

核污水的环境及健康影响——从福岛核污水排放说起

陈海燕¹, 杨春宇¹, 徐瑞¹, 刘玉龙², 曹毅¹

1. 苏州大学, 医学部公共卫生学院, 江苏 苏州 215123; 2. 核工业总医院, 江苏 苏州 215004

摘要: 2021 年 4 月, 日本政府决定向海洋排放福岛第一核电站核污水, 引起全世界的广泛关注。核污水中的放射性物质可能随着海洋环流、地下水或碳循环等作用对环境造成影响。此外, 核污水排海可能会使人们面临长期低剂量污染带来的健康影响。基于此, 本文将从宏观上论述核污水可能带来的全球性环境影响, 从个体的角度阐述核污水可能带来的健康影响, 以及可能引发的心理健康问题。并就此针对福岛核污水排放问题提出建议。

关键词: 核污水; 环境影响; 健康影响; 生物效应

中图分类号: X591 文献标识码: R 文章编号: 1004-714X(2022)01-0105-08

Environmental and health effects of nuclear wastewater —Something beyond Fukushima nuclear wastewater discharge

CHEN Haiyan¹, YANG Chunyu¹, XU Rui¹, LIU Yulong², CAO Yi¹

1. School of Public Health, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123 China;

2. General Hospital of Nuclear Industry, Suzhou 215004 China

Abstract: In April 2021, the Japanese government decided to discharge nuclear wastewater from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the sea, which aroused widespread concern all over the world. The radioactive substances in nuclear wastewater may affect the environment through the action of ocean circulation, groundwater or carbon cycle. In addition, it may expose people to the health effects of low-dose but long-term pollution once nuclear wastewater is discharged into the sea. Based on this, this paper discusses the possible global environmental impact of nuclear wastewater from a general perspective and illustrates its possible health effects as well as potential mental health problems from an individual perspective, and puts forward some suggestions on the issue of Fukushima nuclear wastewater discharge.

Keywords: Nuclear wastewater; Environmental impacts; Health effect; Biological effect

Corresponding author: CAO Yi, E-mail: yicao@suda.edu.cn

2011 年福岛核事故发生后, 日本开始向反应堆容器中注入海水以冷却反应堆, 由此产生了大量的核污水, 截至 2020 年底, 其核污水总量已超过了 120 万吨^[1], 并且每天仍以 140 吨的数量在增加, 预计 2022 年 9 月将达到储存极限, 即 137 万吨^[2]。2021 年 4 月 13 日, 日本政府举行内阁会议, 正式决定将福岛核污水排入海洋, 主要理由是污水无处可存, 经过处理的核污水达到排放标准, 对人类健康影响小。

这一消息报出后, 引起一片哗然。核污水带来的环境及健康影响再次成为了人们关注的焦点。绿色和平组织核专家认为日本核污水中所含的碳-14 在数千年内都存在危险, 并可能造成遗传损害; 并且, 尽管东京电力公司采用多核素去除装置对核污水进行了

处理, 但是这种装置不能有效去除水中的氚。基于这一背景, 本文拟从健康和环境影响的角度出发, 结合日本决定排放核污水的时代背景, 对核污水可能带来的环境危害以及健康影响展开阐述。

1 核污水中主要放射性核素的特性及其生物效应

日本核污水中含有大量的氚(Tritium)、锶-90(Strontium-90, ⁹⁰Sr)、铯-134(Caesium-134, ¹³⁴Cs)、碘-129(Iodine-129, ¹²⁹I)、锝-99(Technetium-99, ⁹⁹Tc)、碳-14(Carbon-14, ¹⁴C)以及铯-137(Caesium-137, ¹³⁷Cs)等放射性物质^[3], 这些放射性同位素有的半衰期较短, 只有几天, 有的半衰期较长, 可达几十万年以上(见表 1)。绿色和平组织指出日本目前所采取的多核

素去除装置 (Advanced liquid processing system, ALPS) 不能去除污水中的 T 和 ^{14}C , 并且不能完全清除 ^{90}Sr 和 ^{129}I 等放射性同位素。一旦将核污水排海, 这些物质将会给环境、生物及其后代带来无法估量的后果。

表 1 核污水中常见放射性物质的半衰期

Table 1 Half-life of common radioactive substances in nuclear wastewater

放射性同位素	半衰期/年
T	12.31
^{14}C	5 730
^{90}Sr	29.1
^{99}Tc	211 000
^{129}I	15 700 000
^{134}Cs	2.06
^{137}Cs	30

1.1 氚 氚是福岛核污水中主要的放射性核素, 其物理半衰期约为 12.31 年, 氚原子和氢原子化学性质一样, 容易发生各种化学反应, 氚可以通过摄入食物、饮用水或皮肤吸收进入体内, 形成内暴露, 而且氚在体内存在组织和细胞的剂量分布差异^[4]。氚在环境中以氚化水 (Tritiated Water, HTO) 的形式存在。急性摄入氚化水时, 其生物半衰期约为 5~11 d。氚在组织中可释放出低能量的 β 粒子, 能够干扰胚胎或胎儿的发育, 引起 DNA 损伤^[5]、染色体突变^[6]、细胞死亡、癌症^[7]、遗传和生殖效应等^[8]。但动物实验发现, 用低浓度的氚饮用水喂养小鼠, 不会对小鼠脾细胞产生细胞毒性, 也不会诱导细胞产生辐射适应性反应^[9]。核污水中氚的健康影响取决于摄入剂量大小。

1.2 ^{14}C 除了氚以外, 福岛核污水中还含有 ^{14}C 。 ^{14}C 能以固体、液体或气体的形式存在于碳循环中。从放射生物学的观点来看, ^{14}C 能释放出 β 射线。由于 C 元素是人体含量较多的元素之一, ^{14}C 能整合在蛋白质、核酸等生物分子和细胞组成成分中, 尤其是整合到细胞的 DNA 当中, 引起 DNA 损伤, 进而可能引起细胞死亡或引起突变^[10]。由于 ^{14}C 极易通过各种途径进入人体, 能使人体的遗传物质发生改变, 并且具有半衰期长、能释放出 β 射线等特点, 因此应采取科学的途径去除福岛核污水中的 ^{14}C 。

1.3 铯 铯是人工来源的放射性核素, 主要放射性同位素包括 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs , 这 2 种放射性同位素在土壤

中不容易发生迁移^[11]。土壤的类型是影响铯吸附的原因, pH 值为 8 时, 铯的吸附量达到最大^[12]。由此推测, 核污水排海可能引起放射性铯沉积在局部海域, 并且在局部环境 pH 值为 8 的地方居多, 进而引起局部海域放射性铯的浓度高于其排放值。此外, 土壤中钾的含量与植物吸收的 ^{137}Cs 的浓度存在相关性, 即当受污染地区的土壤中缺钾时, 植物体内 ^{137}Cs 的含量增加^[11]。福岛核事故发生后, 在撤离区牛的所有器官中均检测出 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs , 其中骨骼肌中铯的浓度最高^[13]。此外, 胎儿和婴儿吸收的放射性物质较多, 并且敏感性较高。胎儿和婴儿器官中放射性铯的浓度往往高于其母体的浓度, 分别是母体的相应器官的 1.19 倍 ($R^2 = 0.62$) 和 1.51 倍 ($R^2 = 0.70$)^[14]。高剂量的放射性铯可引起染色体断裂, 突变率增加, 并且可遗传给下一代^[15]。另外, 观察发现牛体内的放射性铯的内在剂量率与血浆丙二醛的水平和超氧化物歧化酶的活性呈正相关, 与谷胱甘肽氧化物酶的活性呈负相关, 推测长期暴露于低剂量的辐射可以使牛出现轻度氧化应激^[13]。 ^{137}Cs 还能引起小鼠 Tp53 等基因的表达发生改变, 暴露 2~3 d 表现为基因过表达, 暴露 20~30 d 时表现为基因低表达^[16], Tp53 基因突变与癌症风险增加高度相关。总体上说, 核污水排海可能引起放射性铯沉积在局部海域, 可能通过各种途径对受影响地区的动植物的生长以及人群尤其是胎儿和婴儿的器官发育产生影响。

1.4 ^{90}Sr ^{90}Sr 是一种 β 辐射体。土壤中 pH、有机碳的含量、Ca 和 Mg 的总量是影响 ^{90}Sr 迁移的主要因素。由于锶和钙具有化学相似性, 可溶性的 Sr 可通过食物链迁移, 随钙离子的吸收, 直接进入鱼类的体内, 聚集在鱼的骨骼和牙齿等硬组织中。例如 Sr 容易在牙齿的形成期即钙化期被吸收, 并长期留存在牙齿中, 直到其脱落或磨损。牙齿和骨骼中 ^{90}Sr 的含量一定程度上可以反映 ^{90}Sr 的内暴露水平^[17], 牙齿中 ^{90}Sr 浓度的变化还可以反映在组织形成期环境中 ^{90}Sr 污染的情况^[18]。牙齿和骨骼中 Sr 的主要化学形态是羟基磷灰石 ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), 其中的 Ca 被 Sr 取代。此外, 30 min 的 ^{90}Sr 暴露可以引起骨髓基质细胞 DNA 双链断裂, 暴露 7 d 可影响细胞增殖和细胞因子的表达^[19], 长期摄入低浓度的 ^{90}Sr 可以引起小鼠骨代谢发生改变^[20]。核污水排海后, ^{90}Sr 可能会随着海产品的摄入, 进入到人体, 沉积在人体尤其是儿童的骨骼和牙齿中, 并且产生长期的影响。

1.5 ^{129}I 和 ^{131}I ^{129}I 和 ^{131}I 均属于碘的放射性核素, 进入体内后主要聚集在甲状腺, 对甲状腺功能造成影响。 ^{129}I 的半衰期长达一千多万年, 能长期存在于环境中, 对环境及生物体造成持续影响。在酸性介质中, ^{129}I 容易挥发到空气中, 主要通过饮食和吸入进入到体内。 ^{131}I 是一种以 β 衰变和 γ 衰变为主的放射性核素, 物理半衰期约为 8 d, 生物半排期为 138 d。对于给定的摄入量, 婴儿甲状腺受到的剂量比成人受到的要高 9 倍^[21]。福岛核事故和切尔诺贝利事故的相关研究证实 ^{131}I 的释放使甲状腺癌的发生风险增加。此外, 实验研究发现, ^{131}I 还可以抑制人心肌细胞增殖, 通过 p53/Bax/caspase-3 信号通路诱导细胞凋亡^[22]。在涉及放射性碘释放的事故时, 人们往往会在专业人士的指导下服用稳定性碘, 那么当含放射性碘的核污水排海时, 长期低剂量碘暴露可能引起的甲状腺癌风险及其预防措施需要仔细分析和深入研究, 还需要定期对受影响地区居民的甲状腺进行 ^{131}I 含量的监测。

2 核污水排海可能引起的健康效应

福岛核污水排海可能不会在短时间内引起公众的确定性效应, 但需要防范长期外照射或者内照射引起的随机性效应风险。

辐射的健康效应可以分为确定性效应和随机性效应。确定性效应是指超过一定的阈值, 剂量愈高则引起的效应越严重, 一般在核事故引起大剂量照射才可能发生, 而福岛核污水排海涉及剂量较低。因此, 出现确定性效应的可能性较小, 但是发生随机性效应的风险较大。随机性效应主要包括辐射致癌和遗传效应, 表现为线性无阈值, 即其发生的概率与剂量成线性关系, 其后果的严重程度与剂量高低无关。其中癌症被认为是最主要的随机性效应。辐射照射后, 最先引起白血病、甲状腺癌和骨癌的发生, 其他癌症则至少要在受照后十年乃至几十年才会显现出来。切尔诺贝利事故相关研究发现, 辐照可能使儿童或青少年患白血病以及甲状腺癌等疾病的风险增加^[23], 同时也可能使清洁工人患白血病以及心血管疾病的风险增加^[24]。据国际原子能机构(IAEA)报道, 切尔诺贝利事故导致约 4 000 人出现了甲状腺癌, 其中大部分为儿童和青少年, 至少 9 名儿童死于甲状腺癌^[25]; 1988—2002 年期间, 乌克兰成年撤离人员的非癌症疾病的发病率从 632/10 000 人增加到 3 037/10 000 人, 上升了 4 倍^[26]; 1990—2000 年期间, 白俄

罗斯癌症的发病率上升了 40%^[27]。

针对日本核污水排海事件, 也许有人认为福岛核污水排放后, 经海洋的稀释, 核污水的放射性物质的浓度降低, 对人体的健康造成较小的影响。但值得注意的是, 核污水中低剂量放射性物质可能使致癌风险增加。

流行病学和临床研究表明低剂量辐射可能引发癌症^[28-30]、心脑血管疾病^[31]以及白内障^[32]。一项基于人口普查的队列研究发现, 暴露于自然来源的低剂量辐射, 使儿童白血病、淋巴瘤以及中枢神经系统肿瘤的发病风险增加, 白血病的风险比为 1.04, 95%CI (1.00, 1.08), 淋巴瘤的风险比为 1.01, 95%CI (0.96, 1.05), 中枢神经系统的风险比为 1.04, 95%CI (1.00, 1.08)^[28]。此外, 一项关于儿童时期 CT 扫描的辐射暴露和随后的白血病和脑瘤风险的回顾性队列研究表明, CT 扫描的累积剂量约为 50 mSv 的儿童可能会使其患白血病的风险增加 3 倍, 而剂量约为 60 mSv, 可能会使其患脑瘤的风险增加 3 倍^[31]。与之相似的是, 一项国际队列研究发现长期低剂量辐射暴露与白血病(不包括慢性淋巴细胞白血病)之间呈正相关关系^[29]。另外, 现况调查发现, 随着暴露工龄的增加, 放射工作人员皮肤科检查以及眼科检查的异常率升高, 心电图检查、外周血象及染色体的畸变呈现先升后降的趋势^[33]。

实验研究表明, 慢性低剂量率 (4.1 mSv/h) 辐射诱导的 DNA 损伤和氧化应激可激活 p53/p21 通路, 抑制人脐静脉内皮细胞的复制能力, 导致细胞过早衰老^[34]。长期低剂量辐射可以使小鼠的寿命、肿瘤发生率、染色体异常以及基因表达发生轻微改变^[35], 引起 DNA 双链断裂。

总的来说, 福岛核事故核污水海洋排放引起公众发生血管内皮损伤、循环系统疾病、智力下降以及行为和精神障碍等确定性效应的可能性很小, 但仍需重视辐射致癌风险的增加, 要关注甲状腺癌、白血病等随机性效应风险^[36]。

3 低剂量辐射引起适应性反应及兴奋性效应

福岛核污水经海水稀释后, 其中的放射性物质浓度降低, 可能产生低剂量辐射。由此, 不禁让人猜想, 会不会存在引起适应性反应或兴奋性效应的可能?

1984 年, Olivieri 等^[37]发现, 在急性 X 射线暴露之前, 预先暴露于低浓度的 ^3H 胸腺嘧啶核苷的人淋巴细胞染色单体畸变比直接进行 X 射线照射的减少。由此提出低剂量辐射可以诱导适应性反应, 即预

先给予生物体以低剂量无基因毒性的刺激因子后,生物体对之后相同或同类高剂量刺激因子暴露产生一定防护作用,明显降低高剂量暴露的损伤效应。适应性反应的机制目前还不完全清楚,现有研究发现低剂量辐射诱导适应性反应机制可能包括:低剂量辐射通过 p53、ATM、PARP 等通路引起 DNA 损伤修复^[38];激活机体抗氧化系统,促进机体对自由基和氧化应激产物的清除^[39-40];引起内质网未折叠蛋白反应,通过内质网相关降解清除折叠缓慢和错误折叠的蛋白质来提升内质网的蛋白质折叠能力;增强免疫细胞的反应性,促进胸腺淋巴细胞和淋巴细胞增殖,增加巨噬细胞活性^[41],引起机体出现免疫/炎症反应^[42];诱导骨髓基质细胞分化成骨细胞,进而促进骨的形成^[43];调节细胞凋亡^[44]。另外,预先低剂量暴露的时间长度、强度以及机体对其产生的生物学作用是影响适应性反应发生与否的重要因素。一方面,一般来说,预先低剂量刺激诱发的损伤修复能力增强持续几个小时到数周,在这个时间范围内受到大剂量的基因毒性因素攻击时,适应性反应才能够起到保护作用。另一方面,目前大部分关于适应性反应的动物实验研究中所涉及的预先低剂量射线照射的时间均在 30 d 以内,而福岛核污水的影响是长期的,其影响时间远远超出上述时间。

此外,还有研究指出低剂量辐射还可以诱发机体的兴奋效应。低剂量辐射能通过激活丝裂原活化蛋白激酶 MAPK (mitogen-activated protein kinases)、细胞外调节因子激酶 ERK1/2 (extracellular signal-regulated kinase)、刺激白细胞介素的分泌以及激活 Wnt/ β -catenin、Raf 和 Akt 等信号通路,刺激多种类型细胞的增殖^[45-47]、促进辐射损伤细胞的增殖和修复、增强机体的免疫功能、延缓癌症的进展^[48]以及降低肿瘤的发生率,从而减轻组织损伤,促进动物体的生长发育,延长寿命。福岛核污水排海可能会使相关居民偶尔摄入残留的放射性核素,可能引起低剂量刺激作用,但是这种保护性刺激效应持续时间有限,对于居民长期的健康风险的保护作用有限。其次,放射性核素可能随着摄入次数的增加,在体内引起蓄积,进而引起不同的生物学效应。

总体来说,无论是适应性反应还是兴奋效应,其辐照时长往往较短,辐照强度较低。而福岛核污水排海可能引起相关居民长期摄入,尽管一次摄入的剂量率低,但暴露时间长,引起的可能不是有益的刺激效应,而是长期暴露的有害效应。

4 心理健康影响

回顾史上重大的核或辐射事故,事故不仅对人们的躯体健康造成了较大的影响,更是引发了一系列的心理健康问题。对辐射的健康影响的担忧、对饮用水或食物安全的担忧、丧失家人朋友、失去原有的社会关系纽带、失业以及对后代健康的忧虑等众多因素交杂在一起^[49],促使人们出现心理或精神健康问题,如焦虑、抑郁和创伤后应激障碍(posttraumatic stress disorder, PTSD)等^[50],从而诱发睡眠障碍、自杀及饮酒行为等问题^[51-52]。核事故同时也带来了一些社会心理问题,如让疏散人员就此被迫背上污名^[53],事故经历使得他人认为这些受影响人群可能存在潜在的健康问题,从而使其在应聘工作或其他日常活动中受到歧视,使其无法恢复正常社会生活。另外,横断面研究发现,那些在福岛核事故发生后重建家园的人,目前他们的心理困扰、创伤后应激以及辐射健康焦虑情况仍处于较高水平^[54]。

毋庸置疑,核污水排海必然会引起公众的担忧和恐慌,甚至可能引发一些与核事故发生时相似的心理健康问题。一方面,公众对于核技术等新技术或辐射知识缺乏全面、清楚的认识;另一方面,引起包括渔民在内的居民对其健康影响的担忧,如对低剂量暴露的担忧^[55],以及放射性物质可能带来的食品安全隐患;此外,这一行为还可能对海产品行业造成较大的影响甚至是损失等等。

根据世界卫生组织发布的《核与辐射事故心理健康和社会支持框架》^[56],结合日本决定将核污水排海的时代背景,我们应重点关注以下人群的心理健康问题:经历过福岛核事故的人群;核污水排放的直接影响人群;受影响地区的儿童及其父母;受影响地区的孕产妇或哺乳期的母亲;本身存在潜在健康问题的人;文化水平较低,难以理解风险沟通的人;本身存在精神或心理健康的人;核电厂或核设施的工作人员及其家庭。尤其是,经历过福岛核事故的人、具有潜在心理健康问题的人以及怀孕期的父母。从某种程度上来说,福岛核污水的处理方式将会对那些经历过福岛核事故的人的心理健康产生较大的影响;成为具有潜在心理健康问题的人出现心理健康问题的导火线;影响怀孕期父母的心理健康。

5 核污水排海的环境影响

回顾历史,福岛核事故的发生曾导致约 770 000

TBq 放射性物质释放到环境中^[11], 散布在日本陆地、海洋和其他大陆上, 其相对百分比分别约为 19%、80% 和 1%^[57]。根据东京电力公司报道, 2011 年 3 月 12 日至 31 日期间, 福岛核电站向大气释放了 500 PBq 的 ^{131}I 、10 PBq 的 ^{134}Cs 和 10 PBq 的 ^{137}Cs ^[58]; 2011 年 3 月 26 日至 9 月 30 日期间, 大气尘埃和反应堆的直接泄露向环境中释放了 11 PBq 的 ^{131}I 、3.5 PBq 的 ^{134}Cs 以及 3.6 PBq 的 ^{137}Cs ^[59]。据国际原子能机构报道, 福岛核事故发生时, 约有 100~400 PBq 的 ^{131}I 和 7~20 PBq 的 ^{137}Cs 释放到大气中, 并且大约有 10~20 PBq 的 ^{131}I 和 1~6 PBq 的 ^{137}Cs 直接排放到北太平洋^[60]。

尽管核污水排海可能不会像核事故发生那样迅速引起严重的后果, 但是其严重程度迄今无法估量。从理论上来说, 核污水排海不仅会对当地环境以及生物造成影响, 而且可能会直接随着海洋环流污染其他地域^[61], 还可能出现放射性物质随着大气环流飘散到各处等情况^[62]。

日本决定将核污水排海这一消息报出后, 德国海洋科学研究机构采用计算机模拟发现, 福岛核污水排放后的 57 d 内, 放射性物质将随时间持续扩散至太平洋大半区域, 10 年后将蔓延全球海域。从污染范围的角度看, 一方面, 放射性物质可能对受污染地区的植物、动物或人直接产生影响。当污水被排入海洋中时, 一部分放射性物质可能沉积在局部海底, 引起局部水域放射性物质浓度升高, 因此应持续监测受影响海域中放射性物质的浓度; 另一部分则随着海水的流动, 扩散到其他区域; 还有一部分可通过地下水的作用直接污染土壤。随后, 这些放射性物质在植物汲取土壤中的养分时, 通过植物的生物学作用进入到植物体内^[57], 如 ^{14}C 可通过植物光合作用进入到植物体内。另一方面, 通过食物链引起的生物富集作用和生物放大作用。即受污染的海洋植物或动物被其他植物、动物或人摄入后, 其体内的放射性物质一并进入到其他生物体内, 并在体内蓄积。由于生物蓄积, 植物、无脊椎动物和鱼类中放射性核素的含量可能比水中浓度高出数千倍^[63]。在复杂的食物链中, 人往往处于食物链的顶端, 这些放射性物质在人体的蓄积浓度可能更高。因此, 一旦实行核污水排海, 应做好受影响地区的环境、食品以及人群的长期剂量监测; 提前做好应急预案, 以应对其可能引起的不良影响。

6 建 议

首先, 做好协商和沟通工作。一方面, 日本排放

核污水将会对全球生物以及环境造成影响, 这关乎全球生物与环境的健康, 关乎全球的可持续发展, 属于全球性问题, 不应由日本单方面做出决定, 应由所有利益相关方和国际社会共同协商决定, 尤其是其周边国家。另一方面, 从国家的层面看, 应做好民众沟通。福岛核污水的排放量、核污水中含有的放射性物质、这些物质可能带来的影响等等, 这些都是公众所关心的、不可避免的、目前难以说清的问题。对于这些问题, 政府应给出相应的回答。一方面, 解决公众的忧虑, 另一方面, 维持公众的信任, 及其对核安全的信心。

其次, 核污水排海之前应做好相关辐射监测。在国际机构框架下成立包括中国专家在内的联合技术工作组, 接受国际评估核查和监督; 加大研究力度, 研究和评估放射性物质可能引起的生物效应和健康影响; 加强对食品等消费品的放射性物质污染监测; 各国针对核污水的排放提前做好预案, 以应对可能的核污水排放。另外, 应特别关注心理健康问题。

综上所述, 核污水排海使人们长期面临低剂量辐射带来的健康问题, 并且这种健康效应可能不是低剂量辐射引起的适应性反应或兴奋效应, 而更可能表现为辐射致癌风险的增加, 以及多种放射性物质在体内蓄积引起的一系列的未知生物效应。因此, 日本在进行核污水排放之前应当与各利益相关方进行商榷后再做决定。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 陈海燕负责研究设计、研究开展、论文撰写及修改; 杨春宇、徐瑞和刘玉龙负责论文设计和修改; 曹毅负责研究指导、设计、论文撰写及修改

参考文献

- [1] 向丽娟. 日本决定将核污水排入大海[J]. 生态经济, 2021, 37(6): 1-4.
Xiang LJ. Japan decided to discharge nuclear sewage into the sea[J]. Ecol Econ, 2021, 37(6): 1-4.
- [2] 岳光, 任重, 郭伟民. 日120余万吨核废水将排入太平洋? 美杂志: 处理后仍有放射性成分[EB/OL]. [2021-07-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1680940286705537679&wfr=spider&for=pc>.
Yue G, Ren Z, Guo WM. Will more than 1.2 million tons of Japan's nuclear wastewater be discharged into Pacific Ocean? US Journal: Radioactive components remain after treatment[EB/OL]. [2021-07-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1680940286705537679>

- &wfr=spider&for=pc.
- [3] Buesseler KO. Opening the floodgates at Fukushima[J]. *Science*, 2020, 369 (6504) : 621-622. DOI: [10.1126/science.abc1507](https://doi.org/10.1126/science.abc1507).
 - [4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. In: Annex C, Biological Effects of Selected Internal Emitters—tritium, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation[R]. Vienna: UNSCEAR, 2016.
 - [5] Gagnaire B, Arcanjo C, Cavalié I, et al. Tritiated water exposure in zebrafish (*Danio rerio*): effects on the early-life stages[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2020, 39 (3) : 648-658. DOI: [10.1002/etc.4650](https://doi.org/10.1002/etc.4650).
 - [6] Snigireva GP, Khaïmovich TI, Nagiba VI. Assessment of relative biological effectiveness of tritium using chromosome aberration frequency in human blood lymphocytes[J]. *Radiats Biol Radioecol*, 2010, 50 (6) : 663-671.
 - [7] Carpenter LM, Higgins CD, Douglas AJ, et al. Cancer mortality in relation to monitoring for radionuclide exposure in three UK nuclear industry workforces[J]. *Br J Cancer*, 1998, 78 (9) : 1224-1232. DOI: [10.1038/bjc.1998.659](https://doi.org/10.1038/bjc.1998.659).
 - [8] 周湘艳, 王冰, 高卫民, 等. 氚照射生物效应的实验研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2000, 20 (1) : 4-10. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2000.01.002](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2000.01.002).
Zhou XY, Wang B, Gao WM, et al. A review of experimental studies on biological effects of tritium exposure[J]. *Chin J Radiat Med Prot*, 2000, 20 (1) : 4-10. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2000.01.002](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2000.01.002).
 - [9] Flegat M, Blimkie M, Roch-Lefevre S, et al. The lack of cytotoxic effect and radioadaptive response in splenocytes of mice exposed to low level internal β -particle irradiation through tritiated drinking water *in vivo*[J]. *Int J Mol Sci*, 2013, 14 (12) : 23791-23800. DOI: [10.3390/ijms141223791](https://doi.org/10.3390/ijms141223791).
 - [10] Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety. Carbon-14 and the environment[M]. *Ins Radiol Prot Nucl Saf*, 2012: 3-18.
 - [11] Nakanishi TM. Agricultural aspects of radiocontamination induced by the Fukushima nuclear accident - A survey of studies by the Univ. of Tokyo Agricultural Dept. (2011-2016)[J]. *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci*, 2018, 94 (1) : 20-34. DOI: [10.2183/pjab.94.002](https://doi.org/10.2183/pjab.94.002).
 - [12] Giannakopoulou F, Haidouti C, Chronopoulou A, et al. Sorption behavior of cesium on various soils under different pH levels[J]. *J Hazard Mater*, 2007, 149 (3) : 553-556. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.06.109](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.109).
 - [13] Urushihara Y, Kawasumi K, Endo S, et al. Analysis of plasma protein concentrations and enzyme activities in cattle within the evacuation zone of the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident[J]. *PLoS One*, 2016, 11 (5) : e0155069. DOI: [10.1371/journal.pone.0155069](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155069).
 - [14] Fukuda T, Kino Y, Abe Y, et al. Distribution of artificial radionuclides in abandoned cattle in the evacuation zone of the Fukushima Daiichi nuclear power plant[J]. *PLoS One*, 2013, 8 (1) : e54312. DOI: [10.1371/journal.pone.0054312](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054312).
 - [15] da Cruz AD, de Melo e Silva D, da Silva CC, et al. Microsatellite mutations in the offspring of irradiated parents 19 years after the Cesium-137 accident[J]. *Mutat Res*, 2008, 652 (2) : 175-179. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2008.02.002](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.02.002).
 - [16] Paul S, Ghandhi SA, Weber W, et al. Gene expression response of mice after a single dose of ^{137}Cs as an internal emitter[J]. *Radiat Res*, 2014, 182 (4) : 380-389. DOI: [10.1667/RR13466.1](https://doi.org/10.1667/RR13466.1).
 - [17] Fukumoto M. Low-Dose radiation effects on animals and ecosystems long-term study on the Fukushima Nuclear Accident: long-term study on the Fukushima Nuclear Accident[M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020. DOI: [10.1007/978-981-13-8218-5](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8218-5).
 - [18] Koarai K, Kino Y, Takahashi A, et al. (90)Sr in teeth of cattle abandoned in evacuation zone: Record of pollution from the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plant accident[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 24077. DOI: [10.1038/srep24077](https://doi.org/10.1038/srep24077).
 - [19] Musilli S, Nicolas N, El Ali Z, et al. DNA damage induced by Strontium-90 exposure at low concentrations in mesenchymal stromal cells: the functional consequences[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 41580. DOI: [10.1038/srep41580](https://doi.org/10.1038/srep41580).
 - [20] Synhaeve N, Wade-Gueye NM, Musilli S, et al. Chronic exposure to low concentrations of strontium 90 affects bone physiology but not the hematopoietic system in mice[J]. *J Appl Toxicol*, 2014, 34 (1) : 76-86. DOI: [10.1002/jat.2834](https://doi.org/10.1002/jat.2834).
 - [21] United Nations Environment Programme. Radiation: Effects and sources[R]. Vienna: UNSCEAR, 2016.
 - [22] Wang YS, Liu CQ, Wang JC, et al. Iodine-131 induces apoptosis in human cardiac muscle cells through the p53/Bax/caspase-3 and PIDD/caspase-2/ t-BID/cytochrome c/caspase-3 signaling pathway[J]. *Oncol Rep*, 2017, 38 (3) : 1579-1586. DOI: [10.3892/or.2017.5813](https://doi.org/10.3892/or.2017.5813).
 - [23] Kamiya K, Ozasa K, Akiba S, et al. Long-term effects of radiation exposure on health[J]. *Lancet*, 2015, 386 (9992) : 469-478. DOI: [10.1016/s0140-6736\(15\)61167-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(15)61167-9).
 - [24] Hatch M, Cardis E. Somatic health effects of Chernobyl: 30 years on[J]. *Eur J Epidemiol*, 2017, 32 (12) : 1047-1054. DOI: [10.1007/s10654-017-0303-6](https://doi.org/10.1007/s10654-017-0303-6).
 - [25] World Health Organization. Chernobyl: the true scale of the accident[EB/OL]. [2021-5-6]. <https://www.who.int/news/item/05-09-2005-chernobyl-the-true-scale-of-the-accident>.
 - [26] Yablokov AV. 3. General morbidity, impairment, and disability after the Chernobyl catastrophe[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1181: 42-54. DOI: [10.1111/j.1749-6632.2009.04824.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04824.x).
 - [27] Yablokov AV. 6. Oncological diseases after the Chernobyl catastrophe[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1181: 161-191. DOI: [10.1111/j.1749-6632.2009.04827.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04827.x).
 - [28] Spycher BD, Lupatsch JE, Zwahlen M, et al. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study[J]. *Environ Health Perspect*, 2015,

- 123 (6) : 622-628. DOI: [10.1289/ehp.1408548](https://doi.org/10.1289/ehp.1408548).
- [29] Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study[J]. *Lancet Haematol*, 2015, 2 (7) : e276-e281. DOI: [10.1016/S2352-3026\(15\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S2352-3026(15)00094-0).
- [30] 党旭红, 左雅慧, 王仲文. 低剂量/低剂量率电离辐射对人体健康的影响[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 (6) : 725-729. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.034](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.034).
- Dang XH, Zuo YH, Wang ZW. Impacts of low dose or low dose rate ionizing radiation on human health[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28 (6) : 725-729. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.034](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.034).
- [31] Pearce MS, Salotti JA, Little MP, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study[J]. *Lancet*, 2012, 380 (9840) : 499-505. DOI: [10.1016/S0140-6736\(12\)60815-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60815-0).
- [32] Little MP, Cahoon EK, Kitahara CM, et al. Occupational radiation exposure and excess additive risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists[J]. *Occup Environ Med*, 2020, 77 (1) : 1-8. DOI: [10.1136/oemed-2019-105902](https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105902).
- [33] 陈正其, 姚洪章, 刘定理, 等. 低剂量电离辐射对放射工作人员健康影响的调查[J]. *中国辐射卫生*, 2005, 14 (2) : 124-126. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2005.02.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2005.02.026).
- Chen ZQ, Yao HZ, Liu DL, et al. Investigation on the effect of low-dose ionizing radiation on the health of radiation workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2005, 14 (2) : 124-126. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2005.02.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2005.02.026).
- [34] Yentrapalli R, Azimzadeh O, Barjaktarovic Z, et al. Quantitative proteomic analysis reveals induction of premature senescence in human umbilical vein endothelial cells exposed to chronic low-dose rate gamma radiation[J]. *Proteomics*, 2013, 13 (7) : 1096-1107. DOI: [10.1002/pmic.201200463](https://doi.org/10.1002/pmic.201200463).
- [35] Braga-Tanaka I 3rd, Tanaka S, Kohda A, et al. Experimental studies on the biological effects of chronic low dose-rate radiation exposure in mice: overview of the studies at the Institute for Environmental Sciences[J]. *Int J Radiat Biol*, 2018, 94 (5) : 423-433. DOI: [10.1080/09553002.2018.1451048](https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1451048).
- [36] Yablokov AV, Nesterenko VB, Nesterenko AV. 15. Consequences of the Chernobyl catastrophe for public health and the environment 23 years later[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1181: 318-326. DOI: [10.1111/j.1749-6632.2009.04841.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04841.x).
- [37] Olivieri G, Bodycote J, Wolff S. Adaptive response of human lymphocytes to low concentrations of radioactive thymidine[J]. *Science*, 1984, 223 (4636) : 594-597. DOI: [10.1126/science.6695170](https://doi.org/10.1126/science.6695170).
- [38] Sasaki MS, Ejima Y, Tachibana A, et al. DNA damage response pathway in radioadaptive response[J]. *Mutat Res*, 2002, 504 (1/2) : 101-118. DOI: [10.1016/S0027-5107\(02\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(02)00084-2).
- [39] Chen N, Wu LJ, Yuan H, et al. ROS/autophagy/Nrf2 pathway mediated low-dose radiation induced radio-resistance in human lung adenocarcinoma A549 cell[J]. *Int J Biol Sci*, 2015, 11 (7) : 833-844. DOI: [10.7150/ijbs.10564](https://doi.org/10.7150/ijbs.10564). [PubMed].
- [40] 刘涵笑, 方连英, 李洁清, 等. 低剂量辐射适应性反应机制研究进展[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29 (4) : 438-441. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.04.029](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.04.029).
- Liu HX, Fang LY, Li JQ, et al. Advances on the mechanisms of adaptive response to low dose radiation[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29 (4) : 438-441. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.04.029](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.04.029).
- [41] Bogdándi EN, Balogh A, Felgyinszki N, et al. Effects of low-dose radiation on the immune system of mice after total-body irradiation[J]. *Radiat Res*, 2010, 174 (4) : 480-489. DOI: [10.1667/RR2160.1](https://doi.org/10.1667/RR2160.1).
- [42] Rödel F, Hantschel M, Hildebrandt G, et al. Dose-dependent biphasic induction and transcriptional activity of nuclear factor kappa B (NF-kappaB) in EA. hy. 926 endothelial cells after low-dose X-irradiation[J]. *Int J Radiat Biol*, 2004, 80 (2) : 115-123. DOI: [10.1080/09553000310001654701](https://doi.org/10.1080/09553000310001654701).
- [43] Zhang RF, Wang Q, Zhang A, et al. Low-level laser irradiation promotes the differentiation of bone marrow stromal cells into osteoblasts through the APN/Wnt/ β -catenin pathway[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2018, 22 (9) : 2860-2868. DOI: [10.26355/eurrev_201805_14988](https://doi.org/10.26355/eurrev_201805_14988).
- [44] Azimian H, Bahreyni-Toossi MT, Rezaei AR, et al. Up-regulation of Bcl-2 expression in cultured human lymphocytes after exposure to low doses of gamma radiation[J]. *J Med Phys*, 2015, 40 (1) : 38-44. DOI: [10.4103/0971-6203.152249](https://doi.org/10.4103/0971-6203.152249).
- [45] Kim CS, Kim JK, Nam SY, et al. Low-dose radiation stimulates the proliferation of normal human lung fibroblasts via a transient activation of Raf and Akt[J]. *Mol Cells*, 2007, 24 (3) : 424-430. DOI: [10.7590/REAL_2010_02_02](https://doi.org/10.7590/REAL_2010_02_02).
- [46] Suzuki K, Kodama S, Watanabe M. Extremely low-dose ionizing radiation causes activation of mitogen-activated protein kinase pathway and enhances proliferation of normal human diploid cells[J]. *Cancer Res*, 2001, 61 (14) : 5396-5401. DOI: [10.1016/S0165-4608\(01\)00481-2](https://doi.org/10.1016/S0165-4608(01)00481-2).
- [47] Rithidech KN, Scott BR. Evidence for radiation hormesis after *in vitro* exposure of human lymphocytes to low doses of ionizing radiation[J]. *Dose Response*, 2008, 6 (3) : 252-271. DOI: [10.2203/dose-response.07-024.Rithidech](https://doi.org/10.2203/dose-response.07-024.Rithidech).
- [48] Wang BF, Li BH, Dai ZJ, et al. Low-dose splenic radiation inhibits liver tumor development of rats through functional changes in CD4+CD25+Treg cells[J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2014, 55: 98-108. DOI: [10.1016/j.biocel.2014.08.014](https://doi.org/10.1016/j.biocel.2014.08.014).
- [49] Sugimoto A, Gilmour S, Tsubokura M, et al. Assessment of the risk of medium-term internal contamination in Minamisoma City, Fukushima, Japan, after the Fukushima Dai-ichi nuclear accident[J]. *Environ Health Perspect*, 2014, 122 (6) : 587-593. DOI: [10.1289/ehp.1306848](https://doi.org/10.1289/ehp.1306848).

- [50] Oe M, Fujii S, Maeda M, et al. Three-year trend survey of psychological distress, post-traumatic stress, and problem drinking among residents in the evacuation zone after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident [The Fukushima Health Management Survey][J]. *Psychiatry Clin Neurosci*, 2016, 70 (6) : 245-252. DOI: [10.1111/pcn.12387](https://doi.org/10.1111/pcn.12387).
- [51] Orui M, Suzuki Y, Goto A, et al. Factors associated with maintaining the mental health of employees after the fukushima nuclear disaster: findings from companies located in the evacuation area[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 15 (1) : E53. DOI: [10.3390/ijerph15010053](https://doi.org/10.3390/ijerph15010053).
- [52] Zhang W, Ohira T, Maeda M, et al. The association between self-reported sleep dissatisfaction after the Great East Japan Earthquake, and a deteriorated socioeconomic status in the evacuation area: the Fukushima Health Management Survey[J]. *Sleep Med*, 2020, 68: 63-70. DOI: [10.1016/j.sleep.2019.09.004](https://doi.org/10.1016/j.sleep.2019.09.004).
- [53] Maeda M, Oe M. Mental health consequences and social issues after the fukushima disaster[J]. *Asia Pac J Public Health*, 2017, 29 (2_suppl) : 36S-46S. DOI: [10.1177/1010539516689695](https://doi.org/10.1177/1010539516689695).
- [54] Orui M, Nakayama C, Moriyama N, et al. Current psychological distress, post-traumatic stress, and radiation health anxiety remain high for those who have rebuilt permanent homes following the fukushima nuclear disaster[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17 (24) : E9532. DOI: [10.3390/ijerph17249532](https://doi.org/10.3390/ijerph17249532).
- [55] Suzuki Y, Yabe H, Yasumura S, et al. Psychological distress and the perception of radiation risks: the Fukushima health management survey[J]. *Bull World Health Organ*, 2015, 93 (9) : 598-605. DOI: [10.2471/BLT.14.146498](https://doi.org/10.2471/BLT.14.146498).
- [56] World Health Organization. A framework for mental health and psychosocial support in radiological and nuclear emergencies[M]. Geneva:World Health Organization, 2020.
- [57] Yoshida N, Kanda J. Geochemistry. tracking the fukushima radionuclides[J]. *Science*, 2012, 336 (6085) : 1115-1116. DOI: [10.1126/science.1219493](https://doi.org/10.1126/science.1219493).
- [58] Tokyo Electric Power Company. Estimation of the amount of radionuclides emitted from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accidents to the atmosphere[EB/OL]. [2021-5-11]. http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf.
- [59] Tokyo Electric Power Company. Estimation of the amount of radionuclides emitted from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accidents to the sea (around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant exclusive harbour)[EB/OL]. [2021-5-12]. http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0102.pdf.
- [60] International Atomic Energy Agency. The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General[R]. Vienna: IAEA, 2015.
- [61] Aoyama M, Kajino M, Tanaka TY, et al. ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in the north Pacific ocean derived from the March 2011 tepco fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, Japan. part two: estimation of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs inventories in the north Pacific Ocean[J]. *J Oceanogr*, 2016, 72 (1) : 67-76. DOI: [10.1007/s10872-015-0332-2](https://doi.org/10.1007/s10872-015-0332-2).
- [62] Smith JN, Brown RM, Williams WJ, et al. Arrival of the Fukushima radioactivity plume in North American continental waters[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112 (5) : 1310-1315. DOI: [10.1073/pnas.1412814112](https://doi.org/10.1073/pnas.1412814112).
- [63] Yablokov AV, Nesterenko VB, Nesterenko AV. 8. Atmospheric, water, and soil contamination after Chernobyl[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1181: 223-236. DOI: [10.1111/j.1749-6632.2009.04831.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04831.x).

(收稿日期:2021-06-08)

(上接第 98 页)

- [37] 周亮, 徐君乐. 微型个人辐射剂量探测器: CN205643723U[P]. 2016-10-12.
- [38] 胡维. 一种可以监测辐射量和辐射距离的智能腕带: CN106683334A[P]. 2017-05-17.
- [39] 时良辰, 李源, 高志民, 等. 一种基于移动互联网的辐射剂量巡测仪: CN206671573U[P]. 2017-11-24.
- [40] 李忠. 基于SiPM的个人剂量仪的研制[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Li Z. The development of personal dosimeter based on SiPM[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [41] 季翔, 吴宜灿, 赵柱民, 等. 一种基于手机自身图像传感器的辐射剂量监测系统及监测方法: CN106371126A[P]. 2017-02-01.
- [42] 左卓, 柳炳琦, 肖婷婷. 一种Android系统的智能手机γ个人剂量仪[J]. *电子世界*, 2016 (11) : 103-104. DOI: [10.19353/j.cnki.dzsj.2016.11.074](https://doi.org/10.19353/j.cnki.dzsj.2016.11.074).
- Zuo Z, Liu BQ, Xiao TT. A smart phone gamma personal dosimeter for Android system[J]. *Electron World*, 2016 (11) : 103-104. DOI: [10.19353/j.cnki.dzsj.2016.11.074](https://doi.org/10.19353/j.cnki.dzsj.2016.11.074).
- [43] 钟华强, 骆志平, 刘森林, 等. 基于PIN光电二极管的个人辐射探测器研制[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54 (2) : 360-365. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0234](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0234).
- Zhong HQ, Luo ZP, Liu SL, et al. Development of radiation detector based on PIN photodiode[J]. *At Energy Sci Technol*, 2020, 54 (2) : 360-365. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0234](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0234).

(收稿日期:2021-05-13)