

台湾以东黑潮及邻近东海水中的放射性核素 及其对黑潮入侵的指示*

王启栋^{1, 2, 3} 宋金明^{1, 2, 3} 袁华茂^{1, 2, 3} 李学刚^{1, 2, 3} 李 宁^{1, 2, 3}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 根据 2014 年 5—6 月对台湾以东黑潮主流以及东海陆架海域的调查, 研究了海水中放射性核素 K-40、Ra-226 和 U-238 的分布特征, 并以放射性核素为指标定量评估了黑潮入侵东海的程度和范围。结果表明, 黑潮主体放射性核素的含量有明显的层次差异, 整体上看从表层至深层逐渐减小, K-40、Ra-226 和 U-238 的含量范围分别为 13.47—26.11、5.08—9.51 和 7.38—14.72mBq/L。在台湾东部河流带来的陆源物质输入影响下, 黑潮主流下游的放射性核素含量略高于上游。从水平分布上看, 近岸海域放射性核素含量明显高于黑潮主流区, 而长江口和杭州湾外也存在 K-40 和 Ra-226 的低值区, 并且底层海水中更明显。海水的物理化学参数对放射性核素分布的影响不大, 不同水团放射性核素的含量差异主要由陆源物质输入的不同引起。以放射性核素 K-40、Ra-226 以及温盐为指标, 根据端元混合模型的计算结果显示, 黑潮在台湾东北部涌升后, 继续沿东北方向流动, 并可入侵至长江口和杭州湾外, 而福建近岸海域基本不受黑潮水的影响。放射性核素指标 K-40 和 Ra-226 可作为温盐参数的补充, 用于指示黑潮入侵东海的程度和范围, 并可结合温盐参数, 用于多水团混合的半定量研究。

关键词 放射性核素; 指示指标; 黑潮入侵; 东海陆架

中图分类号 P731.23 doi: 10.11693/hyhz20170500130

放射性核素广泛存在于土壤、沉积物、空气、河流及海洋等地球环境中, 其不仅具有与稳定同位素一致的化学性质, 还能通过放射性衰变产生不同种元素的子体。由于半衰期和化学性质的巨大差异, 许多放射性核素的母体与子体之间存在着不平衡现象, 这种不平衡现象被广泛应用于许多地球化学过程的研究。例如, 根据矿物碎屑和生源物质中 K-40 含量的差异, 可以评估沉积物中生源组分的沉降速率 (Gulin *et al.*, 2014); 利用 Ra-226 的分布及与其他同位素之间的不平衡现象, 可以计算溶解态物质的运输过程与通量 (Ku *et al.*, 1995; Cai *et al.*, 2002)、地下水输入通量 (Charette *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005)、水团混

合速率和停留时间等 (Feely *et al.*, 1980; Harada *et al.*, 1986; Nozaki *et al.*, 1991); 根据 U-238 与其衰变子体 Th-234 之间颗粒物活性的差异, 可以研究颗粒物的迁移和沉降通量 (Evangelidou *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2014)。天然长半衰期放射性核素, 如 K-40、Ra-226 和 U-238 等的含量在短时间内不受放射性衰变的影响, 并且海水样品的富集和测定不受时间限制。因此, 如能明确影响天然长半衰期放射性核素分布的因素, 并且获取差异明显的端元值, 仅放射性核素自身也可以作为指示水团混合过程的有效指标 (张磊等, 2007)。

黑潮是北赤道流的北向分支, 起源于菲律宾以

* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类), XDA11020102 号; 青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”计划项目, 2015ASTP-OS13 号。王启栋, 助理研究员, E-mail: wangqd@qdio.ac.cn

通讯作者: 宋金明, 博士生导师, 研究员, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-05-15, 收修改稿时间: 2017-09-20

东, 主流越过吕宋海峡北上, 流经台湾以东, 之后沿东海陆架边缘的冲绳海槽流向东北(卢汐等, 2015)。黑潮及其分支(台湾暖流、对马暖流、黄海暖流)构成了东中国海的外海流系(Hsueh, 2000; 马超, 2009)。黑潮的入侵对我国近海的海洋生态环境具有巨大影响(杨德周, 2011; 刘伟等, 2015)。当前对黑潮入侵的研究, 多采用温度、盐度等传统指标(Yang *et al.*, 2011), 但是温盐参数最多只能指示三水团混合, 对于三个以上水团的混合, 则需要引入更多的指示指标。本文将引入放射性核素作为不同水团的特征指标, 在明确放射性核素分布特征和影响因素的基础上, 应用其定量化评估黑潮入侵东海陆架海域的程度和范围, 探讨其在指示多水团混合过程中的应用。

1 材料与方法

1.1 研究区域和站位

2014年5月, 搭载“科学一号”海洋科考船对东海陆架区以及台湾以东黑潮主流径区等海域进行了调查, 共设置 11 条断面、40 个调查站位, 站位分布如图 1 所示。调查项目除了放射性核素以外, 还包括温度、盐度、pH、颗粒有机碳(POC)、溶解有机碳(DOC)、叶绿素 *a*、总悬浮物(TSM)、总碱度(TALK)和溶解无机碳(DIC)等水体物理化学参数。

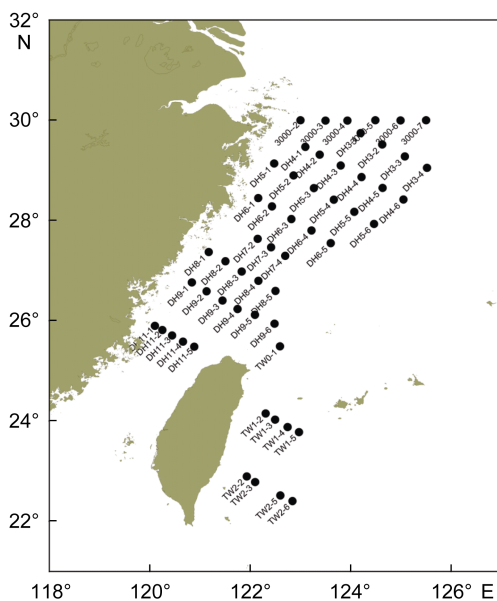


图1 东海陆架区及台湾以东黑潮主流径区调查站位分布图
Fig.1 Map of the stations in the East China Sea and Kuroshio main stream east of Taiwan

1.2 样品的采集与测定

用 CTD 控制的 Niskin 采水器采集东海陆架区的

表层和底层以及 TW1-2 和 TW2-2 两个站位标准层的海水样品各 20L, 置于 25L 塑料桶中, 现场加入足量 FeCl_3 、 MnCl_2 、 NaOH 和四苯基硼酸钠溶液, 充分搅拌后静置, 对 U、Ra 和 K 等元素进行富集。通过静置沉淀, 倒去上层清液, 将海水浓缩至 1L, 然后带回实验室离心分离沉淀物。将沉淀物烘干、磨细, 装入聚乙烯样品管中密封放置 1 个月, 然后用美国 Canberra 公司生产的 HPGe 伽马谱仪测量沉淀物的放射性核素含量。仪器效率刻度用核工业北京地质研究院提供的标准源完成, 测量每种核素所用的伽马射线特征峰分别为: ^{238}U : 63.2 和 92.6keV; ^{226}Ra : 295.2、351.9 和 609.3keV; ^{40}K : 1460.5keV。峰面积采用全能峰面积法计算。测量结果以活度表示, 除以海水体积得到比活度。

温度、盐度和 pH 分别用 SBE 911-Plus CTD 和 Thermo Orion 5-star pH 计(配置雷磁 E-201-D 电极)在现场完成测量, POC、DOC、叶绿素 *a*、TSM、TALK 和 DIC 等参数则按照海洋监测规范(GB17378-2007)的相关规程进行样品的采集, 带回实验室进行测定。

1.3 数据分析

放射性核素的谱图分析和含量计算由 HPGe 伽马谱仪自带的 Genie 2000 分析软件中的 Gamma Acquisition & Analysis 模块完成。放射性核素与其他物理化学参数之间的关系采用 SPSS19.0 进行 Pearson 相关性分析和双侧显著性检验。相关图件采用 Origin9.0 和 Surfer13.0 绘制。

2 结果

2.1 黑潮主流径海水中放射性核素的垂直分布

位于台湾以东、黑潮主流径上的 TW1-2 和 TW2-2 站位, 其放射性核素 K-40、Ra-226 以及 U-238 的垂直分布如图 1 所示。整体看来, TW1-2 站位的放射性核素水平高于 TW2-2, 但分布模式基本类似, 尤其是在次表层及以深。TW1-2 和 TW2-2 站位海水中 K-40、Ra-226 以及 U-238 的平均含量分别为(19.82±1.83)、(8.32±1.00)、(11.52±2.22)和(18.00±1.86)、(5.90±1.26)、(10.29±2.97)mBq/L。相对于南部的 TW2-2, 北部的 TW1-2 站位三种放射性核素的含量分别提高了 10.11%、41.01%和 11.95%。由于天然放射性核素主要来自于土壤、岩石等陆源物质, 而黑潮在台湾东的流向为自南向北, 因此 TW1-2 站位放射性核素含量的提升可能是来自台湾岛的陆源物质输入。由于海拔降低迅速、河流湍急、岩石质地疏松, 台湾东部的剥

蚀速率极高, 四条主要河流向海的泥沙输送量可达 6200 万吨每年(对比长江年输沙量 4.7 亿吨)(Li, 1976; Kao *et al*, 2005)。颗粒物入海后, 由于水体离子强度的突然增大, 吸附在颗粒物上的 Ra-226 会迅速解析, 使水体中溶解态 Ra-226 出现过剩, 因此 Ra-226 的含量提升最大。

根据温盐特征, 台湾以东黑潮水体大致可以分为黑潮表层水(KSW, 0—75m)、黑潮次表层水(KSSW, 100—300m)、黑潮中层水(KIW, 400—800m)和黑潮深层水(KDW, >1000m)(卢汐等, 2015), 不同水层放射

性核素的含量如表 1 所示。除了 TW1-2 站位的 U-238 以外, 其他放射性核素在不同水层之间的含量大小顺序为 KSW > KSSW > KIW, 即随着深度的增加核素含量呈下降趋势。然而, 放射性核素含量随着深度的增加而降低的幅度并不一致, KSW 与 KSSW 之间放射性核素含量的差异更显著, 例如 K-40 的含量从 KSW 到 KSSW 降低了 11.64%, 而从 KSSW 到 KIW 则只下降了 7.62%(以两个站位的平均值计算)。放射性核素的含量可在一定程度上区分黑潮主流的不同水层。

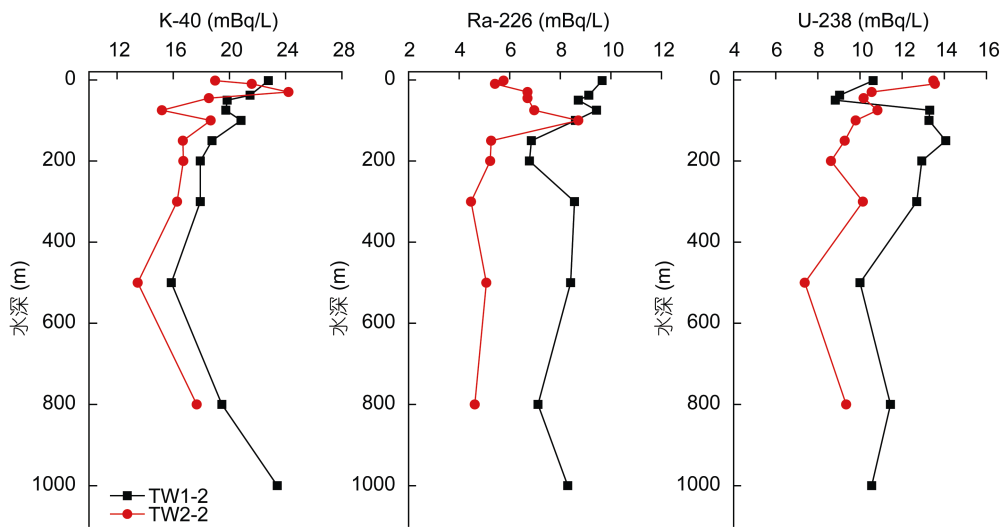


图 2 黑潮主流径海水放射性核素的垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of radionuclides in the main stream of Kuroshio

表 1 黑潮主流径不同水层放射性核素的含量(mBq/L)

Tab.1 Radionuclide concentrations in different layers of the main stream of Kuroshio (mBq/L)

核素 站位	K-40		Ra-226		U-238	
	TW1-2	TW2-2	TW1-2	TW2-2	TW1-2	TW2-2
水层						
KSW	20.96	19.70	9.23	6.31	10.45	11.72
KSSW	18.86	17.09	7.70	5.92	13.24	9.46
KIW	17.66	15.57	7.77	4.85	10.72	8.36
KDW	23.41		8.30		10.55	

注: KSW: 黑潮表层水; KSSW: 黑潮次表层水; KIW: 黑潮中层水; KDW: 黑潮深层水

2.2 东海及邻近黑潮水放射性核素的水平分布

东海陆架区海水中化学物质的分布受陆源河流输入、沿岸流搬运、外海黑潮入侵等多种因素的影响, 总体上看分布模式复杂, 但仍有较清晰的规律。

K-40 的水平分布如图 3 所示。研究海区表层海水中, K-40 的含量范围为 13.92—26.11mBq/L, 平均值为 21.12mBq/L, 并且在浙江外海离岸较远的区域存在一个明显的高值区。而在底层海水中, K-40 的高

值区则向西南移至浙闽沿岸。研究表明, 入侵东海陆架区的黑潮以次表层水为主(Yang *et al*, 2011), 因此本文以 200m 深度的黑潮水与陆架区底层水进行比较(下同)。研究海区底层海水 K-40 的含量范围为 14.36—28.34mBq/L, 平均值为 21.24mBq/L, 整体上与表层相当, 但分布规律更清晰。除了浙闽沿岸的高值区, 在台湾以东黑潮、上升流区以及长江和杭州湾口外还存在明显的低值区。

同 K-40 类似, 研究海区表层和底层 Ra-226 的平均含量相当, 最高值约为最低值的两倍。Ra-226 的水平分布如图 4 所示。表层海水中 Ra-226 的含量范围为 4.58—10.28mBq/L, 平均值为 7.92mBq/L, 近岸海域普遍较高, 最低值出现在浙江外海 125°E 附近海域; 底层海水中 Ra-226 的含量范围为 4.14—10.08mBq/L, 平均值为 7.63mBq/L, 高值区向浙闽沿岸偏移, 浙江

外海的低值区变化不大, 而南部黑潮影响下的低值区范围扩大。

U-238 的分布与 K-40、Ra-226 有明显差异(图 5), 主要体现在长江和杭州湾口外的高值区, 但是南部的黑潮区域仍为低值区, 并且范围延伸至部分陆架区。U 是钢系元素, 而 K 和 Ra 分别属于性质较活泼的碱金属和碱土金属, 化学性质的差异以及受生物

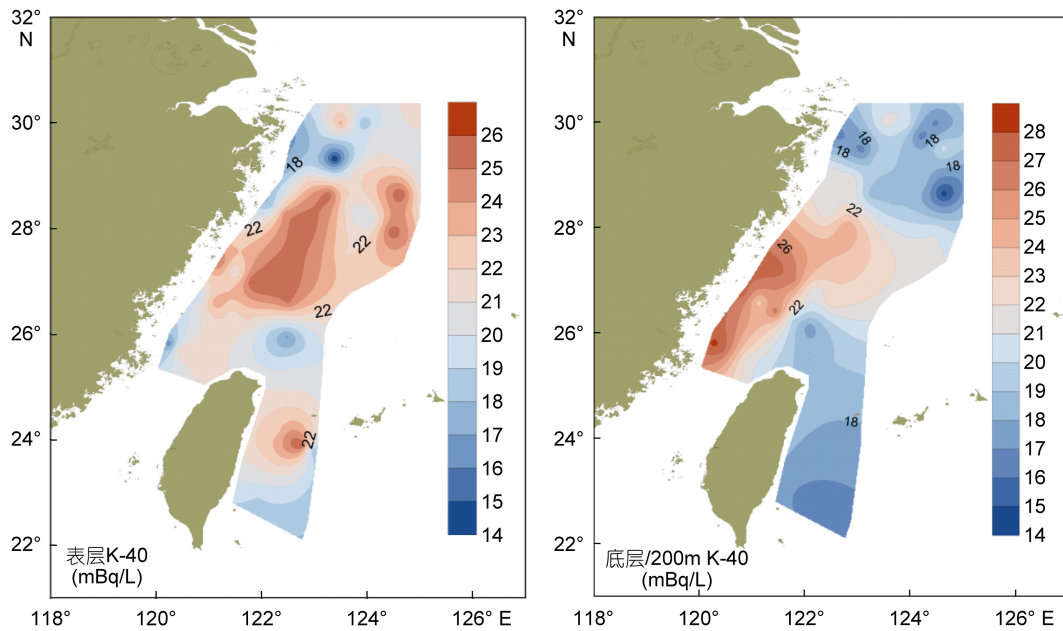


图 3 东海陆架海域及邻近黑潮水中 K-40 的平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of K-40 in the East China Sea and adjacent Kuroshio water

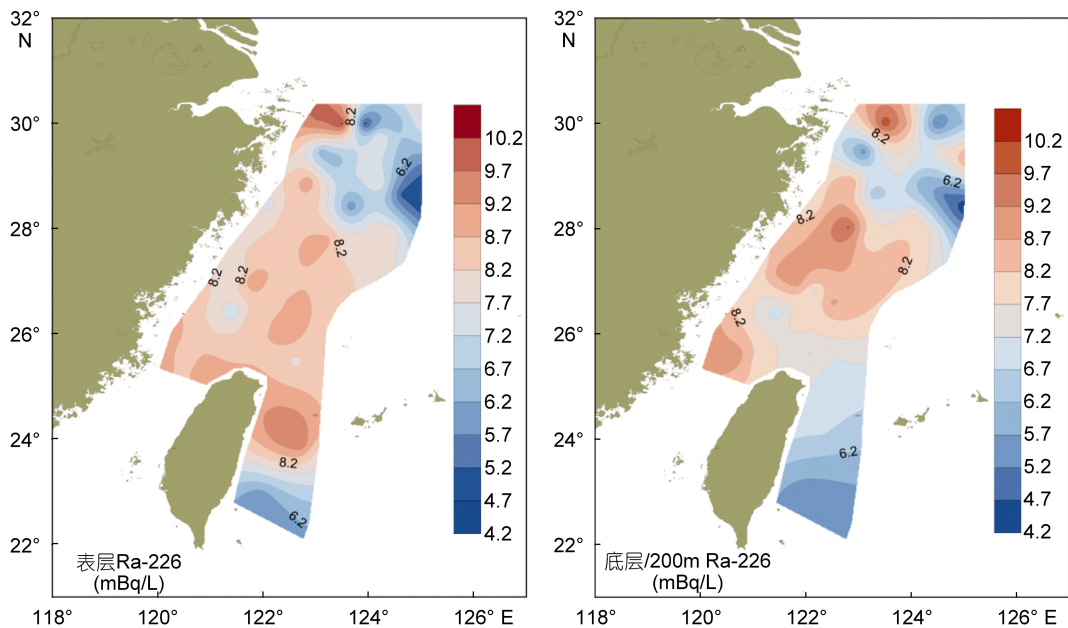


图 4 东海陆架海域及邻近黑潮水中 Ra-226 的平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of Ra-226 in the East China Sea and adjacent Kuroshio water

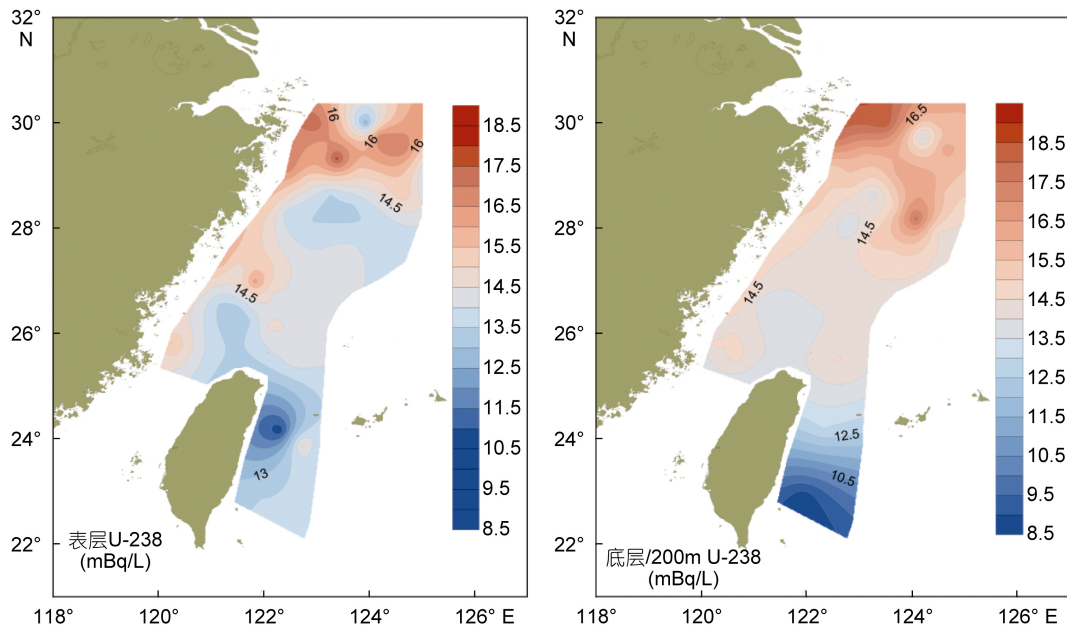


图 5 东海陆架海域及邻近黑潮水中 U-238 的平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of U-238 in the East China Sea and adjacent Kuroshio water

活动影响的不同可能是造成分布差异的主要原因。表层和底层海水中, U-238 的含量范围分别为 10.62—17.34 和 8.62—18.41 mBq/L, 平均值分别为 14.62 和 14.96 mBq/L。

3 讨论

3.1 影响放射性核素分布的因素

放射性核素属于不稳定同位素, 其化学性质与稳定同位素类似, 但其在自然环境中的含量与分布还会受放射性衰变的影响。而 K-40, Ra-226 和 U-238 均具有足够长的半衰期(其中最短的 Ra-226 半衰期也长达 1600 年), 因此这三种核素的含量与分布短期内不会受到放射性衰变的影响。为探究影响放射性核素分布的因素, 对放射性核素和其他海水理化参数进行了相关性分析, 如表 2 所示。结果表明, 放射性核素的垂直分布以及在表层海水中的分布与海水理化参数的关系不密切, 仅垂直剖面中的 Ra-226 和 DOC/POC 以及表层海水中的 U-238 和温度之间存在极显著相关关系。而在底层海水中, 放射性核素与温度、盐度、pH、POC、TSM、叶绿素 *a*(chl *a*) 以及 DIC 等参数显著相关, 但是海水理化参数与不同核素的相关性不同, 例如: pH 与 K-40 显著正相关, 而与 U-238 则显著负相关; DIC 与 K-40 显著负相关, 而与 U-238 则显著正相关; Ra-226 与海水理化参数的相关程度则要比 K-40 和 U-238 弱得多。从三种核素之间的相关

性看, K-40 与 Ra-226 显著正相关($R = 0.484, P < 0.01$), 而 K-40 与 U-238 则显著负相关($R = -0.617, P < 0.01$), 这主要是由不同核素之间的化学性质差异导致的。

近岸沉积物中的 K-40 主要来自河流搬运物质, 并且在海洋环境中矿物颗粒的 K-40 含量较高, 而生源物质的 K-40 含量则较低(Gulin *et al.*, 2014)。在东海, 海水中 K-40 含量的高值区主要集中在近岸, 尤其是底层海水, 表明 K-40 主要来自于陆源矿物。黑潮次表层水的 K-40 含量较低, 台湾东北部的陆架海区 K-40 的分布应该主要受黑潮入侵的影响。长江口和杭州湾东南海区也存在较大面积的 K-40 的低值区, 其形成原因是水体化学环境的改变还是外来水团的入侵仍需进一步验证。Ra-226 同样主要来自于陆源输入, 其分布与 K-40 基本类似, 但在长江口和杭州湾外略有不同。在离长江口最近的区域, Ra-226 存在一个高值区, 而在此高值区的周围, 尤其是东南方向以 28.5°N、125°E 为核心的区域, 仍然存在低值区。结合底层海水 K-40 的分布, 可以推断该区域应该同时受到陆源输入和黑潮水入侵的影响, 是存在河流输入的近岸水体与黑潮水的博弈区。尽管在黑潮主流径区域, U-238 与 K-40、Ra-226 一致, 也为低值区, 但是其高值区却北移至长江口和杭州湾外, 这可能主要是由于海水化学环境的变化。U-238 的迁移性与氧化还原条件有关, 由于+4 价 U 迁移性弱于+6 价 U, 还原条件下 U-238 更倾向于富集沉降(Cochran *et al.*,

表 2 放射性核素与其他海水理化参数的相关性分析
Tab.2 Relationships between radionuclides and other physical and chemical parameters of seawater

		<i>T</i>	<i>S</i>	pH	DOC	POC	TOC	DOC/POC	TSM	chl <i>a</i>	TAlk	DIC
垂直剖面 (TW1-2 和 TW2-2)	K-40	0.230	0.088	0.209	-0.278	-0.301	0.127	-0.382	-0.102	0.068	-0.222	-0.259
	Ra-226	0.297	0.029	0.199	0.186	0.198	0.055	-0.673**	0.433	0.156	-0.241	-0.287
	U-238	0.370	-0.043	0.272	0.205	0.228	-0.117	-0.303	0.196	0.209	-0.060	-0.336
表层	K-40	-0.247	0.036	-0.142	-0.016	0.040	-0.247	0.215	0.109	0.090	-0.015	0.028
	Ra-226	0.168	-0.082	0.194	0.181	0.190	-0.009	0.186	0.094	0.116	-0.365*	-0.162
	U-238	0.429**	0.124	0.120	-0.030	-0.038	0.350*	-0.055	-0.004	-0.031	0.097	-0.006
底层	K-40	0.505**	0.121	0.431**	0.212	0.623**	0.245	-0.277	0.612**	0.604**	-0.066	-0.425**
	Ra-226	0.275	0.081	0.054	0.039	0.249	0.055	-0.094	0.221	0.326*	-0.019	-0.092
	U-238	-0.163	-0.416**	-0.512**	-0.157	0.050	-0.151	-0.375*	-0.017	-0.122	0.173	0.450**
全部	K-40	0.277**	-0.157	0.059	0.154	0.206*	-0.445**	0.426**	0.105	0.226*	-0.145	-0.141
	Ra-226	0.235*	-0.109	0.210*	0.092	0.128	-0.090	0.158	0.101	0.161	-0.266**	-0.211*
	U-238	-0.022	0.155	0.055	-0.121	-0.142	0.317**	-0.156	-0.029	-0.100	0.169	0.033

注: **在 0.01 水平上(双侧)显著相关; *在 0.05 水平上(双侧)显著相关; *T*: 温度; *S*: 盐度; DOC: 溶解有机碳; POC: 颗粒有机碳; TOC: 总有机碳; TSM: 总悬浮物; chl *a*: 叶绿素 *a*; TAlk: 总碱度; DIC: 溶解无机碳

1986; Barnes *et al.*, 1993), 因此长江口外海域缺氧造成的偏还原环境可能是 U-238 的含量出现高值的原因, 而底层海水 U-238 的高值区的范围和含量水平高于表层海水也从侧面印证了这一推测。

3.2 放射性核素对黑潮入侵东海的指示

本文研究的几种放射性核素均呈水溶性特点, 尽管其行为会受到化学环境改变的影响, 但其在海水中主要表现为保守性。由放射性核素的分布可知, 不同层次的黑潮水之间、黑潮水与近岸海水之间的放射性核素含量均具有显著差异, 因此放射性核素可以作为不同水团的特征指标。本文将结合温度和盐度, 筛选能够指示水团混合的放射性核素指标, 并据此探讨黑潮入侵东海陆架区的路径和范围。

东海陆架海域水团分布比较复杂, 不仅有包括

长江冲淡水 and 浙闽沿岸水在内的沿岸水系, 还存在黑潮和台湾暖流等外海水系以及内部的陆架混合水团(李伟等, 2012)。研究表明, 4—9 月份台湾暖流水主要来自台湾海峡北上的暖流水(Qi *et al.*, 2014), 而入侵东海陆架区的黑潮水主要是表层水和次表层水(Yang *et al.*, 2011)。有学者将东海陆架海域简化为黑潮表层水、黑潮次表层水、台湾海峡水和大陆近岸水 4 个水团的混合(张磊等, 2007; 刘伟等, 2017), 本文根据这种简化以四端元混合模型来半定量评估东海陆架区黑潮水的比例。其中黑潮表层水和次表层水端元值取主流径相应采样点的平均值, 台湾海峡水取 DH-11 断面东侧三个站位的平均值, 大陆近岸水取各断面最西侧站位的平均值。各端元的放射性核素含量、温度和盐度如表 3 所示。

表 3 各端元放射性核素和湿盐指标
Tab.3 Radionuclide concentrations and temperature and salinity of the end members

端元	K-40 (mBq/L)	Ra-226 (mBq/L)	盐度	温度(°C)
黑潮表层水	20.33±2.64	7.77±1.63	34.59±0.11	26.81±1.81
黑潮次表层水	17.97±1.48	6.81±1.70	34.73±0.12	18.38±3.08
台湾海峡水	23.09±2.97	8.76±0.44	33.96±0.05	22.62±0.35
大陆近岸水	25.07±4.56	8.14±1.08	29.83±1.83	20.15±1.54

由于 U-238 与其他核素的分布差异较大, 而且利用 U-238 为指标计算的结果并不能指示黑潮在台湾东北部的入侵, 与传统认知不符, 因此本文只探讨 K-40 和 Ra-226 作为水团混合指标的有效性。端元混合模型的初步计算结果表明, 黑潮表层水对研究区域的影响

较小, 这与刘伟等(2017)采用溶解 Ba 计算的结果相一致。而东海陆架海域底层水主要受黑潮次表层水、台湾海峡水和大陆近岸水的影响, 因此分别根据 K-40 和 Ra-226 以及温度和盐度进一步计算了黑潮次表层水在东海陆架海域底层海水中的比例, 结果如图 6 所示。

两组指标的计算结果均可以明显看出黑潮在冲出台湾以后向西北方向的涌升。从 K-40 和 Ra-226(图 6a)的计算结果看,黑潮水于台湾东北部入侵后并没有越过台湾延伸方向的西侧,而在东北部则出现了黑潮水高比例区,因此黑潮可能在与台湾西岸平齐的位置转向东北流动,而温盐的计算结果(图 6b)则清楚的显示了这一路径。这一入侵路径一方面是受海底地形的影响,另一方面还可能受到了东北流向的台湾暖流的影响。放射性核素指标和温盐指标均显示,东海陆架海域外部底层水基本被黑潮次表层水控制,从黑潮涌升区向

东北方向延伸至北纬 27°、东经 123°左右,黑潮水的比例接近 50%,而至北纬 27°以北黑潮水的比例明显提升,最远可延伸至长江口和杭州湾外,这可能是由于台湾暖流的影响逐渐减弱凸显了黑潮入侵分支的影响。有研究表明近岸黑潮底层分支涌升至 60m 等深线后,在北纬 27.5°附近转向东北并可以到达长江口外(杨德周, 2011),这与本文结果大体一致。总的来看,以放射性核素 K-40 和 Ra-226 作为指标,可以基本指示黑潮水的运移趋势和入侵东海陆架区的范围,并能在一定程度上印证由温盐指标得出的结果。

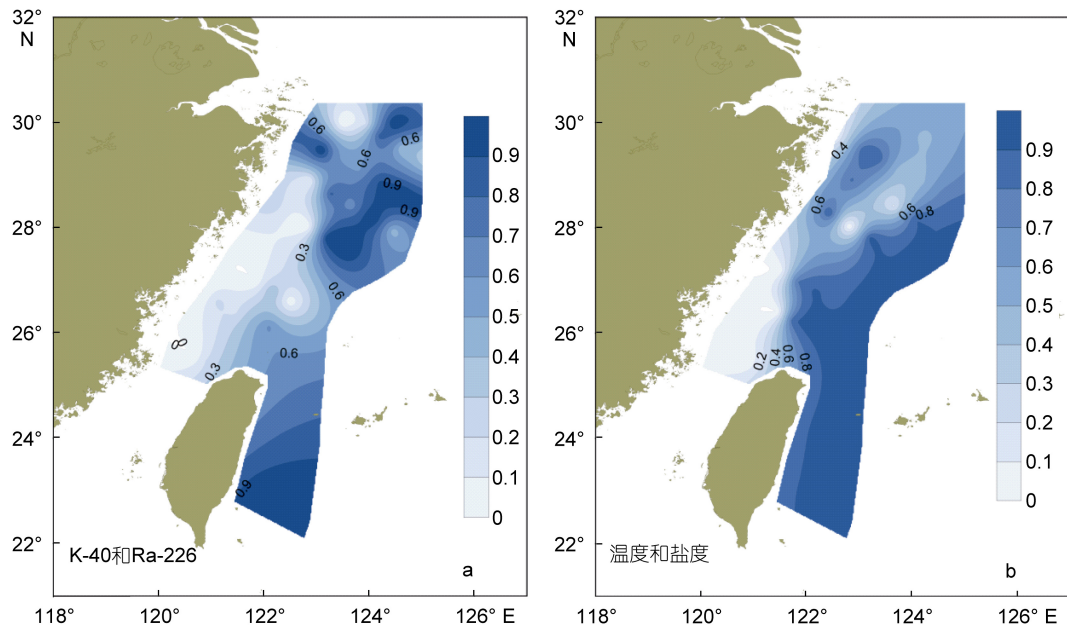


图 6 东海陆架海域底层海水中黑潮次表层水所占的比例
Fig.6 The proportion of Kuroshio water in the bottom of the East China Sea

4 结论

黑潮主体放射性核素的含量有明显的层次差异,整体上看从表层至深层逐渐减小;流经台湾以东的黑潮主流下游的放射性核素含量略高于上游,主要原因是台湾东部河流带来的陆源物质输入。从水平分布上看,放射性核素的高值区主要出现在近岸海域,而黑潮主流区为通常低值区,并且在长江口和杭州湾外海域 K-40 和 Ra-226 还存在含量与黑潮主流接近低值区,这个规律在底层海水中更显著。

研究海区放射性核素与物理化学参数的关系不密切,陆源物质输入是造成不同水团放射性核素含量差异的主要原因。根据 2014 年 5 月的调查数据,以放射性核素 K-40 和 Ra-226 为指标,利用端元混合模型评估黑潮入侵东海陆架区的范围的结果表明,黑

潮在台湾东北部涌升后,在台湾暖流影响下继续沿东北方向入侵,东海陆架区外部底层水基本被黑潮次表层水控制,黑潮水可入侵至长江口和杭州湾外,而福建近岸海域基本不受黑潮水的影响。K-40 和 Ra-226 可作为温盐参数的补充,用于指示黑潮对东海陆架海域的入侵,并可结合温盐参数,用于多水团混合的半定量研究。

参 考 文 献

- 马 超, 2009. 黑潮对东中国海主要流系的影响. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1—30
- 卢 汐, 宋金明, 袁华茂等, 2015. 黑潮与毗邻陆架海域的碳交换. 地球科学进展, 30(2): 214—225
- 刘 伟, 宋金明, 袁华茂等, 2015. 黑潮化学物质输入东海的途径与通量. 地球科学进展, 30(8): 904—914
- 刘 伟, 宋金明, 袁华茂等, 2017. 台湾东部黑潮与邻近东海

- 水中的钷及其对黑潮水入侵的指示. 中国科学: 地球科学, 47(8): 972—984
- 李 伟, 王玉衡, 汪嘉宁等, 2012. 2011 年春、夏季黄、东海水团与水文结构分布特征. 海洋与湖沼, 43(3): 615—623
- 杨德周, 2011. 东海陆架黑潮入侵及生态响应数值模拟研究. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 1—100
- 张 磊, 刘 哲, 张 经, 2007. 海洋四水团混合的定量化分析和方法比较及其在东海西南海区的应用. 海洋环境科学, 26(5): 450—454, 465
- Barnes C E, Cochran J K, 1993. Uranium geochemistry in estuarine sediments: controls on removal and release processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 555—569
- Cai P H, Huang Y P, Chen M *et al*, 2002. New production based on ^{228}Ra -derived nutrient budgets and thorium-estimated POC export at the intercalibration station in the South China Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(1): 53—66
- Charette M A, Splivallo R, Herbold C *et al*, 2003. Salt marsh submarine groundwater discharge as traced by radium isotopes. *Marine Chemistry*, 84(1-2): 113—121
- Cochran J K, Carey A E, Sholkovitz E R *et al*, 1986. The geochemistry of uranium and thorium in coastal marine sediments and sediment pore waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(5): 663—680
- Evangelio N, Florou H, Scoullou M, 2011. POC and particulate ^{234}Th export fluxes estimated using $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in an enclosed Eastern Mediterranean region (Saronikos Gulf and Elefsis Bay, Greece) in seasonal scale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(19): 5367—5388
- Feely H W, Kipphut G W, Trier R M *et al*, 1980. ^{228}Ra and ^{228}Th in coastal waters. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 11(2): 179—205
- Gulin S B, Gulina L V, Sidorov I G *et al*, 2014. ^{40}K in the Black Sea: a proxy to estimate biogenic sedimentation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 134: 21—26
- Harada K, Tsunogai S, 1986. ^{226}Ra in the Japan Sea and the residence time of the Japan Sea water. *Earth and Planetary Science Letters*, 77(2): 236—244
- Hsueh Y, 2000. The kuroshio in the East China Sea. *Journal of Marine Systems*, 24(1—2): 131—139
- Kao S J, Lee T Y, Milliman J D, 2005. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(3): 653—675
- Kim G, Ryu J W, Yang H S *et al*, 2005. Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by ^{228}Ra and ^{226}Ra isotopes: implications for global silicate fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1—2): 156—166
- Ku T L, Luo S D, Kusakabe M *et al*, 1995. ^{228}Ra -derived nutrient budgets in the upper equatorial Pacific and the role of “new” silicate in limiting productivity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 42(2—3): 479—497
- Li Y H, 1976. Denudation of Taiwan Island since the Pliocene epoch. *Geology*, 4(2): 105—108
- Luo Y M, Miller L A, De Baere B *et al*, 2014. POC fluxes measured by sediment traps and $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in Saanich Inlet, British Columbia. *Marine Chemistry*, 162: 19—29
- Nozaki Y, Tsubota H, Kasemsupaya V *et al*, 1991. Residence times of surface water and particle-reactive ^{210}Pb and ^{210}Po in the East China and Yellow seas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(5): 1265—1272
- Qi J F, Yin B S, Zhang Q L *et al*, 2014. Analysis of seasonal variation of water masses in East China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 32(4): 958—971
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al*, 2011. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. *Journal of Geophysical Research*, 116(C5): C05015

RADIONUCLIDE IN THE EAST CHINA SEA AND ADJACENT KUROSHIO SEAWATER: INDICATION OF KUROSHIO INTRUSION

WANG Qi-Dong^{1,2,3}, SONG Jin-Ming^{1,2,3}, YUAN Hua-Mao^{1,2,3}, LI Xue-Gang^{1,2,3}, LI Ning^{1,2,3}

(1. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environment Sciences, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *Laboratory of Marine Ecology and Environment Sciences, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract We studied the distribution of K-40, Ra-226, and U-238 in the Kuroshio mainstream (KM) and East China Sea (ECS) using radionuclide as a tracer to assess the extent of Kuroshio intrusion into the ECS. We found that radionuclide concentrations were different in different layers of the KM, and in general, the concentration decreased downwards in the ranges of 13.47—26.11, 5.08—9.51, and 7.38—14.72 mBq/L for K-40, Ra-226, and U-238, respectively. As the KM flows through the east of Taiwan Island, the radionuclide concentration increased slightly, mainly because of the terrestrial material input brought by rivers of eastern Taiwan. In overall, the radionuclide concentration in the coastal sea was higher than in the KM as well as in the sea off the Changjiang (Yangtze) River mouth and Hangzhou Bay (CJM-HZB). Physical and chemical parameters of seawater had little influence on the distribution of radionuclide, and the difference in radionuclide concentration in different water masses was due mainly to terrestrial material input. Based on K-40, Ra-226, temperature, and salinity data, we calculated the proportion of KM to the ECS using an end-member mixing model. The results show that the KM flows northeastward after it upwells in the northeastern Taiwan, and reaches in the area of CJM-HZB but Fujian coastal regions. Therefore, K-40 and Ra-226 could be used as supplementary parameters of temperature and salinity to indicate the extent and scope of Kuroshio intrusion into the ECS, and as a tracer to estimate the mixing of water masses along the Kuroshio path.

Key words radionuclide; tracer; Kuroshio intrusion; the East China Sea