



黄彦君, 上官志洪, 周如明. Mississippi 河流域运行核电厂环境影响评估研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 422-427. Huang Yanjun, Shangguan Zhihong, Zhou Ruming. An investigation of radiological environment impact from nuclear power plant at Mississippi river watershed[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S1): 422-427.

Mississippi 河流域运行核电厂环境影响评估研究

黄彦君, 上官志洪, 周如明

(中广核集团苏州热工研究院, 江苏 苏州 215004)

摘 要: Mississippi 河是美国第一大河, 流域面积约占美国领土面积的 40%, 流域内人口占美国人口的 37%, 沿岸分布了数十个 10 万以上人口的城市。Mississippi 河及其支流的地表水、地下水为流域内居民的饮用水源。该流域也是美国重要的工农业和能源生产基地, 对用电量的需求较高。现美国 Mississippi 河流域内共运行 21 座核电厂 32 台机组。通过严格控制液体放射性流出物排放管理和环境辐射监测表明, 这些核电厂运行排放的放射性物质对环境和公众的辐射影响是非常小的。通过调研美国核管会(NRC)对流域内申请延寿核电厂的环境影响影响意见书, 表明美国认可这些核电厂放射性液态流出物排放的对环境的影响属于小影响。

关键词: 内陆核电厂; Mississippi 河流域; 环境影响; 辐射环境监测

中图分类号: X820.3 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.S1.083 文章编号: 1003-6504(2016)S1-0422-06

An Investigation of Radiological Environment Impact From Nuclear Power Plant at Mississippi River Watershed

HUANG Yanjun, SHANGGUAN Zhihong, ZHOU Ruming

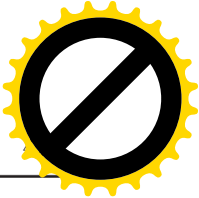
(Suzhou Nuclear Power Research Institute, CGN, Suzhou 215004, China)

Abstract: The Mississippi River is the largest river in United States, has a watershed covered more than 40 percent of US territory. Approximately 37 percent of US's populations live in the watershed, dozens of cities with populations more than 100,000 are located. The watershed is an important production base of industry, agriculture and energy with a high demand of electric power, and in the meanwhile an important water source for drinking for residents. A total of 21 nuclear power plants with 32 units within the watershed are now in normal operation. It was shown that the radiological environment impacts from liquid effluent discharged from these plants were small through a strict supervision of discharge and radiological environment supervision. The environmental statements for the power plants within the watershed reported by US Nuclear Regulatory Commission were revealed also as small, reflected the authority opinion of US, which would provide references for the siting and promoting the inland nuclear power plants in China.

Key words: inland nuclear power plant; Mississippi River watershed; environmental impact; radiological environment monitoring

我国目前已运行和在建的核电厂均位于沿海地区。对于内陆核电建设,我国有关政府部门一直持十分谨慎的态度,其中尤其关注内陆核电厂运行对水环境的影响^[1-4]。事实上,全世界运行的核电机组有一半以上建在内陆地区,美国的 Mississippi 河流域就建有 32 台核电机组;有些国家,如瑞士、乌克兰、比利时等,其核电厂全部建在内陆地区^[5]。国外内陆核电厂的建设和运行为研究和评估内陆核电厂对水环境的影响提供了良好的经验。

我国正在进行选址论证的核电厂有相当一部分位于长江流域。在长江流域建设核电厂历来受到我国流域管理机构、部分专家学者和公众的关注^[1-4]。一种观点认为,长江流域居住着全国 1/3 的人口,占全国面积的 1/5,沿岸有重庆、武汉、南京、上海等数十个大中城市,核电厂排放的放射性液态流出物进入长江后可能造成放射性物质的累积,从而导致流域水资源的安全问题^[6]。美国 Mississippi 河流域面积占美国领土 2/5,包括了 31 个州的全部或部分^[7]。根据美国人口普



查数据库,2012 年 Mississippi 河流域所在州的人口总数达到 1.13 亿,约占美国总人口(3.03 亿)的 37%,流域内人口在 10 万以上的城市共 57 个^[8]。Mississippi 河在美国农业、生态、能源(水利)、内河航运等方面的作用不亚于我国的长江,在美国素有“父亲河”之称。分析研究 Mississippi 河流域核电厂分布、分析核电厂正常运行排放放射性物质的影响、评估水体放射性监测结果等,将有助于理解内陆核电厂建设和运行可能对流域及水环境的影响,从而解答我国流域管理机构、专家学者和公众的疑虑,推动我国内陆核电厂的建设。

1 Mississippi 河流域核电厂分布

美国核电厂的选址布局主要考虑能源需要和环境条件。目前 Mississippi 河流域有 21 座核电厂共 32 台机组运行(见图 1)。其中,在 Mississippi 河干流上有 6 座核电厂(8 台机组),在 Illinois 河及其支流上有 4 座核电厂(7 台机组),在 Tennessee 河上有 3 座核电厂(6 台机组),在 Missouri 河上有 3 座核电厂(3 台机组),在 Arkansas 河上有 2 座核电厂(3 台机组),在 Rock 河、Iowa 河和 Ohio 河上各有 1 座核电厂。

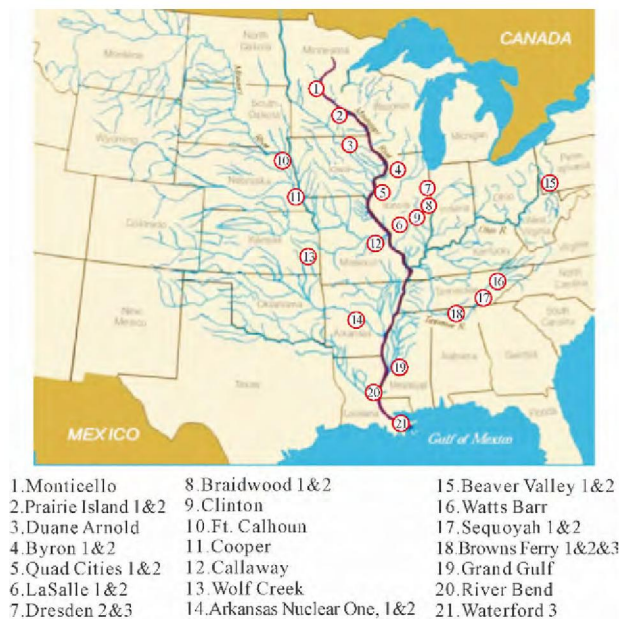


图1 美国Mississippi河流域核电厂分布(2014-12)

2 流域辐射环境影响

2.1 美国运行核电厂延寿申请环境影响评估

2.1.1 背景

Mississippi 河流域核电厂大多数运行了 40 a 或以上的时间。早期美国核电厂设计寿命一般为 40 a 或更短,从 1999 年开始,NRC 陆续开始开展了美国运行延寿核电厂的环境影响评估(GEIS),包括 Mississippi

河流域的 21 座核电厂^[9]。由于申请延寿的核电厂一般都接近核电厂设计寿命,具有多年运行经验,因而分析这些核电厂延寿的环境影响报告书中有关环境影响的内容,有助于理解美国 NRC 对内陆核电厂受纳水体可能受到环境影响特别是辐射环境影响的见解。

2.1.2 评估准则

在美国核电厂延寿申请的环境影响评估中,NRC 建立了一套评估准则,对涉及环境影响的若干问题进行识别和分类,并确定了评估影响的重要程度的准则。对于运行核电厂涉及的环境问题,NRC 将影响分成 3 个水平:

(1) 小影响:环境效应是不可探测的,或者小到既不会破坏也不会显著改变资源的重要属性。

(2) 中等影响:环境效应足以显著改变但不会破坏资源的重要属性。

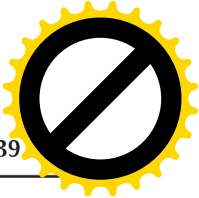
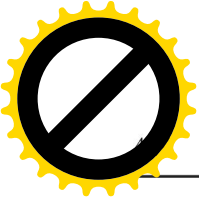
(3) 大影响:环境影响显著,且足以破坏资源的重要属性。

NRC 对于美国运行核电厂共识别了 92 个环境问题。其中,69 个属于 1 类问题,其余 23 个问题需要针对具体电厂的设计特征(例如,循环冷却方式)或厂址特征进行评估。

对于 1 类问题,应满足以下准则:(1) 已经确定与问题有关的环境影响适用于所有电厂,或者适用于特定的冷却系统、电厂或厂址特征;(2) 对各种影响,已经确定了单一的重要度水平,即小影响、中等影响或大影响;(3) 分析中已对问题的不利影响考虑了缓解措施,与特定厂址有关的进一步缓解措施可能不能充分利于确保实现。

NRC 认为,对于 1 类问题,在以后的延寿申请环境影响报告书中不需要针对具体电厂进行分析,除非确定有新的资料。对于不能满足 1 类问题 3 个准则的,NRC 划入为第 2 类或其它类,需要对具体电厂进行审查。

在 NRC 识别的所有 92 个问题中,对地表水的影响,NRC 总结了 11 个问题,包括地表水利用和水质,取排水口构筑物流态的改变,盐度梯度的改变,湖的水温分层改变,由排放冷却水引起的冲刷,冷却系统流出物中金属的排放,灭菌剂、生活污水和少量泄漏化学物质的排放,用水矛盾等。对其中电厂采用冷却塔或冷却池从低流量小河取用补给水的影响,NRC 将其作为 2 类问题,影响类别为小至中等影响。NRC 对其他 10 个问题都认为是小影响。可以看到,NRC 未提到放射性物质在地表水或沉积物中的累积影响问题,甚至都不足以成为 1 类问题,这表明核电厂特别是内陆核电厂运行不会对受纳水体造成累积影响。



NRC 对申请延寿核电厂受纳水体的环境影响评价中,同时还给出了水生资源可能受到影响的问题共 13 个,其中 1 类问题 10 个,2 类问题 3 个。与液态放射性物质排放可能的累积影响的问题仅 1 个,即放射性核素对水生生物的照射,NRC 将该类问题的影响归为小影响。

在人体健康影响类别中,NRC 提出了可能影响的问题 8 个。与排放放射性物质的影响的问题仅 1 个,即对公众造成的辐射影响。NRC 认为,对申请延寿的核电厂,其排放放射性物质对对公众的辐射照射将继续处在正常运行的水平,属于小影响。需要说明的是,NRC 对申请延寿核电厂的环境影响报告书提出了累积影响评价的要求并单列一节。累积影响主要涉及:水生资源、陆生资源、人体健康、社会经济、放射性等。查阅 NRC 发布的延寿申请报告,可以看到 NRC 认可放射性物质排放的累积是 1 类问题,均属于小影响。

2.1.3 评估结果

根据 Mississippi 河流域核电厂延寿申请的环境影响评估报告,详细给出对地表水(受纳水体)和水生资源环境影响的评估结果。评估表明,对 Mississippi 河流域的所有 13 座核电厂,除 Wolf Creek 核电厂地表水用水矛盾被识别小至中等影响外,其它第 2 类与受纳水体相关的问题的环境影响均为小影响。这表明,美国 NRC 认可 Mississippi 河流域的这些核电厂对水体的环境影响是很小的。了解这个基本情况,无疑可以增强对我国内陆建设核电厂的信心。

Wolf Creek 核电厂以 Coffey County 湖为冷却池,而 Coffey County 湖是在 Neosho 河的小支流 Wolf Creek (建湖前测量的多年平均年流量为 $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$) 上筑坝形成的。为了满足 Wolf Creek 核电厂运行需要,通过购水合同从 Neosho 河调水。Neosho 河多年平均流量为 $52.8 \text{ m}^3/\text{s}$,干旱期间,不同月份有规定的最小需水量(即生态流量),介于 $1.1\sim 5.7 \text{ m}^3/\text{s}$,以保证 Neosho 石鲮鱼和淡水珠母的栖息要求。然而,NRC 认为干旱期间 Wolf Creek 核电厂继续在 Neosho 河调水会影响周围地区的地下水补给,因此,将该电厂地表水用水矛盾的影响评估为小至中等影响,可以采取的缓解措施是在严重干旱期间减少或停止从 Neosho 河调水。

2.2 核电厂环境辐射监测报告监测结果的评估

美国核电厂辐射环境监测项目基于 2 个目的,一是公众剂量评估的要求。美国核安全导则 NUREG 1301 规定了基于公众剂量评估要求需要开展的监测项目^[10],而公众剂量评估则考虑了核电厂气态流出物和液态流出物在环境中的传输途径。二是基于累积影

响监测的要求。美国核电厂的辐射环境监测项目中可能会选择开展一些具有指示意义的监测项目,例如对受纳水体沉积物和水生植物的监测。根据美国 NRC 公布的 2005–2012 年间流域内各核电厂向 NRC 提交的辐射监测年报,统计各类水体介质中放射性监测结果^[11]。

2.2.1 地表水

Mississippi 河流域 21 座核电厂地表水中氚的监测结果(年均值)见图 2。

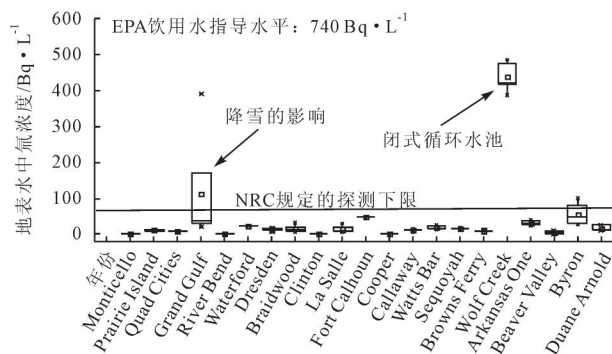


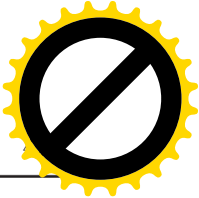
图2 Mississippi河流域核电厂地表水中氚监测结果统计分析

流域内核电厂地表水中检测到的氚一般低于 NRC 规定的探测下限 (74 Bq/L)。除 Grand Gulf 核电厂外,已检出氚的结果亦处于相对较低的水平,与监测点位于排放口附近有关。例如,Prairie Island 核电厂地表水监测指示点位于核电厂排放渠出口附近的大坝处,距离厂址中心 2.6 km 。Grand Gulf 核电厂 2010 年地表水中氚的监测平均值为 395 Bq/L ,出现较高活度浓度的点位于核电厂液态流出物排放口附近,监测结果较高与该年度气态流出物沉降有关。其中,最大浓度的样品对应于当年 2 月份的降雪,采样时降雪厚度达到 1.8 m 。

对 Wolf Creek 核电厂,由于其位于 Arkansas 河上游的 Coffey County 水库(核电厂自建水库)库容仅 0.137 亿 m^3 ,水面面积仅 50.9 km^2 ,下泄流量极小,仅 $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$,该水库通过一条长 8.8 km 的 Wolf Creek 与 Arkansas 河的支流 Neosho 河相连。核电厂运行甚至需要从 Neosho 河上游的 John Redmond 水库取水(位于厂址以西约 8 km 处)。监测年报显示,核电厂地表水指示监测点位 Coffey County 水库大坝处,监测结果反映了排水口区域的放射性水平。

2.2.2 饮用水

美国核电厂开展饮用水监测的水源一般是地表水体上建设的公众饮用水系统。在 Mississippi 河流域有 11 座核电厂开展饮用水监测。2005–2012 年这些核电厂饮用水监测结果见图 3。可以看到,流域内仅少数核电厂在饮用水中检测到氚,但其活度浓度水平较



低,最大为 Braidwood 核电厂在 2005 年监测到的值,仅 38.2 Bq/L;在 2010 年的一个样品中监测到最大值达到 77.3 Bq/L,约为 NRC 规定的报告水平或 EPA 规定的饮用水中氚的指导水平的 1/10^[12]。

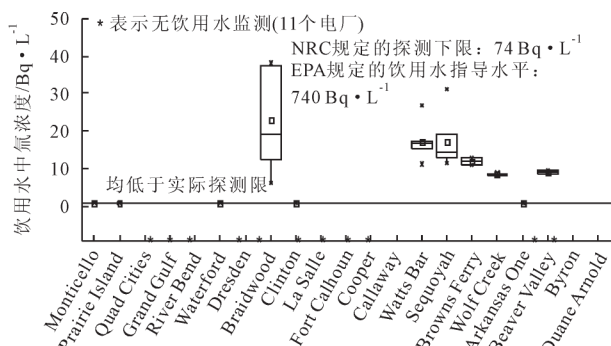


图3 Mississippi河流域核电厂饮用水中氚监测结果统计分析

2.2.3 沉积物

2005–2012 年间 Mississippi 河流域的 21 座核电厂沉积物中 ^{137}Cs 的监测结果见图 4。可以看到,在 Mississippi 河流域内核电厂沉积物中检测到的 ^{137}Cs 一般处于 NRC 规定的探测下限水平,放射性物质未造成累积影响。相反,检测 ^{137}Cs 结果一般仅与采样点设置、受纳水体的稀释扩散能力等有关。根据已检测到的 ^{137}Cs 活度浓度水平,监测结果处于正常范围内,在各核电厂的辐射环境监测年报中,一般认为其来自早其大气层核试验造成的影响^[3-4]。

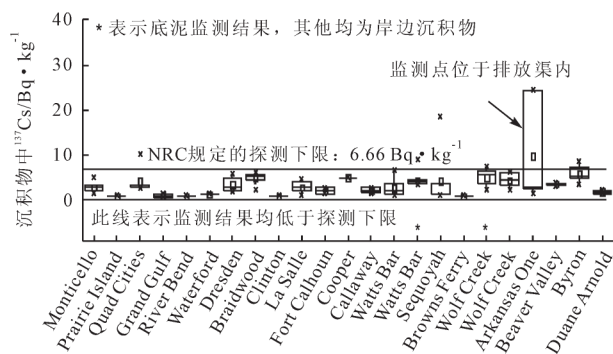


图4 Mississippi河流域核电厂沉积物中 ^{137}Cs 监测结果统计分析

对除 ^{137}Cs 外的其它放射性核素,在 2005–2012 年间仅有 4 座核电厂检出,具体见图 5。一般来说,这些放射性核素一般与核电厂排放有关。在沉积物中检测出的除 ^{137}Cs 外人工 γ 核素主要是 ^{58}Co 和 ^{60}Co 。

对 Watts Bar 核电厂,在其岸边沉积物中未检出除 ^{137}Cs 外的人工 γ 核素;但在底泥样品中常检出 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{125}Sb 。Watts Bar 核电厂底泥监测点位于厂内的临时贮水池内,监测报告认为,由于核电厂一般不向公众开放,其中的放射性核素将难以对公众造成影响。

对 Wolf Creek 核电厂,核电厂开展了岸边沉积物

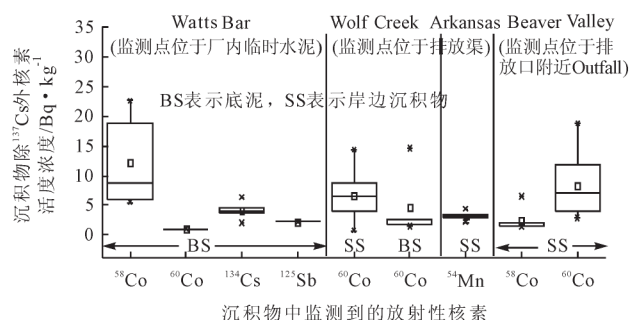


图5 Mississippi河流域核电厂沉积物中除 ^{137}Cs 外核素检测结果分布

和底泥的监测。岸边沉积物指示点设于核电厂排放渠内,底泥中监测到的 ^{60}Co 所在的点位一般在排放渠内,因而沉积物中检出的 ^{60}Co 不会对公众造成影响。

Arkansas 河流域上的 Arkansas One 核电厂沉积物监测结果中,仅在其排放渠内的 1 个年度样品中检出了 ^{54}Mn ,其活度浓度水平极低,监测点位在核电厂循环冷却水排水渠内。

注意到 Beaver Valley 核电厂在沉积物中均监测到了人工放射性核素 ^{60}Co 与 ^{58}Co 的存在,与监测点设于排放口有关。

需要指出的是,在所有核电厂中检测到的这些人工放射性核素,其活度浓度水平都是低的。NRC 规定了对沉积物 ^{137}Cs 的探测下限的要求为 6.66 Bq/kg。一般情况下核电厂监测到的放射性核素浓度水平都在该探测下限水平以下或处于相近范围内。一些核电厂在其辐射环境监测年报中,还会给出天然放射性核素浓度的检测结果,例如 ^{40}K ,其活度浓度水平一般在 100 Bq/kg 以上。以 Beaver Valley 核电厂为例,2011 年底泥样品中检测到的 ^{40}K 结果为 340 Bq/kg。对比可知,检测到的人工放射性核素活度浓度非常小。

2.2.4 水生生物

美国所有内陆核电厂都必须开展受纳水体中鱼类样品的监测,以用于评估公众通过食用鱼类途径造成的辐射剂量水平。Mississippi 河流域的 21 座核电厂中,除开展鱼类样品监测外,还有 2 座核电厂开展了无脊椎动物监测,有 1 座核电厂开展了水生植物的监测,有 3 座核电厂对鱼类区分经济鱼和运动鱼进行监测。水生生物监测结果统计分析见图 6。研究表明,在 Mississippi 河流域的核电厂中,仅 4 座核电厂曾在鱼类等水生生物样品中检出过人工 γ 放射性核素,均为 ^{137}Cs ,其它人工 γ 放射性核素均未检出。对 ^{137}Cs 检测结果可以看到,在 Tennessee 河子流域经济鱼、运动鱼的指示点和对照点中均常检测出 ^{137}Cs ,其活度浓度处于正常水平。

在各种鱼类样中,对照点的监测结果在时甚至比

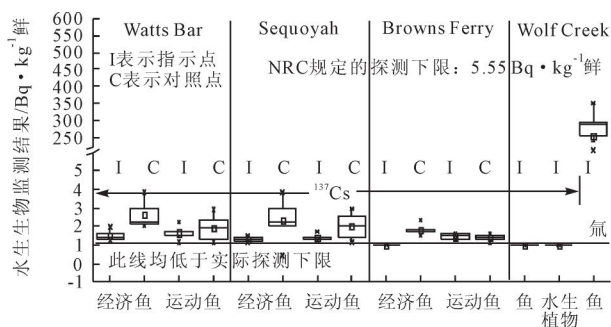
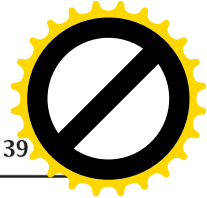
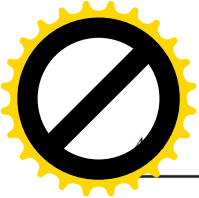


图6 Mississippi河流域核电厂水生生物放射性监测结果统计分布(^{137}Cs 和氚)

指示点的还大,且上游核电厂与下游核电厂监测结果不存在显著差异,表明鱼类样品中检测到的 ^{137}Cs 与核电厂排放无关。

在 Wolf Creek 核电厂的鱼类样品及作为指示生物的水生植物样品中均未检测任何人工 γ 放射性核素,包括 ^{137}Cs 。但是,由于 Wolf Creek 核电厂接纳水体的特殊性,在鱼类样品中检测到的氚的活度浓度水平较高。这与在该湖内检测到水中氚的检测结论是一致的。

2.3 核电厂液态流出物排放及公众剂量评估

美国核电厂每年需要向 NRC 提交上一年度的流出物监测年报,对核电厂流出物排放数据及剂量评估结果进行统计分析,并需要获得 NRC 的认可。

美国 NRC 对核电厂流出物排放有一系列的审管要求,对液态流出物,其审管要求包括^[13]:

(1) 浓度限值要求:液态流出物释放进入非限制区平均浓度水平,不得超过 10 CFR 20 附录 B 表 2 的要求(除溶解或夹带的惰性气体);对溶解或夹带的惰性气体,其浓度应不超过 $2\times 10^{-4}\mu\text{Ci/mL}$ (7.4 Bq/mL);

(2) 剂量限值要求:液态流出物排放对公众的剂量限值(每机组)应满足:

每日历季度排放对公众造成的全身有效剂量不超过 1.5 mrem ($15\mu\text{Sv}$),任意组织剂量不超过 5 mrem ($50\mu\text{Sv}$);

每日历年排放对公众造成的全身有效剂量不超过 3 mrem ($30\mu\text{Sv}$),任意组织剂量不超过 10 mrem ($100\mu\text{Sv}$)。

根据 2005–2012 年美国 Mississippi 河流域核电厂液态流出物监测年报,统计分析了液态途径排放的裂变产物和活化产物产生量^[11]。统计结果见图 7。统计排放的方式包括批量排放和连续排放,各座核电厂一般在监测年报中给出各个季度的统计结果,并汇总成年度排放统计数据。裂变产物活化产物一般包括 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{65}Zn 、 ^{95}Nb 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{124}Sb 、 ^{133}Ba 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 等,各座核电厂统计的核素不完

全相同。美国核电厂液态流出物排放监测数据中,对低于探测下限的数据不进行统计处理;有些核电厂在某年度无液态流出物排放,监测年报显示当年排放液体体积为零。因而,部分核电厂未有裂变产物和活化产物排放。可以看到,除 Browns Ferry 核电厂外,其他核电厂排放的裂变产物和活化产物一般不超过 1 Ci/a (37 GBq) 的水平。

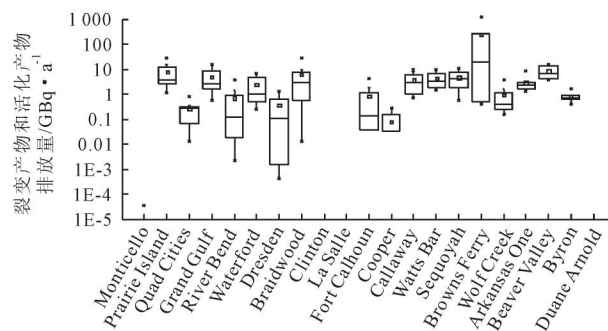


图7 Mississippi河流域核电厂液态排放裂变产物与活化产物统计分布(2005–2012年)

Browns Ferry 核电厂运行 3 台沸水堆核电机组,是 Mississippi 河流域唯一运行 3 台核电机组的核电厂。该核电厂在 2005–2012 年有 3 个年度监测结果均大于 37 GBq,其中,在 2009 年度监测结果达到 1.28 TBq/a。根据年报,该排放主要来自核电厂多次异常排放(泄漏)的影响。根据估算,2009 年的异常排放,公众剂量仅增加不足 $1\times 10^{-5}\text{ mrem}$ ($10^{-4}\mu\text{Sv}$)。

氚是核电厂液态流出物排放需要关注的重要核素。统计分析了 2005–2012 年间 Mississippi 河流域核电厂液态排放氚的量,结果见图 8。从图可以看到,2005–2012 年间,流域内核电厂氚的排放最大约 111 TBq/a(即 Byron 核电厂,2000 年),整体上压水堆核电厂氚的排放量要较沸水堆高。

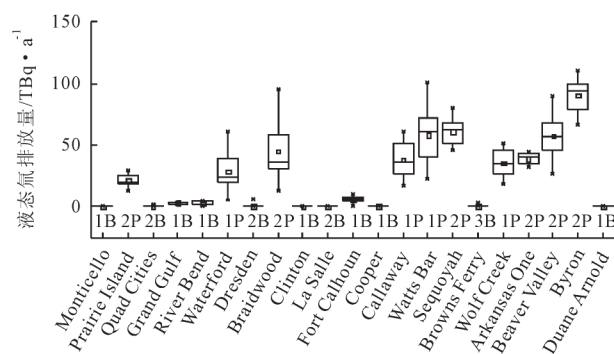
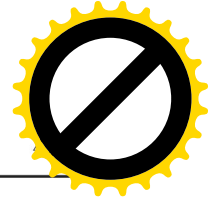


图8 Mississippi河流域核电厂液态排放氚分布(2005–2012年)

根据 Mississippi 河流域核电厂流出物监测年报,所有 21 座核电厂排放的液态流出物中的放射性核素浓度均未超过 10 CFR 20 附录 B 表 2 的要求。根据流出物排放的放射性核素排放量及获得的模式参数,年监测年报均在监测年报和场外剂量评估手册 (OD–



CMD 中给出了年度排放对公众造成的辐射剂量水平。2012 年度的剂量评估结果见图 9。

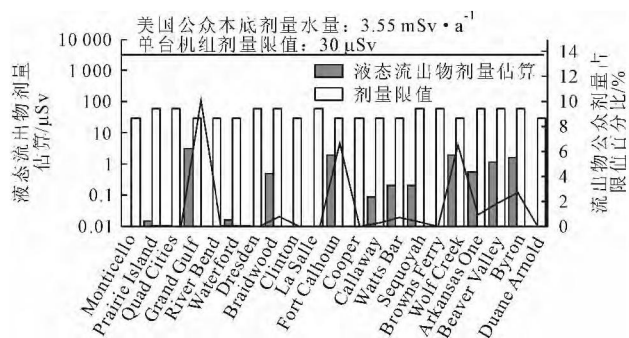


图9 Mississippi河流域核电厂2012年排放对公众造成的辐射剂量统计分析

可以看到,在 Mississippi 河流域的 21 座内陆核电厂中,所有核电厂公众剂量评估结果(最大值)均未超过液态流出物剂量限值(每季度亦未超过),其中限值占比最大的为 Grand Gulf 核电厂,占 10.1%;还有一些核电厂,在 2012 年度无液态流出物排放,因而其估算的公众剂量水平为 0,还有若干核电厂,其液态流出物排放对公众的辐射剂量水平低到可以忽略。

3 结论

Mississippi 河是美国第一大河,流域面积包括 31 个州的部分或全部,占到全美国国土面积的 40%,流域内人口占美国人口约 37%。现美国 Mississippi 河流域内共运行 21 座核电厂 32 台机组,分析了这些核电厂液态流出物排放的放射性物质的量及对公众的辐射剂量水平,同时分析了受纳水体(地表水、饮用水、沉积物和水生生物)在 2005–2012 年间的辐射环境监测数据,表明这些核电厂液态流出物排放均满足 NRC 的监管要求,其排放的放射性物质对环境和公众造成的辐射影响是非常小的,除个别核电厂受纳水体中氚活度浓度较高外,并未造成累积影响。同时,分析了 NRC 对流域内申请延寿核电厂的环境影响评价方法及结论,表明 NRC 认可这些核电厂在经过一个寿期的运行后,通过液态流出物排放的放射性物质对环境的影响很小的。分析和理解美国 NRC 对核电厂受纳水体环境影响评估的见解,无疑为进一步分析我国内陆核电厂可能对水资源安全的影响提供了良好的借鉴和有力的证据。

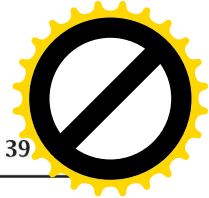
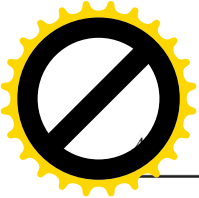
长江是中国的母亲河,在工农业生产方面也起着举足轻重的作用。长江流域同时也是我国重要的生态屏障。长江流域覆盖多个省份,上海、重庆、南京、武汉、长沙、成都等多个大中城市均在该流域,整体上经济发达(2013 年仅长三角地区 GDP 就占到了大陆地区的 17.2%),耗能相对较大。与 Mississippi 河流域作

用在美国的地位类似,长江流域是我国社会和经济发展的重点区域,长江水系为该流域的工农业生产、城市发展、交通运输等方面发挥的作用也和 Mississippi 河水系类似。为满足长江流域区域经济发展的要求,考虑长江流域的资源禀赋和环境条件,适时启动内陆核电建设十分必要。美国 Mississippi 河流域核电厂运行的经验表明,内陆核电厂正常运行对环境的影响非常小,并且不影响流域的其它功能需求,合理的设计和应急组织措施能够保障核电及周边流域的环境安全。

【参考文献】

- [1] 郑通汉,陈庆伟. 内陆核电项目水资源论证关键问题与对策研究[J]. 中国水利, 2011(21): 24–27.
Zheng Tonghan, Chen Qingwei. Studies on key issues related to water resources assessment of inland nuclear power projects and measures[J]. China Water Resources, 2011(21): 24–27. (in Chinese)
- [2] 万育生,张淑玲,陈庆伟,等. 内陆核电水资源论证技术存在问题及对策探讨[J]. 水利水电技术, 2012(2): 17–21.
Wan Yusheng, Zhang Shulin, Chen Qingwei, et al. Study and analysis on problems and countermeasures of technologies for water resources assessment of inland nuclear power development[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012 (2): 17–21. (in Chinese)
- [3] 上官志洪,黄彦君,陶云良,等. 美国内陆核电厂放射性液态流出物累积影响的评估[J]. 辐射防护, 2014, 34(1): 47–55.
Shangguan Zhihong, Huang Yanjun, Tao Yunliang, et al. Long term cumulative radiological impact assessment to liquid effluent of American inland NPPs[J]. Radiation Protection, 2014, 34(1): 47–55. (in Chinese)
- [4] 黄彦君,覃春丽,上官志洪,等. 美国内陆核电厂液态放射性流出物排放环境辐射监测与评估[J]. 辐射防护, 2015, 35(5): 289–299.
Huang Yanjun, Qin Chunli, Shangguan Zhihong, et al. Radiological monitoring and assessment of liquid effluent release to waterborne environment of inland nuclear power plant at USA [J]. Radiation Protection, 2015, 35(5): 289–299. (in Chinese)
- [5] International Atomic Energy Agency. Power Reactor Information System (PRIS)— The Database on Nuclear Power Reactors[EB/OL]. 2015; <https://www.iaea.org/pris/>.
- [6] 刘达,黄本胜,邱静,等. 内陆核电站建设对水资源安全影响的问题及研究现状[J]. 广东水利水电, 2010, 10: 12–15.
Liu Da, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. The safety issues and the research progress of water resources from the operation of inland NPPs[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2010, 10: 12–15. (in Chinese)
- [7] National Research Council of the National Academies, Mississippi River Water Quality and the Clean Water Act:

(下转第 432 页)



- Chinese)
- [7] 任伟, 杨艳丽, 任静, 等. 京杭大运河苏州高新区段水质污染状况研究[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(3): 59–62.
Ren Wei, Yang Yanli, Ren Jing, et al. Water quality at the section of Suzhou High-tech Zone of the Beijing-Hangzhou Grand Canal[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(3): 59–62. (in Chinese)
- [8] 陈燕飞, 张翔. 汉江中下游干流水质变化趋势及持续性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1163–1167.
Chen Yanfei, Zhang Xiang. Long-term trends and sustainability trends of water quality in the middle and lower reaches of Hanjiang River Main stream[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1163–1167. (in Chinese)
- [9] 沈大军, 刘昌明. 南水北调中线工程不同调水规模对汉江中下游影响分析[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 341–348.
Shen Dajun, Liu Changming. Effects of different scales of MR SNWTP on the down stream of the DanJiangkou Reservoir[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 341–348. (in Chinese)
- [10] 高永年, 高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 59–54.
Gao Yongnian, Gao Junfeng. Comprehensive assessment of eco-environment impact of the South-to-North Water Transfer Middle Route Project on the middle-lower Hanjiang River basin[J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 59–54. (in Chinese)
- [11] 窦明, 谢平, 夏军, 等. 汉江水华问题研究 [J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 557–561.
Dou Ming, Xie Ping, Xia Jun, et al. Study on algalbloom in Hanjiang River[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 557–561. (in Chinese)
- [12] 熊春茂, 陈敏. 汉江流域湖北水资源可持续利用的思考[J]. 水利发展研究, 2013, 13(4): 34–38.
Xiong Chunmao, Chen min. Consideration of the Hanjiang River Basin sustainable water resources utilization [J]. Water Resources Development Research, 2013, 13(4): 34–38. (in Chinese)
- [13] 刘隽, 纪洪盛. 汉江流域水环境综合管理[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(3): 64–65.
Liu Jun, Ji Hongsheng. Comprehensive management of water environment in Hanjiang River Valley[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(3): 64–65. (in Chinese)
- [14] 万黎, 毛炳启. Spearman 秩相关系数的批量计算[J]. 环境保护科学, 2008, 34(5): 53–55.
Wan Li, Mao Bingqi. Batch calculation of Spearman rank correlation coefficient[J]. Environmental Protection Science, 2008, 34(5): 53–55. (in Chinese)
- [15] 望志芳, 张煦. 汉江水质与污染物的时空差异分析[J]. 华中农业大学学报, 2010, 29(6): 721–726.
Wang Zhifang, Zhang Xu. Spatio-temporal changing analysis on water quality and pollutants of Hanjiang River[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2010, 29(6): 721–726. (in Chinese)
- [16] 刘小燕, 况明生, 代振, 等. 唐白河水污染分析及治理措施[J]. 重庆文理学院学报, 2014, 33(2): 82–86.
Liu Xiaoyan, Kuang Mingsheng, Dai Zhen, et al. Water pollution analysis and control measures of Tangbai River[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences: Social Sciences Edition, 2014, 33(2): 82–86. (in Chinese)

(上接第 427 页)

- Progress, Challenges and Opportunities [M]. National Academies Press, 2008.
- [8] US Census Bureau. United States Census 2010[EB/OL]. 2015; <http://www.census.gov/2010census/popmap/>.
- [9] US Nuclear Regulatory Commission, NUREG 1437 Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants (revision 1)[EB/OL]. 2009.
- [10] US Nuclear Regulatory Commission, NUREG 1437 Offsite dose calculation manual guidance: standard radiological effluent controls for pressurized water reactors[R]. 1991.
- [11] US Nuclear Regulatory Commission. Radioactive Effluent and Environmental Reports [EB/OL]. 2015; <http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/plant-info.html>.
- [12] US EPA. Safe Drinking Water Information System (SDWIS) 2014 [EB/OL]; <http://www.epa.gov/enviro/facts/sdwis/search.html>.
- [13] US Nuclear Regulatory Commission, NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, Part 20— Standards for protection against radiation[EB/OL]. 2015.