

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.05.2015112406

邓飞, 林清, 王家玥, 等. 大亚湾核电基地氚的排放及其环境影响[J]. 环境化学, 2016, 35(5): 956-963
DENG Fei, LIN Qing, WANG Jiayue, et al. Tritium discharged by Daya Bay nuclear power plant and its environmental impact[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(5): 956-963

大亚湾核电基地氚的排放及其环境影响

邓 飞* 林 清 王家玥 李巧勤 莫光华 陈志东

(广东省环境辐射监测中心, 广州, 510300)

摘 要 1993—2014 年采集了大亚湾核电基地周围水蒸气、雨水、海水、监测井水、饮用水样品, 分析其氚的浓度和大亚湾核电氚的排放情况. 结果表明, 液态流出物受纳水体(西大亚湾)中能监测到高于本底水平的氚, 最大值为 $70.7 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均值范围为 $0.8\text{—}4.4 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 较文献报道的本底值约高一个数量级; 核反应堆周围监测井水中能监测到氚, 主要来源于气态流出物的排放和水汽交换, 随雨水进入监测井, 浓度范围 $<1.0\text{—}22.5 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 均无累积效应. 此外核电附近空气水蒸气中氚浓度较环境本底略高, 核电周围动植物体内的有机氚及饮用水中 ^3H 含量未发现异常.

关键词 大亚湾核电, 氚, 水蒸气, 雨水, 海水, 监测井水, 饮用水.

Tritium discharged by Daya Bay nuclear power plant and its environmental impact

DENG Fei* LIN Qing WANG Jiayue LI Qiaoqin MO Guanghua CHEN Zhidong
(Guangdong Environment Radiation Monitoring Center, Guangzhou, 510300, China)

Abstract: Tritium discharged by Daya Bay nuclear power plant (NPP) and the concentration in the environment medium nearby such as vapor, rain, sea water, monitoring well water, drinking water since 1993—2014 are reported in this paper. The results showed that the concentration of Tritium in sea water from west Daya Bay is higher than background. The max value is $70.7 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ and the average annual value is in the range of $0.8\text{—}4.4 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$. The range of Tritium in the monitoring well is $<1.0\text{—}22.5 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, which originated from gaseous and liquid effluents of the NPPs, and entered well water together with rainfall, without accumulation effect. And ^3H in vapor near NPPs is slightly higher than background. There is no abnormal tritium level in drink water and OBT in propagation near NPPs.

Keywords: Daya Bay nuclear power plant, tritium, vapor, rain, sea water, monitoring well water, drinking water.

^3H 是自然产生的低毒性纯 β 衰变核素之一, 在宇宙射线对大气中的化学元素的原子核作用下, 所发生的核反应构成大气中 ^3H 的来源^[1], 自然环境水体中 ^3H 浓度的相关文献较多, 在没有人工 ^3H 排放的水体中, 阳江/台山核电周围环境水体中的 ^3H 浓度范围为 $0.2\text{—}0.3 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2], 与大亚湾核电 1994 年监测本底值 $0.25 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 一致^[3], 与文献[4]报导的水蒸气、降水、江(河)水、湖(库)水、井水、泉水、海水氚浓度分别为 8.96 、 5.42 、 4.77 、 4.55 、 4.04 、 2.38 、 $1.34 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 有较大差异. 2011—2012 年对广东省内不同地市地表水、地下水的监测结果表明(内部资料), 除深层地下水中 ^3H 的浓度低于 $0.1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 外, 一般环境水

2015 年 11 月 24 日收稿(Received: November 24, 2015).

* 通讯联系人, Tel: 020-84205920, E-mail: 843456548@qq.com

Corresponding author, Tel: 020-84205920, E-mail: 843456548@qq.com

体中³H的浓度范围与阳江/台山核电周围水体中的相当。

1994 年 2 月 GNPS(大亚湾核电)机组开始商业运营, LNPS(岭澳核电)的 4 台机组也先后于 2001 年 12 月、2002 年 7 月、2010 年 4 月和 2010 年 12 月首次装料, 目前大亚湾核电基地有 6 台百万千瓦级的机组在运行, 均为压水堆型, 其中³H、¹⁴C 的排放量最大, ³H、¹⁴C 没有合适的处置手段, 只能通过稀释排放来减缓环境影响。

GB 6249—2011 规定 300 MW 热功率的轻水堆气态、液态流出物³H的年排放量分别为 1.5×10^{13} 、 7.5×10^{13} Bq·a⁻¹, 对于同一堆型的多堆厂址, 所有机组的年排放总量应控制在单堆规定值的 4 倍以内. 对于不同堆型的多堆厂址, 所有机组的年排放总量控制值则由审管部门批准, 并要求核电厂的年放射性排放总量应按季度月控制, 单个季度的排放总量不应超过所批准的年排放总量的二分之一, 每个月的排放总量不应超过所批准的年排放量的五分之一。

本文统计分析了 1993—2014 年大亚湾核电基地各机组先后运营不同阶段³H的排放量及环境介质中³H的含量。

1 实验部分(Experimental section)

1.1 监测方案

针对核电³H的排放, 结合当地自然环境条件、气象、人口分布等因素, 大亚湾核电周围环境介质中³H 的监测方案见表 1, 一般在每季度的第一个月取样. (1) 由于缺乏空气中³H的采样设备, 2007 年开始监测空气水蒸气中³H浓度, 使用除湿机采样; (2) 雨水采集于 2011 年开始, 每月中、下旬收集 1 次, 收集面为 98 cm×6 cm, 雨水自动进入容积为 30 L 的不锈钢储水容器(多余的则自动溢出), 如当月无降雨或收集降雨量少于 5 L, 不取样, 一月中有多次且降雨量较大, 只取样 1 次; (3) 1993 年开始采样, 除在西大亚湾采集外, 作为对照, 另在西面不受排放影响的金沙湾采集海水样品; (4) GNPS 有 2 个监测井, LNPS 一期、二期各有 3 个监测井, 每年采样次数不少于 4 次, 2000 年开始采集 LNPS 一期监测井水, 2008 年开始采集 LNPS 二期监测井水; (5) 饮用水于 1993 年开始取样, 采样频度 1 年 4 次, 2006 年后取消大鹏、东山测点, 2008 年采样频度调整为 1 年 2 次, 深圳饮用水取水点位于深圳市罗湖区, 在大亚湾核电西面约 40 km. 饮用水水样为直接从自来水龙头放取。

表 1 核电周围环境介质中³H的监测方案

Table 1 The monitoring project of ³ H in environmental medium nearby Daya bay nuclear power stations(NPPs)			
介质 Medium		频度 Frequency/a ⁻¹	采样点 Sampling point
空气	水蒸气	4	大坑、鹏城
	雨水	>4	北龙
海洋	海水	4	见图 1
陆地	监测井水	>4	PR1、P5、A、B、C、P1、P2、P3
	饮用水	4	鹏城、GNPS、深圳、大鹏、东山

为减少液态排放对西大亚湾的影响, 2000 年核电的排放口位置向东迁移了约 1 km, 因此 2002 年对西大亚湾海域海水的监测采样点由原来的 18 个(编号 W1—W18, 见图 1A) 优化至 10 个(编号 L1—L10, 见图 1B), 加强了对稀释能力最差的大鹏湾海域监测, 样品采集布点见图 1。

在数据统计分析时, 小于探测限的取探测限(DL) 的一半参与统计分析, 样品数表示为 n/m , n 表示监测样品总数, m 表示高于探测限的样品数. 数据表示为 $A\pm X$, 若为单次测量值, X 为测量过程中仪器计数误差引起的不确定度, 若为多个数据的平均值, 则 X 为标准差。

1.2 采样方法

环境水样采集方法参照 HJ494—2009《水质 采样技术指导》、HJ495—2009《水质 采样方案设计技术规定》, 空气水蒸汽采样使用除湿机, 样品盛装采用玻璃器皿, 洗净的玻璃器皿装样前先用待装水样冲洗 2—3 次, 每个样品采样量 500 mL。

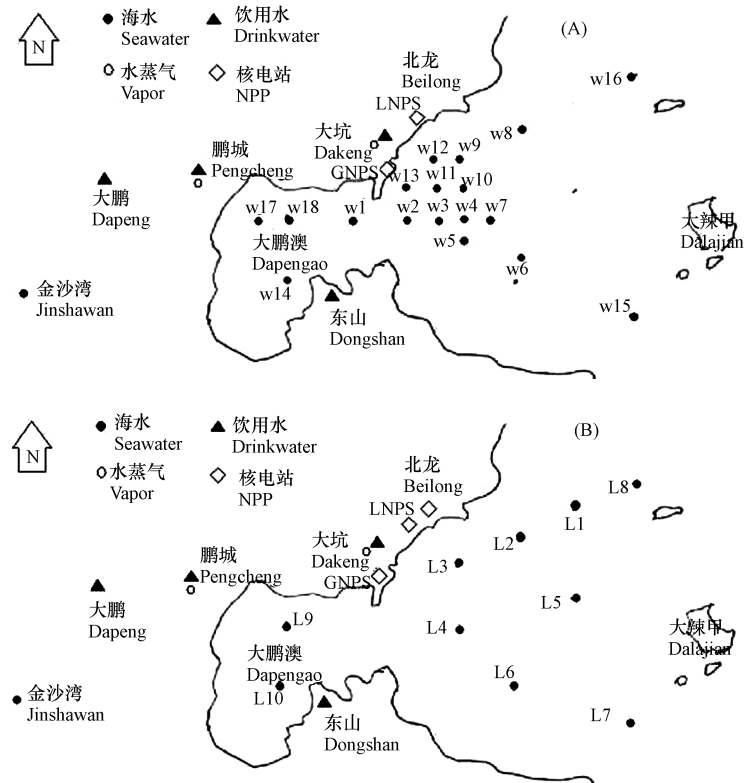


图 1 2002 年前(A)后(B, 含 2002 年)采样布点示意图

Fig.1 The sampling sites for tritium monitoring nearby NPPs before (A) and after 2002(B, include 2002)

1.3 分析方法

³H 的测量采用 GB12375—90(水中氚的分析方法),该方法对低水平样品的水中³H 的电解浓集是通过碱式电解法,需要用到碱式电解槽、真空冷凝蒸馏、液氮等,这种方法的主要缺点是:操作和处理过程复杂、对操作熟练程度要求高、电解时间长(一般需 150—200 h)、具腐蚀性.目前国内按照国标使用碱式电解分析环境水中³H 的单位不多,有文献报道利用 SPE (Solid polymer electrolyte) 固体聚合膜电解质进行电解浓缩的技术^[5],但国内尚无成熟的仪器,我中心于 2010 年开始研制此类电解装置,申请专利号 ZL2011 1 0247742.0^[6],并将此产品成功应用于阳江/台山核电本底调查和广东省不同地区环境水体³H 浓度调查,预计 2016 年推出成熟的仪器.

本文中用于³H 测量的样品均未经电解浓缩.测量仪器为 1220 Quantulus 低本底闪烁仪,仪器本底 <0.7,每分钟计数(cpm),探测效率大于 60%,不经电解、测量 24 h 探测限约为 1.2 Bq·L⁻¹.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 液态排放对西大亚湾海水的影响

1994 年至今大亚湾核电基地液态流出物³H 的排放量(数据来源于大亚湾核电环境科流出物监测结果统计,我单位对部分监测数据进行验证)及西大亚湾海域海水中³H 的浓度见表 2.表 2 中的采样点 L2、L8、L10 为由原来 18 个取样点优化成 10 个取样点后,取样位置未发生变化的测点并分别对应原来的 W8、W16、W14.

1993—2014 年西大亚湾海水中³H 年均值范围为 0.8—7 Bq·L⁻¹,2003 年西大亚湾海水中³H 的平均浓度最高为 7 Bq·L⁻¹,单点最大值为 70.7 Bq·L⁻¹,年均值较大的 1998、2003、2006 年,单点最大值也较大,且出现在距排放口较近的采样点,原因是正逢涨潮期采样前数小时有液态流出物排放.而作为对照点的金沙湾海水中氚浓度均小于探测限(1.2 Bq·L⁻¹).

表 2 的数据也说明,1993—2001、2002—2009、2009—2014 年大亚湾核电基地 GNPS、LNPS I 期、LNPS II 期先后运行的不同阶段,西大亚湾内海水中³H 浓度变化较小,特别是交换稀释能力最差的 L10 测点,海水中³H 浓度较稳定,均值在 2—3 Bq·L⁻¹.

对 2001 年西大亚湾海水中³H 的浓度与液态流出物排放的相关性进行试验,得出经验公式^[3]: $D = D_0 + 1.06 \times 10^{-11} Q T^{-1.2937}$, D 为湾内氙平均浓度, Bq·L⁻¹; D_0 为本底值, Bq·L⁻¹; Q 为采样前一次的液态³H 排放量, Bq; T 为采样时间与采样前一次排放时间的时间间隔, d.

暨南大学也对西大亚湾海水中³H 的浓度与液态流出物排放的相关性进行过理论研究,并给出理论计算式^[7].

两种理论计算式得出的西大亚湾海水中氙的浓度结果基本一致,这些用实测³H 的浓度数据拟合出来的计算式可为事故排放后各核素在西大亚湾内的分布提供参考(不考虑核素的吸附).

表 2 液态³H 的排放量及西大亚湾监测点的浓度

Table 2 ³H discharged with liquid effluents and the concentration in sea water of west Daya Bay

时间 Year	排放量 Discharged ³ H (×10 ¹³)/Bq	西大亚湾 West Daya Bay/(Bq·L ⁻¹)		L2(W8)/ (Bq·L ⁻¹)	L8(W16)/ (Bq·L ⁻¹)	L10(W14)/ (Bq·L ⁻¹)
		范围 Range	均值 Average			
1993	—	<0.7—1.5	0.9±0.4	<0.7	—	—
1994	2.22	<0.6—9.0	3.0±2.7	1.1±1.1	0.8	<0.7
1995	1.01	<0.6—4.2	0.8±0.9	0.7±0.7	<0.8	1.1±1.1
1996	2.21	<1.4—3.6	0.8±0.5	<1.5	<1.5	0.7±0.7
1997	2.85	<1.4—4.6	1.3±1.0	<1.5	<1.5	<1.5
1998	2.75	<1.4—49.6	3.0±7.5	1.2±0.8	<1.5	<1.5
1999	2.39	<1.3—16.4	2.0±3.1	<1.5	<1.5	1.2±0.8
2000	3.42	<0.8—4.5	0.9±1.0	1.0±1.0	<0.8	<1.5
2001	4.76	<1.3—4.0	1.6±1.0	<1.4	<1.4	1.0±1.0
2002	5.42	<1.3—8.5	2.8±2.2	2.3±1.4	2.6±0.7	<1.4
2003	9.66	<1.3—70.7	7±15	25±40	11±13	2.3±1.4
2004	8.78	<1.3—11.0	2.6±2.6	2.2±3.1	2.7±3.0	25±40
2005	10.5	<1.3—3.7	1.4±0.9	1.5±0.9	1.6±1.1	2.2±3.1
2006	10.7	<1.4—38.0	4.2±8.1	10±17	1.1±0.9	1.5±0.9
2007	11.8	<1.4—15.0	3.0±2.7	2.1±1.0	5.1±6.7	10±17
2008	11.6	<1.2—4.8	1.4±1.1	1.7±1.7	1.0±0.5	2.1±1.0
2009	10.8	<1.2—13.6	4.4±3.9	6.7±4.9	1.5±1.6	1.7±1.7
2010	11.6	<1.2—17.1	3.8±4.0	7.3±6.5	2.3±2.1	2.6±1.5
2011	11.2	<1.2—14.4	4.4±3.4	3.8±2.8	4.0±2.4	2.4±1.5
2012	13.3	<1.0—8.9	2.4±1.9	3.4±2.8	2.2±1.4	2.3±1.4
2013	12.8	<1.1—25.2	3.5±3.9	3.6±1.5	2.6±1.4	2.2±1.4
2014	13.3	<0.9—8.1	2.6±1.7	1.9±1.3	4.1±3.1	3.0±1.5

对液态³H 排放后在海水中随深度的变化,进行了相关验证,表 3 给出 3 个监测点不同深度海水中³H 的浓度.采样方法参照 GB12997—91《水质采样方案设计技术规定》(现更新为 HJ 495—2009),采样前先测量水深,表层水采集的是水面下 0.5 m 处的水样,中层水采集水深的 1/2 处的水样,底层水采集距海底 0.5 m 处的水样.

结果表明,L9、L10 测点不同深度海水中³H 的浓度相差不大,而排放口附近的 L2 测点表层海水中³H 浓度明显高于中底层海水.

由于 L2 采样点距离排放口较近,而槽式排放的液态流出物随反应堆冷却水一起外排,水温较自然海域海水高,所以表层海水中的³H 浓度高于中、底层海水,随着洋流的运动、水温温差的缩小,以及³H 的交换、扩散,远离排放口的西大亚湾湾内 L9、L10 采样点不同深度海水中³H 的浓度无明显差异.

表 3 海水³H 的浓度随深度的变化(Bq·L⁻¹)

Table 3 Variation of ³ H in sea water with the depth							
采样时间 Sampling time	7 月 16 日 Jul.16 9:00—11:00	7 月 18 日 Jul.18 9:00—11:00	7 月 19 日 Jul.19 9:00—11:00	7 月 19 日 Jul.19 15:00—17:00	7 月 20 日 Jul.20 9:00—11:00	7 月 21 日 Jul.21 9:00—11:00	7 月 22 日 Jul.22 9:00—11:00
L2(表)	<1.3	126±3	2.3±0.9	55.2±1.8	86.2±2.1	12.0±1.1	<1.3
L2(中)	—	100±3	<1.3	19.5±1.3	29.9±1.4	9.0±1.1	<1.3
L2(底)	—	22.2±1.3	<1.3	2.6±0.9	7.4±1.0	8.6±1.0	2.7±0.9
L9(表)	2.1±0.9	1.6±0.9	2.0±0.9	1.7±0.9	1.6±0.9	2.7±0.9	2.2±0.9
L9(中)	—	—	2.3±0.9	1.5±0.9	1.9±0.9	1.6±0.9	4.0±1.0
L9(底)	—	2.3±0.9	2.8±0.9	2.0±0.9	1.7±0.9	2.3±0.9	6.6±1.0
L10(表)	2.8±0.9	1.9±0.9	2.1±0.9	3.3±0.9	2.2±0.9	1.5±0.9	1.6±0.9
L10(中)	—	2.6±0.9	2.8±0.9	4.0±1.0	1.8±0.9	1.4±0.9	1.5±0.9
L10(底)	—	2.9±0.9	3.4±0.9	3.5±0.9	2.3±0.9	1.4±0.9	1.9±0.9

2.2 反应堆监测井井水中³H 的浓度及来源

核电周围监测井水中的³H 浓度见表 4—表 6, 核电反应堆周围监测井水中³H 浓度范围为<1.0—22.5 Bq·L⁻¹, 最大值为 2005 年 PR1 井 6 月所取样品;岭澳核电一期反应堆 C 井的年均值最高, 2005 年至 2014 年所有样品均能测到³H, 年均值范围为 6.8—14.2 Bq·L⁻¹, 但单样最大值为 15.6 Bq·L⁻¹, 较 A 井高约 1 倍, B 井最低. 2010—2014 年 PR1、P5 监测井中³H 浓度与 1996—2009 年年均值范围一致, 随着岭澳核电二期的运行 B 井的³H 浓度液无明显变化, 说明监测井水中³H 含量受临近反应堆的影响较小, 特别是 GNPS 的 PR1、P5, 井水中³H 浓度与 LNPS 一期、二期的运营完全无关, 各监测井水中³H 的含量差异主要受其所在反应堆气态³H 的排放、气象条件、环境位置等因素的影响.

因担心³H 来源于流出物管网的破损泄漏, 对 GNPS 核电监测井水中³H 的来源进行详细的调查研究^[8], 最终认为³H 来源于核电流出物的排放, 通过空气流动沉降并蓄积于监测井附近土壤, 随雨水渗入监测井, 因此监测井水中的³H 浓度与降雨相关、但高于雨水, 并不完全是雨水中³H 浓度的影响.

表 4 GNPS 核电监测井水中³H 浓度

Table 4 The concentration of ³ H in water from monitoring wells of GNPS						
时间 Year	PR1/(Bq·L ⁻¹)			P5/(Bq·L ⁻¹)		
	n/m	均值 Average	范围 Range	n/m	均值 Average	范围 Range
1996	3/1	3.0	<1.5—7.6	3/1	1.2	<1.5—2.3
1997	9/7	3.5	<1.4—8.1	9/1	0.79	<1.4—1.8
1998	9/8	5.9	<1.4—13.4	10/5	1.6	<1.4—3.8
1999	10/5	4.5	<1.5—15.6	10/1	0.83	<1.3—1.8
2000	7/3	2.6	<1.3—11.4	7/1	0.83	<1.3—1.6
2001	10/8	6.2	<1.3—14.0	10/4	1.3	<1.3—2.8
2002	10/10	4.8	1.7—10.3	10/7	1.4	< 1.4—2.9
2003	7/6	4.6	<1.4—9.4	7/4	1.3	< 1.3—1.9
2004	9/7	3.8	<1.3—17.1	9/2	1.4	< 1.3—1.8
2005	6/4	5.5	<1.4—22.5	6/4	3.8	<1.4—5.0
2006	8/8	7.2	3.8—14.6	8/6	3.1	<1.4—6.1
2007	12/11	3.9	<1.4—7.6	12/10	1.8	<1.4—2.8
2008	12/11	3.4	<1.2—8.5	11/10	2.2	<1.2—3.3
2009	11/9	5.3	<1.2—19.7	11/8	1.8	<1.0—4.5
2010	8/7	3.7	<1.2—8.5	8/8	2.6	1.6—3.5
2011	6/5	3.6	<1.2—7.5	6/6	2.1	1.4—3.1
2012	6/6	3.8	1.0—9.9	6/6	2.2	1.4—2.8
2013	6/5	2.0	<1.2—3.1	6/6	2.1	1.6—2.5
2014	6/6	2.6	0.87—5.1	6/6	2.0	1.4—2.5

注: n/m 表示样品总数/高于探测限的样品数, 下同. n/m expresses the sample total per the number of samples which value high than DL. The same below.

表 5 LNPS 一期核电监测井水中³H浓度

Table 5 The concentration of ³H in water from monitoring wells of LNPS I

时间 Year	A/(Bq·L ⁻¹)			B/(Bq·L ⁻¹)			C/(Bq·L ⁻¹)		
	范围值 Range	平均值 Average	n/m	范围值 Range	平均值 Average	n/m	范围值 Range	平均值 Average	n/m
2000	<1.4	<1.4	2/0	<1.4	<1.4	1/0	<1.4	<1.4	1/0
2001	<1.4—1.7	1.2±0.7	2/1	<1.4	<1.4	2/0	<1.4	<1.4	2/0
2002	<1.4—1.6	1.4±0.2	4/1	<1.4—1.5	<1.4	4/1	<1.4	<1.4	4/0
2003	<1.3	<1.3	3/0	<1.3	<1.3	3/0	<1.3	<1.3	3/0
2004	<1.4	<1.4	8/0	<1.3—1.5	0.77±0.30	8/1	<1.3—5.3	3.5±1.9	8/6
2005	<1.4—3.5	1.5±1.2	6/2	<1.4—4.3	2.3±1.3	6/5	4.9—10.9	6.8±2.2	6/6
2006	1.4—6.2	2.7±1.6	8/8	<1.4—8.0	3.8±2.9	8/7	6.6—12.6	8.7±1.9	8/8
2007	<1.4—4.6	2.7±1.0	12/11	<1.4—4.6	2.7±1.1	12/11	6.4—9.8	8.1±1.0	12/12
2008	1.6—6.4	4.1±1.7	11/11	<1.2—4.6	2.6±1.1	12/11	7.6—13.6	10.6±1.5	12/12
2009	2.3—6.1	4.3±1.3	11/11	1.3—3.5	2.0±0.7	11/11	9.7—12.0	10.9±0.7	11/11
2010	2.9—6.2	4.8±1.0	8/8	2.0—3.3	2.6±0.5	8/8	11.5—15.6	13.2±1.4	8/8
2011	3.6—5.2	4.6±0.6	6/6	2.5—3.8	3.1±0.5	6/6	12.7—14.9	14.0±0.8	6/6
2012	2.4—6.6	4.6±1.6	6/6	2.0—5.7	2.9±1.4	6/6	13.6—15.3	14.2±0.6	6/6
2013	1.6—6.8	5.6±1.0	6/6	2.1—3.3	2.8±0.5	6/6	10.5—14.0	12.0±1.0	6/6
2014	4.9—6.6	5.9±0.7	6/6	2.6—4.2	3.6±0.6	6/6	12.0—13.4	12.6±0.6	6/6

表 6 LNPS 二期核电监测井水中³H浓度

Table 6 The concentration of ³H in water from monitoring wells of LNPS II

时间 Year	P1/(Bq·L ⁻¹)			P2/(Bq·L ⁻¹)			P3/(Bq·L ⁻¹)		
	范围 Range	均值 Average	n/m	范围 Range	均值 Average	n/m	范围 Range	均值 Average	n/m
2008	<1.2	<1.2	4/0	<1.2—2.1	1.3±0.8	4/2	<1.2—2.9	2.0±1.0	4/3
2009	<1.0—1.3	0.7±0.3	11/2	<1.0—1.7	0.7±0.3	11/1	<1.2—1.7	0.8±0.4	11/3
2010	<1.1—2.0	1.2±0.5	8/5	<1.1—1.5	1.0±0.4	8/4	<1.1—2.5	1.3±1.8	7/4
2011	<1.0—1.1	0.7±0.2	6/1	<1.0—1.1	0.7±0.2	6/1	<1.2	<1.2	6/0
2012	<1.0—2.0	1.2±0.6	6/4	1.0—2.8	1.9±0.8	5/5	<1.2—3.0	2.0±1.1	5/4
2013	<1.1—2.6	1.6±0.9	6/4	1.6—2.3	2.0±0.3	6/6	1.6—3.5	2.6±0.7	6/6
2014	<0.8—2.8	0.8±1.0	6/1	<0.8—3.1	1.7±0.8	6/5	<0.9—2.6	1.8±0.9	6/5

2.3 雨水、空气中水蒸气³H浓度

空气中雨水样品分析结果显示,只有 2011 年 6 月份的 1 个雨水样品中能监测到³H,浓度为 1.8 Bq·L⁻¹,其它雨水样品中³H浓度均低于探测限.

空气水蒸气中³H浓度见表 7,距离核反应堆较近的大坑取样点空气水蒸气³H浓度高于鹏城取样点,最大值为 182 mBq·m⁻³,在对照点广州空气水蒸气中³H浓度均低于探测限.

在没有人工³H释放的天然环境,如阳江/台山核电装料前空气水蒸气中³H浓度范围为 0.15—0.80 Bq·L⁻¹水,根据湿度、温度等参数换算至每立方米空气中³H浓度为 2.9—10.7 mBq·m⁻³[9-10],随环境温度、湿度的增加,空气水蒸气中³H浓度下降[9].由此说明,距离核电较近的大坑和鹏城水蒸气中³H浓度要较同纬度、海拔高度的天然环境水平高,特别是距核电只有数百米的大坑,空气水蒸气中³H浓度显然高出西面约 4 km 的鹏城监测点.

2.4 动植物样有机氙、饮用水中³H浓度

对核电周围深圳、鹏城、东山、GNPS 等几个监测点饮用水值³H的监测结果表明,所有样品³H浓度均小于探测限,从未发现饮用水中异常浓度的³H.

由于核电周围环境空气、水体中氙的浓度略高于环境本底水平,而³H属低毒核素,活性强,极易与空气或水中的 H 发生置换,不会在生物体内累积[11-12],因此在环境监测中通常关注水体或空气水蒸气

中³H浓度.

表 7 气态³H排放量及空气水蒸气中³H浓度

Table 7 ³H discharged with gaseous effluents and the concentration in vapor

时间 Year	排放量 Discharged ³ H (×10 ¹²)/Bq	鹏城 Pengcheng/(mBq·m ⁻³)			大坑 Dakeng/(mBq·m ⁻³)		
		<i>n</i> / <i>m</i>	范围 Range	均值 Average	<i>n</i> / <i>m</i>	范围 Range	均值 Average
2007	1.80	4/1	<15—30	15±10	4/1	<15—27	15±9
2008	2.19	4/1	<14—18	10±6	4/1	<14—59	20±26
2009	2.56	4/1	11—24	11±2	4/3	<16—47	23±17
2010	2.59	4/2	<16—41	21±15	4/2	<17—21	14±6
2011	2.51	4/1	<14—26	14±9	4/2	<18—25	15±6
2012	3.77	4/2	<21—32	18±10	4/3	<21—58	29±21
2013	7.05	7/6	<11—50	21±15	7/6	<6—182	59±59
2014	7.43	12/5	<6—22	11±6	12/9	<16—68	27±18

核电环境监测科每年选取陆地的草、松针和海洋动植物分析生物体内有机氚(OBT)含量,结果表明,与1976年12月至1979年10月卫生部组织对中国部分海产品食品中的有机氚调查值相比,大亚湾区域海洋生物中的有机氚比活度基本在调查值范围内波动,氚排放量的增加对海洋生物中有机氚放射性比活度的影响不明显.陆地指示生物松针的有机氚放射性比活度历年变化趋势与海洋生物基本保持一致,氚排放量影响也不显著,有机氚在生物中没有累积现象^[13].

根据文献[14],若饮用水中³H浓度不超过7610 Bq·L⁻¹,相当于待积有效剂量低于0.1 mSv·a⁻¹,产生的毒性较低.秦山第三核电厂重水堆³H的排放量远大于压水堆型,其³H的排放对关键居民点幼儿组成员待积剂量最大为0.33 μSv·a⁻¹^[15].说明目前商用压水堆、重水堆核电站排放量最大的³H,对核电周围民众产生影响的剂量非常低.

3 结论(Conclusion)

大亚湾核电基地³H的排放量最大,其排放浓度和速度满足国家标准及审管部门的批复要求.大亚湾核电基地随着反应堆的投产运行,受纳水体西大亚湾海域海水、核反应堆监测井水及反应堆附近空气水蒸气中³H的含量均高于本底水平,但未出现累积效应.

西大亚湾海域海水中³H的浓度范围为<1.0—70.7 Bq·L⁻¹,年均值范围0.8—4.4 Bq·L⁻¹,海水中³H的浓度和液态流出物的排放时间与采样时间差、排放量、洋流水文、风速风向等因素相关,远离排放口不同深度海水中³H的含量相差不大,从目前的监测结果来看,西大亚湾海域的海水交换稀释能力较好,满足大亚湾核电基地流出物的排放要求.

核反应堆周围监测井水中³H浓度较本底水平高,范围<1.0—22.5 Bq·L⁻¹,主要来源于气态流出物的排放,通过外环境的气沉降、交换至监测井.核电站附近空气水蒸气³H浓度略高于对照点,周围饮用水中³H浓度和陆地植物、海洋生物有机³H浓度未见异常.

参考文献(References)

[1] UNSCEAR. United nations scientific committee on effects of atomic radiation ionizing radiation ,sources and biological effects.1977 Report to the general assembly,with annexes[R]. United Nations sales publication.No.e.82.Ix.8.

[2] 邓飞,林清,周睿东,等.台山/阳江核电厂周围环境水中³H浓度调查[J].辐射防护通讯,2015,35(3):6-11.
DENG F,LIN Q,ZHOU R D,et al. Investigation of ³H activity concentration in environmental water surrounding Taishan and Yangjiang NPPS[J]. Radiation Protection Bulletin,2015,35(3):6-11 (in Chinese).

[3] 黄乃明,林清,陈志东.西大亚湾海水中³H浓度与大亚湾核电站液态³H排放的相关性分析[J]. 辐射防护,2001,6(2):10-14.
HUANG N M,LIN Q,CHEN Z D. Analysis the relation between ³H concentrations in sea water of west daya bay and GNPS'S liquid ³H Discharges[J]. Radiation Protection,2001,6(2):10-14(in Chinese).

[4] 任天山,赵秋芬,陈炳如,等. 中国环境水氚浓度及其变化[J].中华放射医学与防护杂志,2001,21(5):385.

- REN T S,ZHAO Q F,CHEN B R,et al. Tritium concentration and variation in environmental waters of China[J]. Radiological Medicine and Protection,2001,21(5):385(in Chinese).
- [5] 温雪莲,杨海兰,吴斌,等.SPE 固体电解质氚水浓集装置及其应用[J]. 核电子学与探测技术,2003,23(6):583-586.
- WEN X L,YANG H Y,WU B,et al. The development and application of solid polymer electrolysis enrichment device of tritium in water [J].Nuclear Electronics and Detection Technology, 2003,23(6):583-586(in Chinese).
- [6] 周睿东,杨旭富,林清,等.水中氚电解浓集装置.中华人民共和国发明专利[P].ZL 2011 1 0247742.0,2012 年 7 月.
- ZHOU R D,YANG X F,LIN Q,et al. Electrolytic enrichment equipment of ^3H in water[P]. Invention Patent of China. ZL 2011 1 0247742.
- [7] 张春舜,李源新,胡国辉,等.大亚湾核电站液态排出物 H-3 浓度场分布[J].暨南大学学报(自然科学版),2001,22(5):51-56.
- ZHANG C L,LI Y X,HU G H,et al. Research on distribution of ^3H concentration field by the liquid waste discharging from the dayawan nuclear power station[J]. Journal of Jinan University (Natural Science),2001,22(5):51-56(in Chinese).
- [8] 邓飞,陈志东,林清,等.大亚湾核电站监测井水中 ^3H 的来源[J]. 辐射防护通讯,2006,26(2):10-14.
- DENG F,CHEN Z D,LIN Q,et al. Source of ^3H in monitored well water at daya bay nuclear power station[J]. Radiation Protection Bulletin,2006,26(2):10-14 (in Chinese).
- [9] 广东省环境辐射监测中心内部资料.2010-2012 台山核电厂一期工程环境辐射水平调查(总报告)[R]. 2012 年 5 月:192、280.
- Internal data from Guangdong province environmental radiation monitoring center . Environmental radiation level on the First-Phase Construction of Taishan NPPs surveyed during 2010—2012(General Report)[R].May 2012:192, 280.
- [10] 广东省环境辐射监测中心内部资料.2010-2012 阳江核电工程环境辐射水平调查(总报告)[R]. 2012 年 5 月:211.
- Internal data from Guangdong province environmental radiation monitoring center . Environmental radiation level on Yangjiang NPPs surveyed during 2010—2012(General Report)[R].May 2012:211.
- [11] 孙平跃,史建君,李凌云,等.氚水在模拟海水生态系统中的积累、迁移和消长[J].环境科学学报,2002,22(5):609-613.
- SUN P Y,SHI J J,LI M Y,et al. Accumulation transference and dynamical disappearance of HTO in simulated marine ecosystem[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2002,22(5):609-613(in Chinese).
- [12] 申慧芳,姚仁太.氚化水(HTO)气态释放后在大豆中的积累和转化研究[J]. 环境科学学报,2013,33(10):2911-2918.
- SHEN H F,YAO R T. Study of accumulation and transformation of HTO in soybean for atmospheric releases of tritiated water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(10):2911-2918(in Chinese).
- [13] 大亚湾核电运营管理有限公司,《2014 年广东大亚湾核电厂/岭澳核电厂环境监测、三废处理报告报告》附件 23-2 历年环境生物样品中有机结合氚放射性水平[R]. 2015 年 3 月.
- Daya Bay Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Report on Environmental Monitoring and the "Three Wastes" Treatment for Both Daya Bay and Ling Ao Nuclear Power Plants in Guangdong Province 2014 Annex 23-2 Radioactive Levels of Organically Bound Tritium in Environmental Biological Samples over the Years[R] March 2015.
- [14] 陈晓秋,李冰,上官志洪.内陆核电厂液态流出物排放到受纳水体中的氚浓度限制[J].辐射防护,2013,33(1):1-7.
- CHEN X Q,LI B,SHANGGUAN Z H. Tritium concentration limitation for liquid effluent releases from Inland NPPs to Receiving Water[J]. Radiation Protection,2013,33(1):1-7(in Chinese).
- [15] 梁梅燕,马永福,倪士英,等.秦山核电基地排放氚所致公众内照射剂量估算[J]. 辐射防护,2010,30(3):160-163.
- LIANG M Y,MA Y F,NI S Y,et al. Analysis of tritium level around Qinshan NPP base[J]. Radiation Protection,2010,30(3):160-163 (in Chinese).