J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(2):181-188
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn

内陆核电厂对水库环境的影响——以咸宁核电厂为例*

张晓峰,田新珊,黄彦君,上官志洪,沙向东,王 荧
(苏州热工研究院有限公司,苏州 215004)

摘 要:随着我国核电产业的迅速发展,内陆核电厂的建设成为必然趋势.本文以咸宁核电厂为例,从辐射影响、余氯影响和冷却系统影响等方面,评价核电厂对富水水库可能造成的环境影响.评价结果显示,核电厂放射性释放对于水库中参考鱼类产生的总辐射剂量率为 2.06×10^{-4} mGy/d,低于背景辐射本底值和国际组织推荐限值;核电厂造成的库区和下游饮水口处水体中的总β放射性,叠加本底值后仍满足 1Bq/L 的生活饮用水质要求;核电厂运行的化学排放和冷却系统对于水库环境的影响也很小.同时,在与美国 North Anna 核电厂环境影响进行比较的基础上,分析了在我国滨湖厂址建设核电厂的适宜性,并对减缓内陆核电厂对湖库环境的影响给出建议.
关键词:内陆厂址;咸宁核电厂;富水水库;环境影响评价

Impact of inland nuclear power plant on reservoir environment: a case on Xianning Nuclear Power Plant

ZHANG Xiaofeng, TIAN Xinshan, HUANG Yanjun, SHANGGUAN Zhihong, SHA Xiangdong & WANG Ying
(*Suzhou Nuclear Power Research Institute*, *Suzhou* 215004, *P. R. China*)

Abstracts: With the rapid development of nuclear power industry in China, the construction of nuclear power plant (NPP) in inland China becomes imperative. In this paper, the assessment of radiological, chlorine and cooling system impacts from inland NPP on the environment is presented by taking Xianning NPP as an example. The result shows during NPP's normal operation, the radiation dose rate of reference fish is 2.06×10^{-4} mGy/d, less than the background data and international recommended limit. The gross beta radioactivity in reservoir and downstream drinking intakes, after adding background value, is below 1Bq/L, compliable with the national drinking water standard. The impacts of chemical discharge and cooling system on reservoir environment are pretty small. Moreover, this paper also makes analysis on the suitability of constructing NPP on domestic lakeside sites by comparing with that of foreign inland NPP with similar characteristics, and some suggestions to relieve inland NPP's impact on lake and reservoir environment are given.
Keywords: Inland site; Xianning NPP; Fushui Reservoir; environmental impact assessment

随着我国能源结构的调整和环境保护的要求,核电发展开始提速.截至 2008 年,我国有浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾三个核电基地,运行装机容量 910×10^4kW,在建规模 2290×10^4kW[1].我国目前运行和在建的全部为滨海核电厂,由于厂址数量和环境容量所限,仅靠滨海核电厂的建设较难实现《核电中长期规划(2007-2020)》中至 2020 年运行装机容量 4000×10^4kW,在建装机容量 1800×10^4kW 的规划要求.

国际原子能机构(IAEA)将核电厂址分为滨海、滨河和滨湖三类,我国习惯上将滨河、滨湖厂址统称为内陆厂址.世界范围内的核电厂以内陆厂址为主.目前,全世界 207 座运行核电厂中有 118 座位于内陆厂址.内陆核电厂中滨河厂址占大部分,大都位于各国流量较大的主要河流或河流主要支流附近,如美国的密西西比河流域有 20 多座核电厂,法国的 Loire 河和 Rhone 河流域有核电厂 9 座.在湖泊资源丰富的地区,滨湖核电厂也占有一定比例,如北美五大湖地区有 12 个厂址(其中美国 10 个,加拿大 2 个),俄罗斯有 3 座核电厂,分别位于 Udomlia 湖、Imandra 湖和 Tsimlyansk 水库附近.我国拥有丰富的可为核电厂提供生产生活用水

* 中国广东核电集团科研课题(CGNPC-T-2008-061)和国家海洋局海洋公益性行业科研专项(200705028)联合资助.
2009-10-15 收稿;2009-11-25 收修改稿.张晓峰,男,1982 年生,硕士,工程师;E-mail:njuzxf@yahoo.com.cn.

和循环冷却水热阱的河流与湖库资源,因此,合理开发和利用内陆核电厂址势在必行.本文将通过分析和评价咸宁核电厂对富水水库的环境影响,为我国建设内陆核电厂提供建议和参考.

1 咸宁核电厂及富水水库概况

1.1 项目及流域情况

咸宁核电厂位于湖北省咸宁市通山县大畈镇大塄村附近的狮子岩,项目占地262.1hm^2,规划连续建设四台AP1000核电机组,采用二次循环冷却方式,每台机组冷却水系统配备两座逆流式自然通风冷却塔.

咸宁核电厂所在的富水流域界跨鄂赣两省五县,流域面积5310km^2.富水发源于湖北省通山、崇阳及江西省修水三县交界处的幕阜山北麓,至通山城关与通羊河汇合后,向东流经通山、阳新两县,于富池口入江.富水流域内多年平均降水量1594mm,径流深816.7mm,径流量$22.5\times10^8m^3$.核电厂所在的狮子岩位于富水水库中段北岸,为库汊包围下的半岛.富水水库位于富水流域中游,为人工修筑的河道型大(Ⅰ)型水库,库区自上而下渐趋平缓、开阔,沿途纳通山、横石、黄沙、燕厦4条主要河流,过坝后流入富水河.水库正常蓄水位51m,水面面积54.8km^2,总库容$16.21\times10^8m^3$.根据《湖北省地表水环境功能区类别》,富水水库保留区目前主要功能为农业和渔业用水,水质现状与水质管理目标均为Ⅲ类.

咸宁核电厂及富水水库的示意图见图1.

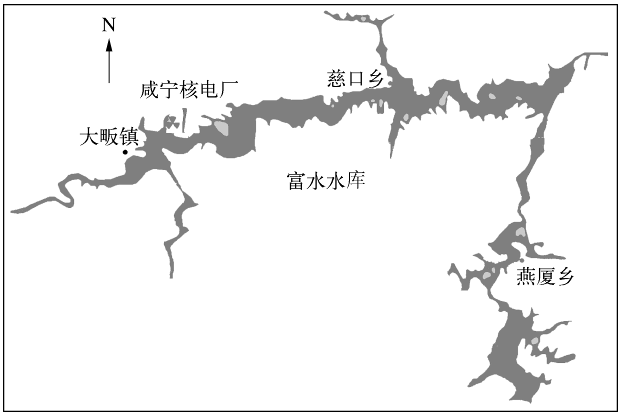

图1 咸宁核电厂及富水水库位置示意图
Fig.1 Location of Xianning NPP and Fushui Reservoir

1.2 水环境质量及水生态概况①,②

富水水库现状水质良好,库区水体透明度平均约3m,pH平均为7.19,DO、COD、氯化物、硫酸盐、总氮、总磷、硅酸盐浓度平均值分别为11.43mg/L、3.27mg/L、3.0mg/L、27.32mg/L、0.659mg/L、0.014mg/L和8.57mg/L.各污染物含量自上游至下游呈下降趋势,在支流汇入水域和丰水期受外源污染影响含量有所升高,在大畈镇下游处受生活污水影响含量最高.各项水质参数除总氮外,均达到Ⅰ-Ⅱ类水质的要求,满足该流域执行的Ⅲ类水质管理目标.水体天然放射性指标:U为0.12-0.23μg/L,$Th<0.02$μg/L,^{226}Ra 0.0011-0.0018Bq/L,^{40}K 0.033-0.037Bq/L,总α放射性<0.04Bq/L,总β放射性0.02-0.04Bq/L,与长江流域本底值[2]相比处于正常偏低的水平.

库区中有浮游植物62属115种,主要为绿藻、硅藻和蓝藻,平均密度为9.00×10^5cells/L,生物量平均为1.41mg/L.浮游动物77属150种,以原生动物、轮虫居多,平均密度为1.71×10^4ind./L,生物量平均为2.63mg/L.底栖动物有18种,平均密度为1636ind./m^2,生物量平均为4.88g/m^2.空间分布上,浮游植物和浮

① 水利部、中国科学院水工程生态研究所.湖北大畈核电厂厂址周边水域生态环境及水产资源调查报告.2006.
② 湖北省环境监测中心.湖北省地面水中天然放射性核素浓度的调查报告. 2005.

游动物种类数、密度和生物量均为中上游高于下游，库区多于支流，底栖动物呈“两头高中间低”的典型山谷型水库分布特征. 时间上，浮游植物与底栖动物的密度均为 3 月 >7 月，生物量呈相反趋势，浮游动物种类数 3 月明显高于 7 月. 库区中水生维管束植物资源量较小，仅水库上游、库湾及周边浅水区域有少量分布. 鱼类有 7 目 14 科 45 种，区系组成与大部分长江中下游水体相似，主要有人工放养的鳙、鲢、银鱼和野生的鲤、鲫、翘嘴鲌、黄颡鱼等. 库区内无国家级保护鱼类，坝下河段有鳡、长吻鮠两种湖北省重点保护鱼类存在.

应用 Shannon-Wiener 生物多样性指数计算方法[3]，可得浮游植物除个别断面外多样性指数均 >2，浮游动物和底栖动物多样性指数分别为 1.90－2.32 和 1.38－1.53. 根据水生态调查结果和水质理化指标综合判断，富水水库水环境现状属于轻度-中度污染状态.

2 核电厂对富水水库的辐射影响

相对于火电，核电的运行过程中几乎不产生 SO_2 和温室气体，被认为是满足环保要求的清洁能源. 但核电厂的核反应过程会产生放射性裂变和活化产物，其中一部分可通过气态和液态途径释入环境，产生的辐射影响是核电厂区别于其他类型电厂的显著特征. 对于水库而言，核电厂的放射性流出物将会改变水体放射性水平，对水生物产生辐射剂量，并可能影响厂址附近的淡水资源利用.

2.1 放射性核素的迁移分布

富水水库作为咸宁核电厂的受纳水体，释入其中的放射性核素主要来自于核电厂液态放射性流出物的稀释扩散，和气载放射性流出物中部分碘与气溶胶粒子的水面沉降. 此外，沉降在水库集雨区域土壤表面的碘与气溶胶粒子中约有 2% 的份额可在雨水冲刷下汇入水库[4]. 放射性核素进入水体后，部分吸附在水体中的悬浮物上并沉淀至水库底部. 放射性核素在水库中的上述迁移过程可参考 IAEA 推荐的水库弥散模型、沉积模型及分配系数(K_d)等参数进行计算[4].

2.2 放射性流出物的辐射生物影响

核电厂有严格的管理措施控制放射性物质排放.《核电厂环境辐射防护规定》(GB6249－86)中规定，核电厂向环境释放的放射性物质对公众中任何个人造成的有效剂量应小于 0.25mSv/a. 根据现有核电厂的运行经验，对附近公众实际产生的剂量远低于该限值，可以满足对公众的辐射防护要求[5-6]. 起初，“保护了人类也就保护了其他生物”的观点是辐射防护界的主导思想. 自 20 世纪 90 年代以来，有研究发现许多生物受到的辐射剂量率及辐射敏感性明显高于人类，人们开始关注非人类物种的辐射影响[7-8].

目前，国内有关生物辐射影响评价的方法研究较少，也无相关评价标准. 国外已开发应用了多种生物剂量评价模型及框架[9]. 其中欧盟于 2004－2007 年开展的 ERICA 项目，旨在评估来自电离辐射的暴露、效应和风险等环境问题，提出的一系列参考生物模型及生物剂量转换因子得到了国际放射防护委员会(ICRP)的认同[10]，并已应用于我国滨海核电厂的环境影响评价中[11].

由于生态系统中的生物多样性，不可能对环境中每种生物进行辐射影响评估. ERICA 项目提出的可用于评价的参考生物中淡水物种有 12 种，包括两栖动物、底栖鱼类、水鸟、软体动物、甲壳动物、腹足动物、虫卵、哺乳动物、浮游鱼类、浮游植物、管束植物和浮游动物等[12]，ICRP 选取了其中的两栖动物、水鸟、浮游鱼类三类，从物种角度明确提出将青蛙、鸭和鲑鱼作为淡水参考生物[10]. 考虑到此三类生物的辐射敏感性为水鸟 > 鱼类 > 两栖动物[13]，同时富水水库中水鸟和两栖动物分布相对较少，因此，本次评价选择淡水鱼类作为参考生物. 富水水库的主要鱼类鳙鱼体重为 590－2015g，体长 35.5－46.0cm，鲢鱼体重 1055－1900g，体长 38.8－47.0cm，鲤鱼体重 300－800g，体长约 25－30cm，与 ERICA 项目和 ICRP 建立的体重 1.26kg，体长 50cm 的参考鱼体模型相近. 此外，基于放射性核素均匀分布于体内，不对核素对鱼个别器官内照射作特别考虑，鱼体内外放射性浓度保持平衡，且仅考虑具有典型代表情况的点源外照射的假定，Ulanovsky 等运用 Monte-Carlo 方法计算得到参考鱼对 α、β、γ 辐射的吸收比例，结合辐射能量得出各种辐射对于鱼体的剂量转换因子(DCC)，根据不同类型辐射所造成的不同辐射效应，分别取 α 辐射、低能 β 辐射(电子能量 <10keV)以及高能 β 和 γ 辐射(电子、光子能量 >10keV)的辐射权重因子(weighting factors, *wf*)为 10、3 和 1，进而得到内照射和外照射的剂量转换因子(DCC_{int} 和 DCC_{ext})[14]：

$$DCC_{\text{int}} = wf_{\text{low}\beta} DCC_{\text{int, low}\beta} + wf_{\beta+\gamma} DCC_{\text{int}, \beta+\gamma} + wf_{\alpha} DCC_{\text{int}, \alpha}$$
$$DCC_{\text{ext}} = wf_{\text{low}\beta} DCC_{\text{ext, low}\beta} + wf_{\beta+\gamma} DCC_{\text{ext}, \beta+\gamma}$$

根据内照射和外照射剂量转换因子,和核素在参考生物体内的浓度(C^{b})及环境介质中的浓度(C^{ref}),计算得到核素对于不同参考生物的内照射及外照射辐射剂量率,其中鱼体内的放射性活度可由 IAEA 推荐的鱼类对核素浓集因子(Bp)得出[4].

$$D_{\text{int}}^{\text{b}} = \sum_{i} C_{i}^{\text{b}} DCC_{\text{int}, i}^{\text{b}}$$
$$D_{\text{ext}}^{\text{b}} = \sum_{z} v_{z} \sum_{i} \text{C}_{zi}^{\text{ref}} DCC_{\text{int}, f}^{\text{b}}$$

式中,v 为参考生物于某种介质中的暴露时间占其生命周期的比例,本文鱼类暴露水体中的 v 取 1. 放射性核素在水库中的分布及参考鱼类所受的内照射和外照射附加剂量率见表 1.

参考鱼类所受辐射来自两个途径,即生物通过水及营养物质直接摄入和通过食物链在体内富集的核素产生的内照射,和生物体活动的水体中所含核素的外照射,由内、外照射剂量率之和即得总的辐射剂量率.

$$D_{\text{total}}^{\text{b}} = D_{\text{int}}^{\text{b}} + D_{\text{ext}}^{\text{b}}$$

计算可得咸宁核电厂放射性释放对于水库中参考鱼类产生的总辐射剂量率为 0.075mGy/a(2.06×10^{-4}mGy/d),该结果约相当于文献[7]中给出的淡水鱼类所受辐射剂量率本底值 8.112μGy/d 的 2.5%. ICRP 认为,对于参考鲑鱼,1 - 10mGy/d 的辐射剂量率可能导致鱼卵及幼鱼变形,性腺发育迟缓并减少繁殖进程,但总体上是安全的. >10mGy/d 的辐射剂量率会导致幼鱼产生不利效应,致病性增加甚至胚胎死亡[10]. 目前,国内外一般将 IAEA、ICRP 等国际组织推荐的400μGy/h(10mGy/d)作为剂量率限值,以保证水生生物不会受到种群水平上的危害[7-8]. 本次计算得到的参考鱼类所受附加辐射剂量率远低于该限值,说明水库中水生生物受到的辐射影响很低. 同时,参考鱼类所受的主要剂量来自^{134}Cs 和^{137}Cs 的内照射,这与核电厂对海洋鱼类剂量贡献的主要核素是^{124}Sb 和^{132}Te 不同[11],除放射性释放源项上的差异外,可能是因为 Cs 在淡水鱼体内的富集系数较高所致.

2.3 放射性核素对水库水质及饮用水影响

由于我国内陆人口较为密集,厂址特征特别是水环境特征较为复杂,因此内陆核电厂所面临的水体环境影响评价因素远比滨海厂址复杂[15]. 目前,我国《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002)中并未提出放射性限值,地表水体放射性评价主要参考《生活饮用水卫生标准》(GB5749 - 2006)中生活饮用水水质总 β 放射性低于 1Bq/L 的要求. 此外,在即将颁布的《核动力厂环境辐射防护规定》中,也有核电厂受纳水体下游 1km 处总 β 放射性应低于 1Bq/L 的规定. 核电厂运行排放的放射性流出物对水库水体造成的总 β 放射性约为 5.57×10^{-3}Bq/L,低于水库库区本底值 0.02 - 0.04Bq/L,叠加后仍小于 1Bq/L(表 1).

富水水库库区内没有居民集中饮用水取水口,距厂址最近的饮用水取水口为水库大坝下游约 21km 处的排市镇自来水厂取水口. 水库大坝距核电厂排放口约 18km,大坝下游进入富水河,富水河沿途汇入龙港河及三溪河的稀释作用以及核素自身的衰变,会导致河水中核素浓度的变化,采用环境影响评价导则中推荐的河流一维稳态模式计算富水河各段水体及取水口的放射性核素浓度,可得排市镇自来水厂处的总 β 放射性增量为 4.51×10^{-3}Bq/L,叠加富水河本底值 0.05 - 0.09Bq/L,也可满足 1Bq/L 的生活饮用水质要求.

3 核电厂对富水水库的其他影响

除辐射影响外,核电厂还会造成一些非放射性环境影响. 本文主要关注核电厂排放化学污染物对水库环境的非放射性影响,并对电厂冷却系统的环境影响给予一定评价.

表 1 水库中的放射性核素分布及参考生物所受辐射剂量率

Tab. 1 Radionuclides distribution and radiation dose rate endured by reference biota in the reservoir

核素	核素浓度 (Bq/L 或 Bq/kg)			剂量转换因子 (μGy/h)/(Bq/kg)		附加辐射剂量率 (μGy/h)		核素	核素浓度 (Bq/L 或 Bq/kg)			剂量转换因子 (μGy/h)/(Bq/kg)		附加辐射剂量率 (μGy/h)	
	水体	沉积物	鱼体	内照射	外照射	内照射	外照射		水体	沉积物	鱼体	内照射	外照射	内照射	外照射
^{3}H	1.59E+02	—	1.59E+02	8.25E-06	3.60E-13	1.31E-03	5.72E-11	^{110m}Ag	1.05E-04	—	5.25E-04	2.40E-04	1.40E-03	1.26E-07	1.47E-07
^{24}Na	1.04E-06	4.08E-09	2.08E-05	5.30E-04	2.17E-03	1.10E-08	2.26E-09	^{110}Ag	4.08E-11	—	2.04E-10	6.47E-04	5.24E-05	1.32E-13	2.14E-15
^{51}Cr	4.89E-05	5.95E-05	9.78E-03	9.71E-06	1.57E-05	9.50E-08	7.68E-10	^{125}Sb	2.40E-06	7.96E-07	2.40E-04	9.86E-05	2.10E-04	2.37E-08	5.04E-10
^{54}Mn	1.53E-04	3.01E-04	6.12E-02	6.59E-05	4.20E-04	4.03E-06	6.43E-08	^{129m}Te	3.41E-06	—	1.36E-03	3.67E-04	4.20E-05	5.01E-07	1.43E-10
^{55}Fe	1.40E-04	3.64E-03	2.80E-02	8.23E-06	1.47E-08	2.30E-07	2.06E-12	^{129}Te	7.43E-09	—	2.97E-06	3.17E-04	3.47E-05	9.42E-10	2.58E-13
^{59}Fe	7.91E-06	9.28E-06	1.58E-03	1.45E-04	6.09E-04	2.29E-07	4.82E-09	^{131m}Te	1.14E-07	—	4.56E-05	3.15E-04	7.74E-04	1.44E-08	8.82E-11
^{57}Co	2.34E-07	1.67E-06	7.02E-05	3.82E-05	6.00E-05	2.68E-09	1.40E-11	^{131}Te	5.34E-10	—	2.14E-07	4.35E-04	2.24E-04	9.29E-11	1.20E-13
^{58}Co	4.90E-04	9.14E-04	1.47E-01	9.36E-05	4.90E-04	1.38E-05	2.40E-07	^{132}Te	7.85E-07	—	3.14E-04	5.30E-04	1.30E-03	1.66E-07	1.02E-09
^{60}Co	4.31E-04	2.19E-02	1.29E-01	2.10E-04	1.30E-03	2.72E-05	5.60E-07	^{131}I	1.32E-03	7.01E-07	5.28E-02	1.40E-04	1.90E-04	7.39E-06	2.51E-07
^{65}Zn	4.05E-05	3.18E-05	4.05E-02	4.93E-05	2.97E-04	2.00E-06	1.20E-08	^{132}I	1.61E-07	1.02E-12	6.44E-06	4.40E-04	1.20E-03	2.83E-09	1.93E-10
^{84}Br	4.52E-10	—	1.81E-07	7.55E-04	9.85E-04	1.37E-10	4.45E-13	^{133}I	4.58E-04	2.61E-08	1.83E-02	2.80E-04	3.10E-04	5.13E-06	1.42E-07
^{88}Rb	3.42E-09	—	6.84E-06	1.10E-03	4.47E-04	7.52E-09	1.53E-12	^{134}I	3.03E-08	7.30E-14	1.21E-06	5.29E-04	1.35E-03	6.41E-10	4.09E-11
^{89}Sr	3.68E-05	1.16E-05	2.76E-03	3.30E-04	7.70E-06	9.11E-07	2.83E-10	^{135}I	1.40E-06	2.54E-11	5.60E-05	3.22E-04	8.48E-04	1.80E-08	1.19E-09
^{90}Sr	5.53E-05	2.80E-03	4.15E-03	6.30E-04	2.40E-05	2.61E-06	1.33E-09	^{134}Cs	1.42E-03	6.71E-03	1.42E+01	2.10E-04	7.90E-04	2.98E-03	1.12E-06
^{91}Sr	8.09E-09	2.01E-11	6.07E-07	4.48E-04	5.37E-04	2.72E-10	4.34E-12	^{136}Cs	8.10E-06	6.66E-07	8.10E-02	2.30E-04	1.10E-03	1.86E-05	8.91E-09
^{91m}Y	3.54E-10	—	1.06E-08	5.54E-05	2.66E-04	5.88E-13	9.42E-14	^{137}Cs	2.30E-03	1.19E-01	2.30E+01	1.80E-04	2.90E-04	4.14E-03	6.67E-07
^{93}Y	3.87E-08	—	1.16E-06	6.44E-04	8.35E-05	7.48E-10	3.23E-12	^{140}Ba	6.80E-05	—	2.72E-04	7.23E-04	1.47E-03	1.97E-07	1.00E-07
^{95}Zr	2.38E-05	9.55E-06	7.14E-03	1.20E-04	3.70E-04	8.57E-07	8.81E-09	^{140}La	1.26E-05	—	3.78E-04	4.49E-04	1.20E-03	1.70E-07	1.51E-08
^{95}Nb	2.67E-05	—	8.01E-03	8.16E-05	3.90E-04	6.54E-07	1.04E-08	^{141}Ce	2.81E-06	4.01E-06	8.43E-05	1.12E-04	3.70E-05	9.44E-09	1.04E-10
^{99}Mo	1.58E-06	—	1.58E-05	2.57E-04	1.39E-04	4.06E-09	2.20E-10	^{143}Ce	2.65E-07	1.60E-08	7.95E-06	2.76E-04	1.42E-04	2.19E-09	3.76E-11
^{99m}Tc	1.41E-07	1.17E-12	2.82E-06	2.27E-05	6.24E-05	6.40E-11	8.80E-12	^{143}Pr	1.66E-06	—	4.98E-05	1.79E-04	1.86E-06	8.91E-09	3.09E-12
^{103}Ru	1.59E-04	2.01E-05	1.59E-03	1.04E-04	2.40E-04	1.65E-07	3.82E-08	^{144}Ce	3.30E-04	4.13E-03	9.90E-03	7.20E-04	6.60E-05	7.13E-06	2.18E-08
^{106}Ru	8.37E-03	9.90E-03	8.37E-02	7.80E-04	1.60E-04	6.53E-05	1.34E-06	^{144}Pr	3.89E-08	—	1.17E-06	6.59E-04	5.56E-05	7.69E-10	2.16E-12
^{103m}Rh	1.96E-07	—	1.96E-06	2.56E-05	2.41E-07	5.02E-11	4.72E-14	^{187}W	1.32E-07	—	1.32E-06	2.37E-04	2.41E-04	3.13E-10	3.18E-11
^{106}Rh	2.61E-08	—	2.61E-07	7.78E-04	1.57E-04	2.03E-10	4.10E-12	^{239}Np	5.71E-07	8.85E-11	1.71E-05	1.84E-04	8.24E-05	4.13E-09	4.71E-11

3.1 电厂化学物质排放的环境影响

核电厂运行过程中,需加入一定量的化学试剂以满足系统运行和水质处理的要求,因此核电厂的液态流出物中除含有放射性核素外,还包括一定量的化学污染物,其中需着重考虑余氯.

与国内其他电厂一样,咸宁核电厂将使用加氯处理方法避免冷却系统生物阻塞的现象,这必然导致电厂排放的冷却水中存在一定数量的余氯.余氯进入水体后可水解生成游离有效氯($HOCl$ 和 OCl^-),进而与水中的氨反应产生化合态有机氯(NH_2Cl 和 $NHCl_2$),游离态余氯毒性强于化合态余氯,但更容易衰减.现有的研究表明,浮游植物受余氯影响较大,0.2mg/L 的氯可直接杀死冷却塔用水中 60%-80% 的藻类,0.1mg/L 的氯会使浮游植物光合作用下降 50%,当余氯稀释到 0.03mg/L 以下,水中初级生产力可完全恢复;浮游动物对氯较敏感,25℃时余氯对淡水中浮游动物的 48h LC_{50} 为 0.032-0.055mg/L,按照 LC_{50} 乘以 50% 的方法可确定余氯安全浓度为 0.016mg/L;鱼类受余氯影响也较大,余氯对几种淡水鱼类的 96h LC_{50} 为 0.050-0.358mg/L,可估算余氯对淡水鱼类的安全容许浓度不低于 0.025-0.179mg/L[16].

目前,我国的《污水综合排放标准》(GB8978-1996)中仅规定了采用氯化消毒的医院污水中总余氯排放限值,不适用于核电厂余氯排放评价.国外针对淡水中余氯浓度制定了一系列的限值要求,欧洲淡水鱼类水质标准中不同 pH 值和温度下淡水中总余氯浓度的阈值(表 2)说明,pH 值对总余氯浓度影响比温度影响大得多[17];Mattice 等通过对氯毒性的零死亡率统计,得出余氯对于淡水生物的慢性毒性阈值为 1.5μg/L[18];EPA 于 2006 年制定的水质基准中针对淡水中余氯制定的基准最大浓度和基准连续浓度(可分别对应为急性阈值和慢性阈值)分别为 19μg/L 和 11μg/L[19].

咸宁核电厂冷却塔补水为淡水,补给水量约 6.2m^3/s,设计采用间歇加氯方式,每天加氯 1-3 次,每次加氯量约 1.0mg/L,冷却塔总排污水量 1.4m^3/s,排水中余氯含量 $<$0.1mg/L.根据保守计算的原则,不考虑余氯衰减,选取水库保证率 99% 的枯水期流量 28.79m^3/s,使用环评导则中推荐的湖泊混合平衡模式计算得到库区内余氯混合后的平衡浓度为 0.005mg/L.计算结果低于刘兰芬等给出的安全浓度[17],但高于一些国外环境基准值.实际情况中,余氯在水库中稀释扩散时会受 pH、光照和水温的影响而衰减;水中的浮游生物,一些还原性物质以及有机物等会迅速消耗水中的游离氯;排水过程中的掺混和压力变化等也会促进余氯衰减.根据相关的余氯衰减研究,余氯在排放后最初 3h 内衰减迅速,可衰减为排放浓度的 8%,随着时间延长,浓度衰减速率变缓,9h 后余氯浓度衰减为排放浓度的 6%,20h 后衰减为排放浓度的 4%[17].考虑到富水水库水容量与电厂排污量相差极大,余氯在水库内有充分的衰减过程,上述保守估算结果可能远远高估实际的余氯浓度,因此预计核电厂排放的余氯对富水水库环境的实际影响不大.

表 2 不同 pH 和温度条件下的总余氯浓度阈值(mg/L)

Tab.2 Threshold concentration of total residual chlorine under different pH and temperature conditions

水温(℃)	pH			
	6	7	8	9
5	0.004	0.005	0.011	0.075
25	0.004	0.005	0.016	0.121

3.2 冷却系统的环境影响

核电厂冷却系统对环境的影响包括冷却水的热影响和冷却系统的机械作用影响[20].咸宁核电厂作为内陆核电厂,为减少对受纳水体的热影响而采用二次循环冷却方式.姜礼燔曾建议长江水系中的鱼类最高水温标准为 35℃,最大水温变化不应超过 3℃[21].富水水库的全年月平均温度为 6.7-28.0℃,最高水温不超过 33.2℃,咸宁核电厂冷却塔排污水量小(1.4m^3/s)且温升较低(3-5℃),因此对富水水库的热影响范围及程度很小.

水生生物随冷却塔补给水进入循环冷却系统后,在压力、冲击力、剪切力、机械磨损和碰撞等因素作用下,可能产生一定的机械损伤.潘明祥等在综述中指出:机械作用对于浮游植物的影响不大,但可一定程度上影响初级生产力;对于浮游动物影响较大,体型越大、水温越低时越易受到损伤,且浮游动物所受的机械损伤常与热冲击、化学冲击并存;鱼类,特别是鱼卵和仔鱼最易受到机械作用影响而死亡,死亡率可接近

100%,机械作用对鱼类的影响可能超过热冲击,甚至对渔业资源产生破坏[22]. 国内目前相关的研究较少. 孔令丰通过数值模拟方法,计算得大亚湾和岭澳核电站四台机组共同运行时,对西大亚湾海域中的黑鲷和墨吉明对虾的卷载率分别为 10.10% 和 5.55%[23]. 盛连喜等在青岛电厂开展的实验结果表明,进入冷却系统的浮游藻类机械损伤率为 11.98% - 27.08%,易损种类主要为蓝藻和绿藻,受损藻类恢复到受损前水平约需 2d 时间;对浮游动物的损伤程度高于浮游藻类,数量损伤率为 31% - 90%,易受损伤的种类主要是桡足类水蚤,浮游动物恢复约需 1.5 - 6d,恢复最快的是原生动物,最慢的是桡足类;因卷吸进入冷却系统的仔虾(体长 7 - 34mm)损伤率为 28.3% - 66.9%,损伤率与仔虾密度呈正相关关系,且随仔虾体长增大而增加;梭鱼幼鱼(体长 20 - 40mm)的损伤率为 63.4% - 78.8%,损伤主要由机械应力和高温所致[24-25].

目前国内的相关研究主要针对采用直流循环冷却方式的滨海电厂,因此难以对咸宁核电厂冷却系统的机械作用影响进行定量分析. Paller 等发现,美国 Savannah 河上的三座反应堆对河流中鱼卵和幼鱼的卷吸率为 4% - 18%,两座反应堆关闭,第三座改为二次循环冷却方式后,卷吸率显著降低为 0.2% - 0.8%[26]. 可见采用二次循环冷却方式后,由于抽取水量减少,对于水生生物的机械影响也将相应减少. 此外,富水水库中没有珍稀的水生生物,可能受核电厂卷吸和撞击影响的水生生物均分布广泛,并可很快恢复,因此估计咸宁核电厂冷却系统的机械作用影响很小.

4 与 North Anna 核电厂环境影响的比较

North Anna 核电厂位于美国 Virginia 州 Louisa 郡,地处 Anna 湖中部西岸. Anna 湖与富水水库环境特征较为类似,同是由筑坝产生的人工河道型水库,湖面面积约 52.7km^2,平均水深 7.6m,湖水平均流量 11.32m^3/s(富水水库面积约 54.8km^2,平均水深约 13m,湖水平均流量 70.68m^3/s). North Anna 核电厂现有两台采用直流循环冷却方式的机组正在运行,冷却水流量为 120m^3/s,冷却水并不直接排入 Anna 湖,而先通入位于 Anna 湖西侧的三个湖湾中进行冷却,湖湾面积约 13.8km^2,与 Anna 湖分别有水坝相隔. 拟建的 3、4 号核电机组将采用冷却塔闭合循环冷却方式,其中 3 号机组冷却塔排污水量约为 0.35m^3/s,目前该机组已获准建设.

根据美国核管会(USNRC)公布的 North Anna 核电厂环评文件[27],拟建的 3、4 号机组对于 Anna 湖中鱼类产生的辐射剂量率为 0.19mGy/a,较之富水水库中参考鱼类所受的 0.075mGy/a 辐射剂量率略高. North Anna 核电厂 1、2 号机组对 Anna 湖中鱼类有一定的机械作用影响,其中影响最大的黑莓鲈(*Pomoxis nigromaculatus*)受影响比例近 3.8%,但总体上影响仍可接受. 拟建机组中,4 号机组拟采用空气干式冷却,水利用量很小. 3 号机组采用湿式冷却塔,其运行会使水生生物受到卷吸和撞击的损失量增加约 1%,不会对Anna湖中生物量增加显著影响. 3 号机组冷却塔排污水水温约 38℃,处于目前电厂夏季排放渠中 37.0 - 39.1℃的温度范围以内,其流量很低,对 Anna 湖的热负荷增加很小.

USNRC 认为,在 North Anna 厂址兴建 4 台核电机组的环境影响是可以接受的,可能是出于环境容量的考虑,该电厂 3、4 号机组采用了对水环境影响相对较小的二次循环冷却方式,从评价结果分析来看,相对已经运行的 1、2 号机组,扩建机组对环境的影响增量很小. 类比来看,建设 4 台机组并全部采用二次循环冷却方式的咸宁核电厂对于富水水库的环境影响应很有限.

5 结果与讨论

综上所述,可以看出在我国适宜的内陆厂址建设核电厂是必要的,咸宁核电厂运行对富水水库环境的影响是可以接受的. 需要指出的是,本文涉及内容只是核电厂环境影响评价中的一部分,对核电厂的建设和运行所造成的环境影响还应从气载流出物的辐射影响、施工期间环境影响、事故风险及应急条件等方面进行综合评估,但对于内陆核电厂而言,水环境影响仍是至关重要的内容.

同时,为准确评价和减缓内陆核电厂对水体的环境影响,相关管理者和研究人员还需关注以下问题:

(1)虽然核电厂放射性释放对于水库环境及饮用水源的辐射影响很小,但核素在水库中的累积效应仍不容忽视. 我国目前亟需制定地表水体中放射性指标限值,同时应加强核素在内陆水体中迁移的放射生态学和对生物的辐射剂量学及辐射生物效应研究.

(2)建设内陆核电厂需重点关注水环境影响.对于淡水水体,核电厂排放的余氯可能是不可忽视的因素.相关人员应关注电厂运行中的余氯影响程度和范围,研究并制定淡水物种对于余氯的安全浓度标准.

(3)水库相对海洋和大江大河来说,水体稀释扩散能力有限.建设内陆核电厂,特别是滨湖核电厂时应尽量使用二次循环冷却方式,避免使用直流冷却方式.如采用直流冷却,应设置必要的冷却水面以减少热影响.

(4)根据现有运行经验,采用二次循环冷却方式可有效减少冷却系统的机械作用影响.核电厂可考虑通过在取水系统中加装旋转滤网等措施,进一步减少取水对水生生物可能的卷吸和撞击等影响.

6 参考文献

[1] 张国宝.科学发展:电力工业赢得挑战的根本路径. 中国水能及电气化,2009,(5):58-60.

[2] 李振平. 长江水系放射性水平调查及评价. 北京:原子能出版社,1984:7.

[3] 国家环保局《水生生物监测手册》编委会. 水生生物监测手册. 南京:东南大学出版社,1992:170-171.

[4] IAEA. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment, IAEA Safety Report Series No.19. Vienna: IAEA, 2001: 44-56.

[5] 施仲齐,曲静原,崔永利.核电厂对环境的放射性污染及其防治. 辐射防护,1998,**18**(4):241-260.

[6] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, Annex C: exposure to the public from man-made sources of radiation. New York: United Nations, 2000: 158-193.

[7] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, Scientific Annex: effects of radiation on the environment. New York: United Nations, 1996: 7-75.

[8] IAEA. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards, IAEA Technical Report Series No. 332. Vienna: IAEA, 1992: 1-6.

[9] Vives IBJ, Bolonov M, Beaugelin-Seiller K *et al*. Inter-comparison of absorbed dose rates for non-human biota. *Radiat Environ Biophy*, 2007, **46**: 349-373.

[10] ICRP. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. Oxford: Pergamon Press, 2008: 25-82.

[11] 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. 热带海洋学报,2009, **28**(6):35-40.

[12] Brown JE, Alfonso B, Avila R *et al*. The ERICA tool. *J Environ Radioactiv*, 2008, **99**(9): 1371-1383.

[13] 周永增. 非人类物种的辐射生物效应及其评价. 辐射防护通讯,2004, **24**(4): 1-9.

[14] Ulanovsky A, Pröhl G. A practical method for assessment of dose conversion coefficients for aquatic biota. *Radiat Environ Biophy*, 2006, **45**(4): 203-214.

[15] 常向东. 我国内陆核电厂选址评价中应关注的问题. 核安全, 2007, (3): 37-41.

[16] 曾江宁, 陈全震, 郑 平等. 余氯对水生生物的影响. 生态学报, **25**(10): 2717-2724.

[17] 刘兰芬, 郝 红, 鲁光四. 电厂温排水中余氯衰减规律及其影响因素的实验研究. 水利学报, 2004, (5): 1-6.

[18] Mattice JS, Zittel HE. Site-specific evaluation of power plant chlorination. *J Water Pollut Con F*, 1976, **48**(10): 2284-2308.

[19] USEPA. National recommended water quality criteria. 2006: 13.

[20] 李 沫, 蔡泽平. 核电站对海洋环境及生物的影响. 海洋科学, 2001, **25**(9): 32-35.

[21] 姜礼燔. 热冲击对鱼类影响的研究. 中国水产科学, 2000, **7**(2): 77-81.

[22] 潘明祥, 王肇鼎. 核电站冷却水系统对水生生物的机械损伤. 南海研究与开发, 1999, (2): 66-80.

[23] 孔令丰. 大亚湾放射生态学及海洋生物转移与卷载效应的研究[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2007.

[24] 盛连喜, 王显久, 李多元等. 青岛电厂卷载效应对浮游生物损伤研究. 东北师大学报(自然科学版), 1994, (2): 83-89.

[25] 盛连喜, 侯文礼, 赵 国等. 电厂冷却系统对梭幼鱼和对虾仔虾卷载效应的初步探讨. 环境科学研究, 1994, **14**(1): 47-55.

[26] Paller MH. The influence of Savannah River discharge and changing SRS cooling water requirements on the potential entrainment of ichthyoplankton at the SRS Savannah River intakes. Aiken: Westinghouse Savannah Rive Company, 1992: 1-19.

[27] USNRC. Environmental impact statement for an Early Site Permit (ESP) at the North Anna ESP site. Final Report. NUREG-1811. Washington DC: USNRC, 2006: 277-280.