

楚科奇海-白令海-北太平洋表层海水中放射性铯分布特征及关联

石红旗^{1,2}, 陈发荣¹

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部 海洋生态环境科学与技术重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 通过分析中国第十次北极科学考察走航获得的表层海水中放射性核素 ^{137}Cs 活度浓度数据, 结合区域水文特征, 解析了楚科奇海、白令海和北太平洋的 ^{137}Cs 的分布特征及迁移机制。楚科奇海海水中 ^{137}Cs 活度浓度低(0.20~0.49 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), 体现为北冰洋融冰水特征, 受白令海水输入影响较小。白令海海水中 ^{137}Cs 活度浓度分布不均匀(0.41~1.08 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), 西侧断面海盆南侧表层出现高值区, 源自低温高盐次表层水上涌迁移, 海盆中的次表层水来自阿留申北坡流的冬季下沉; 东侧断面高值区出现在陆架区, 受白令海陆架流输入的影响; 北太平洋海水中 ^{137}Cs 活度浓度呈现斑块状分布(0.27~1.21 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), 出现了明显的低值带, 证实亚北极环流对污染物的阻隔作用。白令海、北太平洋洋流区 ^{137}Cs 活度浓度分布差异不显著, 表明放射性核素 ^{137}Cs 示踪的放射性物质经洋流输运扩散, 在大洋及边缘海广阔范围内具有均化趋势。该研究为评估核污染物北极迁移提供科学依据。

关键词: ^{137}Cs ; 北太平洋; 白令海; 楚科奇海; 分布

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2025)9-0000-00

DOI: 10.11759/hyxx20250320001

^{137}Cs 作为核电站事故排放的放射性污染物标志性核素, 因其稳定的化学性质和保守迁移特性, 在示踪复杂海洋动力过程方面展现出独特优势^[1]。2011年日本福岛核事故以来, 以 ^{137}Cs 为标志的放射性污染物在海洋环境中的迁移过程及其生态影响受到广泛关注^[2-6]。核事故释放的铯同位素(^{137}Cs 和 ^{134}Cs)通过多种途径进入北太平洋及白令海, 其时空分布特征为研究海洋水团运动和污染物扩散提供了重要示踪依据^[7]。北太平洋亚极地环流系统对放射性铯向白令海的迁移具有主导作用, Huang 等^[8]在白令海、楚科奇海监测到 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs , 证实福岛源区的放射性铯通过阿拉斯加流和阿留申海峡进入白令海, 随后扩散至楚科奇海, 其 ^{137}Cs 活度浓度高值区主要出现在陆架区深层。这一过程与 Buesseler 等^[6]提出的北太平洋洋流输运模型相吻合。值得注意的是, 次表层和上层水的扩散机制同样值得关注, Lee 等^[9]发现鄂霍次克海冬季表层冷却引发的俯冲作用可使 ^{134}Cs 峰值出现在 50~100 m 水层, 该过程对北太平洋中间水层的形成具有重要贡献, 周期性结冰的海域会有类似的物理过程。不同海域的放射性铯活度浓度分布呈现显著的空间差异, 并且影响到表层沉积物。白

令海监测数据显示, 陆架区表层沉积物中 ^{137}Cs 的垂直分布具有明显非均匀性^[10], 而楚科奇海 2 cm 沉积层中的 ^{137}Cs 峰值则被证实来源于福岛事故的大气沉降与生物输送双重机制^[11]。Sanial 等^[12]的研究指出, 2016年后福岛核电站近岸海底地下水排放成为放射性铯的持续性次生污染源, 这改变了初期以表层扩散为主的迁移模式。现有研究表明, 亲潮寒流的分支运动对北太平洋环流结构具有重要调节作用: 其西向分支进入鄂霍次克海, 而东向分支则参与亚北极环流系统, 这种双向输送可能影响放射性污染物的区域分布格局^[7]。北极及邻近区域的放射性调查存在时间和空间范围局限, 使得北太平洋-北极放射性污染物扩散机理与预测研究缺少调查数据的支持。本研究基于第十次北极科学考察的走航连续监测数据, 系统分析了楚科奇海、白令海、北太平洋航段的 ^{137}Cs 分布特征。通过对比不同海域的水团示踪结果, 探讨

收稿日期: 2025-03-20; 修回日期: 2025-04-21

基金项目: 山东省重大科技创新工程(2021CXGC010705)

[Foundation: Major Science and Technology Innovation Project of Shandong Province, No. 2021CXGC010705]

作者简介: 石红旗(1970—), 男, 山东济南人, 高级工程师, 主要从事海洋放射性环境监测技术与资源研究, E-mail: shihongqi@fio.org.cn

阿拉斯加流-阿留申北坡流次表层水对白令海盆南部的影响途径, 以及白令海对楚科奇海的影响, 为完善北极-太平洋物质交换模型提供新的观测依据。

1 取样与分析方法

1.1 研究航次及主要海域

在中国第十次北极科学考察航次(2019年8月10日—9月27日)期间, 对楚科奇海、白令海、及北太平洋等海域开展了系统的海水取样(图1)。研究区域中, 楚科奇海作为北极边缘海的重要组成部分, 其水团结构主要由源自白令海并发生显著变性作用的上层水体(分布于南部白令海峡延伸区)和极地水团构成。毗邻的白令海通过白令海峡与楚科奇海相连, 依据水团垂向分布特征可划分为上层水、中层水和深层水三个主要层次^[13], 其海域北侧存在白令陆坡流, 南侧具有阿留申北坡流等特征性环流系统。在北太平洋区域, 表层环流系统以亚极地环流和亚热带环流两大系统为主导^[7], 构成复杂的海洋动力环境。

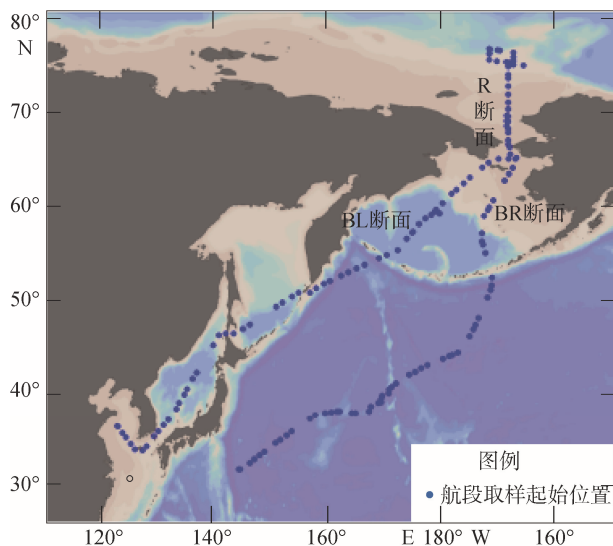


图1 中国第十次北极考察航次海水取样航段位置图
Fig. 1 Map of seawater-sampling locations during China's 10th Arctic Expedition

1.2 仪器、设备与试剂

水体放射性快速监测仪(FCS - 1型): 由自然资源部第一海洋研究所研制^[14]。

高效富集铯滤芯: 由自然资源部第一海洋研究所研制。

船载蠕动泵(型号: SEW-USOCOME RE77AM100): 产地为 Haguenau/France。

高纯锆 γ 谱仪(GCW6023、GC11021): 由 Canberra 有限公司生产。

温盐观测设备: 站位温盐观测采用“向阳红 01”船载 SBE911Plus; 走航表层温盐观测设备由“向阳红 01”号实验室提供, 为美国海鸟电子公司的 SBE45 SEACAT 温盐计。

标准溶液: ^{137}Cs 标准溶液($47.01 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$)和 ^{152}Eu 标准溶液($191.17 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$), 均由中国原子能科学研究院生产。

其他试剂: 盐酸, 分析纯。

1.3 水样采集方法与样品 ^{137}Cs 活度测定

水样采集: 沿科考船航行路线进行连续航段取样。利用科考船船载水泵, 持续抽取水面下 4 m 海水, 航段海水取样量为 0.800 m^3 (少数样品少于此数值), 同时借助水体放射性快速监测仪获取载铯样芯。

样芯测量: 将载铯样芯带回陆上实验室, 使用高纯锆 γ 谱仪检测样芯中 ^{137}Cs 的活度。对于 ^{137}Cs , 通过测定其子体 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 的单一全能峰 0.6617 MeV (分支比 0.900)进行定量。采用 ^{137}Cs 标准滤芯测定高纯锆 γ 谱仪的 ^{137}Cs 探测效率, 并将 ^{137}Cs 活度浓度结果校正到取样时刻。

数据处理: Origin Pro 8.1 软件处理数据, 绘图软件选用 ODV(版本 5.4.0, Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, odv.awi.de, 2023)。

1.4 质量保证

航次出发前, 采用称量法对监测仪进行体积校准; 用 pH 计对监测仪的酸度传感器进行校准。走航取样过程中, 用 pH 计对酸度传感器进行校对。滤芯吸附效率检测, 检测报告编号: JC-A03-130731A101(国防科技工业电离辐射一级计量站)。

标准滤芯校准: ^{137}Cs 标准滤芯(编号 S1401), 活度 123.3 Bq , 扩展不确定度($k=2$) 4.9% , 使用反康普顿低本底 γ 谱仪标准装置校准, 校准证书编号为 JZ-A21-140709A201, 由国防科技工业电离辐射一级计量站提供。

2 结果与讨论

2.1 楚科奇海表层海水中 ^{137}Cs 分布

本航次对北冰洋楚科奇海陆架区至楚科奇海台的 R 断面开展了走航监测。表层海水中 ^{137}Cs 的活度浓度范围为 $0.20\sim 0.49 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 2a), 均值 $0.32\pm 0.08 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=16$)。海水温度($2.1\sim 11.0 \text{ }^\circ\text{C}$)、盐度($27.6\sim$

32.3)反映了海冰融水的混合情况,低温低盐出现在高纬度的楚科奇海台区域。楚科奇海及毗邻北冰洋的表层海水中 ^{137}Cs 活度浓度处于较低水平,主要归因于该区域以低温、低盐度的冰川融水为主,受太平洋水体输入影响较小。Huang 等^[8]观测到楚科奇海(74.5 °N)底层水体中 ^{137}Cs 活度浓度显著高值,可能

与沉积物-水界面交换过程或楚科奇海盆与加拿大海盆中层水的侧向输运有关。任旭等^[11]认为楚科奇海底质沉积层受生物扰动及加拿大海盆中层水的混合作用显著。历史上核素示踪研究表明,北冰洋放射性背景受前苏联核设施排放及英国塞拉菲尔德核处理厂长期排放的叠加影响^[15]。

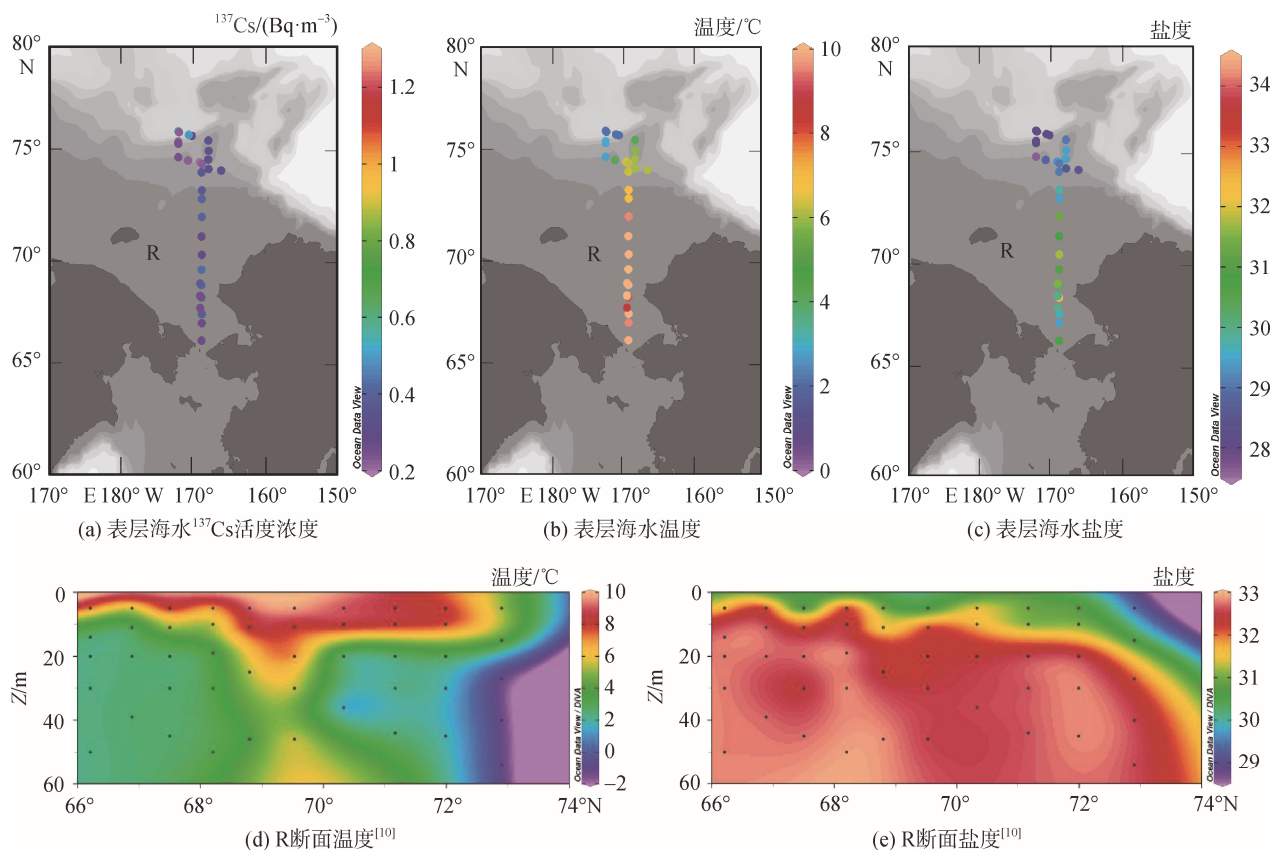


图2 楚科奇海表层海水中 ^{137}Cs 、温度、盐度,以及 R 断面的温度、盐度剖面

Fig. 2 Distributions of ^{137}Cs concentration, temperature, and salinity in surface seawater of the Chukchi Sea, as well as the temperature and salinity profiles for section R

楚科奇海及邻近海域(76 °N 以北)表层水为典型北极表层水,其完全消融期表层温度稳定于 2.1 °C。R 断面陆架区温盐剖面(图 2d, 2e)北端(73 °N 以北)表层海水呈现低温低盐海冰融水性质,20 m 以浅的暖淡水团为海冰融水与河流冲淡水混合产物,受到白令海峡水流影响。在 69.5 °N 附近存在一个涡旋(温盐异常),20 m 以深水体中温度场呈现明显的分界,在 72.9 °N 存在的低温峰面对来自白令海的水流有一定的阻隔作用。

2.2 白令海表层海水中 ^{137}Cs 分布

白令海 ^{137}Cs 活度浓度范围为 0.41~1.08 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$,均值 $0.70 \pm 0.21 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=21$)。BL 断面高值区(图 3a),

对应位置(171.87°E~174.57 °E, 54.5°N~56.57 °N)位于白令海盆西南部(水深 2 000 m),处于奥柳托尔斯基海岭与巴韦尔斯海岭的北侧。Huang 等^[8]在 2017 年北极航次的白令海盆区邻近位置同样观测到 ^{137}Cs 活度浓度有明显的高值,说明 BL 断面海盆区 ^{137}Cs 活度浓度高值不是偶然现象。对比图 3b, 3c, 该区域的表层温度、盐度没有明显差异。但是, BL 温盐剖面(图 3d, 3e)显示出,在 57 °N 附近存在明显上升流,南侧的上涌水与 ^{137}Cs 活度浓度高值段对应,受到低温高盐次表层水上涌影响,其来源是冬季沉降水,最可能受到阿留申北坡流影响,北侧受到低温低盐水影响,出现低值区,低温低盐水源自北冰洋冷水。

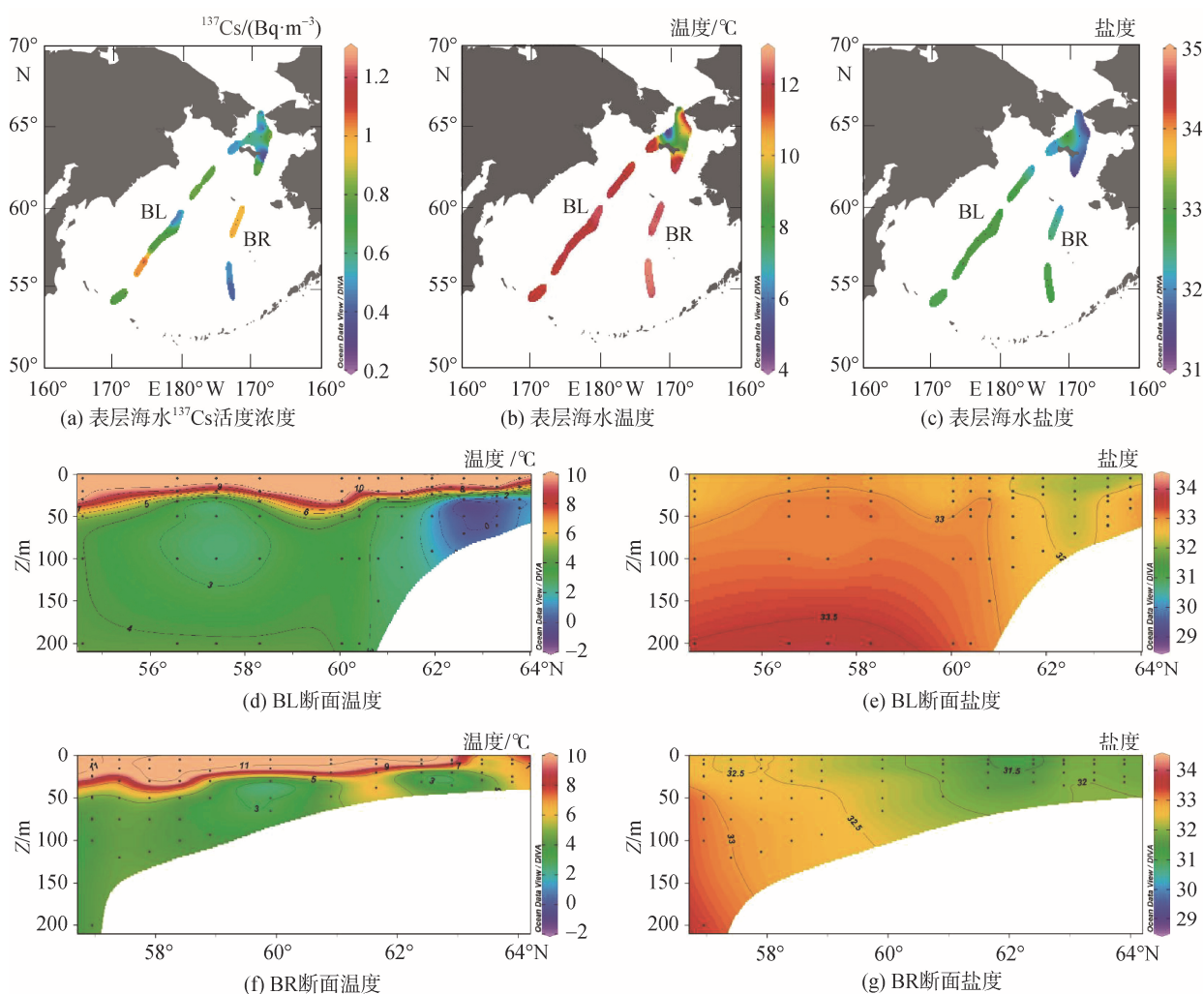


图 3 白令海 BL、BR 断面海水 ^{137}Cs 、温度、盐度，以及 BL、BR 断面温度、盐度剖面

Fig. 3 Distributions of ^{137}Cs concentration, temperature, and salinity in surface seawater of the Bering Sea, along with the temperature and salinity profiles for sections BL and BR

BL 断面垂向温盐结构表现为多层: 20 m 层以上为暖水, 温度约为 10~12 $^{\circ}\text{C}$, 20~50 m 之间, 受涡流影响, 暖水有所下探。暖水与冷水之间, 形成明显的季节性温跃层。在 50~150 m 之间, 存在沿断面自西南向东北冷水团(冬季水), 其核心温度约为 2.5~2.9 $^{\circ}\text{C}$ 。断面表层盐度较低, 在 31.4~33.0 之间, 海水盐度随深度增加而增大。表层海水受太阳辐射影响, 温度较均匀, 而盐度差别能反映海水混合程度。

BR 断面 ^{137}Cs 活度浓度高值区分布于中北部陆坡区, 受到白令海陆架流的影响^[8, 16]。BR 水体断面温盐剖面(图 3f、3g)可以看出, ^{137}Cs 高值区(59 $^{\circ}\text{N}$)与陆架水上涌相关。从图 3f、3g 识别出了来自阿拉斯加河的入流水(61.6 $^{\circ}\text{N}$, 高温低盐), ^{137}Cs 活度浓度低值区则对应低盐融冰水输入。

位于白令海盆东南侧的两个航段(图 3a, 54.2 $^{\circ}\text{N}$ ~56.4 $^{\circ}\text{N}$), 表层海水 ^{137}Cs 活度浓度较低(0.51~0.58 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), 与海盆西侧的结果相比差异明显。说明白令海盆表层水中 ^{137}Cs 活度浓度分布的差异性是由不同的海流动力机制主导。

2.3 北太平洋水体中 ^{137}Cs 分布

北太平洋监测区 ^{137}Cs 活度浓度范围为 0.27~1.21 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 均值 $0.68\pm 0.22 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=29$), ^{137}Cs 处于本底水平。45.5 $^{\circ}\text{N}$ ~50.0 $^{\circ}\text{N}$ (图 4a)区域, 鄂霍次克海(^{137}Cs , 0.35~0.44 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)与北太平洋(^{137}Cs , 0.27~0.47 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)存在明显的 ^{137}Cs 活度浓度低值区。这一低值区处于亚北极环流中间, 明显低于阿拉斯加流(^{137}Cs , 0.67~0.76 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)与黑潮延伸体区域(^{137}Cs , 0.53~1.21 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)。鄂霍次克海-北太平洋低值区受

亲潮(Oyashio current)东西分支低温低盐混合水影响,与阿拉斯加流形成明显梯度。对比温度、盐度分布(图 4b、4c),在 45.4 °N~50.0 °N 的 ^{137}Cs 低值区域,属于低盐、低温的亚北极环流中心区,对污染物扩散具有阻隔作用。

北太平洋海域的南侧部分航段(166.8 °E~167.1 °E, 37.3 °N~37.8 °N)表层水 ^{137}Cs 高值,与盐度高值相对应

(图 4a, 4c), 该区域附近分布有海岭, 海底高大的海岭地形影响上层海洋, 多出现中尺度涡旋引起的次表层水上涌。北太平洋次表层(200~400 m) ^{137}Cs 活度浓度高于表层^[17], 鄂霍次克海冬季表层水冷却俯冲形成中层水(300~800 m, $\sigma_\theta=26.6\sim27.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 对核素的垂向封存与再释放具有长期影响^[7]。尽管福岛核事故已逾十年, 次表层输运是污染物跨洋扩散的关键途径^[2, 7-8]。

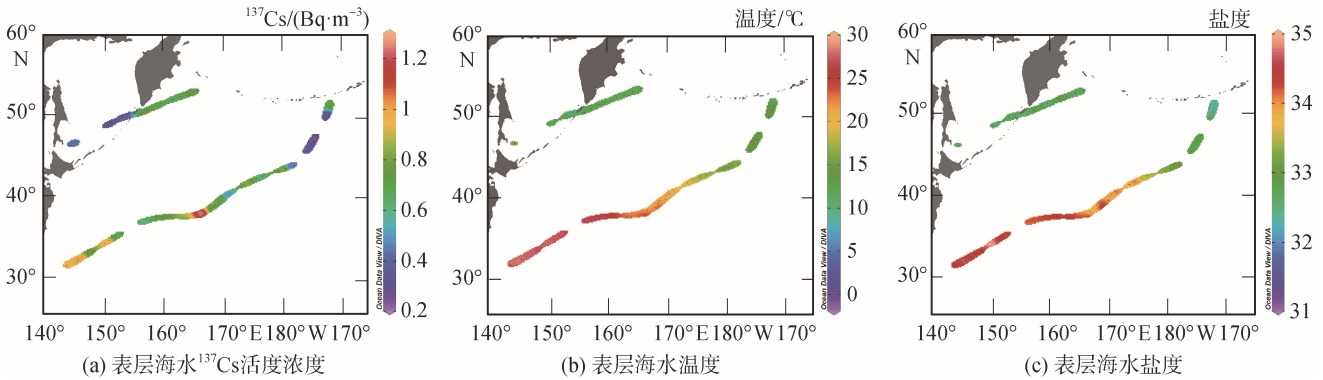


图 4 北太平洋水体中 ^{137}Cs 、温度、盐度

Fig. 4 Distributions of ^{137}Cs concentration, temperature, and salinity in surface seawater of the North Pacific Ocean

2.4 北太平洋-白令海-楚科奇海表层海水中 ^{137}Cs 的关联分析

将 ^{137}Cs 活度浓度数据按照考察海区分组, 并对数据组进行 Mann-Whitney 统计检验, 见表 1、表 2。在 0.05 水平上, 楚科奇海、白令海差异显著, 说明至本考察时, 太平洋海水中的放射性污染物通过白令海输送对北冰洋表层海水的影响很小。鄂霍次克海、亚北极环流中心区与楚科奇海的 ^{137}Cs 活度浓度差异不显著, 表明极地海流经白令海峡、白令海影响到北太平洋。白令海、阿拉斯加海流区、北太平洋亚热带环流区 ^{137}Cs 活度浓度差异不显著, 表明放射性核素 ^{137}Cs 示踪的放射性物质经洋流输运扩散, 在大洋及边缘海广阔范围内具有均化趋势。以 ^{137}Cs 为代表的化学行为保守的放射性核素作为洋流水团的示踪剂, 具有不同于常规海水参数(温度盐度)的优势。

表 1 航段数据组分类

Tab. 1 Summary of data groups

组号	海区	纬度(N)	样本数
1	楚科奇海区	66.3°~76.0°	16
2	白令海区	54.0°~65.5°	20
3	阿拉斯加海流区	50.5°~53.7°	5
4	鄂霍次克海区	46.2°~50.0°	3
5	亚北极环流中心区	43.4°~50.3°	4
6	北太平洋亚热带环流区	31.1°~43.3°	17

表 2 数据组的 Mann-Whitney 检验

Tab. 2 Results of the Mann-Whitney test

对比组	U	Z	Prob > U	差异性
1 vs. 2	6	-4.88	1.01×10^{-6}	显著
1 vs. 5	20.5	-1.04	0.296	不显著
4 vs. 5	6.0	0	1.000	不显著
2 vs. 3	51.5	0.07	0.946	不显著
3 vs. 6	29.5	-0.98	0.327	不显著

楚科奇海-白令海-北太平洋表层海水中 ^{137}Cs 的关联示意图, 见图 5。楚科奇海表层海水 ^{137}Cs 低活度浓度表明通过白令海峡输入的 ^{137}Cs 对北冰洋的贡献较小, 结合低温低盐的海水性质分析, 楚科奇海主要受北冰洋融冰水影响。图 5 中的关注区(A, B, C, D, E), 是指 ^{137}Cs 活度浓度明显区别于周围航段的区域。白令海陆架区高值段(A 区)受白令海陆架海流影响, 海盆区高值段(B 区)则与次表层水上涌相关, 其上涌水的南北差异(57 °N 分界)反映了进入海盆的次表层水的不同性质。推测来自北太平洋的阿拉斯加流进入白令海后, 形成阿留申北坡流自西向东流, 冬季部分海水下沉形成次表层水扩散进入白令海盆, 这是区别于白令海陆坡流和陆架流的另一种扩散途径。白令海的放射性监测需关注经阿留申群岛各水道后进入的太平洋水的次表层潜行输运, 该途径与

陆坡流、陆架流共同构成复杂的污染物迁移网络。北太平洋 D 区(亚北极环流中间)与 C 区(鄂霍次克海)低值区是非常奇特的区域,结合该区域海水稍低于周围区域的温度、盐度特征,推测是受到亲潮东西分支的影响。

北太平洋存在两大环流,亚热带环流和亚北极环流。北太平洋海水中放射性污染物主要随着亚北极环流北侧的阿拉斯加流,通过阿留申群岛的水道进入白令海。本文监测结果显示了亚北极环流中间区域对污染物扩散起到阻碍作用。

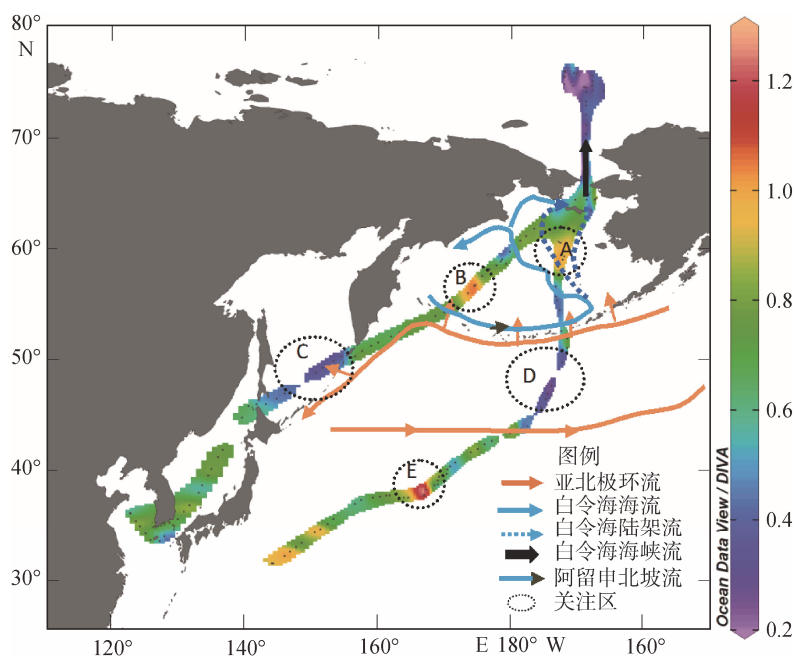


图 5 太平洋-白令海-楚科奇海表层海水中 ^{137}Cs 的关联示意图

Fig. 5 Schematic of the interconnections among the surface-seawater ^{137}Cs in the Pacific Ocean, Bering Sea, and Chukchi Sea

3 结论

本研究基于对楚科奇海、白令海及北太平洋多个海域的考查数据的分析,探讨楚科奇海、白令海及北太平洋海域中 ^{137}Cs 的分布特征与迁移机制。

楚科奇海表层 ^{137}Cs 活度浓度($0.20\sim 0.49 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)极低,主要体现为北冰洋融冰水,白令海海水输入贡献有限。R 断面水团特征表明低温锋面对来自白令海的水流有一定的阻隔作用。

白令海表层 ^{137}Cs 活度浓度($0.41\sim 1.08 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)呈现显著空间差异。BL 断面高值区位于白令海盆中南部,受到高盐低温次表层水上涌影响,其来源于冬季沉降水,可能受到阿留申海北坡流影响;而 BR 断面高值区集中在陆架区,显示白令海陆架流输送作用。受融冰水影响,白令海表层 ^{137}Cs 活度普遍较低,但局部上涌区因次表层水的垂向扩散导致表层异常高值。

北太平洋 ^{137}Cs 活度浓度($0.27\sim 1.21 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)分布差异明显。鄂霍次克海低值区、亚北极环流中心低

值区主要受到亲潮东西分支的影响,亚北极环流中间区域对污染物扩散起到阻碍作用。北太平洋表层海水中的 ^{137}Cs 基本处于本底水平,推测部分航段表层水中 ^{137}Cs 高值源于次表层水,说明北太平洋次表层水对核素的垂向封存与再释放具有长期影响。

本研究为评估北冰洋-太平洋核污染物的迁移行为提供了科学依据。未来需加强次表层水输运的长期监测,区分历史与近期核排放的贡献,关注 ^{137}Cs 在北极食物链中的生态风险。

参考文献:

- [1] WANG H, WANG Z Y, ZHU X M, et al. Numerical study and prediction of nuclear contaminant transport from Fukushima Daiichi nuclear power plant in the North Pacific Ocean[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57: 3518-3524.
- [2] Zhang T, Hou X L, Fan Y K. Marine dispersion of Fukushima-derived radiocesium in the North Pacific and its implications[J]. Science China Earth Sciences, 2025, 68(2): 389-406.

- [3] Kumamoto Y, Aoyama M, Hamajima Y, et al. Fukushima-derived radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific Ocean, Bering Sea, and Arctic Ocean in 2019 and 2020[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, 251/252: 106949.
- [4] KUMAMOTO Y, AOYAMA M, HAMAJIMA Y, et al. Radiocesium in the western subarctic area of the North Pacific ocean, Bering Sea, and Arctic Ocean in 2015 and 2017[J]. *Polar Science*, 2019, 21: 228-232.
- [5] 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: 1310-1315.
- [6] BUESSELER K, DAI M, 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.
- [7] LEE S T, CHO Y K, JUNG J, et al. Surface and subsurface dispersal of radioactive materials from Fukushima by subpolar gyre and intermediate waters in the North Pacific[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 5055.
- [8] Huang D K, Lin J, Du J Z, et al. The detection of Fukushima-derived radiocesium in the Bering Sea and Arctic Ocean six years after the nuclear accident[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113386
- [9] LEE S T, JUNG J, KIM G, et al. Subsurface dispersion path and travel time of radiocesium from Fukushima by Mode Water[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1104786.
- [10] 石红旗, 陈发荣. 楚科奇海、白令海表层沉积物 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 分布[J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(3): 403-414. SHI Hongqi, CHEN Farong. Distribution of ^{210}Pb and ^{137}Cs in surface sediments from the Chukchi Sea and the Bering Sea[J]. *Advance in Marine Science*, 2021, 39(3): 403-414.
- [11] 任旭, 王锦龙, Hong Gi Hoon, 等. 楚科奇海沉积物中铯-137 的福岛核事故信号: 新时标?[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(12): 3878-3887.
- REN Xu, WANG Jinlong, HONG Gi Hoon, et al. Records of Fukushima accident-derived cesium-137 in the Chukchi Sea sediment: Implication for a new time marker?[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(12): 3830-3839.
- [12] SANIAL V, BUESSELER K O, CHARETTE M A, et al. Unexpected source of Fukushima-derived radiocesium to the coastal ocean of Japan[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114 (42): 11092-11096.
- [13] 汤毓祥, 矫玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析[J]. *极地研究*, 2001, 139(1): 57-68. TANG Yuxiang, JIAO Yutian, ZOU Emei. A preliminary analysis of the hydrographic features and water masses in the Bering sea and the Chukchi sea[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2001, 139(1): 57-68.
- [14] 马嫄, 门武, 蔡继杰. 海水中放射性铯快速测量方法研究[J]. *海洋科学前沿*, 2016, 3(3): 65-72. MA Qiang, MEM Wu, CAI Jijie. Study on fast measurement of radioactive cesium in seawater[J]. *Advances in Marine Sciences*, 2016, 3(3): 65-72.
- [15] 郭培, 蒋帅. 俄罗斯核污染对北极生态环境的影响[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2010(3): 12-17. GUO Peiqing, JIANG Shuai. Russian nuclear pollution to the ecological environment of the arctic[J]. *Journal of Ocean University of China(Social Sciences Edition)*, 2010(3): 12-17.
- [16] 李蔷. 白令海峡水交换及其对北极海冰的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017. LI Qiang. The water exchange in Bering Strait and its effects on Arctic Sea ice[D]. Shanghai, Shanghai Ocean University, 2017.
- [17] AOYAMA M, HAMAJIMA Y, HULT M, et al. ^{134}Cs and ^{137}Cs in the North Pacific Ocean derived from the March 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Japan. Part one: surface pathway and vertical distributions[J]. *Journal of Oceanography*, 2016, 72 (1): 53-65.

Radioactive-Cesium Distribution Characteristics and Interconnections in Surface Seawater of the Chukchi Sea, Bering Sea, and North Pacific Ocean

SHI Hongqi^{1, 2}, CHEN Farong¹

(1. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology, MNR, Qingdao 266061, China)

Received: Mar. 20, 2025

Key words: ¹³⁷Cs; North Pacific Ocean; Chukchi Sea; Bering Sea; distribution

Abstract: In this study, the distribution characteristics and transport paths of cesium-137 (¹³⁷Cs) in the Chukchi Sea, Bering Sea, and North Pacific Ocean were analyzed by combining the activity data from surface water collected during China's 10th Arctic scientific expedition with regional hydrological characteristics. Our findings indicate that ¹³⁷Cs exhibited a low activity concentration in the Chukchi Sea (0.20–0.49 Bq·m⁻³), indicating that it was only minimally affected by water inflow from the Bering Sea. In the Bering Sea, the activity concentration of ¹³⁷Cs was unevenly distributed (0.41–1.08 Bq·m⁻³). Additionally, a high-value area was observed in the southern part of the western basin, which was attributed to the migration of low-temperature, high-salinity subsurface water resulting from the winter subsidence of the Aleutian North Slope current. It was also observed that a high-value area in the eastern continental shelf was affected by the inflow of the continental shelf current. In the North Pacific Ocean, the ¹³⁷Cs activity concentration exhibited a patchy distribution (0.27–1.21 Bq·m⁻³), with a distinct low-value area that confirmed the barrier effect of the Subarctic Current on pollutants. The absence of a significant difference in the distribution of ¹³⁷Cs activity concentration in the Bering Sea and North Pacific Ocean indicated that the ¹³⁷Cs-traced radioactive materials were transported and dispersed by ocean currents, leading to a homogenization trend across a wide range of oceans and marginal seas. Overall, this study provides a scientific basis for assessing the migration of nuclear pollutants toward the Arctic.

(本文编辑: 赵卫红)