

TONGWEISU HAIYANGXUE
YANJIU WENJI

同位素海洋学 研究文集

第3卷 沿岸海域

黄奕普 陈 敏 刘广山 等著



海洋出版社

同位素海洋学研究文集

第3卷

沿岸海域

黄奕普 陈 敏 刘广山 等著

海洋出版社

2006年·北京

内 容 简 介

《同位素海洋学研究文集》是厦门大学海洋系同位素海洋学研究组 40 多年来致力于同位素海洋学的研究成果的集粹。

本套文集首批拟出版 5 卷,本卷为第 3 卷:沿岸海域。涉及的同位素有 ^2H 、 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{18}O 、 ^{40}K 、 ^{75}Se 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 、 ^{222}Rn 、 ^{224}Ra 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{228}Ac 、 ^{228}Th 、 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{234}Th 、 ^{234}U 、 ^{238}U 等。主要研究内容包括:(1)沿岸海域水体中核素的分布与水体运动的同位素示踪;(2)沿岸海域的颗粒动力学与生物生产力研究;(3)沿岸海域沉积物中放射性核素的分布及地球化学行为;(4)沿岸地区大气沉降与地下水中的同位素及其海洋学意义等。

图书在版编目(CIP)数据

同位素海洋学研究文集. 第 3 卷,沿岸海域/黄奕普等著. —北京:海洋出版社,2006. 7

ISBN 7-5027-6591-3

I. 同… II. 黄… III. 同位素-海洋化学-文集
IV. P734.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 078251 号

责任编辑:王 溪

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路 8 号)

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月北京第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:23

字数:582 千字 印数:1~1000 册

定价:65.00 元

海洋版图书印、装错误可随时退换

谨以此书庆贺
厦门大学海洋学系
建系六十周年
(1946 ~ 2006)

暨

海洋与环境学院
成立十周年
(1996 ~ 2006)

前 言

同位素海洋学(Isotopic Oceanography)一词 1965 年由 Craig(美国 Scripps 海洋研究所)提出,嗣后三宅泰雄(日本气象研究所)也提出将“不仅着眼于元素而且着眼于同位素或核素(nuclide)的研究领域称为同位素海洋学(Isotopic Oceanography)或核海洋学(Nuclear Oceanography)”(1967)。同位素海洋学顾名思义是运用同位素的理论、方法与技术研究海洋科学,它研究海洋环境中同位素(包括天然与人工放射性同位素和稳定同位素)的来龙去脉及其应用。具体说来,研究海洋中同位素的来源、含量、分布、存在形式、迁移变化规律及其在海洋学各分支学科中的应用。这是核科学、核技术与海洋学相互渗透、结合的新兴边缘学科。

海洋环境中存在着许许多多的天然放射性同位素和稳定同位素,凡是陆地上有的这两类同位素海洋中均存在。此外,由于核武器试验的进行、核工业的发展以及同位素在各个领域的广泛应用,又不可避免地海洋输入种种人工放射性同位素。各种同位素由于它们各自具有特定的核性质(蜕变类型、衰变半衰期、衰变能量或丰度等)和千差万别的化学性质、地球化学行为,使其能为各种海洋学过程提供准确、可靠的时标(time scale)或比较理想的示踪剂(tracer),给出各种海洋学过程的速率特征与机理,这就是同位素海洋学的特色或独到之处,也是它的魅力所在,即通过海洋中核素微观上核性质的微小差异和变化,洞悉宏观时、空尺度上的海洋学过程的规律性。这些海洋学过程诸如海-气交换过程;水团年龄与组成、水体的扩散、混合与交换、各种尺度的海洋环流;以碳、氮、磷、硫等生源要素的生物地球化学为中心的各界面过程及通量;以海洋初级生产力、新生产力和细菌生产力等为中心的生物生产力的测算以及包括珊瑚礁、多金属结核、富钴结壳、热液硫化物、天然气水合物等近岸直至深海的各种沉积过程等。

厦门大学海洋系同位素海洋学研究组 40 多年来致力于同位素海洋学的研究,迄今已将 ^2H 、 ^3H 、 ^7Be 、 ^9Be 、 ^{10}Be 、 ^{13}C 、 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 、 ^{32}P 、 ^{33}P 、 ^{40}K 、 ^{59}Fe 、 ^{65}Zn 、 ^{75}Se 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 、 ^{222}Rn 、 ^{224}Ra 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{227}Th 、 ^{228}Th 、 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{234}Th 、 ^{231}Pa 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 等 30 余种同位素运用于我国及世界辽阔海域中的海洋学研究,包括北冰洋、白令海、东、中、西太平洋、渤海湾、黄河口、胶州湾、黄海、长江口、东海陆架、杭州湾、湄州湾、厦门湾、大亚湾、珠江口、南海东北部、南海北部、南沙群岛海域、东澳海域、南极普里兹湾及邻近海域、南印度洋、南大西洋等沿岸、近海、深海大洋区(详见下图)。在如此辽阔的海域所进行的基于同位素的海洋学研究开拓、发展了我国的同位素海洋学,相关的研究结果已撰写了近 200 篇学术论文,发表在中、外 30 种以上的书刊中,为国内外相关的研究提供了一批重要的参考资料。但由于比较分散,不便利用。为此,我组同仁产生将这相当分散的近 200 篇论文汇编成册出版的想法,旨在方便研究生、本科生的学习和利用,推动科研工作,促进交流并向资助研究的所有上级领导和国内外同行汇报 40 余年来我们在同位素海洋学这块小小园地上耕耘的点滴收获,这就是出版《同位素海洋学研究文集》的初衷。

该文集为不定期的系列出版物,其特色是:反映本研究组运用同位素研究海洋学的研究成果,绝大多数论文均涉及海洋与同位素,并已正式发表,但也有两个例外,一是个别论文虽涉“海”、但未涉“核”,因为与其他论文相关,也被收入文集中,但只占极小的份额;二是个别论文尚未正式发表,但出于研究内容完整性的考虑,也收入其中。

该文集首批拟出版5卷,各卷分别以海域或领域命名,简介如下。

第1卷:南海。应用的同位素有 ^2H 、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{234}Th 、 ^{234}U 、 ^{238}U 等。主要研究内容包括:(1) ^2H 、 ^{18}O 的分布及其在物理海洋学上的应用;(2)海水中锕同位素的分布及其水文学意义;(3)南海碳循环关键过程的同位素示踪研究;(4) $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 不平衡及其颗粒物循环与输出的意义;(5)南海沉积物中核素的分布与地球化学行为等。

第2卷:极地海洋。涉及的同位素包括 ^2H 、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{234}Th 、 ^{234}U 、 ^{238}U 等。主要研究内容包括:(1)南极普里兹湾及邻近海域水团组成的同位素示踪;(2)南极普里兹湾及邻近海域的生物生产力和碳循环;(3)西北冰洋水团组成与水体运动的同位素示踪;(4)北冰洋及其邻近海域生物泵运转的同位素示踪等。

第3卷:沿岸海域。涉及的同位素有 ^2H 、 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{18}O 、 ^{40}K 、 ^{75}Se 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 、 ^{222}Rn 、 ^{224}Ra 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{228}Ac 、 ^{228}Th 、 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{234}Th 、 ^{234}U 、 ^{238}U 等。主要研究内容包括:(1)沿岸海域水体中核素的分布与水体运动的同位素示踪;(2)沿岸海域的颗粒动力学与生物生产力研究;(3)沿岸海域沉积物中放射性核素的分布及地球化学行为;(4)沿岸地区大气沉降与地下水中的同位素及其海洋学意义等。

第4卷:海洋放射年代学。涉及的同位素有 ^9Be 、 ^{10}Be 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{227}Th 、 ^{228}Th 、 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{234}Th 、 ^{231}Pa 、 ^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{238}U 等。主要研究内容包括:(1)海洋沉积物中放射性核素的分布与沉积速率;(2)多金属结核中核、元素的分布与生长速率;(3)富钴结壳中元、核素的分布特征与生长速率;(4)珊瑚礁等碳酸盐地质样品的铀系测年等。

第5卷:核素的测定。涉及的同位素有 ^7Be 、 ^9Be 、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{40}K 、 ^{65}Zn 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、 ^{210}Pb 、 ^{224}Ra 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{227}Th 、 ^{228}Th 、 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{234}Th 、 ^{231}Pa 、 ^{234}U 、 ^{238}U 等。主要研究内容包括:(1)基于 α -能谱分析的核素测定;(2)基于 γ -能谱分析的核素测定;(3)基于 α/β 计数法的核素测定;(4)基于液体闪烁法的核素测定;(5)基于质谱分析的核素测定;(6)同位素海洋学相关的综述与词条等。

第3卷由彭安国负责论文录入,刘广山负责编辑。编辑过程中,对不是十分确切的地方以及以往论文出版时的印刷错误也做了修改。

该卷的出版得到厦门大学985工程项目和教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0593)的共同资助。海洋出版社专著出版中心的牛文生主任、王溪编辑等为此卷的出版付出了大量的心血,我谨代表文集编辑组一并表示衷心的感谢。

由于水平所限,加上时间仓促,书中不当之处,敬请读者惠予指正。

黄奕普
于厦门大学海洋楼
2006年4月6日

目次

第一部分 沿岸海域水体中核素的分布与水体运动的同位素示踪

海水中的放射性核素

黄奕普 陈敏	(3)
九龙江—厦门湾河口区溶解 ²²⁶ Ra 的分布	
施文远 邱晓晖 黄奕普	(15)
九龙江河口区水体中的 ²²⁶ Ra 和 ²²⁸ Ra	
谢永臻 黄奕普 施文远 徐茂泉 邱雨生 阮德记	(21)
九龙江河口区水体中 ²²⁴ Ra 的分布及其应用	
陈性保 黄奕普 谢永臻 陈敏 邱雨生	(28)
厦门湾海水中 ²²⁴ Ra 的深度分布特征及其应用	
陈性保 谢永臻 黄奕普 陈敏 邱雨生	(37)
厦门浔江湾水体交换的 ²²⁴ Ra 和 ² H 示踪研究	
蔡明刚 陈敏 蔡毅华 高众勇 邱雨生 黄奕普	(45)
Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach	
Liu Zhe Wei Hao Liu Guangshan and Zhang Jing	(52)

第二部分 沿岸海域的颗粒动力学与生产力研究

厦门湾水体中铀、钍同位素及悬浮颗粒物的粒径谱——颗粒物采集方法的影响

彭安国 黄奕普 陈敏 刘广山 邱雨生	(71)
厦门湾水体中不同粒级颗粒物、Chl. a 和 ²³⁴ Th 随潮汐的变化及其海洋学意义	
彭安国 黄奕普 陈敏 刘广山 邱雨生	(78)
Size - fractionated thorium isotopes (²²⁸ Th, ²³⁰ Th, ²³² Th) in surface waters in the Jiulong River estuary, China	
Zhang Lei Chen Min Yang Weifeng Xing Na Li Yanping Qiu Yusheng and Huang Yipu	(86)
九龙江河口区不同粒级 ²¹⁰ Po 的输入 - 迁出速率及其意义	
杨伟锋 陈敏 黄奕普 邱雨生 张磊 邢娜 李艳平	(103)
The input/removal rates of size - fractionated ²¹⁰ Po in the Jiulongjiang estuary and its implications	
Yang Weifeng Chen Min Huang Yipu Qiu Yusheng Zhang Lei Xing Na and Li Yanping	(110)
错流超滤技术在海水胶体态铀、钍、镭同位素和有机碳研究中的应用	
陈敏 郭劳动 黄奕普 高众勇 蔡毅华 蔡明刚	(118)

中国若干海域溶解态铀同位素的研究	
陈 敏 黄奕普 陈飞舟 邱雨生 陈性保	(128)
九龙江河口区水体中 ^{238}U 、 ^{234}Th 地球化学行为的研究	
蔡平河 黄奕普 邱雨生	(137)
九龙江河口区溶解态、颗粒态铀同位素的地球化学行为	
陈 敏 黄奕普 邱雨生 陈性保 陈飞舟 蔡平河	(145)
厦门湾水体中 ^{234}Th 的垂直分布及其时间变异特征	
陈飞舟 黄奕普 陈 敏 刘广山 邱雨生	(155)
不同潮时对厦门湾水体中 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡的影响	
陈 敏 黄奕普 邱雨生	(162)
厦门湾水体中颗粒有机碳的垂向输出通量: $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡的应用	
陈 敏 黄奕普 邱雨生	(172)
厦门湾上屿附近海域悬浮颗粒物中若干元素的时空分布特征	
陈飞舟 黄奕普 陈 敏 刘广山	(184)
厦门湾颗粒活性污染物归宿的研究	
陈 敏 黄奕普	(192)
Fate of particle - reactive pollutants in the Xiamen Bay	
Chen Min and Huang Yipu	(196)
厦门湾上屿附近海域初级生产力及相关要素的时间系列研究	
陈飞舟 沈国英 黄奕普 李文权 陈 敏	(201)
春季大亚湾初级生产力的空间分布特征	
邢 娜 刘广山 黄奕普 陈 敏 郑爱榕 蔡平河	(211)
大亚湾细菌生产力研究	
彭安国 黄奕普 刘广山 郑天凌 陈 敏 王肇鼎 练健生 郑爱榕	(221)
Se uptake and accumulation in marine phytoplankton and transfer of Se to the clam <i>Puditapes philippinarum</i>	
Zhang G H Hu M H Huang Y P and Harrison P J	(230)

第三部分 沿岸海域沉积物中放射性核素的分布及地球化学行为

中国近海沉积物中钍同位素的分布	
黄奕普 施文远 林永革 颜晓阳	(241)
Isotope composition of thorium in Chinese offshore sediments	
Huang Yipu Shi Wenyuan Lin Yongge and Yan Xiaoyang	(255)
中国近岸海域沉积物 ^{226}Ra 的分布特征	
陈 敏 黄奕普 林永革 邱雨生	(271)
厦门潮间带表层沉积物天然放射系不平衡研究	
陈锦芳 刘广山 黄奕普	(282)
厦门火烧屿裸露岩石的铀放射系不平衡	
刘广山 徐茂泉 黄奕普	(291)

海洋沉积物岩心放射性核素的 γ 谱测定	
刘广山 陈 敏 黄奕普 夏小明 李 炎	(296)
大亚湾不同介质中 ¹³⁷ Cs 和 ⁹⁰ Sr 的含量及行为特征	
刘广山 周彩芸	(303)
大亚湾与南海东北部海域沉积物中的 ¹³⁷ Cs	
刘广山 黄奕普	(311)
胶州湾表层沉积物放射性核素含量与矿物组成	
贾成霞 刘广山 徐茂泉 黄奕普 张 经	(315)

第四部分 沿岸地区大气沉降与地下水中的同位素及其海洋学意义

厦门大气降水的氢氧同位素研究	
蔡明刚 黄奕普 陈 敏 刘广山 金德秋 周锡煌	(325)
厦门地区 ⁷ Be 和 ²¹⁰ Pb 的大气沉降通量	
贾成霞 刘广山 杨伟锋 张 磊 黄奕普	(333)
青岛 ⁷ Be, ²¹⁰ Pb 和 ²¹⁰ Po 大气沉降通量的测定	
易 勇 白 洁 刘广山 易齐涛 黄奕普 陈洪涛	(341)
厦门岛南岸地下水的氢氧同位素示踪研究	
蔡明刚 黄奕普 陈 敏 刘广山 金德秋	(348)

第一部分 沿岸海域水体中核素的分布 与水体运动的同位素示踪

海洋中同位素的含量分布是应用同位素方法研究海洋学问题的基础与前提。沿岸海域只占海洋总面积很小的部分,但对人类的生产、生活,以及对海洋生态系、全球气候变化等有着重要意义,因而沿岸的陆海相互作用(LOICZ)成了国际地圈生物圈计划(IGBP)的重要核心计划之一。沿岸海域的同位素海洋学研究包括陆源溶解和颗粒活性物质向外海的运输、生物生产力、碳输出通量等重要的前沿研究课题,而这些研究均是靠测量放射性同位素的含量分布和变化来实现的。

本部分论文中,《海水中的放射性核素》一文综述了中国几十年来有关海洋中放射性核素调查与研究成果,包括铀、钍、镭和 ^{210}Pb 、 ^{40}K 、 ^{14}C 等天然放射性同位素, ^3H 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{239}Pu 等人工放射性核素。该部分有五篇文章研究厦门湾水体中的镭同位素和 ^2H 的分布和应用。对九龙江河口和浔江湾水体中的镭同位素的含量、分布及其时空变异作了深入研究。在此基础上将镭同位素(尤其是短寿命的 ^{224}Ra)成功地应用于垂直涡动扩散,九龙江河口区水体入海流速以及浔江湾水体交换等研究。另有一篇文章,作为同位素方法在物理海洋学中的应用,用 ^{228}Ra 作为示踪剂研究了胶州湾水体的交换过程,得到了与数值模拟一致的水体停留时间,实测方法证明了胶州湾不同海域的水体停留时间有很大的差异。以上不难看出镭同位素在海洋水体运动的示踪应用方面的优势。

这部分研究得到国家自然科学基金,教育部博士学科点专项基金以及福建省自然科学基金的资助。

海水中的放射性核素*

黄奕普 陈 敏

(厦门大学海洋系, 厦门 361005)

1 海水中的天然放射性核素

1.1 海水中的²³⁸U、²³⁴U

海水中含有 U 的 3 种同位素²³⁸U、²³⁵U、²³⁴U, 分别属于 $(4n+2)$ 和 $(4n+3)$ 天然放射系。²³⁵U 由于丰度小, 海水中的浓度极低, 国内外都少有专门的研究报道, 但是在深海沉积物、珊瑚礁等海洋物质中, 基于²³¹Pa/²³⁵U 不平衡而建立的铀系测年法的研究报道却不少。

1.1.1 海水中铀的浓度及同位素组成

研究海水中铀的浓度及同位素组成有助于准确地建立海洋环境中铀的地球化学平衡模式。更为重要的在于铀与其子体(如²³⁴Th、²³⁰Th 等)有着迥然不同的地球化学行为, 导致 U 与其子体间的放射性不平衡, 后者在许多重要海洋学问题的研究中, 已获得了广泛的应用, 而海水中 U 的浓度及同位素组成的研究, 恰是这些应用的基本前提和重要基础。

中国在这方面已有不少研究, 尤其是在南海和东海《中国近海放射性水平》汇编了大量渤海、黄海、东海、南海近海海水的 U 浓度。我国四大海域海水的 U 浓度见表 1。

表 1 我国四大海域近海海水中天然放射性核素浓度

海 域	海区	点 数	U($\mu\text{g/L}$)		Th($\mu\text{g/L}$)		²²⁶ Ra(mBq/L)		⁴⁰ K(mBq/L)	
			范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
渤 海	辽东湾	6	0.10~2.31	0.68	0.10~0.71	0.28	11.0~46.0	25.0		
	秦皇岛	3	2.50~3.10	2.87	<0.01	<0.01	7.40~8.50	7.80	9 340~9 970	9 550
	天津渤海湾	5	1.44~5.20	3.10	0.08~0.47	0.34	3.70~8.88	6.66	10 810~17 700	12 500
	山东庙岛海峡	1	4.0~4.26	4.13	0.28~0.29	0.28	24.9~37.0	31.0	11 900~11 920	11 910
	小 计	15	0.10~5.20	2.16	<0.01~0.71	0.24	3.70~46.0	15.9	9 340~17 700	11 450
黄 海	鸭绿江口-大连湾	9	0.10~2.08	0.80	0.10~1.55	0.30	7.00~30.7	16.3		
	威海-胶南	3	3.15~4.70	3.79	0.29~0.60	0.46	21.6~26.7	23.4	11 820~12 270	12 110
	连云港-南通	6	0.95~3.51	2.34	0.16~1.36	0.73	5.28~9.98	7.64	4 810~21 600	13 030
	小 计	18	0.10~4.70	1.81	0.10~1.55	0.47	5.28~30.7	14.6	4 810~21 600	12 720
	上海东部大戢洋	2	2.02~2.15	2.08	<0.02	<0.02	1.64	1.64	2 500~3 520	3 010
	杭州湾-温州湾	5	2.47~3.60	2.98	0.70~5.92	2.65	4.43~13.1	9.49	4 220~8 390	5 780

* 本文发表于: 中国海洋志, (曾呈奎、徐鸿儒、王春林主编), 大象出版社, 2003, 291~299.

续表

海域	海区	点数	U ($\mu\text{g/L}$)		Th ($\mu\text{g/L}$)		^{226}Ra (mBq/L)		^{40}K (mBq/L)	
			范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
东海	福建—台湾海峡	6	1.87 ~ 2.50	2.20	0.04 ~ 0.41	0.23	1.60 ~ 10.8	3.78	10 600 ~ 14 000	12 150
	小 计	13	1.87 ~ 3.60	2.48	<0.02 ~ 5.92	1.13	1.60 ~ 13.1	6.18	2 500 ~ 14 000	8.300
	大亚湾—阳江口	7	0.07 ~ 3.06	2.52	0.10 ~ 0.77	0.36	4.31 ~ 7.10	5.87	2 770 ~ 12 510	9.300
南海	北部湾	2	2.40 ~ 4.40	3.40	0.04 ~ 0.05	0.05	4.20 ~ 5.20	4.70	10 200 ~ 11 900	11 050
	小 计	9	0.07 ~ 4.40	2.71	0.04 ~ 0.77	0.28	4.20 ~ 7.10	5.62	2770 ~ 12510	9.690
	合 计	55	0.07 ~ 5.20	2.21	0.01 ~ 5.92	0.53	1.60 ~ 46.0	11.7	2 500 ~ 21 600	10 320

1977 年和 1980 年,对黄海、渤海以及一些河口区铀含量进行了研究,发现渤海湾西部和南黄海北部溶解态铀分布比较均匀,近于大洋中溶解 U 含量,但渤海湾西部,颗粒态 U 含量较高,且颗粒态 U 和颗粒态钍的含量呈正相关。

1978 年 7 ~ 8 月,李培泉等对 $26^{\circ}30' \sim 33^{\circ}\text{N}$, $123^{\circ} \sim 129^{\circ}\text{E}$ 之间的广阔海域进行了大面积调查,共选站位置 22 个,分表、中、底三层取样,采用分光光度法,较系统地研究了东海大陆架海水中铀的分布规律,获得以下主要结果:①东海陆架海水铀的含量基本上保持均匀分布的特点,其值约为 $3 \mu\text{g/L}$,说明铀主要以离子状态形式存在,大洋水在该区占主导地位;②表层水 U 的水平分布也是比较均匀,但由于长江水的影响而使相当大的海区铀含量偏低和波动,夏季这种影响可能达到 123°E 以远的海区;③铀的垂直分布比较均匀;④底层水中铀含量的分布不够均匀,主要受沉积物类型和悬浮体的铀含量等因素影响;⑤东海陆架海水铀的停留时间为 1.1 a。

徐丽君等(1987)研究了黄河口 U 的地球化学异常,发现:①黄河口内水中铀浓度较高,一般为 $5 \sim 6 \mu\text{g/L}$,最高约可达 $9 \mu\text{g/L}$,高于世界主要河流的铀浓度;②黄河口水中铀浓度与盐度成反比;③黄河口水中铀浓度变化与季节及河口水文条件有关;④黄河口水中铀浓度出现最高值与悬浮物中铀浓度出现最低值,显示出河口站水中含铀悬浮物具有较明显的解吸作用。

周仲怀等(1988)研究了莱州湾沿岸地下浓缩海水的铀浓度异常,发现地下浓缩海水中铀、钍等元素的浓度特高,最高的 U 浓度比海水高 30 余倍,达到约 $100 \mu\text{g/L}$,钍浓度也比海水高约 17 倍,达到 $7 \mu\text{g/L}$,像这种类型的地下浓缩海水中的异常现象,在国内外都是不多见的。

1992 年,在“南海东北部海区环流‘配合性’合作调查研究”中,黄奕普等在巴士海峡(断面 4)和珠江口(断面 10 和断面 11)的 18 个测站采集了 27 份表层和不同深度的水样,实测其铀浓度和同位素组成,结果表明:表层海水中 U 的浓度介于 $2.79 \sim 3.20 \mu\text{g/L}$,位于巴士海峡的断面平均 U 浓度 $2.9 \mu\text{g/L}$,两个断面的 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}}$ ①平均约 1.14,显示了表层水中 U 分布的均匀性。位于巴士海峡靠近台湾南岸的 26 号站(采水深度达 2 600 m)和珠江口断面上的 82 号站(采水深度 240 m)的深度分布研究指出, U 的垂直分布亦是均匀的,唯一的例外是 26 号——100 m 层, U 浓度高达 $3.84 \pm 0.09 \mu\text{g/L}$,比周围水体的 U 浓度高,这从一个侧面佐证了高盐黑潮水对南海的入侵(尽管其程度很有限)。统计分析得出,

① A. R. 即活度比(Activity Ratio)。

U/S 比值为 $(8.72 \pm 0.05) \times 10^{-8} \text{ m/m}$ 。珠江口水体的 S 从 10.371 增至 34.054, 相应的 U 浓度从 0.98 增至 $3.0 \mu\text{g/L}$, 但 U 的同位素组成基本不变, $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}}$ 为 1.13 ± 0.05 , 与 Ku 等对采自世界各大洋的 63 份水样测出的 1.14 ± 0.03 非常吻合。

此前, 刘韶等(1984)也曾南海东北部作过类似的研究, 他们在 5 个测站采集了 8 份水样(最深 90 m), 给出海水平均盐度为 33.956, 平均 U 含量为 $(3.34 \pm 0.20) \mu\text{g/L}$, $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}}$ 为 1.15 ± 0.06 , 而 U/S 比值为 $(9.60 \pm 0.57) \times 10^{-8}$ 。

在《八五南沙群岛及邻近海区综合科学考察》中, 黄奕普等(1996)对南沙海域的 ^{238}U 、 ^{234}U 进行了较系统、深入的研究, 嗣后, 陈敏等(1997)又对南海东北部、南沙海域和厦门湾的 U 同位素作了详细的研究, 给出表 2 和表 3 的主要研究结果, 可见南沙海域与南海东北部水体中 ^{238}U 的浓度及 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}}$ 均呈均匀分布(不管是水平或垂直方向上), 将 88 份水样结果进行平均可得南海水体中 ^{238}U 浓度为 $3.790 \times 10^{-2} \text{ Bq/L}$, $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}} = 1.13 \pm 0.01$, 与世界大洋水的数值相吻合。厦门湾塔角附近海域水体中 ^{238}U 含量明显高于南海水域, 尽管高、低潮时盐度存在着差异, 但 ^{238}U 浓度并未呈现相应的变化, 表明该海域有可能存在铀的附加来源。4 个研究海区溶解态 U/S 此值的大小顺序为: 厦门湾塔角附近海域 > 九龙江河口区 > 南沙海域 $\approx$ 南海东北部海域。

1.1.2 水中 ^{238}U 、 ^{234}U 在海洋学上的应用

基于 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 不平衡的测年法广泛应用于深海沉积物、大洋锰结核以及珊瑚礁等的沉积动力学的研究, 而 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡在真光层的颗粒动力学以及海洋新生产力研究中获得广泛应用。

表 2 4 个研究海区 ^{238}U 的放射性比活度与 $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}}$ 比较

研究海区	采样季节与潮位	样品数	盐度		^{238}U 比度 ($\times 10^{-2} \text{ Bq/L}$)		$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_{\text{A.R.}}$	
			变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值
南沙海域	冬季	22	32.043 ~ 34.605	33.828	3.213 ~ 3.942	3.630 ± 0.028	1.09 ~ 1.18	1.14 ± 0.01
	秋季	34	32.732 ~ 34.638	34.040	3.377 ~ 4.333	3.895 ± 0.032	1.08 ~ 1.18	1.13 ± 0.01
南海东北部	秋季	32	33.157 ~ 34.755	34.219	3.383 ~ 4.158	3.815 ± 0.040	1.02 ~ 1.24	1.12 ± 0.01
厦门湾	所有样品	30	30.083 ~ 34.269	32.992	3.468 ~ 5.425	4.260 ± 0.033	0.96 ~ 1.26	1.14 ± 0.01
塔角附近海域	高潮	10	30.106 ~ 34.269	33.223	3.802 ~ 4.495	4.098 ± 0.047	1.08 ~ 1.22	1.16 ± 0.01
	低潮	10	30.083 ~ 34.138	32.297	3.468 ~ 5.197	4.203 ± 0.047	0.96 ~ 1.19	1.11 ± 0.01
九龙江河口区	丰、枯水期	22	0 ~ 31.75	14.022	0.097 ~ 3.855	1.762 ± 0.017	1.01 ~ 1.31	1.12 ± 0.01

表 3 4 个研究海区水体中 U/S 比的比较

研究海区	南沙海域		南海东北部	厦门湾塔角附近海域	九龙江河口区
	冬季 ($n=22$)	秋季 ($n=34$)	($n=32$)	($n=30$)	($n=22$)
U/S	$(8.48 \pm 0.07) \times 10^{-8}$	$(9.04 \pm 0.08) \times 10^{-8}$	$(8.81 \pm 0.09) \times 10^{-8}$	$(10.20 \pm 0.08) \times 10^{-8}$	$(9.93 \pm 0.09) \times 10^{-8}$
	$(8.83 \pm 0.05) \times 10^{-8}$				

1.2 海水中的 ^{234}Th 、 ^{232}Th 、 ^{230}Th 、 ^{228}Th 和 ^{227}Th

海水中的钍(Th)主要以水合态 $\text{Th}(\text{OH})_n^{(4-n)+}$ 存在,因而它对海洋颗粒物具有很强的亲合力,是典型的颗粒活性元素。在钍的天然放射性同位素中, ^{232}Th ($T_{1/2} = 1.41 \times 10^{10}$ a)、 ^{230}Th ($T_{1/2} = 75\,200$ a)、 ^{228}Th ($T_{1/2} = 1.913$ a)、 ^{234}Th ($T_{1/2} = 24.1$ d)和 ^{227}Th ($T_{1/2} = 18.718$ d)由于具有不同的核性质(半衰期、蜕变类型和能量等),已成为时间尺度不同的诸多海洋学过程理想的天然示踪剂,从而为各国海洋学家所青睐。下面简介中国海水钍同位素的研究概况。

1.2.1 海水中的 ^{232}Th 、 ^{230}Th 、 ^{228}Th 和 ^{227}Th

在1980~1982年进行的中国近海放射性水平调查中,研究者们利用分光光度法实测了渤海、黄海近海、辽宁近海、锦州近海和福建近海海域海水中钍元素的含量(主要为 ^{232}Th 的贡献)。随后进行的全国水体天然放射性核素浓度调查研究(1983~1990),又获得渤海、黄海、东海、南海四大海域近海海水中钍含量的数据(表1)。这些调查提供了海水钍含量的不少数据,但由于分析方法的探测下限较高,数据误差较大。刘韶等(1988)测得珠江口近河端水体悬浮颗粒物(2份样品)中的钍含量分别为 $(11.3 \pm 0.79) \times 10^{-6}$ 和 $(10.42 \pm 0.28) \times 10^{-6}$, $(^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th})_{\text{A.R.}}$ 分别为 0.76 ± 0.07 和 0.75 ± 0.03 ,并据此推算钍随珠江流入海洋的通量为 $4\,935 \sim 9\,870$ t/a。刘广山等(1996)利用 γ 能谱法测得大亚湾海水中 ^{228}Th 的放射性比度,其含量介于 $0.62 \sim 9.61$ Bq/m³之间,平均为 4.33 Bq/m³。至于属于铀系的 ^{227}Th ,由于母体 ^{235}U 丰度很小,海水中 ^{227}Th 浓度极低,国内外均少有专门的研究报道。

1.2.2 海水中的 ^{234}Th 及 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡的应用

表4给出了中国若干海域海水中溶解态、颗粒态 ^{234}Th 放射性比度的变化范围与平均值。由表可见,溶解态、颗粒态 ^{234}Th 的含量均表现出由近岸向外海增加的态势,这是由 ^{234}Th 来源的唯一性—— ^{238}U 的现场衰变所决定的。从近岸至外海海域, ^{234}Th 在溶解相与颗粒相间的分配状况亦呈现规律性变化,在九龙江河口区,海水中80%的 ^{234}Th 以颗粒物状态存在,至厦门湾时,颗粒态 ^{234}Th 占总 ^{234}Th 的比例下降至约占50%,对于性质接近于大洋水的南沙、南海东北部海域,溶解态是 ^{234}Th 的主要存在相(约占70%)。陈敏等(1997)指出,海水中 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡程度也存在明显的空间变化,其中近岸海域 ^{234}Th 的亏损程度远较外海来得大,充分反映出近岸海域 ^{234}Th 清除、迁出作用强于大洋区域的特征。对于大洋水体,真光层中总 ^{234}Th 相对于 ^{238}U 处于亏损状态,而在真光层以深水体,总 ^{234}Th 与 ^{238}U 达到了平衡,但近岸水体则有明显不同的特点,无论溶解态、颗粒态 ^{234}Th 还是总 ^{234}Th ,相对于与 ^{238}U 的平衡值均是不足的,且亏损程度明显比大洋水来得大。需要指出的是,在开阔大洋的某些区域,由于颗粒物水平运移、浮游植物垂直分层现象等的影响,真光层以深某些层位亦会表现出 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡的特征。

利用上述实测的诸多数据,研究者们将 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡应用于以下几方面的海洋学研究中。

(1)输出生产力(即从真光层输出的POC通量)的估算:黄奕普等(1996)首次利用 ^{234}Th 的不可逆箱式清除模型求得颗粒态 ^{234}Th 迁出通量,结合POC含量计算出南沙海域冬季某一站位的输出生产力(以C计)为 19.3 mmol/(m²·d);南沙、南海东北部海域输出生产力介于 $3.2 \sim 38.4$ mmol/(m²·d)之间,且呈现季节变化,厦门湾塔角附近海域POC输出通量平

均为 $16.0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 呈现周日变化特征; 陈飞舟(1997)利用垂直集成采样法获得南海北部海域输出生产力的空间分布图像, 为输出生产力的大面积、准同步研究提供了成功的范例。

(2) 真光层层化结构的研究结果表明, 真光层的层化结构存在空间变化, 某些区域呈现“层化的双层结构”, 而某些区域真光层 ^{234}Th 的清除、迁出情况更为复杂, 真光层的颗粒动力学图像在不同的海洋学区域、不同的浮游生物活动阶段有较大差别。

(3) 颗粒活性核(元)素固/液界面分配机制的研究: 已发现 ^{234}Th 存在“颗粒物浓度效应”, 即随着悬浮颗粒物浓度的增加, ^{234}Th 的条件分配系数不断降低, 对此进行的理论分析表明, 胶体在其中起着重要的作用。胶体浓度与悬浮颗粒物浓度之间的关系可能为: $C_c = f(\text{TSM}^{0.59})$ 。

(4) 近岸海域颗粒活性污染物归宿的研究: 采用条件分配系数 K_d 作为量度污染物颗粒活性强弱的基准, 结合 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡确定的颗粒物停留时间以及水体的停留时间, 建立了一个简单的模型, 用于预测具有不同 K_d 值的污染物在厦门湾的归宿, 确定了某一污染物进入该海域沉积物与离开该海域进入外海之相对份额。

表 4 中国若干海域海水中溶解态、颗粒态 ^{234}Th 的放射性比度

研究海域	样品数	溶解态 ^{234}Th (Bq/m^3)		颗粒态 ^{234}Th (Bq/m^3)		研究者
		变化范围	平均值	变化范围	平均值	
南沙群岛海域	56	4.9 ~ 42.4	22.5	0.7 ~ 29.0	10.9	陈敏(1996)
南海东北部海域	32	9.3 ~ 38.2	22.8	3.9 ~ 29.0	10.8	陈敏(1996)
南海北部海域	18	14.3 ~ 28.2	23.3	4.1 ~ 13.2	7.9	陈飞舟(1997)
厦门湾西港海域	20	2.5 ~ 7.5	4.7	6.7 ~ 16.7	11.7	陈飞舟(1997)
厦门湾塔角附近海域	30	0.6 ~ 12.2	4.8	1.2 ~ 18.1	5.8	陈敏(1996)
厦门湾上屿附近海域	30	0.8 ~ 4.0	2.0	1.9 ~ 5.6	3.5	陈飞舟(1997)
九龙江河口区	22	0 ~ 3.2	1.2	1.7 ~ 10.0	4.9	陈敏(1996)

(5) 其他海洋学信息的揭示: 陈敏等(1996)发现南沙群岛北康暗沙附近海域 ($^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$)_{A.R.} 的垂直分布呈三层区域分布, 其中 ^{234}Th 的两个亏损区分别对应于光合色素两个极大值出现的区域, 反映了两类浮游植物聚集区域的差别; 陈飞舟(1997)描绘出厦门湾上屿附近海域 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡的时间演化图像, 指出生物活动和沉积物再悬浮作用均对 ^{234}Th 清除、迁出起重要作用; 蔡平等(1996)研究了九龙江口水体中 ^{234}Th 的地球化学行为, 指出 ^{234}Th 呈现非保守行为, 存在着快速的清除、迁出作用。

综上所述, 中国对海水中钍同位素的研究仍很不充分, 远不如国外广泛和深入, 其中关于海水中 ^{232}Th 、 ^{230}Th 、 ^{228}Th 的研究仅有零星的数据报道。将它们应用于海洋学过程的示踪研究更是一片空白。最近几年, 厦门大学同位素海洋化学研究组广泛地开展了海水中 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 不平衡的研究, 获得了一系列有价值的成果, 为推动我国同位素海洋化学的深入研究打下一定的基础。

1.3 海水中的 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{224}Ra

海水中含有 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{224}Ra 和 ^{223}Ra , 前者属于 $(4n+2)$ 天然放射系(铀系), 后者属于