

杭州湾、长江口余流及其物质 输运作用的模拟研究*

II. 冬季余流及其对物质的输运作用

朱首贤** 丁平兴 史峰岩 朱建荣

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 首先分析了杭州湾、长江口冬季余流和物质输运作用的观测特征, 提出了几个值得继续研究的问题. 然后, 利用杭州湾、长江口三维联合模型, 综合考虑径流、风应力、密度流、中国东部海域背景环流和 M_2, S_2, K_1, O_1 四个分潮的综合作用, 模拟出了冬季的余流结构及其对物质的输运作用. 在此基础上, 针对所总结的几个问题, 进一步作数值模拟, 讨论余流和物质输运作用形成的机制.

关键词 杭州湾和长江口 冬季 余流 物质输运 三维模拟

中图分类号: P713

1 引言

一般认为, 在科氏力和沿岸流作用下, 冬季长江径流入海后, 余流沿岸向南流动, 由杭州湾湾口北部进入杭州湾, 从湾口南部流出而继续向南扩展^{[1~8], 1)}. 近年来, 一些学者对观测资料作深入分析, 给出其余流和物质输运更全面的特征^[2, 5, 6, 11]. 本文第一部分^[10]已经建立了杭州湾、长江口三维联合模型, 这一部分对这些观测特征作简要分析, 总结出几个值得继续研究的问题. 然后围绕这几个问题, 综合考虑径流、风、温盐的斜压效应、中国东部海域背景环流和 M_2, S_2, K_1, O_1 四个分潮, 作模拟研究.

本文于 1999-07-10 收到, 修改稿于 2000-05-12 收到.

* 国家 973 计划(G1999043803); 国家自然科学基金(编号: 4960606); 河口海岸国家重点实验室开放基金项目.

** 单位又为解放军理工大学气象学院, 南京 211101.

1) 曹沛奎, 谷国传, 董永发, 等. 长江口与杭州湾泥沙交换. 华东师范大学河口海岸研究所, 1998.

第一作者简介: 朱首贤, 男, 27 岁, 讲师, 在职博士, 主要从事近岸和近海海洋环境研究.

2 冬季余流和物质输运观测特征的分析及研究问题的提出

2.1 Euler 余流

引用文献[11]整理的资料,如图1所示.可以看出,长江口外远岸段和杭州湾南部,Euler余流流向基本偏南.同时,长江口外还存在向北分支,这种特征在文献[12,13]整理的观测资料中也有明显体现.浦永修^[6]把这种沿岸北上的流称为“吕四扩散流”.杭州湾北部 Euler 余流有很强的偏向东北成分,与从长江口到杭州湾的物质输运方向接近相反.这一点在文献[14]中也有明显体现.

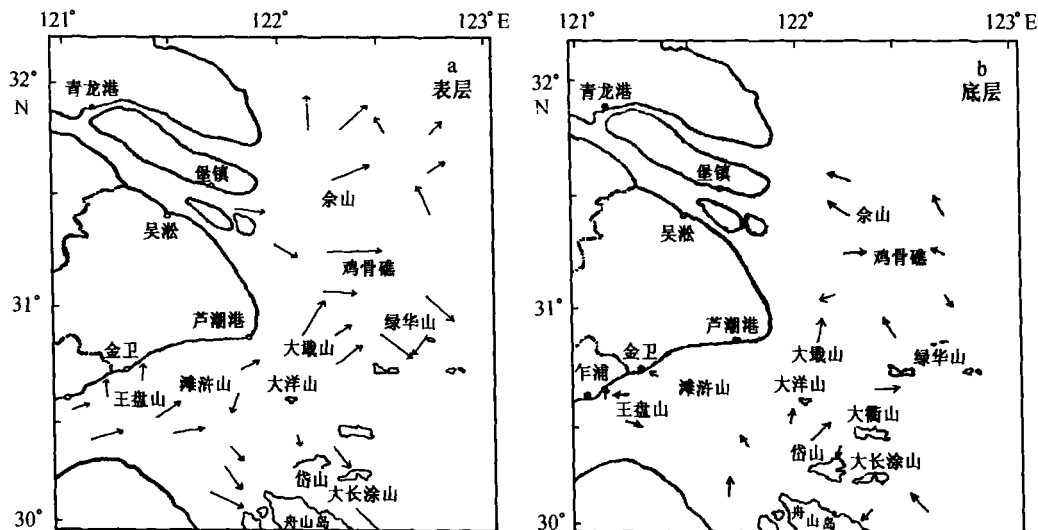


图1 杭州湾和长江口冬季观测的 Euler 余流(引自文献[11])

2.2 物质输运

引用王康培等^[2]和浦泳修等^[6]整理的盐度观测资料,由图2和图3可以看出,长江口出来的低盐水基本上在比较狭窄的范围内向杭州湾和浙闽沿岸扩展,这种物质输运特征在廖先贵等^[7]和何青^[8]整理的重金属分布场中也有明确体现.另外,杭州湾有两个明显的锋面,分别为长江冲淡水次级锋和钱塘江冲淡水锋面(又称金山舌形锋).毛汉礼等^[15]早就指出杭州湾顶附近,北部盐度低于南部.长江口附近,除了向南的物质输运外,图3还表明存在向北的输运,与浦泳修提出的“吕四扩散流”对应.

2.3 研究问题的提出

对于上述特征,很多学者基于观测资料作了深入的结构和动力机制分析^{[1~9,11~15],1)}.数值模拟是研究余流和物质输运的一个重要手段.如本文第一部分^[10]所述,过去涉及该海域的数值模拟,有的分辨率太低,有的仅计算杭州湾或长江口局部海域,不易综合考虑各种动力因子全面模拟上述特征及分析其动力机制.本文把杭州湾、长江口作为整体,围绕下述几个问题作进一步的模拟研究.

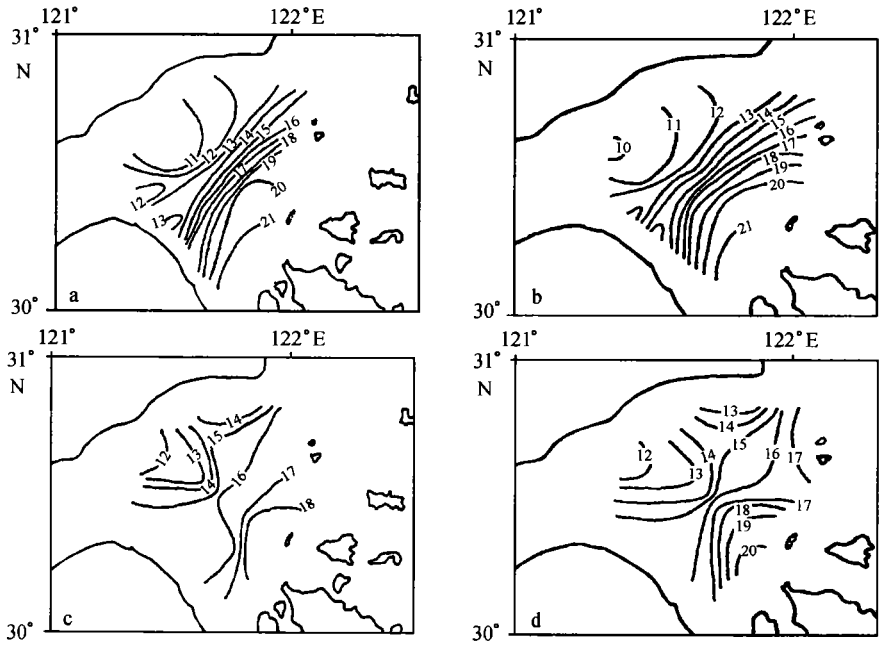


图2 杭州湾冬季盐度分布(引自文献[2])
a. 大潮表层 b. 大潮底层 c. 小潮表层 d. 小潮底层

(1) 综合考虑影响杭州湾、长江口冬季余流和物质输运的主要动力因子, 模拟其余流及其物质输运作用。

(2) 就以下几个问题讨论其动力机制。一、冬季各种动力在总的余流和物质输运中各起什么样的作用? 二、冬季长江口外向北的“吕四扩散流”和物质输运, 到底是什么动力造成的? 三、在冬季, 什么动力造成杭州湾北岸 Euler 余流和物质输运方向接近相反? 四、在冬季, 金山舌形锋和杭州湾顶附近南高北低的盐度分布是什么动力造成的?

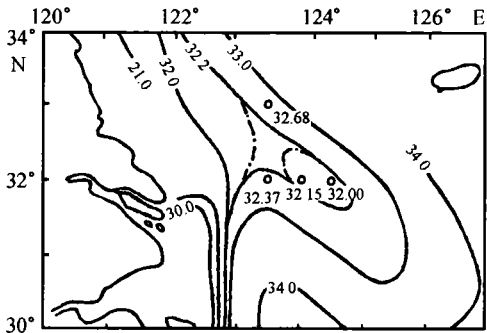


图3 长江口2月份表层的平均盐度
(引自文献[6])

3 冬季整体余流及其物质输运作用的研究方案

和本文第一部分^[10]一样, 重点计算范围包括杭州湾、长江口, 垂直方向均匀分为8层. 另外, 我们把中国东部海域也作为嵌套计算范围, 通过计算中国东部海域冬季“边界力”、温盐和风作用下的环流来提供以杭州湾、长江口为整体的计算域的开边界余水位。

对于中国东部海域冬季环流的模拟, 给出6个开边界的流量, 即台湾海峡 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 台湾以东黑潮入口 $22.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、大隅-吐噶喇海峡 $21.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、对马海峡 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、朝鲜海峡 $0.1529 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、长江口 $0.0129 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, 其余侧边界或者是岸边界, 或

者由于流量不大而取为封闭;风场取自 COADS 资料;温度和盐度参照《渤海、黄海、东海海洋图集》^[16]、胡方西提供的盐度大面图^[17]和王康培等提供的杭州湾盐度锋面图^[2]给出。

对于冬季杭州湾、长江口为整体的海域的余流及其物质作用模拟,我们采用以下方案。

东、南、北开边界水位由 $\zeta = \sum_{i=1}^4 H_i \cos(\delta_i t - g_i) + \zeta_0$ 给出, H_i, g_i 分别为 M_2, S_2, K_1, O_1 的振幅和迟角, ζ_0 为中国东部海域背景环流计算结果;河流上界给定流量,长江取 $12\,900\text{ m}^3/\text{s}$,钱塘江取 $250\text{ m}^3/\text{s}$;温度、盐度的资料来源和计算中国东部海域环流一样,风应力取冬季典型值西北北方向 0.1 N/m^2 。从静止开始积分 5 d, 流场稳定。继续积分 30 d, 用最小二乘法作潮流调和分析, 其常数项即为 Euler 余流。用质点跟踪法求 Lagrange 余流时, 4 个分潮周期的最小公倍数大, 为了充分滤掉周期性潮流, 我们作过一个月的质点轨迹跟踪, 滤掉周期性摆动, 给出部分点的轨迹示意图, 反映 Lagrange 余流及其物质输运作用。我们对两个 M_2 分潮周期的模拟流场作时间平均, 其平均值和 30 d 模拟结果求出的 Euler 余流基本一致; 作两个 M_2 分潮周期的质点跟踪, 其轨迹和 30 d 的轨迹反映的物质输运趋势也基本相同。因此, 作两个 M_2 分潮周期的质点跟踪, 周期性潮流基本被滤掉, 求出的流可以近似作为 Lagrange 余流, 而这种方法给出的模拟结果讨论更方便。

由于不能给出完全合理的开边界条件, 开边界附近模拟的余流误差大, 不具代表性。因此, 后面的模拟结果, 我们主要分析远离开边界的区域。

4 冬季整体余流和物质输运作用的模拟结果分析

模拟的 Euler 余流基本体现了观测的 Euler 余流特征。深度平均 Euler 余流, 长江口存在两个分支, 北支和北港口外流向偏北, 直到 122.4°E 附近转向偏南方向, 形成半环形涡旋, 南港口外偏南; 杭州湾, 模拟的余流在杭州湾北部流向偏北, 南部偏南。流速, 长江口门附近、口外和杭州湾一般 $5\sim 20\text{ cm/s}$ 。垂向各层余流有很大差别。长江口, 表层余流基本上都偏南, 从第二层开始, 存在向南和向北的分支; 杭州湾, 表层和第二层余流基本上都偏南, 从第三层开始, 湾北部和中部有很强的偏北倾向。图 4 是模拟的深度平均、表层和底层余流。

模拟的 Lagrange 余流能反映物质输运观测特征。深度平均 Lagrange 余流, 长江口门附近和口外有两支, 一支由北支、北港出来, 流向偏北, 一支由南港出来, 流向偏南; 杭州湾东北部和东、南部余流都偏向南, 湾顶存在顺时针涡旋, 金山附近是涡旋和向南余流的交界处, 这种余流使长江冲淡水进入杭州湾后, 在金山以东进入湾中, 湾顶附近余流南进北出, 在金山附近转向湾中, 有利于形成金山盐度舌形锋和湾顶附近南高北低的盐度分布。垂向各层 Lagrange 余流存在差别。长江口, 表层和第二层 Lagrange 余流基本偏南, 从第三层开始, Lagrange 余流分偏向南和偏向北两支向外扩展; 杭州湾, 上部偏南余流比下部强。图 5 是模拟的深度平均、表层和底层 Lagrange 余流。

对模拟结果综合分析, 有一点值得重视, 在杭州湾北部, 模拟的 Euler 余流和 Lagrange 余流方向基本相反, 可以体现观测的 Euler 余流和物质输运方向接近相反的特征。

需要指出的是, 冬季偏北风对长江口外向北余流有抑制作用, 底层风生流指向偏东方向, 对密度流产生的向口内入侵也有抑制作用, 本文采用的风应力典型值比平均风速对应的风应力要大一些, 我们也采用平均风速作过对比模拟, 发现口外向北扩散分支和向口内入侵的现象更明显。

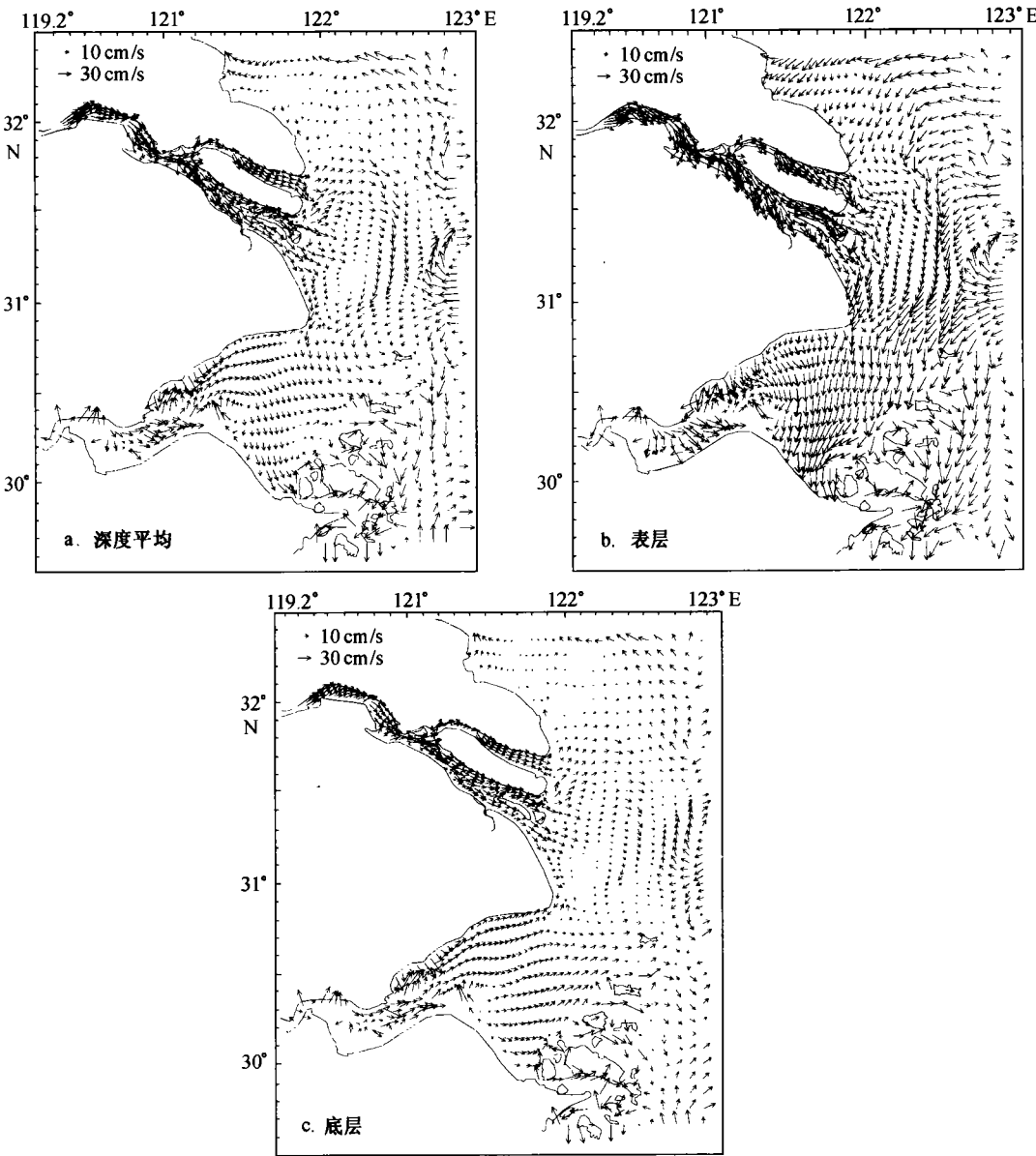


图4 模拟的冬季 Euler 余流

5 冬季余流及期物质输运作用的机制模拟

5.1 径流对冬季余流和物质输运的贡献

在河流上界给定流量,其他动力因子都不考虑. 首先以中国东部海域为计算域计算径流所产生的流,提供杭州湾、长江口为整体的小区域的开边界条件. 然后在杭州湾、长江口为整体的海域采用高分辨率曲线网格,进一步模拟径流产生的余流.

垂向各层流的趋势基本一致,下层一般比上层小 20%~70%. 从图 6 深度平均流模拟结

果可以看出,长江径流小股从北港和北支出来向北扩展,可以一直影响到 31.85°N , 绝大部分在科氏力作用下向南偏转,从杭州湾湾口北部进入杭州湾,从湾口南部流出杭州湾. 长江口门附近流速为 $2\sim 12\text{ cm/s}$, 口外 31.8°N 以北和 122.4°E 以东已降到 2 cm/s 以下, 杭州湾在长江径流主体影响到的地方为 $2\sim 6\text{ cm/s}$, 121.5°E 以西和 121.9°E 以东也降到 2 cm/s 以下.

从模拟结果可以看出,在径流作用下,长江口除科氏力作用下存在向东南的余流和物质输运分支外,也存在很弱的向北余流和物质输运分支;杭州湾、长江径流自身的扩散不会破坏金山盐度舌形锋.

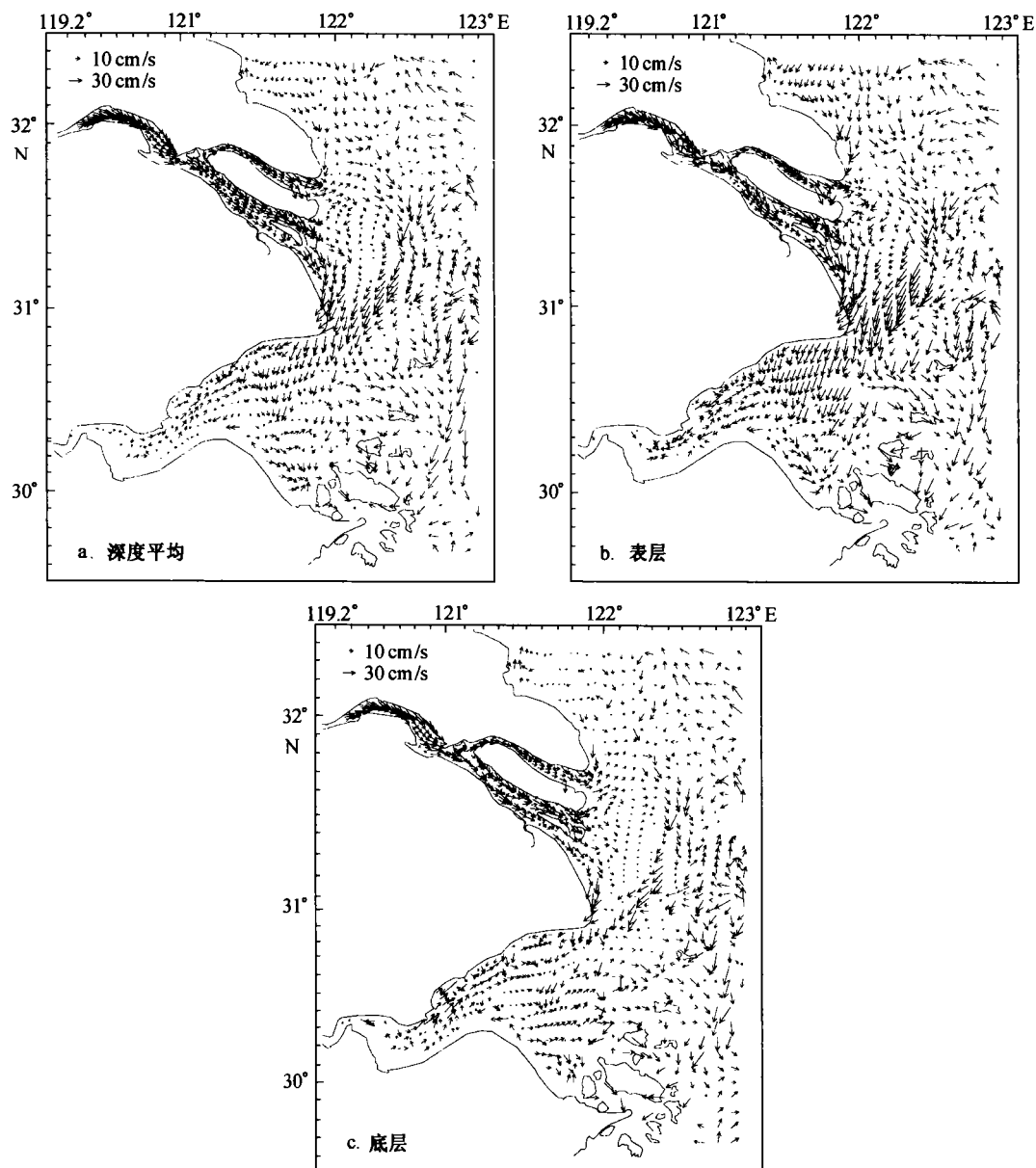


图5 模拟的冬季 Lagrange 余流

5.2 风生流对冬季余流和物质输运的贡献

我们首先在中国东部海域计算风生流,提供杭州湾、长江口为整体的小区域的开边界条件.然后在杭州湾、长江口为整体的海域采用高分辨率曲线网格,进一步模拟风生流.风生流模拟所采用的风场为 COADS 资料所提供的冬季平均风场,在长江口和杭州湾的风应力比冬季典型风应力要小.

深度平均流,长江口门附近、口外和杭州湾大部分海域盛行偏南向流;杭州湾顶附近具有补偿流特征,在 121.2°E 附近流向偏北,与其东侧偏南向流组成顺时针涡旋,与其西侧偏南向流组成逆时针涡旋.长江口外和杭州湾东部流速一般为 10~20 cm/s.流的垂向变化明显.长江口门附近、口外和杭州湾东部,从表层到底层流向逐渐由偏南转向偏东方向.从表层到底层,流速迅速减小,底层流速一般比表层小 70%~90%.我们给出模拟的表层和底层风生流图 7.

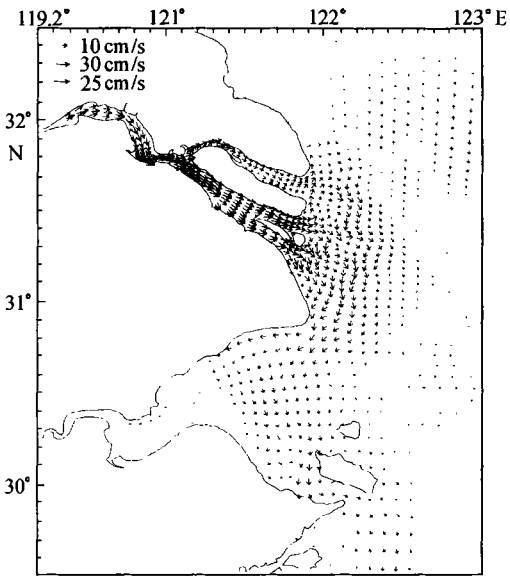


图 6 模拟的冬季径流作用下的深度平均流

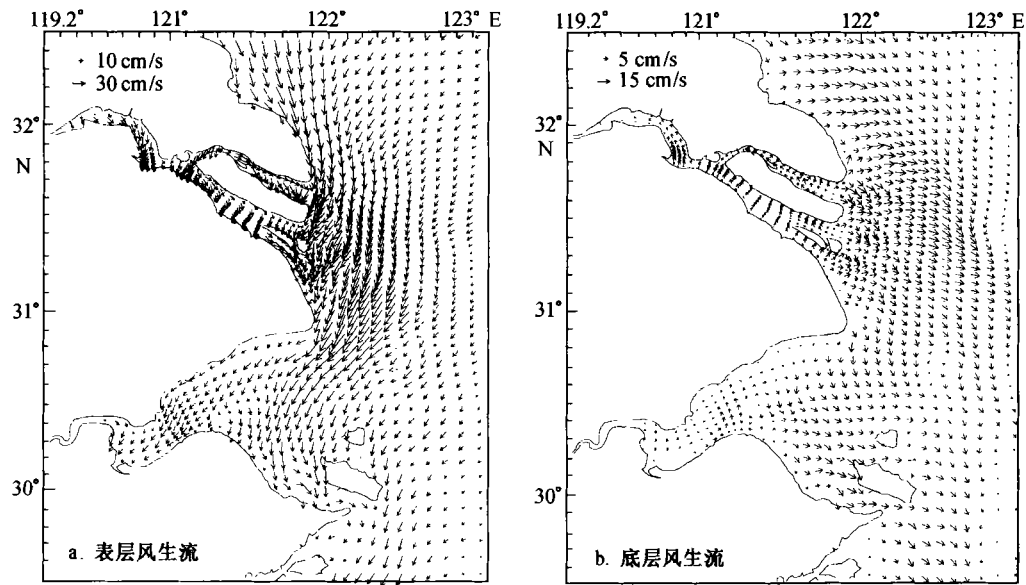


图 7 冬季风应力作用流的模拟结果

从模拟结果可以看出,冬季风生流不利于长江口出来的物质向北和向东输送,而有利于向杭州湾输运.在杭州湾内,风生流使长江口出来的物质在金山以东就转向湾外,有利于形成金山盐度舌形锋.

5.3 温盐斜压效应对余流和物质输运的贡献

首先在中国东部海域计算冬季温盐产生的流,提供杭州湾、长江口为整体的小区域的开边界条

件. 然后在杭州湾、长江口为整体的海域采用高分辨率曲线网格. 进一步模拟温盐产生的密度流.

首先分析深度平均流. 长江口附近规律性不强, 口外流向偏北; 杭州湾密度流由湾口南部流入湾内, 并由湾口北部流出. 流速一般在 $2 \sim 15 \text{ cm/s}$ 之间. 垂向各层密度流差别很大. 长江口门附近和口外, 从第一层到第三层, 密度流基本上都指向口外, 从第五层开始, 以指向口内方向为主. 杭州湾, 上部流向规律性差一些, 从第三层开始, 基本上由湾口南部流向湾内, 由湾口北部流出. 杭州湾冬季的盐度场大面图, 我们主要参考了胡方西等提供的盐度大面图^[17]和王康增等提供的杭州湾盐度锋面图^[2]而给出, 其中表层盐度场如图 8a 所示, 与实际盐度场可能有一些差别, 会影响模拟结果.

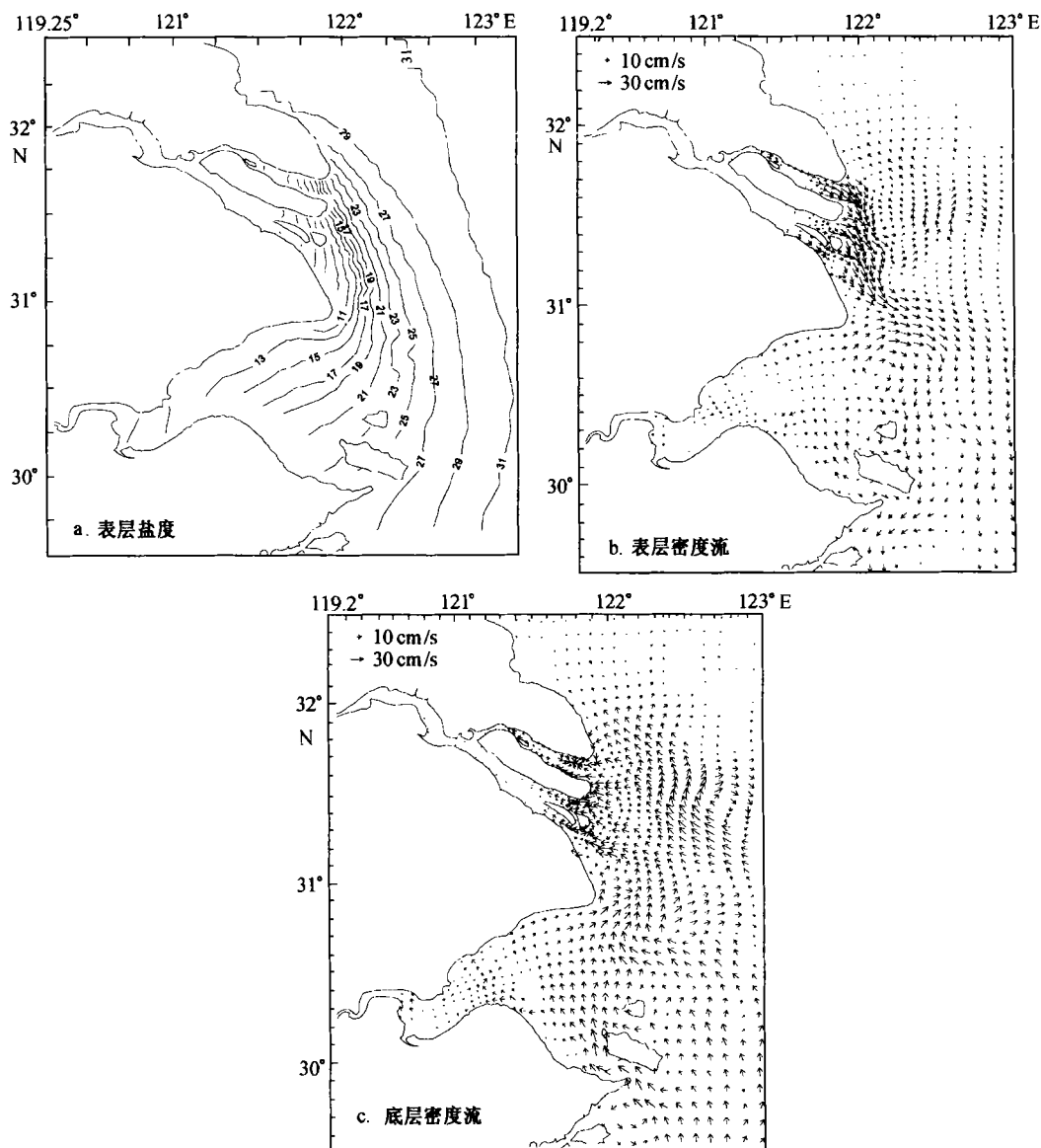


图 8 冬季盐度场和模拟的密度流

对于密度流在余流和物质输运作用中的贡献,有3个特征值得注意,一是长江口门附近,上部密度流向外,下部密度流向内,有利于形成盐水楔;二是有利于长江口外向北余流和物质输运分支的形成;三是在杭州湾有利于外海高盐水从底部爬进湾内。

5.4 M_2, S_2, K_1, O_1 四分潮对余流和物质输运的贡献

从模拟结果来看,除了底层,潮致余流垂向变化不明显,Euler余流一般为5~20 cm/s, Lagrange余流一般要小一半左右。图9a是根据30 d模拟结果求出的深度平均 Euler 余流。图9b

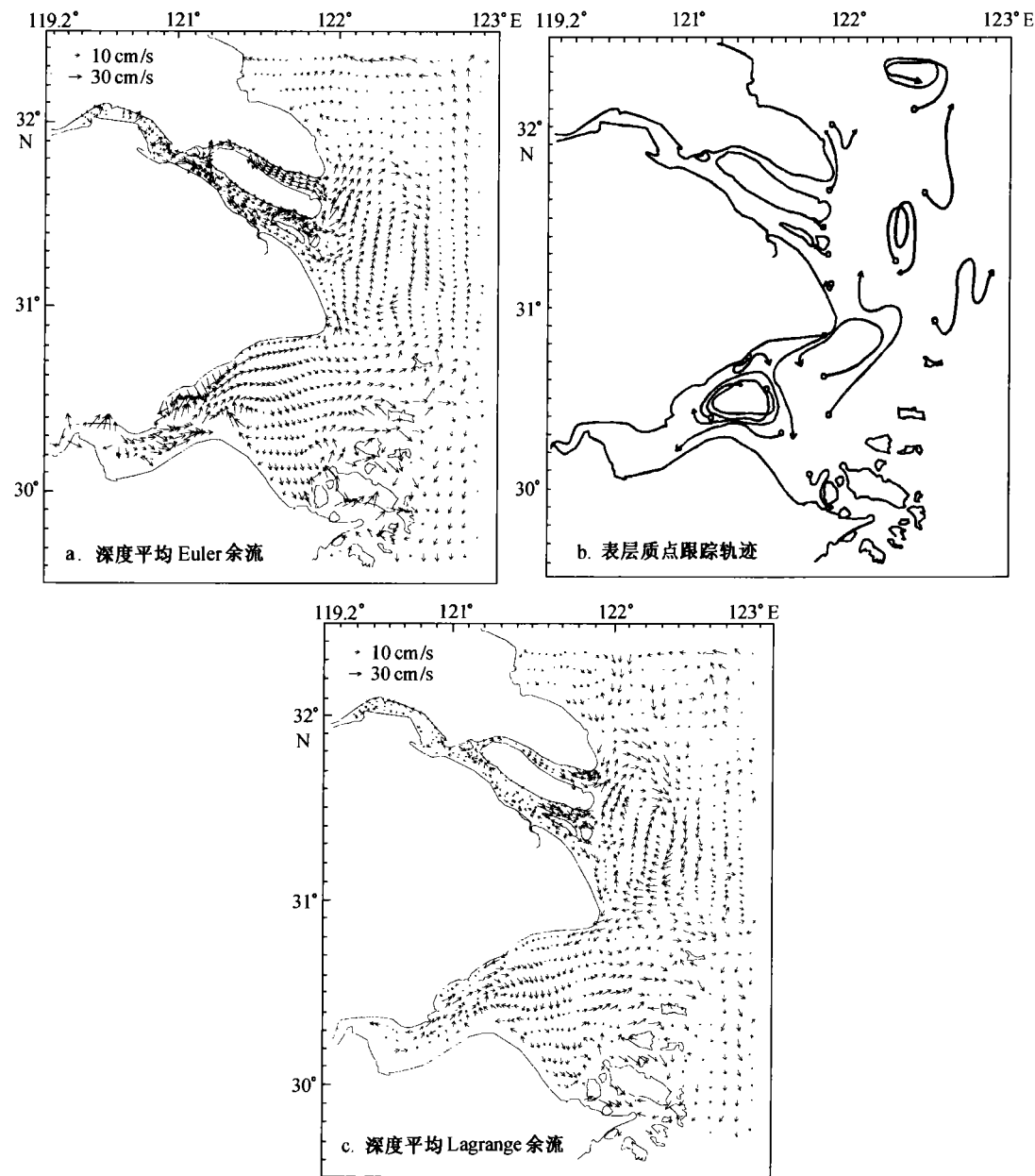


图9 4个分潮潮致余流及质点跟踪轨迹的模拟结果

是表层从小潮期间开始跟踪 30 d 的质点轨迹,跟踪的起始潮时所对应的位相与该点的调和常数 g 一致,我们已经滤掉了周期性摆动. 图 9c 是两个 M_2 分潮周期的质点轨迹给出的深度平均 Lagrange 余流.

可以看出,长江口外 Euler 余流和 Lagrange 余流(或跟踪的质点轨迹)顺时针涡旋,有利于形成向北的余流和物质输运分支. 南汇边滩附近的 Langrange 余流(或跟踪的质点轨迹)逆时针涡旋,有利于长江口出来的物质沿杭州湾北岸向湾中输运,在金山附近转向湾中,而杭州湾顶附近 Euler 余流和 Lagrange 余流(或跟踪的质点轨迹)顺时针涡旋,有利于钱塘江和金山以西沿岸排出的物质沿北岸向湾中输送,也在金山附近转向湾中,这两个涡旋和王康瑾等分析的

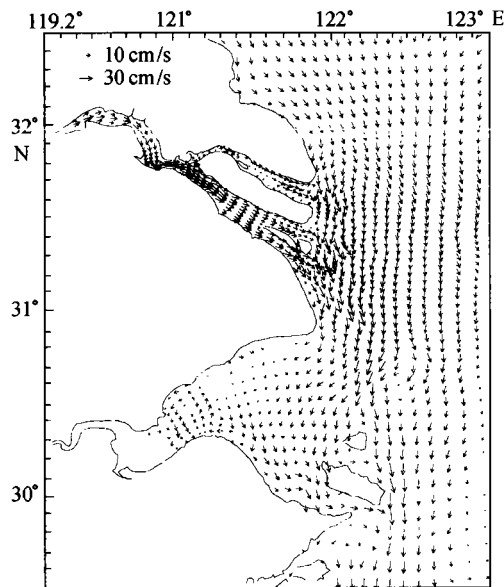


图 10 径流、风、温盐的斜压效应综合作用的深度平均流

金山舌形锋盐度^[2]有较好的对应,也能从一定程度上解释杭州湾湾顶附近北部盐度低于南部的观测特征. 另外,杭州湾北部模拟的潮致 Euler 余流和 Lagrange 余流方向接近相反,能对 Euler 余流和物质输运方向接近相反的观测特征给出动力解释.

5.5 径流、风、温盐的斜压效应综合作用对余流和物质输运的贡献

为了进一步体现 4 个分潮对余流和物质输运的贡献,我们去掉 4 个分潮的作用,采用前面模拟整体余流的方案,模拟径流、风、温盐的斜压效应综合作用对余流的贡献. 从深度平均流图 10 可以看出,长江口外和杭州湾盛行偏南向流,长江冲淡水主体在金山以东转向湾外,杭州湾顶附近有一个顺时针和一个逆时针涡旋. 图 4、图 5 和图 10 综合比较,可以进一步看出潮致余流对冬季长江口外向北余流和物质输运、金山舌形

锋以及杭州湾北部 Euler 余流和物质输运方向接近相反等特征中的重要作用.

6 关于冬季余流及其物质输运作用的综合讨论

综合本文的模拟结果及其与观测事实的对照分析,我们可以对前面几个问题作出初步的分析和讨论.

6.1 本文考虑冬季径流、风、温盐的斜压效应、中国东部海域背景环流和 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 四个分潮的综合作用,从模拟结果来看,基本与观测到的余流及其物质输运特征一致. 前面所分析的几个特征,如长江口外余流和物质输运的向北分支、杭州湾北部 Euler 余流与物质输运方向接近相反、金山盐度舌形锋对应的物质输运作用,在模拟结果中也得到很好的体现. 这说明本文的模拟结果基本上是合理的,同时也说明这些观测特征极有可能是经常存在的.

6.2 根据模拟结果也可以对前面提出的关于余流和物质输运动力机制的问题作出初步的回答.

(1) 径流、风生流、密度流、潮致余流对杭州湾、长江口的余流和物质输运作用都有一定的作用,但对于不同的海域和观测特征,其作用大小并不一样.

(2) 对于长江口外向北的“吕四扩散流”和物质输运,径流、密度流和潮致余流都有利于其形成与维持,冬季北风驱动的风生流则起相反作用。

(3) 关于杭州湾北部 Euler 余流和物质输运方向接近相反的观测特征,也能分析出其动力机制。冬季各种因子综合作用下,在杭州湾北部,深度平均 Euler 余流偏向东北,深度平均 Lagrange 余流偏向西南,两者方向接近相反,这种特征主要是潮致余流造成的。

(4) 从模拟结果也可以看出金山舌形锋和杭州湾顶附近南高北低盐度分布的形成机制。如前所分析,潮致 Lagrange 余流在杭州湾顶附近有一顺时针涡旋,在南汇边滩外有一逆时针涡旋,这两个涡旋有利于形成盐度舌形锋。同时北风作用下的风生流在金山西侧形成一个顺时针涡旋,既有利于金山以西低盐水由金山附近流入湾中,又阻挡由长江口来的物质继续进入金山以西,对舌形锋的形成也有一定作用。径流作用下的余流对金山舌形锋的形成虽然没有直接作用,但是,单纯径流作用下,长江冲淡水只扩展到金山以东,不会破坏舌形锋的形状。杭州湾顶附近盐度南高北低,湾顶附近顺时针潮致余流涡旋是一个重要原因;密度流由杭州湾南部进入杭州湾,对南岸高盐度的形成有一定作用;北风作用下的风生流,在 121.2°E 东侧的顺时针涡旋有利形成南高北低盐度,但其西侧的逆时针涡旋又不利于形成这种盐度分布,其综合作用可能并不强。

杭州湾、长江口的余流和物质输运作用很复杂,又受观测资料限制,因此本文的模拟和结论还是很初步的,还需进一步的模拟和观测来证实。

参考文献

- 1 Su Jilan, Wang Kangshan. Changjiang River plume and suspended sediment transport in the Hangzhou Bay. C S R, 1989, 9(1): 93~111
- 2 王康瑭,苏纪兰. 杭州湾锋面的结构特征. 中国海洋学文集,第2集. 北京:海洋出版社,1992. 13~21
- 3 朱建荣,沈焕庭. 长江冲淡水扩展机制. 上海:华东师范大学出版社,1997. 1~17
- 4 潘玉球,王康瑭,黄树生. 长江冲淡水输运和扩散途径的分析. 东海海洋,1997,15(2): 25~34
- 5 王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的输运. 黄渤海海洋,1998,16(2): 41~46
- 6 浦泳修,许小云. 从径流、水位和海区盐度的分布看长江水的扩展. 海洋通报,1983,2(3): 1~7
- 7 廖先贵,张湘君,应时理,等. 杭州湾重金属的来源及其对泥沙运动的指示意义. 中国海洋学文集. 第2集. 北京:海洋出版社,1992. 57~63
- 8 何青. 杭州湾北部水域污染物扩散输移的数值模拟与分析[博士论文]. 华东师范大学,1998
- 9 陈伟,黄大吉,杨昭庆. 杭州湾锋面区余流场结构及其动力分析. 中国海洋学文集. 第2集. 北京:海洋出版社. 1992, 22~28
- 10 史峰岩,朱首贤,朱建荣,等. 杭州湾、长江口余流及其物质输运作用的模拟研究 I. 杭州湾、长江口三维联合模型. 海洋学报,2000,22(5): 1~12
- 11 上海市海岸带和滩涂资源综合调查报告. 上海:上海科学技术出版社,1988. 15~26
- 12 乐肯堂,于振娟,等. 长江口外海流结构及其季节变化. 海洋科学集刊,第33集. 北京:科学出版社,1992. 51~67
- 13 胡辉,李身铎,等. 长江口外海滨余流特征分析. 见:长江河口动力过程和地貌演变. 上海:上海科学技术出版社,1988. 108~110
- 14 李身铎,胡辉. 杭州湾流场的研究. 海洋与湖沼,1987,18(1): 28~37
- 15 毛汉礼,等. 杭州湾潮混合的初步研究 I. 上湾区. 海洋与湖沼,1964,6(2): 121~134
- 16 海洋图集编委会. 渤海黄海东海海洋图集,水文卷. 北京:海洋出版社,1992. 20~28
- 17 胡方西,胡辉,等. 长江河口盐度锋. 海洋与湖沼,1995,26(5): 23~31

Numerical study on residual current and its effect on mass transport in the Hangzhou Bay and the Changjiang Estuary

II . The residual current and its effect on mass transport in winter

Zhu Shouxian,^{1,2} Ding Pingxing,¹ Shi Fengyan,¹ Zhu Jianrong¹

1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062*

2. *Meteorology Institute of People's Liberation Army Science and Engineering University, Nanjing 211101*

Abstract—First, some observational characteristics of residual current and mass transport in the Hangzhou Bay and the Changjiang Estuary in winter are analyzed. Then, the residual current and its effect on mass transport are simulated with the 3-D joint model of the Hangzhou Bay and the Changjiang Estuary, in which the impacts of river flow, wind, baroclinic pressure induced by temperature and salinity, current of the East China Sea and tide (including M_2 , S_2 , K_1 and O_1) are taken into account. Based on these studies there are also some simulations to analyze the dynamical mechanisms of the observational characteristics.

Key words Hangzhou Bay, Changjiang Estuary, residual current, mass transport, numerical study, winter