福岛核事故后中国海域多介质中 ^{137}Cs 的长期变化及环境行为研究

姚志鹏，王锦龙

（华东师范大学河口海岸全国重点实验室　上海　200241）

摘要：为明确福岛核事故后中国海域 ^{137}Cs 的长期变化及多介质环境响应特征，文章系统地汇总了公开报道的中国海域海水、表层沉积物和鱼类体内 ^{137}Cs 比活度数据，并采用指数衰减拟合、分段回归分析及参数计算方法，评估了 2013 年前后 ^{137}Cs 的变化特征。结果表明，中国海域海水中 ^{137}Cs 比活度在 2013 年前整体呈指数下降趋势，2013 年后发生显著正向偏移，年均附加乘性变化率为 5.8%；渤海、东海和南海分别为 16.9%、7.6%和 3.2%，黄海未发生显著变化。表层沉积物中 ^{137}Cs 比活度仅黄海表现出显著正向偏移，其余海域未见显著偏移。东海鱼类体内 ^{137}Cs 比活度在 2013 年后发生显著正向偏移。整体上，中国海域 ^{137}Cs 固液分配系数为（1.00 ± 1.37）$m^3 \cdot kg^{-1}$，生物富集系数为（69.0 ± 69.8）$L \cdot kg^{-1}$，可为构建中国海域人工放射性核素环境行为参数数据库提供参考。剂量评估显示，食用中国海域鱼类所致 ^{137}Cs 年待积有效剂量小于国家标准规定的公众年有效剂量的限值。研究表明，福岛核事故后中国海域 ^{137}Cs 比活度响应具有明显的介质差异和区域差异，仍需开展长期、多介质连续监测。

关键词：福岛核事故；中国海域；^{137}Cs；分段回归；固液分配系数；生物富集系数；年待积有效剂量

中图分类号：X591；X820.3；P7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2026）05-0067-20

Long-term Trends and Environmental Behavior of ^{137}Cs in Multiple Environmental Media of the China Seas After the Fukushima Nuclear Accident

YAO Zhipeng，WANG Jinlong

（State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research，East China Normal University，Shanghai 200241，China）

Abstract：To clarify the long-term variation of ^{137}Cs in the China Seas after the Fukushima nuclear accident and the characteristics of its environmental responses across multiple media，this study systematically compiled publicly reported activity concentration data of ^{137}Cs in seawater，surface sediments，and fish from the China Seas. Exponential decay fitting，segmented regression analysis，and parameter calculation were applied to evaluate

收稿日期：2026-03-15；**修订日期：**2026-05-15

基金项目：科技部重大研发项目“海陆交互带地下水污染诊断与风险管控技术体系”（2023YFC3709003）.

作者简介：姚志鹏，博士研究生，研究方向为同位素海洋学

通信作者：王锦龙，研究员，博士，研究方向为同位素海洋学

the variation characteristics of ^{137}Cs before and after 2013. The results showed that the activity concentratio of ^{137}Cs in seawater of the China Seas generally followed an exponential decreasing trend before 2013 and exhibited a significant positive offset after 2013, with an additional annual multiplicative change rate of 5.8%. The corresponding rates for the Bohai Sea, East China Sea, and South China Sea were 16.9%, 7.6%, and 3.2%, respectively, whereas no significant change was observed in the Yellow Sea. For the activity concentration of ^{137}Cs in surface sediments, only the Yellow Sea exhibited a significant positive shift, whereas no significant systematic shift was observed in the other sea areas. The activity concentration of ^{137}Cs in fish from the East China Sea showed a significant positive offset after 2013. Overall, the sediment distribution coefficients and bioconcentration factor for biota of ^{137}Cs in the China Seas were (1.00 ± 1.37) $m^3 \cdot kg^{-1}$ and (69.0 ± 69.8) $L \cdot kg^{-1}$, respectively, which could provide reference values for establishing environmental behavior parameter databases for artificial radionuclides in the China Seas. Dose assessment indicated that the annual committed effective dose caused by consumption of fish from the China Seas was below the national annual effective dose limit for the public. This study suggests that the response of the activity concentration of ^{137}Cs in the China Seas after the Fukushima nuclear accident shows clear media-specific and regional differences, highlighting the need for long-term, continuous, and multi-media monitoring.

Keywords: Fukushima nuclear accident; China Seas; ^{137}Cs; Segmented regression; Sediment distribution coefficients; Bioconcentration factor for biota; Annual committed effective dose

0 引言

2011 年 3 月，日本福岛第一核电站事故导致多种人工放射性核素进入大气和西北太平洋，成为影响海洋环境的重要核事故之一。铯 -137（^{137}Cs，半衰期 30.17 年）具有环境释放量大、迁移性强和易被生物吸收等特点，是评价核事故海洋环境影响和开展环境示踪研究的典型核素[1]。环境中的 ^{137}Cs 主要来自全球大气核试验、核事故以及核设施运行排放等，其中全球大气核试验曾是其最首要来源。^{137}Cs 可通过 γ 射线形成外照射，也可经呼吸或摄食进入人体引发内照射；在海洋生态系统中，其可通过生物富集和食物链传递对高营养级生物及人类食品安全造成潜在风险[2]。

福岛核事故发生后，针对中国海域的数值模拟结果表明，福岛源 ^{137}Cs 可能自 2013 年前后开始影响中国近海[3]；部分监测与评估研究认为，此次事故未对中国海域造成明显影响[4-7]，但 Men 等[8] 和 Deng 等[9] 在中国台湾地区南部海域检测到福岛源 ^{134}Cs 信号，表明福岛核事故释放核素已被输送至中国邻近海域。因此，有必要基于长期观测数据，系统地评估事故前后中国海域 ^{137}Cs 的变化特征及其区域响应。现阶段，关于福岛核事故前后中国海域多介质中 ^{137}Cs 比活度变化的综合对比研究仍相对有限[5,7,10]。基于此，本文汇总中国海域海水、表层沉积物和鱼类体内 ^{137}Cs 比活度数据，分析其长期变化趋势及多介质环境行为，并评估食用鱼类所致辐射剂量。与此同时，日本 2023 年 8 月启动核污染水排海，截至 2025 年 11 月已完成第 14 次排放，累计排放量超 10 万 t[11]。因此，持续开展中国海域多介质放射性核素调查，对评价海洋生态安全、辐射安全、生物多样性保护和食品安全均具有重要意义。

1 数据来源

本文系统整理国内外公开发表的中国海域海水、表层沉积物和鱼类体内 ^{137}Cs 比活度数据，研究范围包括渤海、黄海、东海和南海，优先选取具有明确采样时间、采样海域或站位、样品类型及计量单位的数据。在时间序列分析、趋势拟合及分段回归过程中，统一采用原始观测数据，以保持 ^{137}Cs 比活度随时间变化特征的真实性；仅在计算各海域及整体海域统计平均值和离散程度（统计样本标准

差）时，为保证不同年代数据之间的可比性，统一将观测值衰变校正至同一参考日期，即 2025 年 10 月 1 日。对低于检出限（LLD）和未检出（NA）的数据，参考 Pearson 等[12]的处理方法，分别以 LLD 值和 0 替代，用于统计与回归分析。本文共收集 1960—2023 年中国海域海水 ^{137}Cs 比活度数据 1 682 个[5,10,13-34]；1979—2022 年表层沉积物数据 934 个[10,14-17,20,25,26,35-65]，鉴于不同文献和监测报告对“表层沉积物”的取样厚度定义存在差异，本文选择 0 ～ 10 cm 范围内的沉积物数据，可在区域尺度上近似反映近现代沉积物对水体 ^{137}Cs 输入、再分布及沉积过程的综合响应；在生物样品方面，收集 1970—2023 年中国海域鱼类体内 ^{137}Cs 比活度数据 1 322 个[16,25-26,35,38,40,47,55-58,66-76]。

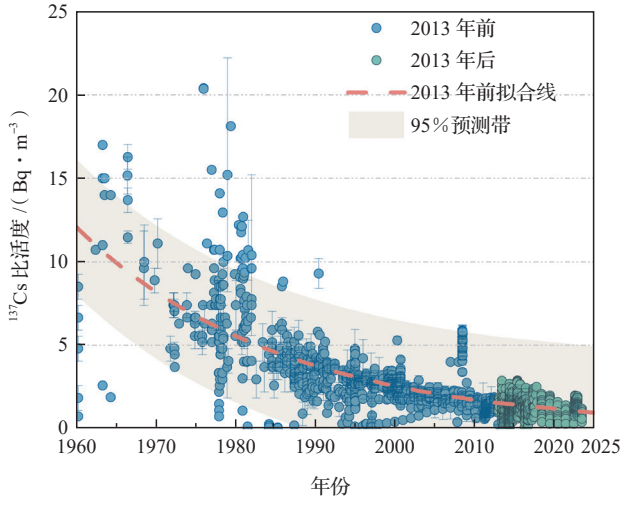


图 1　海水中 ^{137}Cs 比活度随时间分布

Fig.1　Temporal variation of ^{137}Cs activity concentration in seawater

注：拟合线为 2013 年前数据拟合并向后延伸的结果。

2　^{137}Cs 的比活度长期变化趋势

2.1　海水中 ^{137}Cs 的比活度长期变化趋势

中国海域海水样品中 ^{137}Cs 比活度的报道结果包括低于分析方法检出限的数据，其中所报道的最低检出限为 0.03 Bq · m^{-3}，可定量测得的最高比活度为 20.4 Bq · m^{-3}。汇总数据经统一衰变校正后，^{137}Cs 平均比活度为（1.26 ± 0.77）Bq · m^{-3}（n=1 682）。其中，渤海平均比活度为（1.43 ± 1.35）Bq · m^{-3}（n=131），高于南海［（1.27 ± 0.72）Bq · m^{-3}（n=513）］、东海［（1.26 ± 0.66）Bq · m^{-3}（n=760）］和黄海［（1.15 ± 0.74）Bq · m^{-3}（n=278）］。

海水中 ^{137}Cs 比活度随时间分布如图 1 所示。受全球大气核试验沉降影响，海水 ^{137}Cs 比活度在 20 世纪 60—70 年代处于较高水平，随后整体呈指数下降趋势。图 1 中的拟合线为基于 2013 年前观测数据拟合得到的指数衰减模型并向后延伸，阴影部分为 95 % 预测带。2013 年后，观测值相较于此前长期衰减趋势呈现抬升特征，该现象与数值模拟的结果[3]类似。为验证是否存在系统性趋势偏移，仍需进一步通过统计方法检验。考虑到放射性核素在海洋中的迁移与衰减过程具有指数变化特征，因此，对观测数据进行分段回归（Segmented regression）分析。将观测比活度进行自然对数转换，即 ln（y），并以采样年份（x）及 2013 年后年份偏移量［t_2=max(0,x–2 013)］作为自变量，构建多元线性回归模型：

$$\ln y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot t_2 + \varepsilon \qquad (1)$$

式中：β_0 为模型截距；β_1 为采样年份（x）的回归系数，β_1 为负值且其 p 值（p_1）< 0.01，表征 2013 年前 ^{137}Cs 比活度的长期衰减趋势；β_2 为 2013 年后相对于事故前的水平偏移系数，表征 2013 年后相对于原趋势的附加变化。通过检验 β_2 是否显著不为零［即检验其 p 值（p_2）是否达到显著或极显著水平，以 0.05 作为统计显著性水平，当 p < 0.05 表示差异显著，p < 0.01 表示差异极显著］，可判断时间序列在 2013 年后是否发生结构变化；ε 为随机误差。分段回归结果显示，β_2=0.056 1，p_2=1.66 × 10^{-12} < 0.01，表明 2013 年后 ^{137}Cs 比活度的衰减趋势相较于原长期指数衰减趋势发生极显著正向偏移，这与采用不同的断点（± 1 年）开展敏感性分析得到的结果一致，反映出 2013 年后检测到的 ^{137}Cs 比活度变化具有稳健性。由于模型基于对数空间建立，e^{β_2} ≈ 1.058，说明 2013 年后 ^{137}Cs 比活度相对于原长期趋势每年额外产生约 5.8 % 的乘性效应。

为识别不同海域海水 ^{137}Cs 比活度的区域性响应特征，对四大海域数据进行分段回归分析（图 2 和表 1）。结果显示，渤海、东海和南海 β_2 均为正且

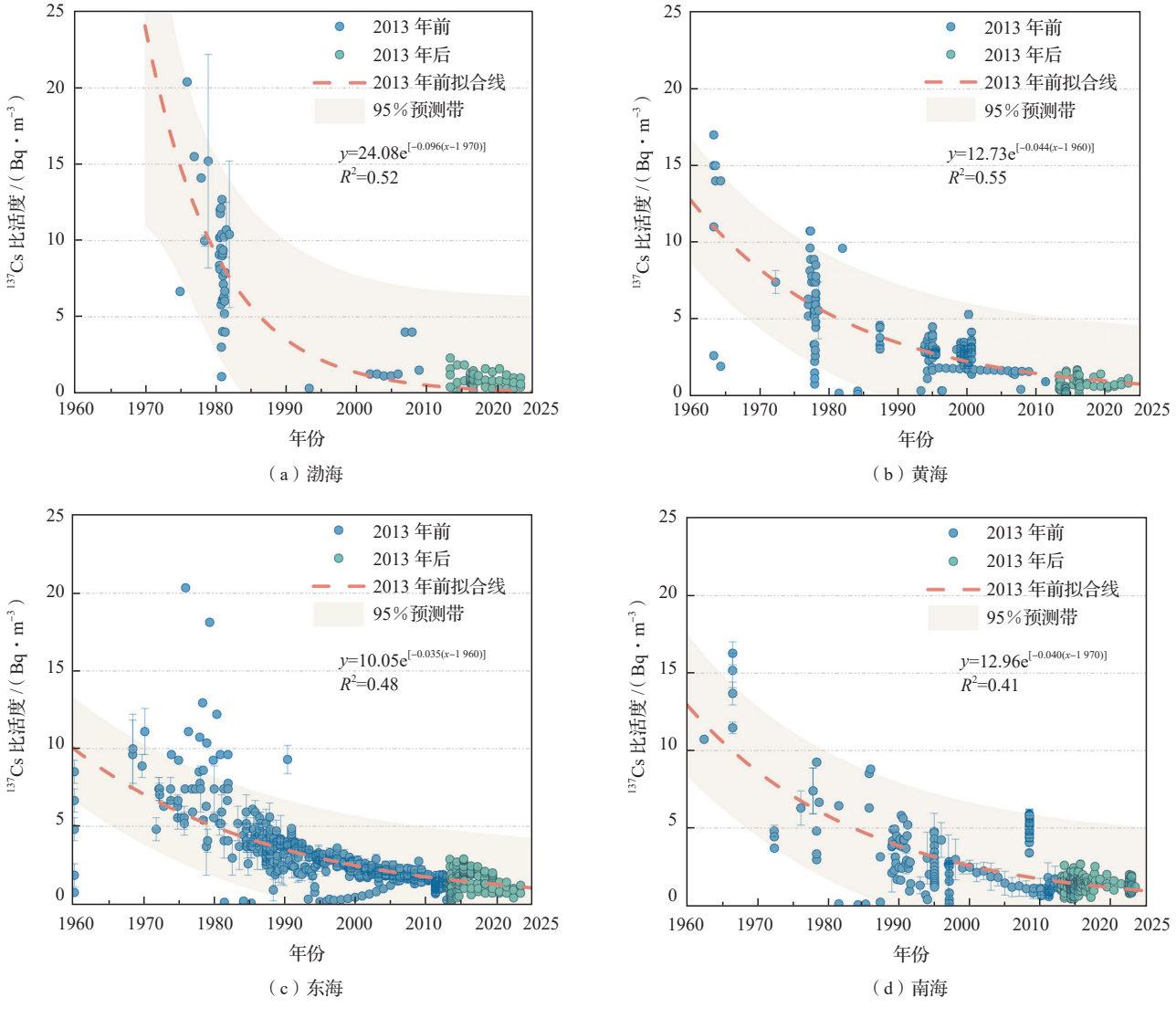


图 2 渤海、黄海、东海和南海海水中 ^{137}Cs 比活度随时间分布

Fig.2 Temporal variations of ^{137}Cs activity concentration in seawater of the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea

注：拟合线为 2013 年前数据拟合并向后延伸的结果。

表 1 2013 年后海水 ^{137}Cs 分段回归结果

Table 1 Segmented regression results for ^{137}Cs in seawater after 2013

海域	β_2	p_2	e^{β_2}	显著性
渤海	+0.156	4.08×10^{-4}	1.169	极显著
黄海	+0.0467	0.218	1.048	不显著
东海	+0.0741	2.43×10^{-6}	1.076	极显著
南海	+0.0315	4.22×10^{-4}	1.032	极显著

达到极显著水平（$p_2 < 0.01$），表明 2013 年后上述海域相对于原长期指数衰减趋势均存在稳定正向偏移。根据计算，渤海、东海和南海 2013 年后相对于原趋势的年均附加乘性变化率分别约为 16.9%、7.6%和 3.2%。黄海 β_2 未达显著水平（$p_2 > 0.05$），表明黄海海水中 ^{137}Cs 比活度未发生系统性趋势改变，但已有研究在黄海检出明显 ^{134}Cs 信号[77]，提示黄海局部的放射性水平变化过程仍值得关注。此外，2007 年后黄海藻华大规模暴发也可能在一定

程度上影响海水中放射性核素的表观比活度：已有研究指出浮游生物（如藻类）对包括 ^{137}Cs 在内的多种放射性核素具有吸附或富集作用，进而可能降低周围海水中的比活度[78]。该过程假设仍需要在多角度证据与水文过程约束下进一步开展讨论及验证。东海显示极显著且稳定的正向偏移（$p < 0.01$，$e^{\beta_2} \approx 1.076$），表明东海 2013 年后相对于长期衰减背景存在持续的抬升信号，提示可能存在明确的额外来源或区域过程驱动补给。南海 β_2 虽较小但仍达到极显著水平（$p < 0.01$，$e^{\beta_2} \approx 1.032$），表现为幅度较弱但可检出的长期信号，这可能与南海具有较强的水体交换和稀释能力有关。已有研究在中国台湾地区南部海域检测到福岛源 ^{134}Cs 信号[8-9]，并在南海东北部海域观测到 ^{137}Cs 比活度抬升[18]，为南海受福岛核污染水影响提供了局地证据支撑。同时，福岛核事故后开阔大洋中 ^{137}Cs 比活度曾出现显著抬升，反映该事故对邻近大洋环境的影响不容忽视[79]。鉴于日本自 2023 年 8 月 24 日起持续分批排放核污染水入海，面向中国近海开展长期和规范化的多介质放射性核素监测具有重要现实意义。

2.2　表层沉积物中 ^{137}Cs 的比活度长期变化趋势

中国海域表层沉积物中 ^{137}Cs 平均比活度为（1.26 ± 1.55）Bq · $kg^{-1}_{干}$（n=934），中位数为 0.89 Bq · $kg^{-1}_{干}$。整体样本均值高于中位数且标准差较大，分布呈明显右偏特征，时空变异性较强。因此，本文同时采用均值和中位数表征其统计水平。渤海平均比活度为（2.55 ± 2.52）Bq · $kg^{-1}_{干}$（n=141），中位数为 1.77 Bq · $kg^{-1}_{干}$；黄海平均值为（1.34 ± 1.52）Bq · $kg^{-1}_{干}$（n=236），中位数为 1.04 Bq · $kg^{-1}_{干}$；东海平均值为（1.05 ± 1.07）Bq · $kg^{-1}_{干}$（n=285），中位数为 0.91 Bq · $kg^{-1}_{干}$；南海平均值为（0.75 ± 0.62）Bq · $kg^{-1}_{干}$（n=272），中位数为 0.57 Bq · $kg^{-1}_{干}$。

图 3 显示，中国海域表层沉积物 ^{137}Cs 比活度于 20 世纪 80 年代处于较高水平，随后呈快速下降趋势。以 2013 年作为分界点开展分段回归分析，设置因变量为 ln（$y+\delta$），建立回归模型：

$$\ln(y+\delta)=\beta_0+\beta_1 \cdot x+\beta_2 \cdot t_2+\varepsilon \quad (2)$$

式中：δ 为表层沉积物 ^{137}Cs 比活度的最低检出限的

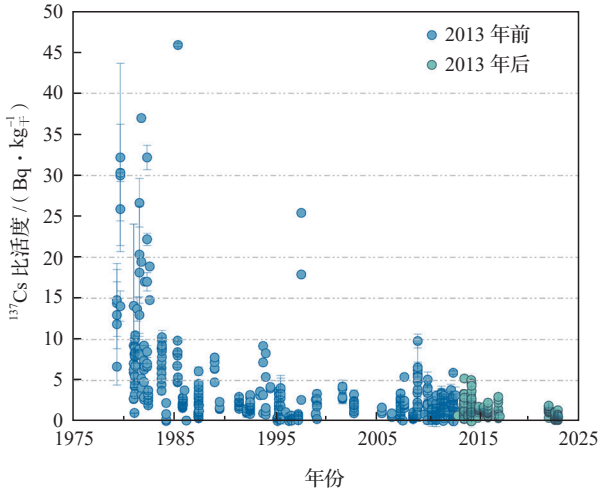


图 3　表层沉积物中 ^{137}Cs 比活度随时间分布

Fig.3　Temporal variation of ^{137}Cs activity concentration in surface sediments

1/2，即 0.02 Bq · $kg^{-1}_{干}$；其余参数与海水部分相同。结果显示 β_2=−0.012 3，p_2=0.323 > 0.05，表明 2013 年后沉积物 ^{137}Cs 比活度未发生显著的系统性变化。

本文进一步对渤海、黄海、东海和南海表层沉积物中 ^{137}Cs 的比活度数据开展分段回归分析（图 4 和表 2）。渤海和黄海表现出早期高值随后指数下降趋势；相比之下，东海和南海数据离散程度较高，未呈现出明显的时间变化规律。分段回归结果表明，2013 年后渤海、东海和南海表层沉积物 ^{137}Cs 比活度均未发生系统性显著偏移（$p_2 > 0.05$）。黄海表层沉积物 ^{137}Cs 比活度发生了极显著正向偏离（$p_2 < 0.01$），e^{β_2}=1.139 可解释为 2013 年后每年额外产生约 13.9% 的乘性增加效应。黄海表层沉积物 ^{137}Cs 比活度的正向偏离或与自 2008 年以来黄海暴发较大规模藻华现象有关，浮游生物及悬浮颗粒物对海水中 ^{137}Cs 的吸附和沉降过程可促进 ^{137}Cs 由水体向表层沉积物转移[80-81]。已有研究表明，福岛核事故释放的绝大部分随海水以溶解态输运，仅有少部分最终沉降至近岸沉积物[82]。Oguri 等[83]发现，^{137}Cs 可在距离原始来源 100 km 以外的区域发生沉积。这说明，尽管海水是 ^{137}Cs 远距离输运的主要介质，但沉积物仍可记录其区域再分布与沉降过程。因此，对中国海域沉积物中 ^{137}Cs 开展长期连续监测仍具有重要意义。

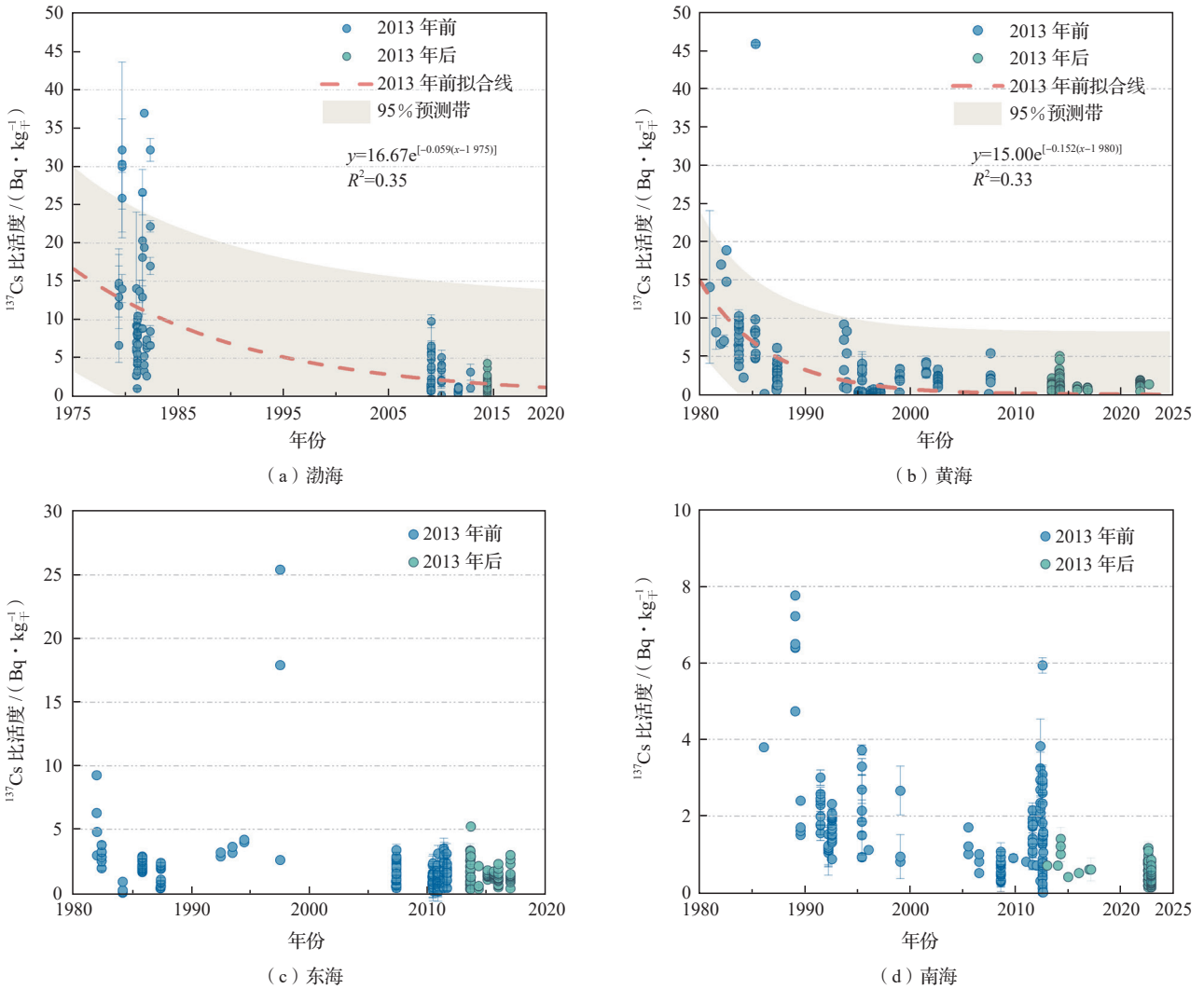


图 4 渤海、黄海、东海和南海表层沉积物中 ^{137}Cs 比活度随时间分布

Fig.4 Temporal distribution of ^{137}Cs activity concentration in surface sediments of the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea

注：拟合线为全部年份数据拟合的结果。

表 2 2013 年后四大海域表层沉积物 ^{137}Cs 分段回归结果

Table 2 Segmented regression results of ^{137}Cs in surface sediments after 2013

海域	β_2	p_2	e^{β_2}	统计显著性
渤海	+0.034 3	0.818	1.035	不显著
黄海	+0.130	1.44×10^{-3}	1.139	极显著
东海	+0.086 7	0.0547	1.091	不显著
南海	−0.010 9	0.502	0.989 2	不显著

2.3 鱼类体内 ^{137}Cs 的比活度长期变化趋势

中国鱼类体内 ^{137}Cs 比活度分布范围为 0～1.9 Bq · kg^{-1}，平均比活度为（0.087 ± 0.070）Bq · kg^{-1}（n=1 322），样本标准差较大，表明 ^{137}Cs 在不同海域和不同种类鱼的分布差异性较大。渤海平均比活度为（0.187 ± 0.108）Bq · kg^{-1}（n=31），与黄海［平均值为（0.158 ± 0.141）Bq · kg^{-1}（n=98）］接近，高于东海［平均值为（0.075 ± 0.038）Bq · kg^{-1}（n=1 143）］和南海［平均值为（0.134 ± 0.169）Bq · kg^{-1}（n=50）］。

图 5 显示，中国海域鱼类体内 ^{137}Cs 比活度整体呈指数型下降趋势，但 2013 年后略有抬高。分段回归结果显示，β_2=0.025 4（p_2=0.001 23 ＜ 0.01），表明 2013 年后鱼类体内 ^{137}Cs 比活度发生了极显著的系统性抬高；$e^{\beta_2} \approx 1.025$，意味着 2013 年后该比活度每年呈现约 2.5%的乘法增长效应。

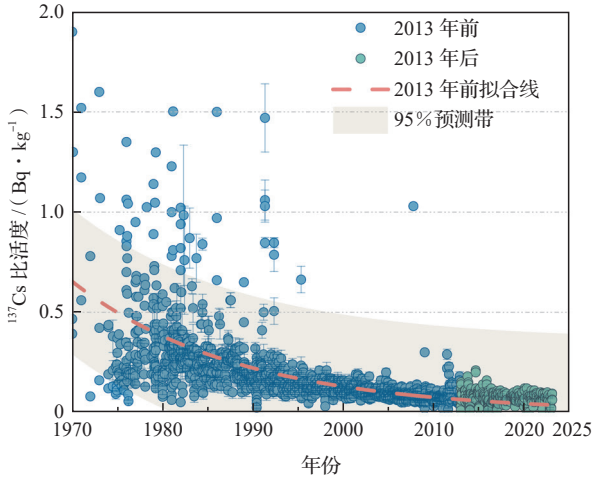
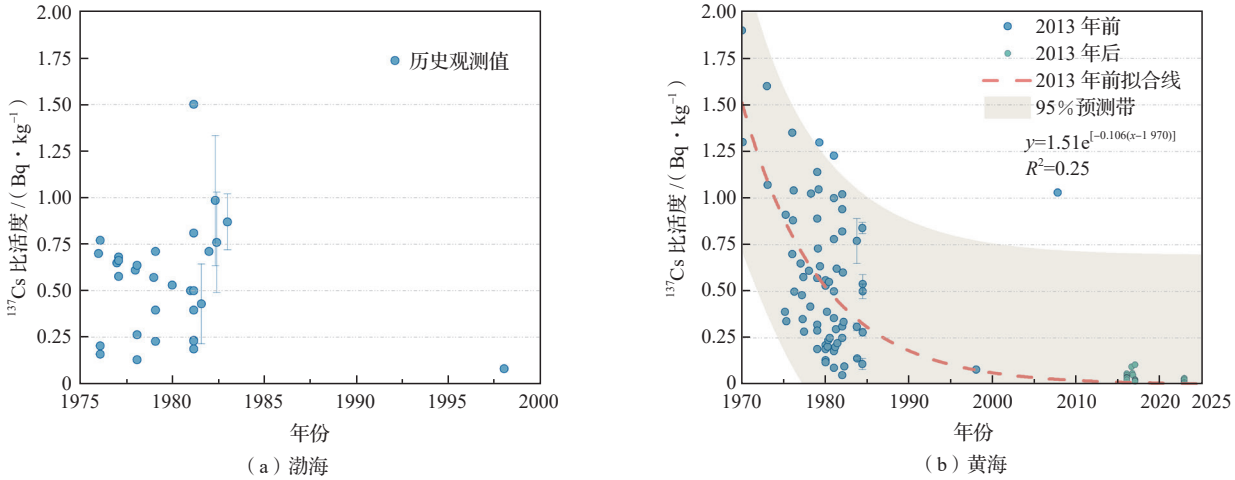


图 5　鱼类体内 ^{137}Cs 比活度随时间分布

Fig.5　Temporal distribution of ^{137}Cs activity concentration in fish

注：拟合线为 2013 年前数据拟合并向后延伸的结果。

绘制渤海、黄海、东海和南海鱼类体内 ^{137}Cs 比活度随时间变化的分布图，并分别开展区域尺度分析（图 6 和表 3）。渤海鱼类历史数据主要集中于 1998 年以前，缺乏后续观测资料，因此未对其进行分段分析。四大海域鱼类体内 ^{137}Cs 比活度整体上在 20 世纪 70—80 年代较高且离散性较强，随后呈下降趋势。黄海和南海历史数据量相对较少且时间分布不连续，东海数据量较大，能够较好地反映中国海域鱼类 ^{137}Cs 长期变化的主体特征。黄海和南海分段回归结果显示，在 2013 年后 ^{137}Cs 比活度均未发生显著的系统变化（p_2 ＞ 0.05）。东海在 2013 年后 ^{137}Cs 比活度发生极显著的系统性偏移（p_2 ＜ 0.01），年均正向偏移量为 2.5%，说明全域鱼类体内 ^{137}Cs 在 2013 年后的正向偏移主要由东海样本贡献。由于铯在海水中呈可溶态，随潮流可进行远距离输送，因此，其在河口地区沉降后伴随碎屑颗粒矿化和生物吸收等过程的发生，使底栖鱼类中 ^{137}Cs 比活度总是超出预期水平[84]。唐峰华等[85-86]指出在营养级传递的过程中，^{137}Cs 比活度不断增高。也有研究计算了 ^{137}Cs 在不同营养级间的传递因子，大于 ^{3}H、^{14}C 和 ^{90}Sr 等其他核素[38]。由于部分鱼类具有洄游习性，它们将事故泄漏的人工核素带至更远距



（a）渤海　　（b）黄海

图 6　渤海、黄海、东海和南海鱼类体内 ^{137}Cs 比活度随时间分布

Fig.6　Temporal distribution of ^{137}Cs activity concentration in fish from the Bohai Sea，Yellow Sea，East China Sea，and South China Sea

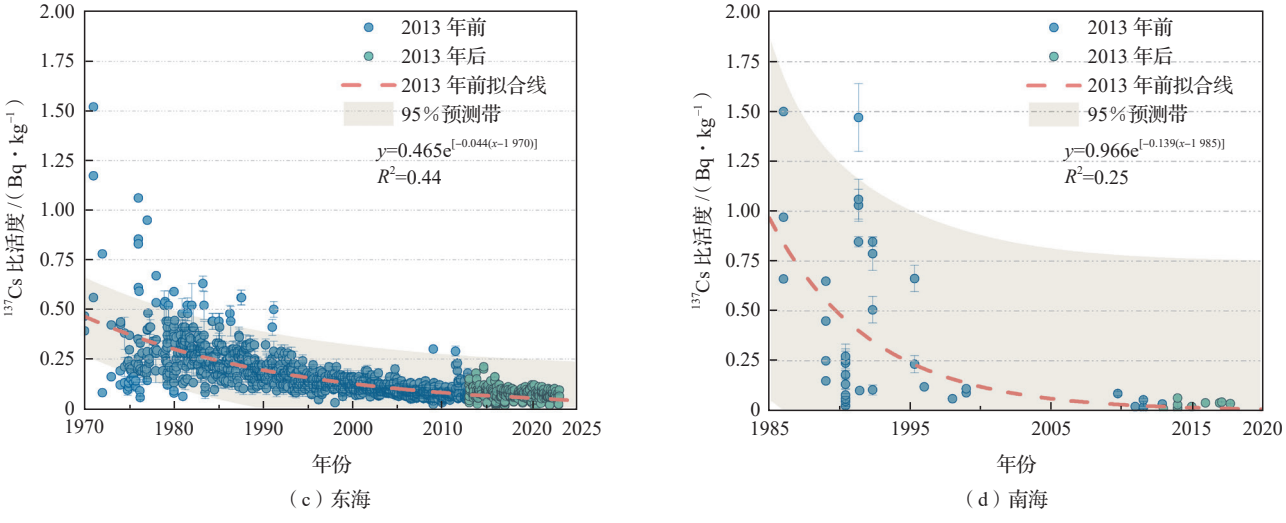


图 6 渤海、黄海、东海和南海鱼类体内 ^{137}Cs 比活度随时间分布（续图）

Fig.6 Temporal distribution of ^{137}Cs activity concentration in fish from the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea

注：拟合线为 2013 年前数据拟合并向后延伸的结果。

表 3 2013 年后黄海、东海和南海海域鱼类体内 ^{137}Cs 分段回归结果

Table 3 Segmented regression results of ^{137}Cs in fish from Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea after 2013

海域	β_2	p_2	e^{β_2}	统计显著性
黄海	−0.022 0	0.640	0.978 3	不显著
东海	0.025 1	1.14×10^{-5}	1.025	极显著
南海	0.173	0.218	1.189	不显著

离海域的速度快于海水扩散。例如，Madigan 等[87]在福岛核事故后，于圣地亚哥海域的渔获物中检测到了福岛源的 ^{134}Cs。因此，尽管中国海域鱼类体内 ^{137}Cs 比活度整体水平处于下降趋势，但仍有必要对人类食用比例较高的鱼、虾、蟹和贝等海产品中的人工放射性核素开展长期监测。

3 ^{137}Cs 行为和辐射剂量评价

3.1 海水中 ^{137}Cs 的平均停留时间

将海水全部观测数据带入指数模型拟合，得到拟合线和相应公式（图 7 和图 8）。按式（3）计算环境半衰期，按式（4）计算平均停留时间[88]：

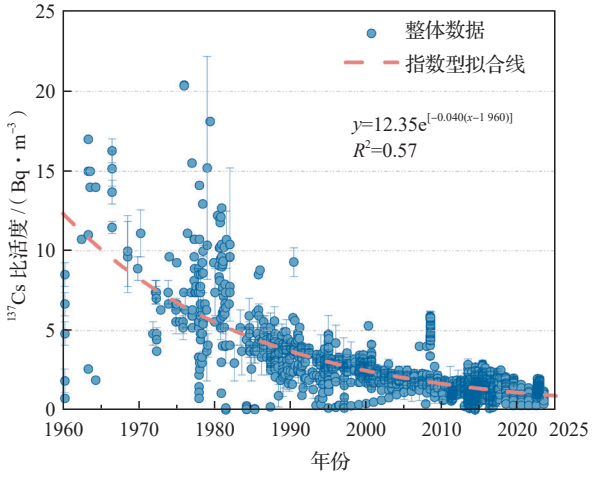


图 7 海水中 ^{137}Cs 比活度指数衰减拟合结果

Fig.7 Exponential decay fit of ^{137}Cs activity concentration in seawater

注：拟合线为全部年份数据拟合的结果。

$$T_{EF}=\frac{\ln 2}{k} \quad (3)$$

$$\frac{1}{T_M}=\frac{\ln 2}{T_{EF}}-\frac{\ln 2}{T_R} \quad (4)$$

式中：T_{EF} 为环境半衰期，单位为 a；k 为核素在环境中的表观减少速率，单位为 a^{-1}；T_M 为 ^{137}Cs 平均停

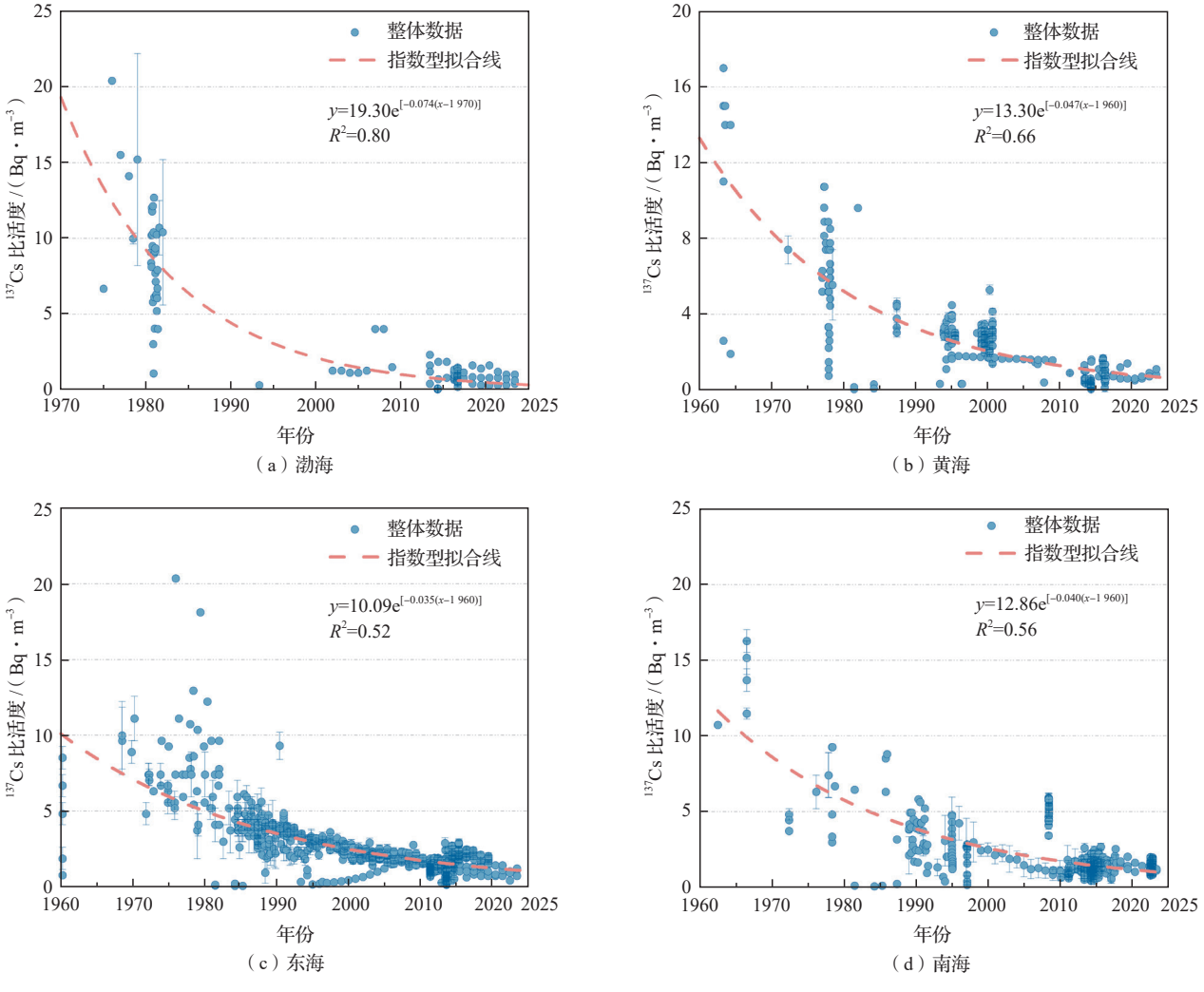


图 8　渤海、黄海、东海和南海海水中 ^{137}Cs 比活度指数衰减拟合结果

Fig.8　Exponential decay fits of ^{137}Cs activity concentration in seawater of the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea

注：趋势线为全部年份数据拟合的结果。

留时间，单位为 a；T_R 为 ^{137}Cs 的自然衰减半衰期，为 30.17 a。经计算得到中国海域海水 ^{137}Cs 环境半衰期为（17.3 ± 0.4）a，平均停留时间为（58.4 ± 2.9）a；渤海环境半衰期为（9.41 ± 1.0）a，平均停留时间为（19.7 ± 2.9）a；黄海环境半衰期为（14.8 ± 0.7）a，平均停留时间为（42.2 ± 3.8）a；东海环境半衰期为（19.7 ± 0.7）a，平均停留时间为（81.7 ± 8.0）a；南海环境半衰期为（17.2 ± 0.5）a，平均停留时间为（58.0 ± 4.3）a。

中国海域及世界其他海域 ^{137}Cs 环境半衰期和平均停留时间如表 4 所示。与其他海域相比，本文获得的中国海域海水中 ^{137}Cs 环境半衰期为（17.3 ± 0.4）a，处于已有报道结果［（10 ～ 20）a］的较高范围，长于波罗的海（10 a）、北太平洋［（13 ± 1）a］与日本海［（14.7 ± 0.7）a］，但略短于北印度洋［（20 ± 2）a］。中国海域海水中 ^{137}Cs 的平均停留时间为［（58.4 ± 2.9）a］，长于波罗的海（22 a）、北太平洋（33 a）和日本海（41 a），但略短于北印度洋（86 a）。中国不同海域之间也存在明显差异：渤海 ^{137}Cs 的环境半衰期和平均停留时间最短，分别为（9.41 ± 1.0）a 和（19.7 ± 2.9）a，与波罗的海研究的结果较为接近；黄海 ^{137}Cs的环境半衰期和平均停留时间分别为（14.8 ±

0.7）a 和（42.2 ± 3.8）a，与日本海较为接近；东海 ^{137}Cs 的环境半衰期和平均停留时间最长，分别为（19.7 ± 0.7）a 和（81.7 ± 8.0）a，接近北印度洋的相应结果；南海则分别为（17.2 ± 0.5）a 和（58.0 ± 4.3）a，处于上述海域之间。需要说明的是，福岛核事故释放的放射性核素及后续核污染水排放所形成的扩散过程，并不局限于表层海水。已有研究表明，次表层的模态水和小尺度湍流等过程可以从不同深度入侵福岛以外的海域[89]。因此，本文在计算中国海域 ^{137}Cs 环境半衰期和平均停留时间时，将不同深度海水作为整体研究对象，未进一步按水深分层讨论。与此不同，既往研究中用于计算环境半衰期或平均停留时间的数据多来源于表层海水。相比之下，基于整体海水数据计算得到的环境半衰期和平均停留时间综合反映了 ^{137}Cs 在不同水层中的滞留与再分布特征，因而其数值总体略高于前人在相近时间段基于表层海水数据获得的结果[7,90]。

表 4 不同海域 ^{137}Cs 的环境半衰期和平均停留时间

Table 4 Environmental half-lives and average residence times of ^{137}Cs in different sea areas

海域	测量时间	^{137}Cs 环境半衰期 /a	^{137}Cs 平均停留时间 /a	参考文献
北印度洋	1971—2000 年	20 ± 2	86	[91]
北太平洋	1971—2010 年	13 ± 1	33	[91]
波罗的海	1987—2006 年	10	22	[92]
日本海	1993—2010 年	14.7 ± 0.7	41	[93]
黄海	1963—2018 年	6.5 ± 0.5	12.0	[94]
东海	1968—2015 年	14.4 ± 1.7	39.7	[95]
南海	1984—2018 年	16.9 ± 2.1	55.4	[95]
渤海	1976—2016 年	9.50	20.00	[7]
黄海	1963—2016 年	13.33	34.48	[7]
东海	1960—2013 年	13.59	35.71	[7]
南海	1960—2013 年	19.25	76.92	[7]
东海	1968—2012 年	13.7 ± 0.5	36.2	[90]
南海	1965—2012 年	15.5 ± 0.7	46.0	[90]
中国海域	1960—2023 年	17.3 ± 0.4	58.4 ± 2.9	本文
渤海	1975—2023 年	9.41 ± 1.0	19.7 ± 2.9	本文
黄海	1972—2023 年	14.8 ± 0.7	42.2 ± 3.8	本文
东海	1960—2023 年	19.7 ± 0.7	81.7 ± 8.0	本文
南海	1966—2023 年	17.2 ± 0.5	58.0 ± 4.3	本文

续表 4

3.2 中国海域 ^{137}Cs 的固液分配系数

固液分配系数（K_d，Sediment Distribution Coefficient）是表征放射性核素在水体与颗粒物/沉积物之间分配行为的重要参数[96]。其计算公式如下：

$$K_d = \frac{A_S}{A_W} \quad (5)$$

式中：K_d 为固液分配系数，单位为 $m^3 \cdot kg^{-1}$；A_S 为沉积物中核素比活度，单位为 $Bq \cdot kg_{干}^{-1}$；A_W 为海水中核素比活度，单位为 $Bq \cdot m^{-3}$。

如图 9 所示，中国海域 ^{137}Cs 固液分配系数（K_d）平均值为（1.00 ± 1.37）$m^3 \cdot kg^{-1}$，其中渤海最高，为（1.78 ± 2.44）$m^3 \cdot kg^{-1}$，该标准差较大，反映区域空间异质性显著，其次为黄海（1.16 ± 1.52）$m^3 \cdot kg^{-1}$、东海（0.83 ± 0.95）$m^3 \cdot kg^{-1}$ 和南海（0.59 ± 0.59）$m^3 \cdot kg^{-1}$。这说明，渤海和黄海沉积物对 ^{137}Cs 具有相对较强的吸附或保留能力，而东海和南海中 ^{137}Cs 则更倾向于维持在水相，或其受水体交换与稀释过程的影响更强。这种区域差异可能与不同海域的地形封闭程度和水动力条件有关。渤海是内陆海，相对封闭；黄海虽是边缘海，但其平均水深较浅，相较于东海和南海水体交换较为受限，沉积物对区域输入和再分布过程的响应更容易在局地尺度上保留下来[97]。东海和南海更易受到风暴潮和台风等海上极端天气过程影响，此类事件可在短时间内显著改变海域水动力条件和悬浮颗粒物浓度，进而影响 ^{137}Cs 在固液两相之间的再悬浮、再沉积和再分配过程[98-99]。因此，极端天气事件对 ^{137}Cs 固液分配行为的影响仍有待进一步研究。除水动力过程外，^{137}Cs 在固液界面的分配还受 pH、悬浮颗粒物浓度、离子强度、有机质含量及沉积物粒径组

成等环境因子的共同控制[100]。Wang 等[80,101]研究表明，在高盐度、高悬浮颗粒物浓度及缺氧条件下，^{137}Cs 更易被颗粒物吸附并沉积于有机质含量较高的沉积物中。黄海夏季大规模藻华过程，可能为 ^{137}Cs 由海水向沉积物迁移提供了较为有利的缺氧环境、更稳定的附着点以及富含有机质的生物颗粒来源，从而在一定程度上解释了黄海较高的 K_d 值及沉积物中 ^{137}Cs 比活度正向偏移现象。本文估算的 K_d 值与张翊邦等[102]报道的中国近海 ^{137}Cs 的 K_d 值（平均值为 0.98 $m^3 \cdot kg^{-1}$，范围为 0.46 ～ 1.50 $m^3 \cdot kg^{-1}$）较为接近，也处于国际原子能机构推荐范围（0.4 ～ 40 $m^3 \cdot kg^{-1}$）内，说明本文估算结果总体合理。

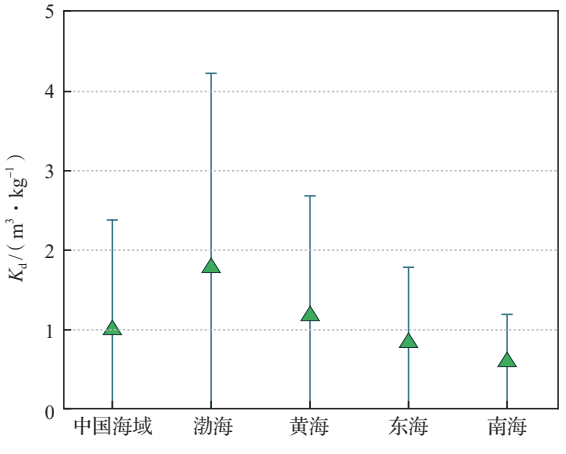


图 9　中国海域及四大海域 K_d 值

Fig.9　K_d values for the China Seas and the four major sea areas

3.3　中国海域 ^{137}Cs 的生物富集系数

生物富集系数（K_{BCF}，Bioconcentration Factor for Biota）通常定义为生物体内核素比活度与其所处水体中核素比活度之比，常用于评价海洋生物对海水中人工放射性核素的富集水平[38,96]。其计算公式如下：

$$K_{BCF}=\frac{A_B}{A_W} \quad (6)$$

式中：K_{BCF} 为生物富集系数，单位为 L · kg^{-1}；A_B 为生物体内核素的比活度，单位为 Bq · kg^{-1}；A_W 为海水中核素的比活度，常见单位为 Bq · L^{-1}。

中国海域 ^{137}Cs 生物富集系数（K_{BCF}）平均值为（69.0 ± 69.8）L · kg^{-1}，该标准差较大，反映区域空间异质性显著；其中，渤海为（130.8 ± 144.8）L · kg^{-1}，黄海为（137.4 ± 151.2）L · kg^{-1}，东海为（59.5 ± 43.4）L · kg^{-1}，南海为（105.5 ± 145.9）L · kg^{-1}。需要说明的是，鱼类对 ^{137}Cs 的 K_{BCF} 受物种组成、体长、年龄、营养级、生活习性及栖息地等多种因素影响。由于本文汇总数据未能对鱼类种属及生态类型做进一步细分，因此，所得 K_{BCF} 应理解为区域尺度上的表观生物富集系数，不确定度较高，但仍可用于不同海域之间及与已有文献结果进行比较。将本文计算结果与其他海域已有研究结果进行对比，中国海域鱼类 ^{137}Cs 生物富集系数总体处于国际报道范围内，略高于国际原子能机构（IAEA）推荐的海鱼富集系数（100 L · kg^{-1}）。渤海和黄海高于 IAEA 推荐值，南海与推荐值较为接近，东海则低于推荐值。唐峰华等[85,86,103]研究表明，富集系数与生物体长、营养级及生态习性等因素密切相关。Ni 等[38]也指出，在不同人工核素于食物链不同营养级的传递过程中，^{137}Cs 的传递因子最大。另有研究表明，在太平洋海域，^{137}Cs 的 K_{BCF} 仅低于 ^{14}C（约 10^4 L · kg^{-1}）[104]（表 5）[105-111]。因此，有必要继续加强对主要食用海洋生物中关键人工核素的监测，并逐步构建涵盖不同物种和不同生态类型海洋生物的生物富集参数数据库。

3.4　食用中国海域鱼类导致的年待积有效剂量评估

参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871—2002）[112]，本文采用年待积有效剂量 $E_{j,ing}$ 评价食用相关鱼类摄入 ^{137}Cs 所产生的内照射剂量。其计算公式为：

$$E_{j,ing}=\sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing} \quad (7)$$

式中：$E_{j,ing}$ 为食用鱼类后放射性核素 j（此处为 ^{137}Cs）带来的年待积有效剂量，单位为 Sv · a^{-1}；$e(g)_{j,ing}$ 为 g 年龄组食入单位活度放射性核素 j 的待积有效剂量系数。本文以大于 17 岁的成人为评价对象，^{137}Cs 的食入剂量系数取 1.3×10^{-8} Sv · Bq^{-1}；$I_{j,ing}$ 为一年内经食物摄入的 ^{137}Cs 总活度，单位为 Bq · a^{-1}。鱼

表 5 不同海域 ^{137}Cs 的生物富集系数

Table 5 Bioconcentration factors of ^{137}Cs in different sea areas

海域	检测时间	生物类型	K_{BCF}/(L · kg^{-1})	参考文献
日本沿岸	1960—1970 年	鱼类	43 ± 5	[105]
	1984—1990 年	鱼类	52 ± 4	[106]
欧洲海域	1978—1985 年	鳕鱼	92	[107]
		黑线鳕	58	[107]
		鳎鱼	39	[107]
		牙鳕	150	[107]
北太平洋	2011—2012 年	鱿鱼	250 ～ 2 400	[86，108]
美国西海岸	2012 年	蓝鳍金枪鱼	3 000	[109]
福岛以东邻近海域	2011 年	中层鱼	80 ～ 1 000	[110]
波罗的海	2019 年 12 月—2020 年 12 月	底栖鱼	97 ± 4	[111]
		近底层鱼	160 ± 7	[111]
		中上层鱼类	115 ± 8	[111]
爱尔兰海	2019 年 12 月—2020 年 12 月	底栖鱼	60.0 ± 2.9	[111]
		近底层鱼	60.6 ± 3.7	[111]
		中上层鱼类	58.1 ± 5.7	[111]
中国烟台海阳邻近海域	2022 年 11 月	底栖鱼	19.18 ± 8.89	[38]
中国海域	1970—2023 年	鱼类	69.0 ± 69.8	本文
渤海	1976—1998 年		130.8 ± 144.8	本文
黄海	1970—2022 年		137.4 ± 151.2	本文
东海	1970—2023 年		59.5 ± 43.4	本文
南海	1985—2017 年		105.5 ± 145.9	本文
IAEA 推荐值		海鱼	100	[96]

类摄入量参考《中国居民膳食指南》[113]建议值，按 75 g · d^{-1} 计，即年摄入量为 27.38 kg · a^{-1}。根据中国海域鱼类体内 ^{137}Cs 比活度计算可得，食用中国海域鱼类所致 ^{137}Cs 年待积有效剂量为（31.0 ± 24.9）nSv · a^{-1}。其中，渤海为（66.6 ± 38.5）nSv · a^{-1}，黄海为（56.3 ± 50.2）nSv · a^{-1}，东海为（26.7 ± 13.5）nSv · a^{-1}，南海为（47.7 ± 60.2）nSv · a^{-1}。总体来看，各海域鱼类摄入所致 ^{137}Cs 年待积有效剂量远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871—2002）规定的公众年有效剂量限值 1 mSv · a^{-1}，表明当前食入中国海域鱼类造成的辐射剂量贡献较低。

4 结论与展望

福岛核事故是近几十年来最严重的海洋放射性污染事件。为明确中国海域 ^{137}Cs 比活度在福岛核事故后的响应特征，本文对中国海域海水、表层沉积物和鱼类体内 ^{137}Cs 比活度数据进行了汇总与分析。结果表明，海水中 ^{137}Cs 比活度自 20 世纪 60—70 年代达到顶值后，整体呈指数型下降趋势。2013 年后中国海域海水 ^{137}Cs 比活度发生了极显著正向偏移，年均附加乘性变化率为 5.8%。渤海、东海和南海均发生显著正向偏移，年均附加乘性变化率分别为 16.9%、7.6%

和 3.2%。在表层沉积物方面，整体海域 ^{137}Cs 比活度在 2013 年后未发生显著变化，仅黄海出现显著正向偏移，年均附加乘性变化率为 13.9%。2013 年后整体海域鱼类体内 ^{137}Cs 比活度相对于原有长期趋势发生显著正向偏移，该现象主要由东海样本贡献。东海和南海 ^{137}Cs 在海水中的平均停留时间与环境半衰期均大于黄海和渤海。渤海 K_d 值最高，其次为黄海、东海和南海。K_{BCF} 结果显示，渤海和黄海鱼类体内富集系数的值高于 IAEA 推荐值（100 L·kg^{-1}），南海与推荐值较为接近，东海则低于推荐值，总体上，中国海域鱼类 ^{137}Cs 生物富集系数与全球其他海域处于同一数量级。剂量评估结果表明，食用中国海域鱼类所致 ^{137}Cs 年待积有效剂量远低于公众年有效剂量限值。

需要指出的是，本文结论基于已公开数据，并在海域尺度上开展统计分析。受历史资料时空覆盖不均、采样深度差异、局地水动力条件及生物种类组成等因素影响，所得结果主要反映中国海域 ^{137}Cs 的区域平均变化特征，不宜直接外推至所有局部海域或具体站位。鉴于日本自 2023 年 8 月 24 日起持续分批排放福岛核污染水入海，未来有必要针对中国近海开展长期、规范化、多介质联合监测，重点关注黑潮及其分支影响显著海域、东海陆架边缘、中国台湾地区周边海域和南海东北部等外海输入关键通道，以定量评估福岛核事故及后续核污染水排放对中国海域的潜在影响。东海和南海是台风等极端天气频发区，亟须深入研究极端天气影响下铯在局部海域多介质间的迁移行为。此外，本文结果显示，2013 年后黄海海水中 ^{137}Cs 比活度未发生显著升高，而表层沉积物 ^{137}Cs 比活度出现显著正向偏移，推测该现象可能与同期黄海大规模藻华事件及颗粒物 / 生物沉降过程有关。因此，后续研究应进一步关注 ^{137}Cs 在黄海水体、悬浮颗粒物、沉积物和生物体之间的迁移转化机制，明确生物吸附、颗粒沉降、再悬浮及沉积物再释放等过程对 ^{137}Cs 归趋的影响。同时，^{137}Cs 易在生物肌肉组织中累积，其富集能力又受物种、体长、年龄、生活习性、营养级及栖息环境等多重因素调控。未来应建立中国海域典型海洋生物对关键人工放射性核素的生物富集系数数据库，尤其加强对鱼、虾、蟹和贝等主要食用海产品的长期监测，以提高海产品摄入剂量评估和潜在生态风险评价的准确性。最后，在核电事业快速发展和极端自然灾害风险并存的背景下，应加强近海核设施事故情景下人工放射性核素输运扩散、生态转移和剂量影响的模拟研究，完善面向周边海域生态环境保护的应急监测和风险防控方案，从而为海洋放射性污染应急处置和公众健康风险管理提供科学依据。

参考文献（References）：

[1] BUESSELER K，DAI Minhan，AOYAMA M，et al. Fukushima Daiichi-derived radionuclides in the ocean：transport，fate，and impacts[J]. Annual Review of Marine Science，2017，9：173-203.

[2] TSUMUNE D，TSUBONO T，AOYAMA M，et al. Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model[J]. Journal of Environmental Radioactivity，2012，111：100-108.

[3] 赵昌，乔方利，王关锁，等. 福岛核事故泄漏进入海洋的 ^{137}Cs 对中国近海影响的模拟与预测[J]. 科学通报，2014，59(34)：3416-3423.
ZHAO Chang，QIAO Fangli，WANG Guansuo，et al. Simulation and prediction of ^{137}Cs from the Fukushima accident in the China Seas (in Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin，2014，59(34)：3416-3423.

[4] 王辉，王兆毅，朱学明，等. 日本福岛放射性污染物在北太平洋海水中的输运模拟与预测[J]. 科学通报，2012，57(22)：2111-2118.
WANG Hui，WANG Zhaoyi，ZHU Xueming，et al. Numerical study and prediction of nuclear contaminant transport from Fukushima Daiichi Nuclear PowerPlant in the North Pacific Ocean[J]. Chinese Science Bulletin，2012，57(22)：2111-2118.

[5] WU Junwen，ZHOU Kuanbo，DAI Minhan. Impacts of the Fukushima nuclear accident on the China Seas：evaluation based on anthropogenic radionuclide ^{137}Cs[J]. Chinese Science Bulletin，2013，58(4)：552-558.

[6] 赵云霞，韩磊，曲大鹏，等. 福岛核事故释放的 ^{137}Cs 在西北太平洋海水中输运的模拟与预测[J]. 海洋科学进展，2017，35(2)：221-233.

ZHAO Yunxia, HAN Lei, QU Dapeng, et al. Numerical Study and Prediction of ^{137}Cs Transport From the Fukushima Nuclear Accident in the Northwest Pacific Ocean[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(2): 221-233.

[7] 吕吉鑫. 中国近海 ^{137}Cs 的时空变化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
LYU Jixin. Temporal and spatial variation of ^{137}Cs in offshore China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2021.

[8] MEN Wu, HE Jianhua, WANG Fenfen, et al. Radioactive status of seawater in the northwest Pacific more than one year after the Fukushima nuclear accident[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7757.

[9] DENG Fangfang, LIN Feng, YU Wen, et al. The distributions of ^{134}Cs, ^{137}Cs and ^{90}Sr in the northwest Pacific seawater in the winter of 2012[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 152: 110900.

[10] ZHANG Fule, WANG Jinlong, LIU Dantong, et al. Distribution of ^{137}Cs in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea: sources, budgets and environmental implications[J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 1004-1016.

[11] 俄罗斯卫星通讯社. 东电启动第十四次福岛核污水排海[EB/OL]. (2025-08-07)[2026-05-13]. https://sputniknews.cn/20250807/1066752611.html.
Sputnik News Agency. TEPCO starts the 14th discharge of Fukushima nuclear-contaminated wastewater into the sea[EB/OL]. (2025-08-07)[2026-05-13]. https://sputniknews.cn/20250807/1066752611.html.

[12] PEARSON A J, GAW S, HERMANSPAHN N, et al. Activity concentrations of ^{137}Caesium and ^{210}Polonium in seafood from fishing regions of New Zealand and the dose assessment for seafood consumers[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 151: 542-550.

[13] HAO Yongpei, XU Yihong, PAN Shaoming, et al. Sources of plutonium isotopes and ^{137}Cs in coastal seawaters of Liaodong Bay and Bohai Strait, China and its environmental implications[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 130: 240-248.

[14] HONG G H, CHUNG C S, LEE S H, et al. Artificial radionuclides in the Yellow Sea: inputs and redistribution[M]//POVINEC P P, SANCHEZ-CABEZA J A, eds. Radionuclides in the Environment. Amsterdam: Elsevier, 2006, 8: 96-133.

[15] LI Peiquan, YU Yinting. Investigations of natural and artificial radioactive isotopes in seawater and sediments in the Yellow Sea and adjacent southeast area[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1992, 10(4): 325-330.

[16] IAEA MARIS, 2025. IAEA Marine Radioactivity Information System. In: Division of IAEA Marine Environment Laboratories [EB/OL]. (2025-12-22)[2026-05-13]. https://maris.iaea.org.

[17] NAGAYA Y, NAKAMURA K. 239, ^{240}Pu and ^{137}Cs in the East China and the Yellow Seas[J]. Journal of Oceanography, 1992, 48(1): 23-35.

[18] WANG Fenfen, MEN Wu, YU Tao, et al. Intrusion of Fukushima-derived radiocesium into the East China Sea and the northeast South China Sea in 2011-2015[J]. Chemosphere, 2022, 294: 133546.

[19] YAMADA M, ZHENG Jian, WANG Zhongliang. ^{137}Cs, $^{239+240}$Pu and ^{240}Pu/^{239}Pu atom ratios in the surface waters of the western North Pacific Ocean, eastern Indian Ocean and their adjacent seas[J]. Science of the Total Environment, 2006, 366(1): 242-252.

[20] ZHANG Fule, HUANG Dekun, LIU Jinwen, et al. Spatiotemporal variation and transport of ^{137}Cs in the Beibu Gulf[J]. Marine Pollution Bulletin, 2025, 212: 117505.

[21] ZHAO Lijun, LIU Dantong, WANG Jinlong, et al. Spatial and vertical distribution of radiocesium in seawater of the East China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 128: 361-368.

[22] ZHOU Peng, LI Dongmei, ZHAO Li, et al. Radioactive status of seawater and its assessment in the northeast South China Sea and the Luzon Strait and its adjacent areas from 2011 to 2014[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 131: 163-173.

[23] ZHU Hanmin, LI Shuqing, WU Fushou, et al. Radioactivity in the coastal waters of the Bohai and Yellow Seas of China[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1991, 14(3): 193-209.

[24] 霍湘娟, 陈英, 姚家奠, 等. 东中国海近岸海域海水中放射性水平研究[J]. 海洋环境科学, 1994(2): 23-27.
HUO Xiangjuan, CHEN Ying, YAO Jiadian, et al. Study on radioactivity levels in seawater of the coastal waters of the East China Sea [J]. Marine Environmental Science, 1994(2): 23-27.

[25] 李恒. 青岛近海放射性核素的调查研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
LI Heng. Investigation on the radionuclide along the coast of Qingdao[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

[26] 李树庆, 祝汉民, 吴复寿, 等. 中国近海放射性水平[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.
LI Shuqing, ZHU Hanmin, WU Fushou, et al. Radioactivity level in the coastal waters of China[M]. Beijing: Ocean Press,

1987.

[27] 秦学祥，王志忠．渤海海域铯 -137 的分布[J]．海洋环境科学，1983，2(2)：33-40.
QIN Xuexiang，WANG Zhizhong．Distribution of cesium-137 in Bohai Sea[J]．Marine Environmental Science，1983，2(2)：33-40.

[28] 任珊，潘少明，郝永佩，等．东中国海表层海水 ^{137}Cs 分布的影响因素[J]．海洋环境科学，2017，36(6)：905-910.
REN Shan，PAN Shaoming，HAO Yongpei，et al．Influence factors of ^{137}Cs distribution in surface seawater of East China Seas[J]．Marine Environmental Science，2017，36(6)：905-910.

[29] 任珊．辽东湾和山东半岛沿岸表层海水 ^{137}Cs 与 $^{239+240}$Pu 的分布特征及示踪研究[D]．南京：南京大学，2017.
REN Shan．Distribution and source identification of theradionuclide ^{137}Cs and $^{239+240}$Pu in the costal surface seawater of Liaodong Bay and Shandong Peninsula[D]．Nanjing：Nanjing University，2017.

[30] 魏计房，王荣元，王伟，等．海水中 ^{137}Cs γ 能谱测量的效率刻度研究[J]．海洋环境科学，2019，38(3)：342-346.
WEI Jifang，WANG Rongyuan，WANG Wei，et al．Study on efficiency calibration of ^{137}Cs γ-spectrum analysis in seawater[J]．Marine Environmental Science，2019，38(3)：342-346.

[31] 吴世炎，施纯坦，陈进兴．广东近岸海域表层水中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的分布[J]．台湾海峡，1992，11(4)：363-367.
WU Shiyan，SHI Chuntan，CHEN Jinxing．Distribution of ^{90}Sr and ^{137}Cs in coastal surface waters of Guangdong[J]．Journal of Oceanography in Taiwan Strait，1992，11(4)：363-367.

[32] 姚海云，朱玲，周滟，等．1995—2009 年我国近岸海域海水中放射性核素水平监测[J]．辐射防护通讯，2010，30(5)：13-17.
YAO Haiyun，ZHU Ling，ZHOU Yan，et al．Monitoring of radioactivity levels of sea water in near coast marine environment in China during 1995–2009[J]．Radiation Protection Bulletin，2010，30(5)：13-17.

[33] 张衍津，邓飞，冯颖思，等．1993—2017 年广东省近岸海域海水 ^{137}Cs 活度浓度水平[J]．辐射防护通讯，2019，39(1)：27-32.
ZHANG Yanjin，DENG Fei，FENG Yingsi，et al．Activity cconcentration of ^{137}Cs in seawater from coastal areas of Guangdong，China，in the year of 1993–2017[J]．Radiation Protection Bulletin，2019，39(1)：27-32.

[34] 中华人民共和国生态环境部 (MEEPRC)．全国辐射环境年度质量报告 (2015—2022)[R/OL]．[2026-05-13]．https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/fshjzlbg/.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (MEEPRC)．Annual report on the quality of the national radiation environment：2015–2022[R/OL]．[2026-05-13]．https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/fshjzlbg/.

[35] YU Yue，ZHOU Peng，MEN Wu．Impact of long-term operation of nuclear power plants on the marine ecosystem of Daya Bay[J]．Marine Pollution Bulletin，2023，193：115146.

[36] DU Jinzhou，WU Yunfeng，HUANG Dekun，et al．Use of 7Be，^{210}Pb and ^{137}Cs tracers to the transport of surface sediments of the Changjiang Estuary，China[J]．Journal of Marine Systems，2010，82(4)：286-294.

[37] LIU Zhiyong，PAN Shaoming，LIU Xuying，et al．Distribution of ^{137}Cs and ^{210}Pb in sediments of tidal flats in north Jiangsu Province[J]．Journal of Geographical Sciences，2010，20(1)：91-108.

[38] NI Jialin，CHEN Dongjun，QIAN Zhen，et al．A study on the transfer of radionuclides and of the resulting radiation dose assessment for marine organisms on the eastern coast of Yantai city[J]．Frontiers in Marine Science，2024，11：1377411.

[39] ZHUANG Qifan，LI Guosheng，WANG Fu，et al．^{137}Cs and $^{239+240}$Pu in the Bohai Sea of China：comparison in distribution and source identification between the inner bay and the tidal flat[J]．Marine Pollution Bulletin，2019，138：604-617.

[40] 陈进兴，吴世炎，施纯坦，等．南海近海放射性背景值的综合研究[J]．同位素，1993，6(1)：41-46.
CHEN Jinxing，WU Shiyan，SHI Chuntan，et al．Comprehensive study of radioactive background in the coastal waters of South China Sea area[J]．Journal of Isotopes，1993，6(1)：41-46.

[41] 陈绍勇，李文权，施文远，等．湄洲湾沉积物的混合速率和沉积速率的研究[J]．海洋学报，1988，10(5)：566-574.
CHEN Shaoyong，LI Wenquan，SHI Wenyuan，et al．Study on mixing rate and deposition rate of sediments in Meizhou Bay[J]．Acta Oceanologica Sinica，1988，10(5)：566-574.

[42] 崔守信，张洪海，门武．厦门邻近海域海洋环境放射性水平及评价[J]．应用海洋学学报，2022，41(3)：443-453.
CUI Shouxin，ZHANG Honghai，MEN Wu．Marine environmental radioactive levels in the waters adjacent to Xiamen and environmental quality assessment[J]．Journal of Applied Oceanography，2022，41(3)：443-453.

[43] 关祖杰，杨健明，余君岳，等．用 γ 谱方法测定大鹏湾的沉积速率[J]．中山大学学报（自然科学版），1995(2)：32-37.

GUAN Zujie，YANG Jianming，YU Junyue，et al．Determination of sedimentation rates in the Mirs Bay sea areas with gamma spectrometry[J]．Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni，1995(2)：32-37.

[44] 国家海洋局第一海洋研究所环保组．渤海放射性调查研究[J]．海洋环境科学，1985(2)：1-10.
Environmental Protection Group of the First Institute of Oceanography，State Oceanic Administration．Investigation and study of radioactivity in the Bohai Sea[J]．Marine Environmental Science，1985(2)：1-10.

[45] 胡金君．广西北部湾土壤中 ^{137}Cs 及重金属的分布特征[D]．南宁：广西大学，2014.
HU Jinjun．Distribution characteristics of ^{137}Cs and heavy metals in the soil of Guangxi Beibu Gulf[D]．Nanning：Guangxi University，2014.

[46] 黄德坤．基于核素示踪的长江口、东海和海南东部近海泥沙的沉降过程[D]．上海：华东师范大学，2012.
HUANG Dekun．Applications of radionuclides to trace the sources，transport pathways and depositions of sediments in the Changjiang Estuary，East China Sea and coastal environment of eastern Hainan Island[D]．Shanghai：East China Normal University，2012.

[47] 可愚，刘湘根，谭赛章，等．核电站周边海域鱼类与表层沉积物中的放射性水平调查[J]．海洋开发与管理，2022，39(8)：91-98.
KE Yu，LIU Xianggen，TAN Saizhang，et al．Radioactive level in fishes and surface sediments from the coastal areas of nuclear power plants[J]．Ocean Development and Management，2022，39(8)：91-98.

[48] 李培泉，刘志和，卢光山，等．渤海近岸区表层沉积物中 U，Ra，Th，^{40}K，^{137}Cs 的 Ge (Li) γ 谱仪测定及地球化学研究[J]．海洋与湖沼，1983，14(4)：333-341.
LI Peiquan，LIU Zhihe，LU Guangshan，et al．Determinations of U，Ra，Th，^{40}K and ^{137}Cs in the surface sediments in the offshore area of western Bohai Sea with Ge (Li) γ spectrometer[J]．Oceanologia et Limnologia Sinica，1983，14(4)：333-341.

[49] 李培泉，苗绿田，刘志和．青岛胶州湾表层沉积物五种重要放射性同位素的测定[J]．海洋科学，1986，10(6)：18-21.
LI Peiquan，MIAO Lyutian，LIU Zhihe．The determinations of five important radioisotopes in surface sediment in Jiaozhou Bay[J]．Marine Sciences，1986，10(6)：18-21.

[50] 林植青，王建林，郑建禄，等．大亚湾海洋沉积物的人工放射性核素[J]．海洋科学，1993，17(4)：61-64.
LIN Zhiqing，WANG Jianlin，ZHENG Jianlu，et al．Activities of artificial radionuclides in sediments of Daya Bay[J]．Marine Sciences，1993，17(4)：61-64.

[51] 刘广山，黄奕普．大亚湾与南海东北部海域沉积物中的 ^{137}Cs[J]．辐射防护通讯，1998，18(5)：40-43.
LIU Guangshan，HUANG Yipu．^{137}Cs in sediments from Daya Bay and the northeastern South China Sea[J]．Radiation Protection Bulletin，1998，18(5)：40-43.

[52] 刘广山，周彩芸．大亚湾海洋生态环境放射性水平研究[M]//侯秉政．中国青年学者论环境．北京：中国环境科学出版社，1996：800-804.
LIU Guangshan，ZHOU Caiyun．Radioactivity levels in the marine ecological environment of Daya Bay[M]//HOU Bingzheng．Chinese young scholars on the environment．Beijing：China Environmental Science Press，1996：800-804.

[53] 刘广山，黄奕普，陈敏，等．南海东北部表层沉积物天然放射性核素与 ^{137}Cs[J]．海洋学报，2001，23(6)：76-84.
LIU Guangshan，HUANG Yipu，CHEN Min，et al．Specific activity and distribution of natural radionuclides and ^{137}Cs in surface sediments of the northeastern South China Sea[J]．Acta Oceanologica Sinica，2001，23(6)：76-84.

[54] 刘广山，李冬梅，易勇，等．胶州湾沉积物的放射性核素含量分布与沉积速率[J]．地球学报，2008，29(6)：769-777.
LIU Guangshan，LI Dongmei，YI Yong，et al．Radionuclide distribution in sediments and sedimentary rates in the Jiaozhou Bay[J]．Acta Geoscientia Sinica，2008，29(6)：769-777.

[55] 刘怀，陈炽，梁谦林．南海珠江口海区人工放射性核素 ^{90}Sr，^{137}Cs 分布特征的研究[J]．海洋科学，1989，13(1)：62-64.
LIU Huai，CHEN Chi，LIANG Qianlin．Study of distribution character of artificial radioactives ^{90}Sr，^{137}Cs in the Zhujiang estuary area in South China Sea[J]．Marine Sciences，1989，13(1)：62-64.

[56] 刘伟容，齐宇虹，林峰，等．海南昌江核电厂两次海域放射性调查结果分析[J]．应用海洋学学报，2020，39(1)：63-70.
LIU Weirong，QI Yuhong，LIN Feng，et al．Result analysis of two marine radioactivity surveys in the adjacent waters of Hainan Changjiang NPP[J]．Journal of Applied Oceanography，2020，39(1)：63-70.

[57] 柳宪民．青岛近海放射性状况[J]．黄渤海海洋，1988，6(2)：30-38.
LIU Xianmin．The status of radioactivity in the offshore of Qingdao[J]．Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas，

1988，6(2)：30-38.

[58] 宋海青，李灵娟，牛广秋，等. 东、南海近岸海域环境综合调查中γ能谱数据浅析[J]. 辐射防护，2002，22(2)：108-112.
SONG Haiqing，LI Lingjuan，NIU Guangqiu，et al. Elementary analysis of gamma spectrometry data of the environmental survey on offshore waters of the East and the South China Sea[J]. Radiation Protection，2002，22(2)：108-112.

[59] 王锦龙. 基于多参数示踪的东海泥沙输运研究[D]. 上海：华东师范大学，2016.
WANG Jinlong. Study on sediment transport in the East China Sea based on multi-parameter tracing[D]. Shanghai：East China Normal University，2016.

[60] 吴梅桂，周鹏，赵峰，等. 阳江核电站附近海域表层沉积物中γ放射性核素含量水平[J]. 海洋环境科学，2018，37(1)：43-47.
WU Meigui，ZHOU Peng，ZHAO Feng，et al. The concentration of γ radionuclides in surface marine sediments from Yangjiang nuclear power plant and its adjacent sea area，South China Sea[J]. Marine Environmental Science，2018，37(1)：43-47.

[61] 夏小明，谢钦春，李炎，等. 东海沿岸海底沉积物中的 ^{137}Cs、^{210}Pb 分布及其沉积环境解释[J]. 东海海洋，1999(1)：20-27.
XIA Xiaoming，XIE Qinchun，LI Yan，et al. ^{137}Cs and ^{210}Pb profiles of the seabed cores along the East China Sea coast and their implications to sedimentary environment[J]. Donghai Marine Science，1999(1)：20-27.

[62] 易勇. 胶州湾沉积物放射性核素和矿物地球化学[D]. 厦门：厦门大学，2006.
YI Yong. The geochemistry of radionuclides and minerals for sediments in Jiaozhou Bay[D]. Xiamen：Xiamen University，2006.

[63] 郁滨赫，刘红磊，卢学强，等. 天津近岸表层沉积物重金属和放射性核素分布特征[J]. 中国环境科学，2013，33(6)：1053-1059.
YU Binhe，LIU Honglei，LU Xueqiang，et al. Characteristics of heavy metals and radionuclides in surface sediments from the inner Bohai Bay (Tianjin coastal sea)[J]. China Environmental Science，2013，33(6)：1053-1059.

[64] 赵峰，吴梅桂，周鹏，等. 黄茅海 - 广海湾及其邻近海域表层沉积物中γ放射性核素含量水平[J]. 热带海洋学报，2015，34(4)：77-82.
ZHAO Feng，WU Meigui，ZHOU Peng，et al. Radionuclides in surface sediments from the Huangmaohai Estuary-Guanghai Bay and its adjacent sea area of the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography，2015，34(4)：77-82.

[65] 郑远来，郎印海，周鹏，等. 大亚湾海域沉积物中放射性γ谱分析测定[J]. 中国新技术新产品，2009(10)：11.
ZHENG Yuanlai，LANG Yinhai，ZHOU Peng，et al. Determination of radioactivity in sediments from Daya Bay by γ-ray spectrometry[J]. China New Technologies and Products，2009(10)：11.

[66] LI Dongmei，JIANG Zhongchen，ZHAO Li，et al. Assessment of radioactivity level in the terrestrial and marine organisms in Yangjiang and its adjacent areas (China)[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2021，18(16)：8767.

[67] SUN Jiang，MEN Wu，WANG Fenfen，et al. Activity levels of ^{210}Po，^{210}Pb and other radionuclides (^{134}Cs，^{137}Cs，^{90}Sr，^{110m}Ag，^{238}U，^{226}Ra and ^{40}K) in marine organisms from coastal waters adjacent to Fuqing and Ningde nuclear power plants (China) and radiation dose assessment[J]. Frontiers in Marine Science，2021，8：702124.

[68] 冯兰英，卢秀芳，赵新春，等. 2012—2015 年广西核电站区域海产品放射性本底调查[J]. 应用预防医学，2017，23(4)：315-317.
FENG Lanying，LU Xiufang，ZHAO Xinchun，et al. Baseline survey of radioactivity in seafood from the area surrounding the Guangxi Nuclear Power Plant from 2012 to 2015[J]. Journal of Applied Preventive Medicine，2017，23(4)：315-317.

[69] 付斌，吴春勇，余雯，等. 霞浦核电基地海洋生物放射性本底水平及辐射剂量评价[J]. 应用海洋学学报，2022，41(3)：454-461.
FU Bin，WU Chunyong，YU Wen，et al. Marine organism radioactivity baseline and radiological dose assessment near Xiapu nuclear power plant，China[J]. Journal of Applied Oceanography，2022，41(3)：454-461.

[70] 黄丽华，郑琪珊，赵时敏，等. 2013 年宁德核电站周围食品中放射性物质水平监测[J]. 职业与健康，2018，34(11)：1475-1479.
HUANG Lihua，ZHENG Qishan，ZHAO Shimin，et al. Monitoring of radiation level in food from surrounding areas of Ningde Nuclear Power Station in 2013[J]. Occupation and Health，2018，34(11)：1475-1479.

[71] 李树庆，焦淑芬，陈虹，等. 辽宁渤黄海海域海生物中放射性水平及其所致居民的内照射剂量[J]. 海洋环境科学，1989，8(2)：14-18.
LI Shuqing，JIAO Shufen，CHEN Hong，et al. Radioactivity levels in marine organisms from the Liaoning waters of the Bohai and Yellow Seas and the resulting internal radiation doses to residents[J]. Marine Environmental Science，1989，8(2)：14-18.

[72] 刘广山，周彩芸. 核电站运行前后大亚湾海洋生物、海水和沉积物 ^{137}Cs 含量[J]. 海洋环境科学，1998，17(4)：7-10.
LIU Guangshan，ZHOU Caiyun. ^{137}Cs contents in the marine organisms，seawater and sediment in Dayawan before and after the

nuclear power plant operation[J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(4): 7-10.

[73] 刘广山, 周彩芸. 大亚湾不同介质中 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 的含量及行为特征[J]. 台湾海峡, 2000, 19(3): 261-268.
LIU Guangshan, ZHOU Caiyun. Contents and behavior characteristics of ^{137}Cs and ^{90}Sr in various mediums of Daya Bay[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2000, 19(3): 261-268.

[74] 唐森铭, 商照荣. 中国近海海域环境放射性水平调查[J]. 核安全, 2005(2): 21-30.
TANG Senming, SHANG Zhaorong. Radiation investigation in near coast marine environment in China[J]. Nuclear Safety, 2005(2): 21-30.

[75] 肖云鹏, 李逢伟, 钱震. 2013—2023 年宁德核电厂周边海洋生物中 ^{137}Cs 放射性水平分析与评价[J]. 海峡科学, 2024(2): 63-66.
XIAO Yunpeng, LI Fengwei, QIAN Zhen. Analysis and evaluation of ^{137}Cs radioactivity levels in marine organisms around Ningde Nuclear Power Plant from 2013 to 2023[J]. Straits Science, 2024(2): 63-66.

[76] 许家昂, 闵楠, 王垒, 等. 福岛核事故对山东海域海产品 ^{134}Cs、^{137}Cs 放射性活度浓度的影响[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(1): 1-3.
XU Jia'ang, MIN Nan, WANG Lei, et al. Effects of Fukushima nuclear accident on activity concentration of cesium-134 and cesium-137 of marine products in Shandong[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2017, 26(1): 1-3.

[77] INOUE M, SHIROTANI Y, YAMASHITA S, et al. Temporal and spatial variations of ^{134}Cs and ^{137}Cs levels in the Sea of Japan and Pacific coastal region: implications for dispersion of FDNPP-derived radiocesium[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 182: 142-150.

[78] ABBASI A, ALMOUSA N, ZAKALY H M H. The distribution of radiotoxic ^{137}Cs concentrations in seaweed and mussel species in the Mediterranean Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 197: 115737.

[79] 林武辉, 陈立奇, 何建华, 等. 日本福岛核事故后的海洋放射性监测进展[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 269-276.
LIN Wuhui, CHEN Liqi, HE Jianhua, et al. Review on monitoring marine radioactivity since the Fukushima nuclear accident[J]. China Environmental Science, 2015, 35(1): 269-276.

[80] WANG Jinlong, BASKARAN M, CUKROV N, et al. Geochemical mobility of ^{137}Cs in marine environments based on laboratory and field studies[J]. Chemical Geology, 2022, 614: 121179.

[81] VOLPE A M, BANDONG B B, ESSER B K, et al. Radiocesium in North San Francisco Bay and Baja California coastal surface waters[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 60(3): 365-380.

[82] KUSAKABE M, OIKAWA S, TAKATA H, et al. Spatiotemporal distributions of Fukushima-derived radionuclides in surface sediments in the waters off Miyagi, Fukushima, and Ibaraki Prefectures, Japan[J]. Biogeosciences Discussions, 2013, 10: 5019-5030.

[83] OGURI K, KAWAMURA K, SAKAGUCHI A, et al. Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1915.

[84] BUESSELER K. Fukushima and ocean radioactivity[J]. Oceanography, 2014, 27(1): 92-105.

[85] 唐峰华, 张胜茂, 吴祖立, 等. 核素 ^{137}Cs 在北太平洋典型生物体内的分布与富集[J]. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1684-1692.
TANG Fenghua, ZHANG Shengmao, WU Zuli, et al. Enrichment and distribution of nuclide ^{137}Cs in typical organisms of North Pacific[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(10): 1684-1692.

[86] 唐峰华, 王锦龙, 刘丹彤, 等. 日本福岛核泄漏典型人工放射性核素在北太平洋柔鱼渔场的分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 2066-2071.
TANG Fenghua, WANG Jinlong, LIU Dantong, et al. Distribution of Fukushima accident-derived radionuclides in neon flying squid in the North Pacific Ocean[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(10): 2066-2071.

[87] MADIGAN D J, BAUMANN Z, FISHER N S. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(24): 9483-9486.

[88] KASAMATSU F, INATOMI N. Effective environmental half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the coastal seawater of Japan[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C1): 1209-1217.

[89] 林武辉, 余克服, 杜金秋, 等. 日本福岛核废水排海情景下海洋生态环境影响与应对[J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4500-4509.
LIN Wuhui, YU Kefu, DU Jinqiu, et al. Consequences of marine ecological environment and our preparedness for Fukushima radioactive wastewater discharge into the ocean[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(35): 4500-4509.

[90] 张福乐. 中国近海环境中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的源汇过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.

ZHANG Fule. Source-sink processes of ^{90}Sr and ^{137}Cs in China's coastal environment[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.

[91] POVINEC P P, AARKROG A, BUESSELER K O, et al. ^{90}Sr, ^{137}Cs and $^{239, 240}$Pu concentration surface water time series in the Pacific and Indian Oceans-WOMARS results[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, 81(1): 63-87.

[92] IKÄHEIMONEN T K, OUTOLA I, VARTTI V P, et al. Radioactivity in the Baltic Sea: inventories and temporal trends of ^{137}Cs and ^{90}Sr in water and sediments[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, 282(2): 419-425.

[93] HIROSE K, POVINEC P P. ^{137}Cs and ^{90}Sr in surface waters of the Sea of Japan: variations and the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident impact[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 645-652.

[94] LIN Wuhui, MO Minting, YU Kefu, et al. Establishing historical ^{90}Sr activity in seawater of the China seas from 1963 to 2018[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 176: 113476.

[95] WU Junwen. Impacts of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident on the Western North Pacific and the China Seas: evaluation based on field observation of ^{137}Cs[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 127: 45-53.

[96] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment: technical reports series no. 422[R]. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2004.

[97] ZHU Jia, HU Jianyu, ZHENG Quanan. An overview on water masses in the China seas[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 972921.

[98] LIE H J, CHO C H. Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations[J]. Progress in Oceanography, 2016, 146: 121-141.

[99] NAN Feng, XUE Huijie, YU Fei. Kuroshio intrusion into the South China Sea: a review[J]. Progress in Oceanography, 2015, 137: 314-333.

[100] SANTSCHI P H, AMDURER M, ADLER D, et al. Relative mobility of radioactive trace elements across the sediment-water interface in the MERL model ecosystems of Narragansett Bay[J]. Journal of Marine Research, 1987, 45(4): 1007-1048.

[101] WANG Jinlong, BASKARAN M, NIEDERMILLER J. Mobility of ^{137}Cs in freshwater lakes: a mass balance and diffusion study of Lake st. clair, Southeast Michigan, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 218: 323-342.

[102] 张翊邦，杜金秋，林武辉，等. 近海主要天然与人工放射性核素的吸附与迁移研究[J]. 原子能科学技术，2024，58(10)：2045-2057.
ZHANG Yibang, DU Jinqiu, LIN Wuhui, et al. Adsorption and migration studies of major natural and artificial radionuclides in offshore[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(10): 2045-2057.

[103] 唐峰华，张胜茂，吴祖立，等. 北太平洋公海中心渔场海域放射性核素 ^{137}Cs 的生态环境监测与风险评估[J]. 农业环境科学学报，2018，37(4)：680-687.
TANG Fenghua, ZHANG Shengmao, WU Zuli, et al. Ecological environment monitoring and risk assessment of radioactive element ^{137}Cs in central fishing grounds of the North Pacific Ocean[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(4): 680-687.

[104] BUESSELER K O. Opening the floodgates at Fukushima[J]. Science, 2020, 369 (6504): 621-622.

[105] SUZUKI Y, NAKAMURA R, UEDA T. Cesium-137 contamination of marine fishes from the coasts of Japan[J]. Journal of Radiation Research, 1973, 14(4): 382-391.

[106] TATEDA Y, KOYANAGI T. Concentration factors for ^{137}Cs in Japanese coastal fish (1984–1990)[J]. Journal of Radiation Research, 1996, 37(2): 71-79.

[107] STEELE A K. Derived concentration factors for caesium-137 in edible species of North Sea fish[J]. Marine Pollution Bulletin, 1990, 21(12): 591-594.

[108] AOYAMA M, TSUMUNE D, HAMAJIMA Y. Distribution of ^{137}Cs and ^{134}Cs in the North Pacific ocean: impacts of the TEPCO Fukushima-Daiichi NPP accident[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2013, 296(1): 535-539.

[109] SMITH J N, BROWN R M, WILLIAMS W J, et al. Arrival of the Fukushima radioactivity plume in North American continental waters[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(5): 1310-1315.

[110] WANG Cuiyu, CERRATO R M, FISHER N S. Temporal changes in ^{137}Cs concentrations in fish, sediments, and seawater off Fukushima Japan[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(22): 13119-13126.

[111] NOGUEIRA P，KAMMANN U，SCHMIED S A K，et al. Comparison between the Baltic Sea and Irish Sea level of Cs-137 contamination on benthic，demersal and pelagic fish species[J]. Journal of Environmental Radioactivity，2024，278：107510.

[112] 核工业标准化研究所. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准：GB 18871—2002[S]. 北京：中国标准出版社，2002.
Institute for Standardization of Nuclear Industry. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources：GB 18871—2002[S]. Beijing：China Standards Press，2002.

[113] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 拉萨：西藏人民出版社，2008.
Chinese Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents[M]. Lhasa：Xizang People's Publishing House，2008.