对我国饮用水水质标准现状,规定在放射性指标总  $\alpha$  和总  $\beta$  活度超出筛查水平时应进行放射性核素分析与评价,但《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)并未设定相关放射性核素的限值,建议参考 WHO 和欧美的饮用水水质标准,首先针对我国饮用水开展放射性核素调查,其次确定饮用水中常见的或含量较高的或经人类活动影响可能进入饮用水的天然和人工放射性核素指标 15~20 种,最后根据个人辐射剂量限值和我国人均饮用水摄入量,利用公式(1)推导出相关放射性核素的饮用水标准限值。

针对我国水环境质量标准和生态风险评价研究,20 世纪 80 年代有关生物辐射效应与辐射剂量的研究开始起步,包括通过利用模型计算水生生物的辐射剂量<sup>[48]</sup>,针对核电站液态流出物评估海洋生物所受的辐射剂量<sup>[49]</sup>,利用 ERICA 工具和 RESRAD-BIOTA 程序对核电站邻近区域陆生和海洋生物进行辐射影响评价和生态风险评价<sup>[50-52]</sup>,进而估算核电站放射性流出物中主要放射性核素的环境安全浓度限值<sup>[53]</sup>。截至目前,我国仍未建立有关

生物辐射效应的水环境辐射剂量生态风险评价体系,建议针对我国核能发展和生态文明建设需求,加快开展放射性核素的生物辐射效应与生态风险评价研究。首先,基于当前研究现状,确定不同水环境的参考生物,按照陆生生物、淡水生物和海洋生物划分,依据营养级分别确定具有代表性的 10 类生物,作为生态风险评价研究的参考生物;其次,针对我国核能开发利用现状,对不同水环境中的放射性核素开展调查,确定各类水环境中常见和典型的天然和人工放射性核素 15~20 种,作为生态风险评价研究的目标核素;再次,针对不同水环境和目标核素开展富集因子和迁移转化研究;最后,开展现场调查与模拟实验相结合的形式,利用并改进现有辐射剂量与生物效应评价模型和方法,开展生态风险评价和生物毒理学研究,推导、验证并确定不同水环境不同放射性核素的生态安全阈值,进而为制定并完善放射性核素水环境质量标准提供基础与支撑,从而保障我国人民健康和环境安全,实现核能发展与生态文明建设的和谐统一。

**通讯作者简介:**姚子伟(1973-),男,环境化学博士,研究员,主要研究方向为海洋污染生态化学,发表学术论文 50 余篇。

**共同通讯作者简介:**杜金秋(1984-),女,博士,工程师,研究方向为海洋放射污染生态化学。

#### 参考文献 (References):

- [1] IAEA. IAEA Safety Series No.115: International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources [S]. Vienna: IAEA, 1996
- [2] Codex Alimentarius Commission. Contaminants: Guideline Levels for Radionuclides in Food Following Accidental Nuclear Contamination for Use in International Trade, Supplemental to Codex Alimentarius. Vol. XVII. 1st ed. Joint FAO/WHO Food Standards Program [S]. Rome: Codex Alimentarius Commission, 2004
- [3] 孟伟,张远,郑丙辉.水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略[J].环境科学研究,2006,19(3):1-6  
Meng W, Zhang Y, Zheng B H. The quality criteria, standards of water environment and the water pollutant control strategy on watershed [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(3): 1-6 (in Chinese)
- [4] Brenner D J, Doll R, Goodhead D T, et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know [J]. Proceedings of the National A-

- cademy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(24): 13761-13766
- [ 5 ] Ajayi O S, Owolabi T P. Determination of natural radioactivity in drinking water in private dug wells in Akure, Southwestern Nigeria [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2008, 128(4): 477-484
- [ 6 ] 倪彬, 王洪波, 李旭东, 等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2010(1): 74-79
- Ni B, Wang H B, Li X D, et al. Water environmental health risk assessment in lake sources of drinking water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010(1): 74-79 (in Chinese)
- [ 7 ] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO [S]. Geneva: World Health Organization, 2017
- [ 8 ] Gharbi F, Baccouche S, Abdelli W, et al. Uranium isotopes in Tunisian bottled mineral waters [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, 101(8): 589-590
- [ 9 ] Fatima I, Zaidi J H, Arif M, et al. Measurement of natural radioactivity in bottled drinking water in Pakistan and consequent dose estimates [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2007, 123(2): 234-240
- [10] Tao Z, Zha Y, Akiba S, et al. Cancer mortality in the high background radiation areas of Yangjiang, China during the period between 1979 and 1995 [J]. *Journal of Radiation Research*, 2000, 41: 31-41
- [11] Nair R, Rajan B S, Jayalekshmi P, et al. Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study [J]. *Health Physics*, 2009, 96(1): 55-66
- [12] Larsson C M. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 [J]. *Annals of the ICRP*, 2007, 37(1): 2-4
- [13] Poschl M, Nollet L M L, Poschl M, et al. Radionuclide-Concentrations in Food and the Environment [M]. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006: 561-578
- [14] The Council of The European Union. Council Directive on the Quality of Water Intended for Human Consumption, Regulation of the European Parliament and of the Council. No 596. [R]. Brussels: The Council of The European Union, 2009
- [15] Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations. EPA 816-F-01-003. [S]. Washington, DC: EPA, 2017
- [16] Health Canada. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch [S]. Ottawa, Ontario: Health Canada, 2017
- [17] Canadian Nuclear Safety Commission. Decision of Emergency Preparedness of Nuclear Installations [S]. Ottawa, Ontario: Canadian Nuclear Safety Commission, 2001
- [18] United Nations. Economic and Social Council, Environmental Performance Review of Ukraine [R]. New York: United Nations, 1999
- [19] Ministry of Health New Zealand. Drinking-water Standards for New Zealand 2005 (Revised 2008) [S]. Wellington: Ministry of Health New Zealand, 2008
- [20] 中华人民共和国卫生部. GB 5749—2006, 中华人民共和国国家标准生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
- [21] International Atomic Energy Agency. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency [J]. *Disasters Preparedness & Mitigation in the Americas*, 2011, 27(2): 10
- [22] Woodhead D S. Effects of ionizing radiation on aquatic organisms and ecosystems [R]. White Plains, NY: International Atomic Energy Agency (IAEA), 1976
- [23] Templeton W L, Blaylock B G. Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms [M]// *Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms: Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements, 1991: 87-99
- [24] Valentin J. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP Publication 91 [J]. *Annals of the ICRP*, 2003, 33(3): 201-270
- [25] Larsson C M, Brewitz E, Jones C. Deliverable 2: Part 1 formulating the FASSET assessment context [R]. Brussels: EC, 2007
- [26] Larsson C M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99(9): 1364-1370
- [27] Ulanovsky A, Pröhl G. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota [J]. *Radiation & Environmental Biophysics*, 2006, 45(3): 203-214
- [28] Brown J E, Alfonso B, Avila R, et al. The ERICA Tool [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99(9): 1371-1383
- [29] Barescut J C, Gariel J C, Péres J M, et al. Impact assessment of ionising radiation on wildlife: Meeting the requirements of the EU birds and habitats directives [J]. *Radioprotection*, 2005, 40(1): 893-898
- [30] IAEA. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards. Technical Report Series No.332 [R]. Vienna: IAEA, 1992

- [31] Groen R S. Health effects due to radiation from the chernobyl accident. Annex D of UNSCEAR 2008: Sources and effects of ionizing radiation. Volume 2: Effects [J]. Archives of Neurology, 2011, 52(4): 373-378
- [32] Sazykina T G, Kryshev I I. Methodology for radioecological assessment of radionuclides permissible levels in the seas—Protection of human and marine biota [J]. Radioprotection, 2010, 37(C1): 899-902
- [33] Beresford N A, Hosseini A, Brown J E, et al. Assessment of risk to wildlife from ionising radiation: Can initial screening tiers be used with a high level of confidence [J]. Journal of Radiological Protection, 2010, 30(2): 265-281
- [34] US EPA. Water Quality Standards for Surface Waters [R]. Washington DC: EPA, 2002
- [35] Driscoll D G. Hydrology of the Black Hills Area, South Dakota [J]. USGS-U. S. Geological Survey, Water Resources, 2002, 24(10): 596-602
- [36] Cool D A, Peterson H T. Standards for protection against radiation, 10 CFR Part 20 [R]. Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1991
- [37] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 14848—2017, 中华人民共和国国家标准地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
- [38] 中华人民共和国环境保护部. GB 3097—1997, 中华人民共和国国家标准海水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [39] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB3838—2002, 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
- [40] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 5084—2005, 中华人民共和国国家标准农田灌溉水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [41] 中华人民共和国建设部. CJ 94—2005, 中华人民共和国城镇建设行业标准饮用净水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [42] 中华人民共和国环境保护部. GB11607—1989, 中华人民共和国国家标准渔业水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989
- [43] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 8537—2008, 中华人民共和国国家标准饮用天然矿泉水[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- [44] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 19298—2014, 食品安全国家标准——包装饮用水[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003
- [45] 中华人民共和国环境保护部. GB 8978—1996, 中华人民共和国国家标准污水综合排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996
- [46] 中华人民共和国建设部. CJ/T 206—2005, 中华人民共和国城镇建设行业标准城市供水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [47] 谢文川. 我国“十三五”将发布核电厂乏燃料处置规划[N]. 中国电力报, 2017-03-25(001). [http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201703/t20170327\\_957313.html](http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201703/t20170327_957313.html)
- [48] 李培泉. 水生生物的辐射剂量率——II. 计算模型及其应用[J]. 海洋湖沼通报, 1983(1): 76-82
- Li P Q. Radiation dose rates of aquatic organisms II. Calculated model and its application [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1983(1): 76-82 (in Chinese)
- [49] 唐文乔, 潘自强, 夏益华, 等. 核电站放射性液态流出物对大亚湾海洋生物所致的辐射剂量[J]. 科学通报, 1999, 44(17): 1846-1850
- Tang W Q, Pan Z Q, Xia Y H, et al. Radiation dose of radioactive liquid effluent from nuclear power station to marine life in Daya Bay [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(17): 1846-1850 (in Chinese)
- [50] 白晓平, 杜红燕, 周耀权, 等. RESRAD-BIOTA 和 ERICA 程序对陆生生物辐射影响评价的比较研究[J]. 辐射防护, 2015, 35: 53-57
- Bai X P, Du H Y, Zhou Y Q, et al. Comparative study on radiation impact assessment of terrestrial organisms by RESRAD-BIOTA and ERICA [J]. Radiological Protection, 2015, 35: 53-57 (in Chinese)
- [51] 张晓峰, 上官志洪, 赵锋. 阳江核电厂附近海域生物辐射影响评价研究[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 35-40
- Zhang X F, Shangguan Z H, Zhao F. Assessment of radiological impact on the marine organisms near Yangjiang Nuclear Power Plant [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 35-40 (in Chinese)
- [52] 叶素芬, 张珞平, 陈伟琪. 海洋放射性污染生态风险评估研究进展[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(6): 1-11
- Ye S F, Zhang L P, Chen W Q. Progress of ecological risk assessment for marine radioactive pollution [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(6): 1-11 (in Chinese)
- [53] 于宁, 郭佩芳. 基于 ERICA 框架的放射性核素环境安全浓度限值的计算[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(3): 19-23
- Yu N, Guo P F. Calculation of environmental safe concentration limit of radionuclides based on ERICA Project [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(3): 19-23 (in Chinese) ◆