

一种估算陆架上升流流速的新方法^{*}

庞重光¹ 胡敦欣¹ 白学志¹ 雷 坤²

(¹ 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

(² 青岛海洋大学河口海岸研究所 266003)

提要 依据海水中悬浮物垂直通量的计算公式,提出了一种利用悬浮物含量、垂直通量和静水沉速估算海水垂向流速的新方法。当悬浮物静水沉速未知时,可用判别方法对海水是否存在显著垂向流动做基本判断。同时采用估算及判别方法对东海 9404 航次两连续站 111 和 410 的实测资料进行分析,得出了 410 站的海水不存在显著的上升流动,而 111 站的海水不仅存在上升流动,流速约为 2.6×10^{-3} c m/s,而且在时均情况下,上升流不能达到表层的结果。此判断结果与以往的观测和结论以及本次观测结果相吻合。

关键词 总悬浮物含量, 垂直通量, 垂向流速, 沉速, 粒径

对于海水的大尺度运动,其垂向流速与水平流速相比十分微弱,两者相差三个量级左右。即使在海水存在显著上升流动的区域如大洋东边界的秘鲁、加利福尼亚以及西北非沿岸等,其垂向流速最大仅为 1×10^{-2} c m/s^[3],一般在 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ c m/s 之间,当前测流技术不能现场直接测量如此小的流速。一般通过间接的

^{*} 国家自然科学基金资助项目 49636210 号和中国科学院创新工程资助项目 KZCX2-207 号。

第一作者:庞重光,出生于 1973 年,博士,研究员,研究方向:物质运输和沉积动力。E-mail:chgpang@ms.qdio.ac.cn

收稿日期:2001-03-16;修回日期:2001-08-20

方法,如综合分析海水温盐分布、生源要素分布的方法¹⁴以及解析或数值求解数学模式的方法^{15,6}判断上升流是否存在并估算其流速。上升流的流速虽然很小,但是它在细颗粒悬浮物的沉降与沉积过程中起相当大的作用。本文试图根据海水中悬浮物的含量、垂直通量以及悬浮物的静水沉速估算海水的垂直流速,同时提出一种在未知悬浮物静水沉速准确时判别海水是否存在上升流动的新方法。

1 原理与方法

海水中悬浮物的向下垂直通量(F_{spm})等于悬浮物含量(C_{spm})与悬浮物有效沉速(W)之积,如(1)式所示:

$$F_{\text{spm}} = C_{\text{spm}} \times W = C_{\text{spm}} \times (w + \omega) \quad (1),$$

其中, F_{spm} , C_{spm} 和 W 的单位分别为 $\text{mg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, mg / L 和 mm / s 。 ω 为悬浮物的静水沉速, w 为海水的垂向流速,取垂直向下为正。海水中悬浮物的向下垂直通量和含量一般通过实测方法求得:量测捕捉器中悬浮物的捕捉量求垂直通量;现场取水样,而后抽滤、称重测悬浮物含量。

式(1)是一种瞬时形式,而悬浮物捕捉器投放时间一般持续 1 d 以上,从捕捉器中所得的悬浮物总质量 M (mg)是一个积分值,如下式所示。

据式(2),已知各层海水中悬浮物捕捉量 M ,不同

$$M = \int_0^T \int_0^S F_{\text{spm}} dS dt = \int_0^T \int_0^S C_{\text{spm}} (w + \omega) dS dt \\ \approx \sum_{i=1}^n C_{(\text{spm})_i} (w_i + \omega_i) S \Delta t, \\ \text{其中 } T \text{ 为垂直通量量测时间, } S \text{ 为捕捉器的面积, } n \\ \text{为垂直通量量测时段,取水样的次数。令: } w_i \approx \bar{w} \\ \text{(时均值), } M/S = \sum_{i=1}^n C_{(\text{spm})_i} \omega_i \Delta t + \bar{w} \sum_{i=1}^n C_{(\text{spm})_i} \Delta t \\ (2),$$

式(1)亦可写为如下时均形式(量测垂直通量时段的平均,略去二阶小量)。

$$M/(S \times T) = \overline{F_{\text{spm}}} = \overline{C_{\text{spm}} \times W} = \overline{C_{\text{spm}} \times \bar{W}} + \\ \overline{C_{\text{spm}} \times W'} \approx \overline{C_{\text{spm}}} \times \bar{W} = \overline{C_{\text{spm}}} \times (\bar{w} + \bar{\omega}) \quad (3),$$

时段悬浮物的 $C_{(\text{spm})_i}$ 值以及悬浮物静水沉速 ω_i , 可求得各层海水的时均垂向流速 \bar{w} 。悬浮物的静水沉速一般通过近似计算方法或室内、现场实测方法求得¹⁷。静水沉速的近似计算公式有常用的 Stokes 公式(式 4), Rubey 公式和沉速积分表达式等。

$$\omega = \frac{d^2(\rho_s - \rho_w)g}{18\rho_w\nu} \quad (4),$$

其中, ρ_s , ρ_w 分别是悬浮物和水体的密度, g 是重力加速度, ν 是水体的运动粘滞系数, d 是悬浮物中值粒

径。

实测静水沉速的仪器有两类:沉降管和直接测量系统。沉降管的种类较多,包括欧文管(Owen tubes),准现场沉降管(QUISSET),以及现场沉降管(FST)和沉降箱(ISSEB)等。直接测量系统有现场录象系统(VIS),现场沉速仪(INSSEV),欧文管录象系统(VIOT)等。随着技术的进步,实测仪器的测量精度不断提高,但其测速范围有限,极细悬浮物如细粘土的沉速很难用实测法求得。

2 应用实例

2.1 采样与实测

1994 年 4 月在东海的 111 站和 410 站做了定点连续观测,站位见图 1。观测内容包括 CTD(海水的温度、盐度和深度)观测(时间间隔 2 h,深度间隔 1 m),悬浮物向下垂直通量实测(量测锚定式捕捉器中悬浮物的捕捉量)以及悬浮物含量和粒径分析(时间间隔 4 h,深度间隔 15 ~ 30 m 取水样)。粒径采用激光粒度分析仪量测。

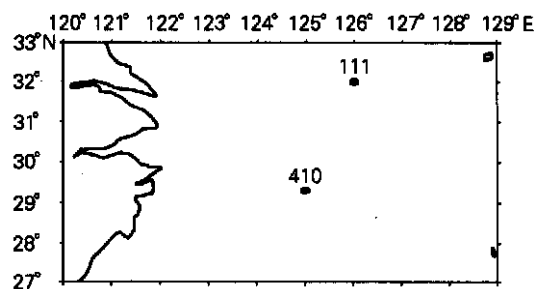


图 1 东海海上综合观测连续站站位

Fig. 1 Site locations on time-series observations in the East China Sea

2.2 估算海水的垂向流速

由于本海域悬浮物粒径很小(有机絮团除外),其沉速难以用直接量测法求得,所以采用近似算法由悬浮物粒径估算其静水沉速。当海水中悬浮物含量很低时,粒径分析亦难以进行。本航次 111 站上层海水和 410 站上下层海水中悬浮物含量均小于 2 mg / L ,未进行粒径分析。因此仅仅已知本航次 111 站下层海水中悬浮物的粒径分布(典型粒径直方图见图 2),悬浮物经氧化处理后的平均粒径为 6.83 μm (0.00879 mm),因为计算沉速时所用的悬浮物密度为纯泥沙颗粒的密度,所以要选用经氧化后的粒径以除去悬浮物中有机成分的影响。而后据 Stokes 公式(公式 4,我国水电部规范推荐的公式)计算,得到当悬浮物密度为 $2.65 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$,海水密度(水温 13.5 $^{\circ}\text{C}$,盐度 32.5)为 $1.024 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$,以及海水的运动粘滞系数为 1.23 mm^2 / s 时,悬浮物中值粒径对应的静水沉速。

已知 111 站下层海水中不同时段悬浮物的含量 $C_{(tsm)_i}$, 静水沉速 ω_i 和悬浮物捕捉量 M , 就可求解式 (2) 得 111 站下层海水的时均垂向流速 \bar{w} 估算值: -0.026 m m/s , 负号表示 111 站下层存在上升流, 流速

为 $2.6 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 。

410 站上下层和 111 站上层海水中悬浮物的粒径分布和静水沉速未知, 不能用式 (2) 计算该层位海水的垂向流速, 此时可用如下的判别方法仅根据悬浮物垂直通

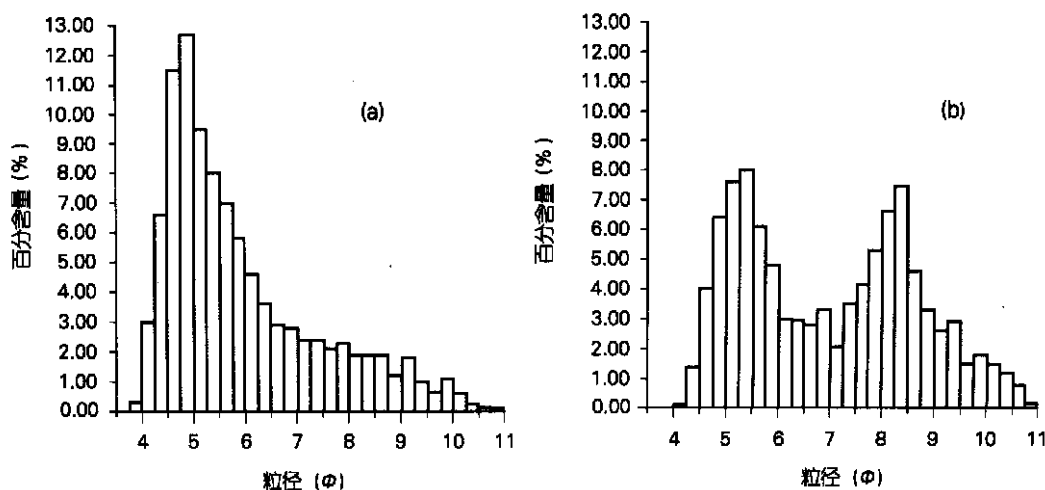


图 2 111 站近底层悬浮体粒径直方图
(a) 未经氧化处理; (b) 经氧化处理

Fig. 2 Distributions of the diameters of suspended matter near the bottom at Station 111

量和含量值对海水的垂向流动情况作出基本判断。

2.3 升降流判别

9404 航次两连续站时间平均的 C_{tsm} 值 (111 站 32h, 410 站 24h 平均) 和 F_{spm} 值见表 1。根据公式 (3), 已知 111 站、410 站上层和下层的时均 F_{spm} 和 C_{tsm} , 计算得两站不同层位悬浮物的时均有效沉速 W (表 1)。此处海水垂向流速 w 和悬浮物静水沉速 ω 均未知, 不能对海水的垂向流动做出判断, 在此需引入普遍成立的多组分悬浮物分层沉降模式。分层沉降模式认为, 如果悬浮物的比重相同, 那么粗颗粒悬浮物的沉速总是大于细颗粒悬浮物的沉速, 水体中粗细均匀分布的悬浮物经过一段时间的沉降后, 粗颗粒物总是位于水体的下层, 而细颗粒物位于水体的上层^[8]。下面利用此模式的普适性判断 111 站和 410 站海水的垂向流动情况。

2.3.1 111 站计算粒径的垂向分布异常

已知 111 和 410 站所在海域悬浮物 (不包含有机絮团) 中值粒径一般在 0.018 mm 和 0.001 mm 之间^[7] 对应的静水沉速范围为 $0.1832 \sim 0.0007 \text{ m m/s}$ 。

假设在 111 站和 410 站海水的垂向流速为 0, 即悬浮物有效沉速 W 为其静水沉速, 据 Stokes 公式由

悬浮物沉速计算得 111 站和 410 站不同层位悬浮物的计算粒径 (见表 1)。考查两连续站计算粒径的垂向分布, 可以看出 410 站的计算粒径结果符合分层沉降规律, 而 111 站的结果与分层沉降模式正好相反, 上层粒径粗, 下层粒径极细, 悬浮物计算粒径的垂向分布明显异常。

2.3.2 判别海水的垂向流动情况

在假设 410 站海水垂向流速为 0 的条件下, 计算得出的悬浮体粒径分布符合上细下粗的粒径分布模式, 且未超出本海域悬浮物的粒径范围, 由此可知对 410 站海水垂向流速为 0 的假设可以成立, 本站海水不存在显著的上升流动。

而 111 站的情况正相反: 在假设 111 站海水垂向流速为 0 的条件下, 计算得出的悬浮物粒径结果不符合悬浮物分层沉降规律, 由此可以认为 111 站海水垂向流速为 0 的假设不能成立, 111 站的海水一定存在显著的垂向流动, 而且只有当本站存在上升流时, 才会使下层悬浮物的有效沉速和计算粒径如此小, 下层悬浮物粒径远小于本海域悬浮物粒径范围。

如果 111 站的上升流贯穿整个深度, 那么上层 (15 m) 和下层 (75 m) 悬浮物的有效沉速会在其静水沉速的基础上同时等幅减小, 这里 111 站上层悬浮物的

表 1 9404 航次 111 站、410 站悬浮物参量表

Tab.1 Parameters on suspended matter at Station 111 and 410 during 9404 cruise

站位	水深 (m)	C_{spm} (mg/L)	F_{spm} ($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	W (mm/s)	悬浮物计算粒径 (mm)
111	15	1.3	96.9	8.561×10^{-4}	0.001 4
	75	15.9	18.2	1.327×10^{-5}	< 0.000 5
410	15	1.8	253.7	1.631×10^{-3}	0.001 8
	85	1.7	6 439.3	4.384×10^{-2}	0.012

静水沉速值未知,但根据海水中悬浮物组成相对稳定性的原则,可以把 410 站悬浮物的静水沉速即 410 站悬浮物的有效沉速当作 111 站悬浮物的静水沉速。比较 111 站悬浮物的有效沉速和 410 站悬浮物的有效沉速可知,两站的上层沉速几乎相等,而下层沉速值相差很大达 3 个量级,111 站上层和下层悬浮物的有效沉速并不是在静水沉速的基础上等幅减小,表明 111 站上层悬浮物的静水沉速几乎未受上升流的影响,可以认为此层海水的垂向流速为 0,而在 111 站的下层,海水的上升流速抵消掉悬浮颗粒静水沉速的绝大部分,使得此处下层悬浮物的有效沉速异常小。即 111 站虽然一定存在上升流,但从时间平均的角度,此处上升流一般不能穿越 15 米层。

2.3.3 判别法的可靠性

根据以往的观测和结论^[9,10],以及本航次的 CTD 资料和分析,111 站确有上升流存在,且在本航次中上升流一般不能达到表层,最大上升到距表面 10~20 m 处;而 410 站的海水通常不发生显著的上升流动。由此说明用判别法判断海水是否存在升降流动的方法是可信的。

3 结论与讨论

(1) 估算方法:已知某一连续站海水中悬浮物的含量、垂直通量和悬浮物的静水沉速,可求解悬浮物通量计算公式估算海水的垂向流速;(2) 判别方法:利用某一连续站海水中悬浮物的时均含量和垂直通量资料,可判断该站海水是否存在显著的上升流动。

上述方法的误差主要存在于两个方面,一是由于 C_{spm} 和 F_{spm} 的测量误差造成的,二是由于静水沉速的测量误差或粒径分析误差和经验半经验的沉速计算公式存在误差造成的。可以根据公式(3)分析海水垂向流速的计算误差(指系统误差):已知悬浮物垂向捕捉量的量测精度为 $\pm 0.1 \text{ mg}$,悬浮物含量的量测精度为 $\pm 0.1 \text{ mg/L}$,悬浮物静水沉速的量测精度为 $\pm 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$,根据误差传递原理得出,当垂直通量量测时间为 24h,捕捉器面积为 0.27 m^2 ,悬浮物捕捉量为 5 mg ,悬浮物含量为 5 mg/L 时,海水垂向流速的计算精度(绝对误差)为 $\pm 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。在实测过程中,悬浮物含量和垂向捕捉量的测量精度可能会受到一些不确定因素的影响,因此还需对垂向流速的计算精度做进一步探讨。

据秦蕴珊^[2]研究,TS M(总悬浮物含量)与透光度相关系数大于 0.85,可利用经验关系式由透光度资料计算 TS M 值。图 3 为 111 站 9702 航次实测的

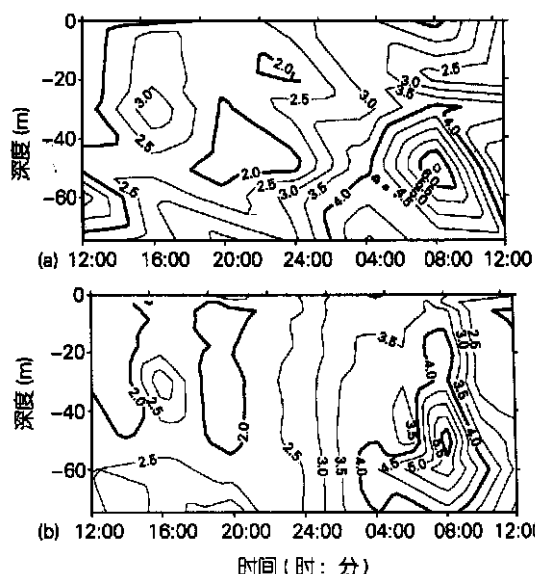


图 3 111 站 9702 航次总悬浮物含量(TSM);随时间(20.12:00~21.12:00)变化图
(a) 实测 TSM;(b) 由透光度换算的 TSM

Fig.3 Temporal variations of TSM at station 111 during 9702 cruise

TS M(mg/L)和由透光度资料换算的 TS M(mg/L)随水深时间变化图,可以看出两图基本一致。因此若没有同步测量的 TS M 值,可用由同期海水透光度资料换算的 TS M 值进行判断。

参考文献

- 1 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉等,东海地质,北京:科学出版社,1987.70
- 2 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉等,黄海地质,北京:海洋出版社,1989.71
- 3 Robinson A. R., Brink K. H. . The Sea : the Global Coastal Ocean . New York : John Wiley & Sons Inc ., 1998 .42
- 4 Evans S. R., Middleton J. F. . Regional Model of Shelf Circulation near Bass Strait: A New Upwelling Mechanism , *Journal of physical oceanography*, 1998, 28(7) : 1439 - 1457
- 5 Rao A. D., Dube S. K. . A three - dimensional simulation of coastal upwelling/ downwelling off east coast of India , *Indian journal of marinesciences*, 1998, 27(1) : 138 - 143
- 6 Rippeth T. P., Simpson J. . Diurnal signals in vertical

- motions on the Hebridean Shelf, *Limnol. and Oceanogr.*, 1998, **43** (7): 1 690 ~ 1 696
- 7 Sternberg R. W., Berhane I., Ogston A. S.. Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf, *Marine Geology*, 1999, **154** (1-4): 43 ~ 53
- 8 Zeng J. J., Lowe D. R.. A numerical model for sedimentation from multi - sized suspensions, *Math. Geol.*, 1992, 24: 393 ~ 415
- 9 Hu D. X., Tsunogai S.. Margin Flux in the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1999. 3 ~ 10
- 10 Wang S. L., Chen C. T.. Carbon dioxide and related parameters in the East China Sea, *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 525 ~ 544

A METHOD OF EVALUATING UPWELLING VELOCITY

PANG Chong-guang¹ HU Dun-xin¹ BAI Xue-zhi¹ LEI kun²
(¹*Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)
(²*Ocean University of Qingdao, 266003*)

Received: Mar., 16, 2001

Key Words: Total suspended matter, Vertical flux, Vertical velocity, Settling speed, Grain size

Abstract

Based on the formula of vertical flux of total suspended matters in sea water and according to suspended matter concentration, its vertical flux and settling velocity, a new method evaluating the vertical velocity of sea water has been put out. When settling velocity is unknown, we can identify whether sea water flowing vertically is obvious. The observed data obtained from East China Sea field measurement in 1994 have been analyzed with evaluation and calculation methods. The conclusion is that there is upwelling in whit velocity is 2.6×10^{-3} cm/s Station 111, but the upwelling can't reach to the sea surface. There is good coincidence between calculation result and observed data. (本文编辑: 张培新)