

刘广山, 门武, 纪丽红等. 基于镭同位素分布的黄海和东海垂直混合速率计算. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1976~1984, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.024

Liu G S, Men W, Ji L H, et al. Vertical mixing rate evaluation based on radium isotope distributions of Yellow Sea and East China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1976~1984, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.024

基于镭同位素分布的黄海和东海垂直混合速率计算

刘广山¹, 门武², 纪丽红¹

1 近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门大学海洋与环境学院, 厦门 361005

2 国家海洋局大气化学与全球变化重点实验室 第三海洋研究所, 厦门 361005

摘要 在黄海和东海采样测定了水体中的镭同位素分布, 用平流扩散模型描述镭同位素分布, 最小二乘方法计算了垂直涡动扩散系数和上升流或下降流流速. 结果给出北黄海中部、南黄海中部、浙江沿岸和台湾北部海域存在上升流, 流速分别为 $0.46 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.17 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.02 \times 10^{-3} \sim 3.04 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.06 \times 10^{-3} \sim 2.51 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 北黄海中部和东海东北部存在下降流, 流速分别为 $-2.30 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-0.61 \times 10^{-3} \sim -2.10 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 计算同时给出的垂直涡动扩散系数为 $5.84 \sim 48.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $22.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 北黄海和浙江沿岸上升流流速与文献的结果一致; 北黄海中部存在下降流与文献的结论一致. 本研究结果与文献结果一致是对所建立的方法的肯定, 也是对文献研究结果的支持.

关键词 镭同位素, 涡动扩散, 上升流, 下降流

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.08.024

中图分类号 P738

收稿日期 2009-11-25, 2010-07-16 收修定稿

Vertical mixing rate evaluation based on radium isotope distributions of Yellow Sea and East China Sea

LIU Guang-Shan¹, MEN Wu², JI Li-Hong¹

1 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

2 Key Laboratory of Global Change and Marine-Atmospheric Chemistry, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China

Abstract Radium isotopes in the seawater of the Yellow Sea and the East China Sea (YSECS) were measured and their vertical distributions were described using an advection-diffusion model. Vertical eddy diffusion coefficients and advection velocities in the YSECS were calculated by fitting the distributions of radium isotopes in the seawater using least-square method. Results showed that upwellings occur in the middle of Northern and Southern Yellow Sea, coastal zone of Zhejiang, and Northeast of Taiwan. The current rates of upwellings are $0.46 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.17 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $2.02 \times 10^{-3} \sim 3.04 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $1.06 \times 10^{-3} \sim 2.51 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ for above four sea areas respectively. Downwellings are indicated in the middle of Northern Yellow Sea and Northeastern East China Sea and the current rates are $-2.30 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ and $-0.61 \times 10^{-3} \sim -2.10 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ respectively. The vertical eddy diffusion coefficients were obtained as $5.84 \sim 48.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ with an average of $22.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ from the same calculation. Upwelling velocity of Northern Yellow Sea and coastal zone of Zhejiang given by this

基金项目 973 计划项目 (2005CB422305, 2006CB400602) 资助.

作者简介 刘广山, 男, 1959 年生, 教授, 1986 年毕业于兰州大学, 现从事同位素海洋学研究. E-mail: lgshan@xmu.edu.cn

study is in agreement with the results of literatures, and downwelling in Northern Yellow Sea is also supported by the literature. The agreement of the results obtained in this study with that of literatures not only confirms previous inference about upwelling distribution in the Yellow Sea and East China Sea, but also affirms the validity of our method.

Keywords Radium isotope, Eddy diffusion, Upwelling, Downwelling

1 引言

我们用垂直方向的平流速度和涡动扩散系数表示海洋的垂直混合速率. 海洋中溶解态物质通过涡动扩散和平流从高浓度水体向低浓度水体, 或从源地向远离源地的方向输运. 海洋深层水富含营养盐, 上升流从深层向上层涌升把富含营养盐的深层水带到上层, 使上层水中因生物摄食消耗的营养盐得到不断补充, 因此大多数鱼场处于上升流海区^[1]. 另外, 由于涡动混合, 深层海水的营养盐也通过涡动扩散向上层水输运. 海洋生物地球化学研究海洋中化学元素, 特别是生源要素的分布和形成这种分布的控制过程^[2]. 人们想知道底层营养盐向上层水的输运通量是多少, 能支持多大份额的生产力^[3]. 所以上升流和涡动扩散的研究不仅是物理海洋学也是海洋生物地球化学重要的研究课题. 但是由于上升流流速低, 流速一般在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.01 \sim 1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$), 流向又在垂直方向, 至今仍没有可行的、且可信的测量上升流流速的方法. 人们通常通过理论计算或从温盐分布进行估算, 或用数值模拟方法估算上升流的流速^[4-9].

海洋中的镭同位素主要来源于海底沉积物的释出, 而且主要以溶解态的形式存在于海水中, 一旦进入水体, 则随水体混合或海流向远离源地的方向输运^[10]. 水体中镭同位素的分布可以用来估算海洋水体的涡动扩散系数和海流速度. 由于其来源于海底沉积物, 所以又以示踪上升流和垂直涡动扩散最为合适^[11]. 天然存在四种镭同位素, ^{223}Ra 、 ^{224}Ra 、 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra , 具有不同的半衰期, 所以被认为可以用来研究不同时间尺度的海洋学过程. ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 半衰期分别为 11.43d 和 3.66d, 适合于垂直方向距沉积物水界面几十米和水平方向近岸几十千米距离空间尺度的海洋学过程研究; ^{228}Ra 半衰期 5.75a, 适合于海盆尺度海洋混合过程研究^[12]; ^{226}Ra 半衰期 1600a, 被认为适合于大洋环流研究^[10,13]. 早在 1950 年代, Koczy 就提出用 ^{226}Ra 作示踪剂研究海洋学问题, 并利用 ^{226}Ra 的分布估算了大西洋深海水的垂直

涡动扩散系数^[14]. Ku 等(1980)曾用 ^{226}Ra 作为示踪剂, 研究了东南太平洋深层水的涡动扩散系数与上升流流速^[11], Huh 和 Ku 用 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 研究了东北太平洋的涡动扩散系数和上升流流速. 由于近岸海洋学过程时间短, ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 被认为是合适的示踪核素, 而在这样一个时间尺度内, ^{228}Ra 和 ^{226}Ra 的活度变化不明显^[15]. 目前还没见到用 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 计算包含平流的垂直混合研究的报道.

黄海中部和浙江近海存在上升流. 多年来多个研究者对该海域的上升流的形成机制进行了研究, 并对上升流的流速进行了估算^[4,6,16-20]. 胡敦欣等(2001)曾勾画出黄海和东海的上升流区, 可分为北黄海、南黄海、东海东北部和浙江沿岸四个上升流区^[21]. 本研究从黄海和东海的以上四个上升流海区中部采样, 测定了镭同位素 ^{224}Ra 、 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra , 基于三种镭同位素分布计算了上升流的流速和垂直涡动扩散系数, 与理论和数值计算结果进行了比较.

2 海洋中镭同位素的源与输运模式

研究发现, 海洋中的天然放射系核素可以分为两组. 一组是颗粒活性核素, 包括钍、铅、钷和镤的同位素; 另一组是非颗粒活性核素, 包括铀、镭和氡的同位素. 颗粒活性核素易吸附在颗粒物上随颗粒物从水体中迁出, 向下层水输运, 最后可能沉积在沉积物中; 非颗粒活性核素进入水体后则主要通过水体的混合和平流向异地输运^[13].

通常人们称溶解在海水中的元素为溶解态的, 而吸附在颗粒物上的称为颗粒态的, 颗粒物吸附溶解态元素的过程称之为清除, 而颗粒物下沉从上层水向下层水的运移或向沉积物沉积的过程叫迁出. 综合颗粒态和溶解态的研究, 一维情况下, 可以将海水中溶解态的放射性核素浓度变化用以下方程描述^[11]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla A) - \nabla \cdot (VA) - \lambda A + I - J, \quad (1)$$

式(1)中, A 是核素浓度, K 是涡动扩散系数, V 是平流速度; I 为源通量, 例如颗粒态的解吸输入, 或大

气沉降输入,或母体衰变产生; J 是汇通量,比如颗粒物清除, Ku 等(1980)文章的方程式中 I 和 J 是一项; λ 是衰变常数. 最常见的简化处理是假设涡动扩散系数 K 和平流速度 V 为常数,不存在颗粒物的解析与清除,则海水中的放射性核素活度 A 随时间 t 和离开源地距离 x 的变化可以简化为以下质量平衡方程^[22]:

$$\frac{dA}{dt} = K \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - V \frac{\partial A}{\partial x} - \lambda A. \quad (2)$$

对于镭同位素,除河口之外,经常这样处理. 稳态条件下, $\frac{dA}{dt} = 0$, 所以有

$$K \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - V \frac{\partial A}{\partial x} - \lambda A = 0. \quad (3)$$

该方程的解为:

$$A = A_0 e^{-\eta x}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\sqrt{V^2 + 4K\lambda} - V}{2K}. \quad (5)$$

在忽略平流的条件下,即仅存在涡动扩散,例如,水体中的镭同位素垂直分布仅受垂直涡动扩散的影响,在稳态条件下式(3)可以简化为:

$$K \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = \lambda A. \quad (6)$$

方程(6)的解为:

$$A = A_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{K}} \cdot x}. \quad (7)$$

很多研究者忽略平流项,用式(7)拟合实验数据,对水体的涡动扩散进行估算^[12,22]. 一些研究者用方程(4)拟合实验数据估算水体的垂直涡动扩散系数和上升流速度^[11,15].

3 黄海和东海镭同位素的垂直分布

分别于 2006 年 7 月(夏季航次)和 2007 年 1 月(冬季航次)进行了样品采集,用射气法测量了²²⁴Ra、²²⁶Ra 和²²⁸Ra^[23]. 本文选择其中可能存在上升流的海区的站位,站位分布如图 1 示. 图 2 为三种镭同位素的垂直分布. 图 2 和下文中的站位编号前的 S 表示夏季航次, W 表示冬季航次. 结果给出黄海(不包括 406 和 408 站)三种镭同位素²²⁴Ra、²²⁶Ra 和²²⁸Ra 的浓度分别为 0.18~3.48 Bq · m⁻³、1.79~3.82 Bq · m⁻³ 和 3.26~15.8 Bq · m⁻³; 东海(包括 406 和 408 站)三种镭同位素的浓度分别为 0.12~1.63 Bq · m⁻³、1.04~3.15 Bq · m⁻³ 和 1.09~7.65 Bq · m⁻³. 黄海水体中比东海的水体中有高的镭同位素含量,从图 2 中 205~308 站的横坐标比处于东海的

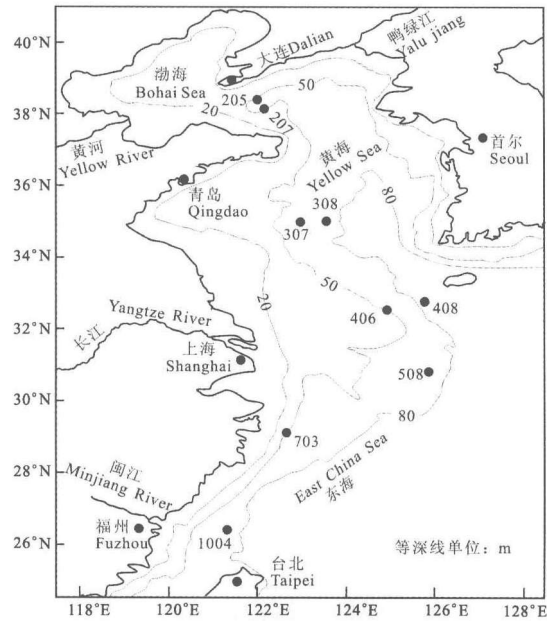


图 1 采样站位

Fig. 1 Sampling stations

站位刻度范围大也可确认这一点.

全部站位的²²⁴Ra 均表现为表层低、底层高的浓度变化趋势,但大部分不是理想的指数分布形式. 与²²⁴Ra 分布不同的是,大部分²²⁶Ra 近似为均匀分布. 在底层随离开沉积物水界面距离增加,²²⁸Ra 浓度呈减小趋势. 定性看,大部分站位三种镭同位素的分布是正常的,一些站位表层水含有高的²²⁶Ra 和²²⁸Ra 浓度,可能是侧向输运形成的,相关的问题将另文讨论.

4 上升流速度和垂直涡动扩散系数的计算

忽略平流时,用式(7)拟合实验数据可以直接得到涡动扩散系数. 对平流不可忽略的海区,整理式(5)为如下形式:

$$K\eta^2 + V\eta - \lambda = 0, \quad (8)$$

式(8)有两个未知数 K 和 V , 所以如果有两种以上的示踪剂得到两个以上的 η 值, 将其代入式(8)就可以得到 K 和 V 值. 用下角标 1、2 和 3 分别表示²²⁴Ra、²²⁶Ra 和²²⁸Ra, 则它们的衰变常数为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 拟合²²⁴Ra、²²⁶Ra 和²²⁸Ra 实验数据得到的 η 值分别为 η_1 、 η_2 和 η_3 , 代入式(8), 得到以下方程组:

$$\begin{cases} K\eta_1^2 + V\eta_1 = \lambda_1, \\ K\eta_2^2 + V\eta_2 = \lambda_2, \\ K\eta_3^2 + V\eta_3 = \lambda_3. \end{cases} \quad (9)$$

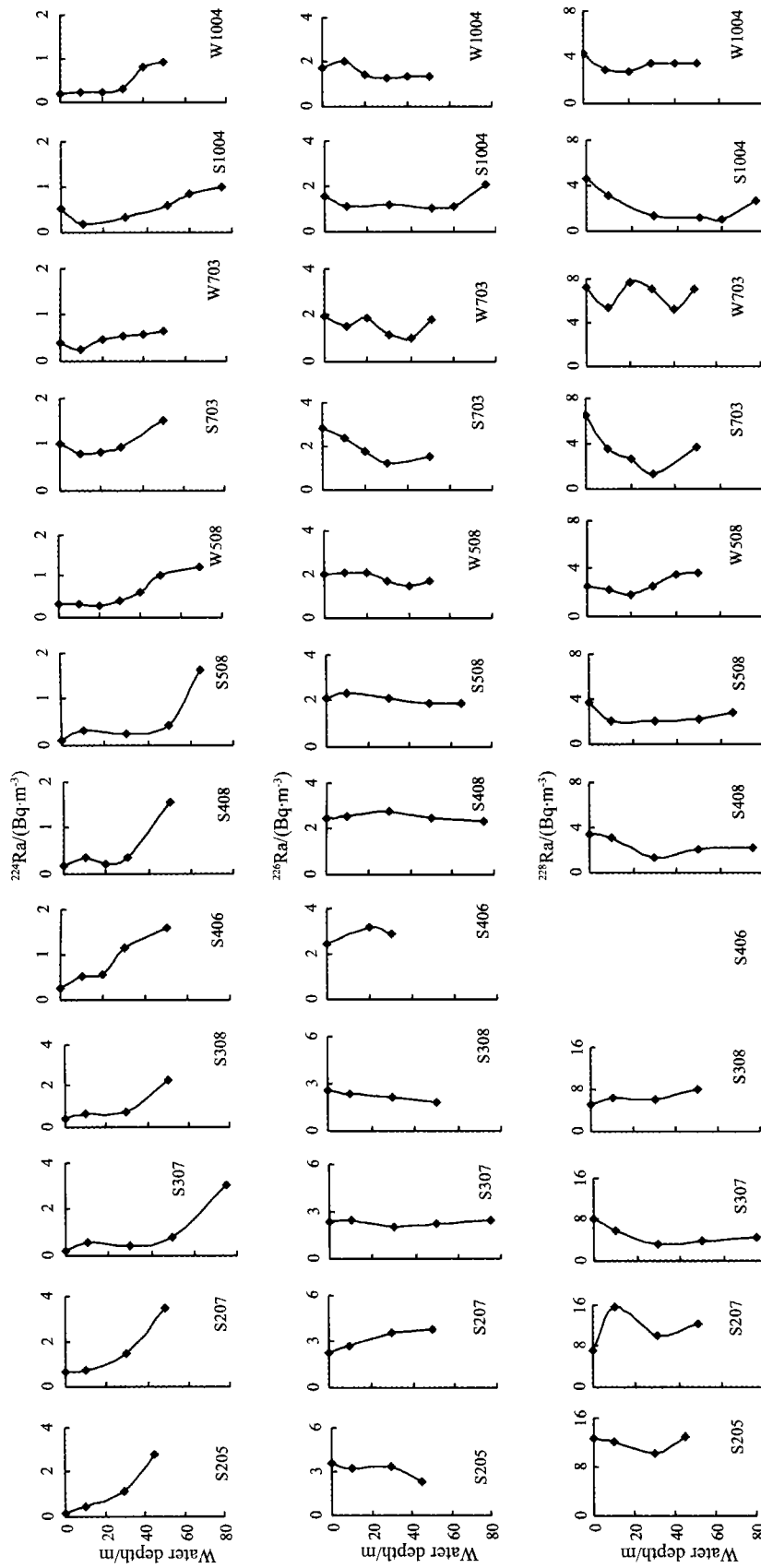


图 2 三种镭同位素的分布
Fig. 2 The distributions of three radium isotopes

对每一个站位,有一组 $(\eta_i^2, \eta_i, \lambda_i), i = 1, 2, 3$. 有 3 个方程组成一个方程组. 按最小二乘法原理,最佳 K 和 V 值将使以下偏差之和达到最小.

$$\sum_{i=1}^3 e_i^2 = \sum_{i=1}^3 [\lambda_i - (K\eta_i^2 + V\eta_i)]^2, \quad (10)$$

对 $\sum_{i=1}^n e_i^2$ 分别求关于 K 和 V 的偏导数,并令之为零,得到以下方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 \eta_i^2 \lambda_i = \sum_{i=1}^3 K \eta_i^4 + \sum_{i=1}^n V \eta_i^3, \\ \sum_{i=1}^3 \eta_i \lambda_i = \sum_{i=1}^3 K \eta_i^3 + \sum_{i=1}^n V \eta_i^2. \end{cases} \quad (11)$$

方程(11)的解为:

$$\begin{bmatrix} K \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 \eta_i^4 & \sum_{i=1}^3 \eta_i^3 \\ \sum_{i=1}^3 \eta_i^3 & \sum_{i=1}^3 \eta_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 \eta_i^2 \lambda_i \\ \sum_{i=1}^3 \eta_i \lambda_i \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由半衰期计算得²²⁴Ra、²²⁶Ra 和 ²²⁸Ra 的衰变常数分别为 0.189d^{-1} 、 $1.19 \times 10^{-6}\text{d}^{-1}$ 和 $3.30 \times 10^{-4}\text{d}^{-1}$. 表 1 是利用测定得到的三种镭同位素数据,用式(4)拟合得到的 η 值.

将衰变常数和各站的 η_1 、 η_2 和 η_3 值代入式(12),计算得到的 K 和 V 值列于表 1 中,表中的上升流速度一列的负值表示为下降流. 下文中凡下降流则在数值前加负号,以示区别. 表中的最后一列是忽略平流

由式(7)拟合²²⁴Ra 分布数据得到的涡动扩散系数.

我们的计算结果表明,在北黄海中(205 站)、南黄海中(307 和 308 站)、浙江沿岸(703 站)和台湾北部(1004 站)海域存在上升流,北黄海中(207 站)和东海东北部(406、408 和 508 站)存在下降流. 定性上与文献给出的这些海区存在上升流和下降流的结果一致^[1,8,20,21].

结果给出研究海区上升流流速为 $0.17 \times 10^{-3} \sim 3.04 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,其中北黄海中为 $0.46 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,南黄海中为 $0.17 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,浙江沿岸为 $2.02 \times 10^{-3} \sim 3.04 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,台湾北部海区为 $1.06 \times 10^{-3} \sim 2.51 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 下降流流速为 $-0.61 \times 10^{-3} \sim -2.30 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,其中北黄海中为 $-2.30 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,东海东北部为 $-0.61 \times 10^{-3} \sim -2.10 \times 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

计算同时给出的垂直涡动扩散系数为 $5.84 \sim 48.2\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $22.3\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. S205 和 W1004 有较低的涡动扩散系数值;W508 和 W703 有高的涡动扩散系数值. 除去这四个站外,涡动扩散系数的平均值为 $21.0\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 忽略平流,由²²⁴Ra 的垂直分布数据计算得到的垂直涡动扩散系数(表 1 中最后一列 K')范围值为 $6.3 \sim 79.5\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $26.9\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 从数据上看,本文方法得到的更多的垂直涡动扩散系数的数据比忽略平流得到的数据接近平均值.

表 1 上升流速度和涡动扩散系数的计算结果

Table 1 The results calculated of upwelling velocities and eddy diffusion coefficients

海区	站位 编号	纬度 /(°N)	经度 /(°E)	航次	站位 水深/m	η_1	η_2	η_3	K /($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	V /($10^{-3}\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	K' /($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
北黄海中 部	S205	38.42	122.01	夏季	49	0.0574	-0.00793	0.0167	5.84	0.46	6.3
	S207	38.11	122.21	夏季	36	0.0350	0.0105	0.00541	24.2	-2.30	16.8
南黄海中 部	S307	35.00	123.00	夏季	78	0.0303	0.00014	0.00701	19.2	1.39	22.4
	S308	35.01	123.55	夏季	78	0.0331	-0.00657	0.00703	19.4	0.17	18.8
浙江沿 岸	S703	29.10	122.64	夏季	55	0.0161	-0.0143	0.0173	18.8	3.04	79.5
	W703			冬季	53	0.0220	-0.00573	-0.00093	36.0	2.02	42.6
东海东 北部	S406	32.53	124.94	夏季	59	0.0360	0.00607		20.3	-1.23	15.9
	S408	32.83	125.74	夏季	94	0.0388	-0.00088	0.0108	19.9	-2.10	13.7
东海东 北部	S508	30.84	125.86	夏季	75	0.0316	-0.00272	0.00495	23.8	-0.61	20.6
	W508			冬季	76	0.0229	-0.00576	0.0167	48.2	-1.87	39.3
台湾北 部	S1004	26.38	121.30	夏季	79	0.0260	0.00211	0.0144	22.7	2.51	30.5
	W1004			冬季	80	0.0349	-0.00712	0.00623	14.9	1.06	16.9
范围值									5.84~48.2	-2.30~3.04	6.3~79.5
平均值									22.3		26.9

表 2 一些文献给出的黄海和东海的上升流与下降流流速与本文结果的对比

Table 2 The velocity comparison of upwelling and downwelling between values from literatures and this study

海域	$V/(10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$		方法	研究者
	上升流	下降流		
北黄海	<0.68		理论计算	袁业立等,1993 ^[6]
北黄海	~0.5		理论计算	李惠卿等,1992 ^[19]
北黄海	0~0.4	0~-0.8	数值诊断计算	赵保仁,1996 ^[20]
北黄海中部	0.46	-2.30	²²⁴ Ra/ ²²⁶ Ra/ ²²⁸ Ra 示踪方法	本文
南黄海中部	0.17~1.39		²²⁴ Ra/ ²²⁶ Ra/ ²²⁸ Ra 示踪方法	本文
浙江沿岸	0.4~6		理论计算	潘玉球等,1985 ^[16]
浙江沿岸	2,3		溶解氧分布	林建平,1985 ^[5]
浙江沿岸	5.3~11.6		理论计算	胡敦欣等,1980 ^[4]
舟山海域	1.06~3.21		数值模拟	黄祖珂等,1996 ^[18]
浙中沿岸	0.98~4.07		数值模拟	
浙江沿岸	2.02~3.04		²²⁴ Ra/ ²²⁶ Ra/ ²²⁸ Ra 示踪方法	本文
闽北沿岸	0.90~3.72		数值模拟	黄祖珂等,1996 ^[18]
东海东北部		-0.61~-2.10	²²⁴ Ra/ ²²⁶ Ra/ ²²⁸ Ra 示踪方法	本文
台湾北部	1.06~2.51		²²⁴ Ra/ ²²⁶ Ra/ ²²⁸ Ra 示踪方法	本文
范围值	0~11.6	0~-2.30		

5 讨 论

表 2 是一些文献报道的中国近海上升流的流速,一些方法的名称是本文作者加的.文献给出中国近岸海区上升流流速为 $0 \sim 11.6 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 本文结果在该范围内.

5.1 北黄海的垂直混合

很多黄海的物理海洋学研究围绕黄海冷水团及其影响进行^[6,20,24,25],尤其以研究北黄海大连一成山角断面的文章为多,本文的 205 和 207 站就在该断面上.从表 2 可以看出,文献给出的北黄海中部上升流的流速非常接近,本文得到的流速也与之一致.但是很少文献给出下降流,仅赵保仁计算出下降流的流速为 $0 \sim -0.8 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[20],与本文的差异比较明显.但是本研究结果支持赵保仁的冷水团中部存在下降流的结论.

本文计算使用的是从表层到底层的全水层数据,如同对整个水层取了平均,所以不象文献的结果那样给出上层、下层或薄壳层的流速.例如苏纪兰等的研究结果认为黄海冷水团的环流分为上下两个环,上环中心为上升流,流较弱;下环中心为下降流,流较强.本文也给出下降流的流强大于上升流,与苏纪兰等的意义不完全相同,但环中心下降流较强的

结论是一致的.

北黄海相距很近的两个站位,不仅垂直方向的平流差异很大,而且垂直涡动扩散系数差异也很大. S205 站的垂直涡动扩散系数是全部研究站位中最低的,说明北黄海面积虽小,但水文结构却很复杂.

5.2 南黄海的垂直混合

从面积上看,南黄海要比北黄海大得多,南黄海的海洋学研究也比北黄海广泛.但是黄海垂直混合的研究大都以北黄海大连一成山角断面为例^[6,19,20,24,25],南黄海的相关研究没有对垂直平流给出量的表示.本文在南黄海的两个站位位于 35°N ,计算结果给出存在上升流,而且流速差别较大,类比北黄海的情况,加上较大差异的上升流速度,可以推测南黄海也存在下降流.文献^[26,27]给出,在黄海中部的温度分布中存在两个低温中心,两个低温中心之间的水体有稍高的温度和盐度.赵保仁(1987)认为黄海冷水团区边界存在上升流,特别是陆架锋区,上升流现象更加明显^[28].但文献^[26,27]对南黄海中部是否存在垂直平流却没有明确论断.本研究给出南黄海两个站位的垂直涡动扩散系数非常接近.

5.3 浙江沿岸的垂直混合

浙江近海北部邻接长江口,以长江冲淡水为本体的江浙沿岸水随长江径流量的季节变化对本区产生影响.南部有高温、次高盐的台湾暖流水流经本

区,使得海水处于强烈交换和更新状态.研究海域夏季盛行西南风,冬季盛行东北风,东亚季风对海区有很大的影响.上述各因子共同作用,使得浙江近海呈现出“上升流”、“锋面迁移”、“冲淡水转向”等诸多现象,这是舟山渔场在此形成的基础^[4,16~18,29].对浙江及长江口海域上升流的研究,不仅有助于渔业工作者更好地了解渔场的分布与变化,对进一步认识长江口赤潮等海洋现象也起到一定作用.

毛汉礼等早在 1964 年提出,浙江沿岸存在上升流^[30],后被海洋观测和分析所证实.胡敦欣(1980)等认为黑潮北上余脉沿东海陆架海底的抬升是主要的动力因素^[4];潘玉球等(1985)依据地形上升流理论,分析了浙江沿岸上升流的调查资料,认为台湾暖流经过浙江沿岸海底等深线发散区引起深层海水涌升,同时认为地形和风对浙江沿岸上升流有几乎相同量级的贡献^[16];刘先炳(1991)等认为浙江沿岸上升流按其成因可分为近岸和远岸两个区域,在近岸区风应力对上升流和沿岸锋面的形成有重要的作用,而在远岸区,上升流主要由沿岸向北的台湾暖流诱生^[17].

我们的计算得出该海域上升流流速是多种物理因素共同作用的结果.但从表 2 数值可以看出,本研究给出的上升流速度与大多数文献给出的上升流速度一致.另外本研究结果给出,该海域冬季的垂直涡动扩散系数远高于夏季,几乎是夏季的两倍,而夏季的垂直涡动扩散系数与其他海域水平接近,说明冬季该海区有强的垂直混合.

5.4 东海东北部的垂直混合

东海东北部是多种水团交汇区^[31],而且存在冷涡^[8].各种水团的消长使该海区的水文结构变得复杂多样,而且随时间变化很大.周培强等(1990)的研究给出,在本研究采样的 406 站和 408 站所在海域,出现水温双跃层,而且存在逆温层^[32],乔方利等(2008)认为在该冷涡中心不存在上升流^[8].

本文在该海区的三个采样站位均在冷涡区的边缘,结果均给出存在下降流,与文献结果也不矛盾.该海区冬季的垂直涡动扩散系数也比其他海区高得多.由于本研究站位较少,不能覆盖整个海区,全面的垂直平流情况需要在更多的站位进行采样分析.

5.5 台湾北部海域的垂直混合

台湾北部海域存在上升流^[33~36],但是文献给出的上升流中心大都在本研究 1004 站的东侧.文献认为台湾东北部海域的冷水块是黑潮次表层水涌升的结果^[37],本研究给出的 1004 站表层以下水体²²⁸Ra

虽然具有低的浓度,但还没有低到黑潮水²²⁸Ra 的浓度水平,所以至少不完全是黑潮水的涌升,可能是黑潮水与陆架水混合的结果,其中很大一部分水体可能来自台湾暖流.1984 年进行的东海黑潮试验性调查中的 B 断面的 3 站位与本研究的 1004 站接近,孙湘平等(2002)分析给出上升流在 B 断面 7 号站,位于本研究 1004 站的东侧,但从温度、盐度、溶解氧和磷酸盐的分布看,3 站位也可能存在下层水的涌升^[37].

6 结 论

(1) 建立了用镭同位素分布同时计算上升流速度和垂直涡动扩散系数的方法.计算了北黄海中部、南黄海中部、东海东北部、浙江沿岸和台湾北部海区垂直平流的流速.结果给出北黄海中部、南黄海中部、浙江沿岸和台湾北部海域存在上升流,各海区上升流的流速分别为 $0.46 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.17 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.02 \times 10^{-3} \sim 3.04 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.06 \times 10^{-3} \sim 2.51 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.北黄海中部和东海东北部存在下降流,流速分别为 $-2.30 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-0.61 \times 10^{-3} \sim -2.10 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

(2) 计算同时给出的垂直涡动扩散系数为 $5.84 \sim 48.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $22.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,黄海和东海大部分海区具有非常接近的垂直涡动扩散系数.

(3) 研究结果表明,镭同位素既可用于研究底层水涌升的上升流海区的垂直混合,也可以用于研究局地环流形成的上升流和下降流海区的垂直混合.本研究大多数结果与已有研究结果一致,说明本研究方法可行,也是对文献结果的支持.从时间尺度上看,²²³Ra 和 ²²⁴Ra 更适合研究近岸海域的垂直混合问题,由于本实验室还未建立 ²²³Ra 的测量方法,所以本研究未能同时测量 ²²³Ra,相信如果同时测定 ²²³Ra,会使计算结果更好.

参考文献(References)

- [1] 许建平. 浙江沿岸上升流. 见:中国近海水文. 北京:海洋出版社,2005. 246~249
Xu J P. Upwelling of the coastal zone of Zhejiang. In: Hydrology of China Sea (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2005. 246~249
- [2] Sarmiento J L, Gruber N. Ocean Biogeochemical Dynamics. Princeton: Princeton University Press, 2006. 1~15
- [3] 雷鹏飞. 浙江近海上升流速度及其营养盐通量计算. 海洋与

- 湖沼通报, 1984, 2: 22~26
- Lei P F. Evaluation of upwelling rate and the nutrient flux in the coastal zone of Zhejiang. *Transactions of Oceanology and Limnology* (in Chinese), 1984, 2: 22~26
- [4] 胡敦欣, 吕良洪, 熊庆成等. 关于浙江沿岸上升流的研究. 科学通报, 1980, (3): 131~133
- Hu D X, Lü L H, Xiong Q C, et al. Study on upwelling of coastal zone of Zhejiang. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1980, (3): 131~133
- [5] 林建平. 用溶解氧数据计算浙江沿岸上升流流速. 海洋科学, 1985, 9(1): 24~28
- Lin J P. Calculating the upwelling speed off Zhejiang with concentration of dissolved oxygen. *Marine Sciences* (in Chinese), 1985, 9(1): 24~28
- [6] 袁业立, 李惠卿. 黄海冷水团环流结构及生成机制研究——I. 0 阶解及冷水团的环流结构. 中国科学 B, 1993, 23(1): 93~103
- Yuan Y L, Li H Q. Study on the structure and inducing mechanism of cold water mass of Yellow Sea — I. 0 order solution and circulation structure. *Science of China B* (in Chinese), 1993, 23(1): 93~103
- [7] 庞重光, 胡敦欣, 白志学等. 一种估算陆架上升流流速的新方法. 海洋科学, 2002, 26(8): 67~71
- Pang C G, Hu D X, Bai Z X, et al. A method of evaluating upwelling velocity. *Marine Sciences* (in Chinese), 2002, 26(8): 67~71
- [8] 乔方利, 赵伟, 吕新刚. 东海冷涡上升流的环状结构. 自然科学进展, 2008, 18(6): 674~679
- Qiao F L, Zhao W, Lü X G. Ring structure of cold eddy in the East China Sea. *Advance in Natural Science* (in Chinese), 2008, 18(6): 674~679
- [9] 苏京志, 张人禾. 赤道太平洋近表层上升流的估计. 热带海洋学报, 2008, 27(7): 32~37
- Su J Z, Zhang R H. An estimate of near-surface upwelling in Equatorial Pacific. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2008, 27(7): 32~37
- [10] Krishnaswami S. Uranium-thorium series isotopes in ocean profiles. In: Steele J H, Thorpe S A, Turekian eds. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. San Diego: Academic Press, 2001. 3146~3156
- [11] Ku T L, Huh C A, Chen P S. Meridional distribution of ^{226}Ra in the Eastern Pacific along GEOSECS cruise tracks. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 49: 293~308
- [12] Kaufman A, Trier R, Broecker W S. Distribution of ^{226}Ra in the world ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78: 8827~8848
- [13] Cochran J K. The oceanic chemistry of the uranium and thorium-series nuclides. In: Ivanovich M, Harmon R S, eds. *Uranium-Series Disequilibrium: Application to Earth, Marine and Environmental Science*. Clarendon Press, Oxford, 1992. 334~395
- [14] Koczy F F. Natural radium as a tracer in the ocean. *Proceedings of UN 2nd International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy*. Geneva, 1958. 351~357
- [15] Huh C A, Ku T L. A 2-D section of ^{228}Ra and ^{226}Ra in the Northeast Pacific. *Oceanologia Acta*, 1998, 21(4): 533~542
- [16] 潘玉球, 徐端蓉, 许建平. 浙江沿岸上升流区的锋面结构、变化及其原因. 海洋学报, 1985, 7(4): 401~411
- Pan Y Q, Xu D R, Xu J P. The structure, variation and development of front located coastal upwelling zone of Zhejiang. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1985, 7(4): 401~411
- [17] 刘先炳, 苏纪兰. 浙江沿岸上升流和沿岸锋面的数值研究. 海洋学报, 1991, 13(3): 305~311
- Liu X B, Su J L. A numerical study on coastal upwelling and coastal front off Zhejiang. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1991, 13(3): 305~311
- [18] 黄祖珂, 俞光耀, 罗义勇等. 东海沿岸潮致上升流的数值模拟. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(4): 405~412
- Huang Z K, Yu G Y, Luo Y Y, et al. Numerical modeling of tide-induced upwelling coastal areas of the East China Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 1996, 26(4): 405~412
- [19] 李惠卿, 袁业立. 黄海冷水团热结构及其环流解析研究. 海洋与湖沼, 1992, 23(1): 7~13
- Li H Q, Yuan Y L. Theoretical study on the thermal structure and circulation pattern related to cold water mass of Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1992, 23(1): 7~13
- [20] 赵保仁. 北黄海冷水团环流结构探讨——潮混合锋对环流结构的影响. 海洋与湖沼, 1996, 27(4): 429~436
- Zhao B R. A study of the circulations of the Northern Yellow Sea cold water mass—effects of tidal mixing on them. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1996, 27(4): 429~436
- [21] 胡敦欣, 杨作升. 东海海洋通量关键过程. 北京: 海洋出版社, 2001
- Hu D X, Yang Z S. *Key Processes on Marine Flux of East China Sea* (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2001
- [22] Moore W S. Determining coastal mixing rates using radium isotopes. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 1993~2007
- [23] 门武. 镭同位素示踪的黄海和东海海洋学研究[博士学位论文]. 厦门: 厦门大学海洋系, 2008
- Men W. *The study on the oceanography of the Yellow Sea and East China Sea traced by radium isotopes* [Ph. D. thesis] (in Chinese), Xiamen: Department of Oceanography, Xiamen University, 2008
- [24] 苏纪兰, 黄大吉. 黄海冷水团的环流结构. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 1~7
- Su J L, Huang D J. On the current field associated with the Yellow Sea cold water mass. *Oceanologia et Limnologia Sinica Supplement* (in Chinese), 1995, 26(5): 1~7
- [25] 张书文, 夏长水, 袁业立. 黄海冷水团上升流对叶绿素垂直分

- 布的影响. 海洋科学进展, 2002, **20**(3):9~14
Zhang S W, Xia C S, Yuan Y L. Effect of the upwelling current on the vertical chlorophyll distribution in the Yellow Sea cold water mass. *Advance in Marine Science* (in Chinese), 2002, **20**(3):9~14
- [26] 张启龙, 翁学传, 杨玉玲. 南黄海春季水团分析. 海洋与湖沼, 1996, **27**(4):421~428
Zhang Q L, Weng X C, Yang Y L. Analysis of water masses in the South Yellow Sea in spring. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1996, **27**(4):421~428
- [27] 于非, 张欣志, 兰健等. 南黄海春季水温分布特征的分析. 海洋科学进展, 2005, **23**(3):281~288
Yu F, Zhang X Z, Lan J, et al. Analysis of water temperature distribution characteristics in the Southern Yellow Sea in spring. *Advance in Marine Science* (in Chinese), 2005, **23**(3):281~288
- [28] 赵保仁. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋环流结构的初步研究. 海洋与湖沼, 1987, **18**(3):217~227
Zhao B R. A preliminary study of continental shelf fronts in the western part of Southern Huanghai Sea and circulation structure in the front region of the Huanghai cold water mass. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1987, **18**(3):217~227
- [29] 罗义勇, 俞光耀. 风和台湾暖流引起东海沿岸上升流数值计算. 青岛海洋大学学报, 1998, **28**(4):536~542
Luo Y Y, Yu G Y. Numerical study of wind and TWC - driven upwelling in coastal areas of the East China Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 1998, **28**(4):536~542
- [30] 毛汉礼, 任允武, 万国铭. 应用 T-S 关系定量地分析浅海水团的初步研究. 海洋与湖沼, 1964, **6**(1):1~22
Mao H L, Ren Y W, Wan G M. A preliminary investigation on the application of using T-S diagrams for a quantitative analysis of the water masses in the shallow water area. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1964, **6**(1):1~22
- [31] 孙湘平. 中国近海区域海洋. 北京: 海洋出版社, 2006
Sun X P. *Regional Oceanography of China Sea* (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2006
- [32] 周培强, 孙曰彦, 赵继胜. 长江口、济州岛海域温、盐分布探讨. 青岛海洋大学学报, 1990, **20**(3):49~55
Zhou P Q, Sun Y Y, Zhao J S. A preliminary analysis of temperature and salinity in the sea area near the Yangtze River mouth and Chejudo. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 1990, **20**(3):49~55
- [33] 苏纪兰, 潘玉球. 台湾以北陆架环流动力学初步研究. 海洋学报, 1989, **11**(1):1~14
Su J L, Pan Y Q. A preliminary study on circulation dynamics in the continental shelf area of the North of Taiwan. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1989, **11**(1):1~14
- [34] 孙湘平, 修树孟. 台湾东北海域冷涡的分析. 海洋通报, 1997, **16**(2):1~10
Sun X P, Xiu S M. Analysis on the cold eddies in the sea area Northeast of Taiwan. *Marine Science Bulletin* (in Chinese), 1997, **16**(2):1~10
- [35] 郭炳火, 林葵, 宋万先. 夏季东海南部海水流动的若干问题. 海洋学报, 1985, **7**(2):143~153
Guo B H, Lin K, Song W X. Some problems about sea current of the Southern East China Sea in the summer. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1985, **7**(2):143~153
- [36] 王甜甜, 康建成, 李卫江等. 台湾东北海域冷涡—上升流系统冬、夏季温度三维结构. 热带海洋学报, 2008, **27**(6):6~13
Wang T T, Kang J C, Li W J, et al. Three-dimension temperature structure of cold eddy-upwelling system off northeastern Taiwan island in summer and winter. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2008, **27**(6):6~13
- [37] 孙湘平, 修树孟. 台湾东北海域冷水块的特征. 黄渤海海洋, 2002, **20**(1):1~10
Sun X P, Xiu S M. Characteristics of the cold water body Northeast of Taiwan. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Sea* (in Chinese), 2002, **20**(1):1~10

(本文编辑 胡素芳)