

苏北沿岸水的去向与淡水来源估算*

张志欣^{1, 2, 3} 郭景松^{1, 2, 3} 乔方利^{1, 2, 3①} 刘又毓⁴ 郭炳火^{1, 3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 海洋国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室 青岛 266235;
3. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室 青岛 266061; 4. 宁波市海洋与渔业研究所 宁波 315012)

摘要 本文基于 2006—2007 年春、夏、秋、冬季 CTD 观测的盐度资料分析了苏北沿岸水盐度的季节变化特征, 并利用冬、夏季盐度场变化估算了苏北沿岸水的淡水来源。结果表明: 冬季苏北沿岸水在东北季风的驱动下顺岸南下, 在离开苏北浅滩后转向东南进入东海; 夏季低盐的苏北沿岸水分多支向北、向东流出沿岸区, 后者汇入南黄海夏季冷水团环流中。估算结果表明苏北沿岸水的淡水来源主要是苏北沿岸的入海径流水, 约占总量的 65%, 次之是降水/蒸发量通量和长江冲淡水沿江苏沿岸的北向扩展。

关键词 沿岸水; 苏北; 季节变化; 入海径流; 降水

中图分类号 P731.3 doi: 10.11693/hyhz20150800208

江苏近岸海域位于南黄海西部, 苏北沿海平原东侧, 由北向南包括海州湾、废黄河口、辐射沙洲与长江口北支口外海域(图 1), 海岸线长达 954km。其中, 形态独特的苏北浅滩辐射沙洲在江苏岸外水深 30m 以浅地区呈扇形向外海辐射, 由线状潮流沙脊和脊间沟槽共同组成。江苏境内的新沂河、灌河、灌溉总渠、射阳河等大中型入海河流多集中在江苏北部。

苏北沿岸水分布在海州湾至长江口以北的江苏近岸海域。苏北沿岸区水深浅、潮流混合强, 故沿岸水所占深度几乎从海面至海底(孙湘平, 2006; 秦毅, 2009)。苏北沿岸流通常被认为常年向东南方向输运(邹娥梅等, 1999; 郭炳火等, 2005)。但林锡藩等(1979)指出苏北沿岸流在夏季还有北流的趋势。王辉(1996)基于拉格朗日观点建立的陆架浅海环流模式, 数值模拟显示苏北浅滩附近海域存在沿岸北上的流动; Xia 等(2006)数值模拟结果显示在夏季风驱动下黄海西部表层(0—4m)水体整体大致沿岸北上。2008 年 5 月底至 7 月初, 黄海浒苔大规模爆发, 并在青岛外海大量聚集(Lü *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2015; Xu *et al.*,

2016), 对青岛奥帆赛场和青岛市沿海景观影响很大。这一事件引起了世界媒体包括海洋科学界的高度关注。目前研究普遍认为黄海绿潮起源于江苏沿岸(Ye *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009; 乔方利等, 2011; 邢前国等, 2011; Xu *et al.*, 2014; Xing *et al.*, 2015)。Yuan 等(2008)分析 MODIS 卫星图像注意到苏北沿岸夏季存在着北向的流动, 刘志亮等(2009)依据 2003 年鲁南海槽深水处的一个定点潜标资料推断出苏北沿岸流夏季向北流动。李峤(2010)使用 Argos 表层漂流浮标等资料分析显示夏季江苏沿岸海流受风驱动向北流动, 支持 Xia 等(2006)的数值模拟结果。江苏近海各水层悬浮物、营养盐高值区也呈现出东北向(北向)扩展趋势, 漂流瓶实验进一步表明江苏沿岸海域存在着北向流动(韦钦胜等, 2012, 2013)。

受近年黄海浒苔生态灾害事件的影响, 关于苏北沿岸水夏季在近岸海域的去向引起众多学者的关注, 但有一个问题仍不清楚: 苏北沿岸水的低盐来自哪里? 通常认为它是由江苏北部的灌河、灌溉总渠、射阳河等入海径流与沿岸海水混合形成的。然而

*中国科学院先导专项项目, XDA1102030103 号; 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1406404 号; 国际合作项目“海洋动力系统和多运动形态相互作用”, GASI-03-IPOVAI-05 号; 国家自然科学基金项目, 41206025 号。
张志欣, 博士, E-mail: zhangzx@fio.org.cn

① 通讯作者: 乔方利, 研究员, E-mail: qiaofl@fio.org.cn

收稿日期: 2015-08-05, 收修改稿日期: 2015-11-13

江苏沿岸入海径流量年际差别较大, 2006 年入海水量为 $277.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ (江苏省水利厅, 2007), 2007 年为 $366.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (江苏省水利厅, 2008), 而多年平均入海水量约为 $297.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (据杨宏忠(2012)数据估算), 这些当地淡水是否可以满足苏北沿岸水的来源需求? 王然等(2014)指出 2000 年后淮河流域降水异常导致苏北近海的入海淡水输运异常。而近年数值模式结果则显示夏季、秋季长江干流入海后还有一沿江苏近岸北向扩展的分支(Oh *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2015)。本文就苏北沿岸水的水源构成这一科学问题进行了探讨。

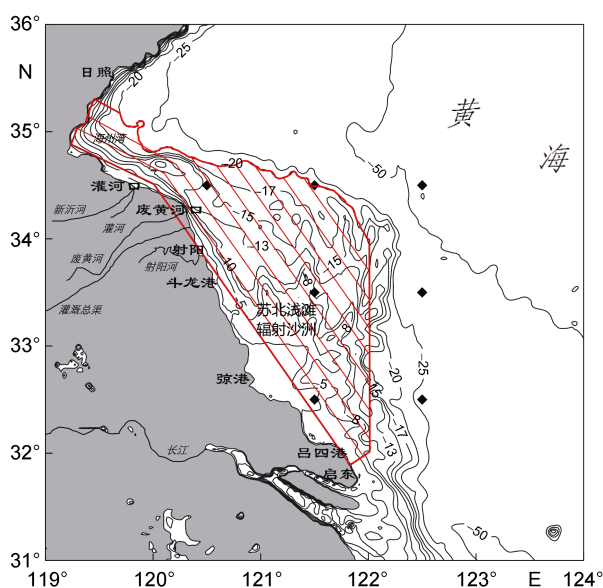


图 1 苏北近岸地形及文中淡水来源估算区域示意图

Fig.1 The study region around the Subei coastal current

浅灰色等值线为实际水深; 黑色粗实线为苏北沿岸水淡水来源的估算区域, 黑色细实线表示估算区域地形由岸边向深水水域呈阶梯分布, 共划分为 9 个小区块。其中黑色菱形标示了文中选用的降水量和蒸发量资料所在的位置处

1 数据

本文采用了“我国近海海洋环境综合调查与评价”专项在江苏沿海的 CTD 盐度观测数据, 观测时间段分别为 2006 年 7—8 月(代表夏季)、2006 年 12 月—2007 年 1 月(代表冬季)、2007 年 4—5 月(代表春季)、2007 年 10—12 月(代表秋季)。该数据经处理和质量控制后的垂向分辨率为 1m。然后, 依据该数据绘制了江苏近岸的表层盐度分布图; 与多年平均的气候态结果(潘楚东, 2006; 潘楚东等, 2007)比较, 此次所得结果具有更多的诸如苏北沿岸水走向的水文细节, 有助于我们进一步正确认识该区域的沿岸水状况。此

外, 降水量数据使用了 1979—2002 年期间的月平均 XieArkin 数据, 它是由 National Center for Atmospheric Research(NCAR)的 Climate and Global Dynamics(CGD) Climate Analysis Section(CAS)提供的数据产品; 蒸发数据选用了 2006 年的月平均 OaFlux (the Objectively Analyzed air-sea Fluxes)数据产品, 由 WHOI(<http://oafux.whoi.edu>)提供。

2 结果和讨论

2.1 苏北沿岸水的季节变化

夏季降水明显大于蒸发, 入海径流量也大, 冬季则相反, 因而整个黄海区的夏季盐度比冬季低。图 2 清楚展示出江苏沿岸四季都存在一条盐度锋, 据此我们定义盐度锋内侧的等盐度线(冬、春季取 31.0 等盐线; 夏、秋季取 30.0 等盐线)为苏北沿岸水核心区的边界。苏北沿岸水扩展势态的季节差异如下。

冬季苏北沿岸水的盐度在 30.0—31.0 的范围内, 31.0 等盐线大致沿浅滩的边缘, 向北延伸到海州湾(图 2d), 此条等盐线与秋季的 30.0 等盐线位置(图 2c)基本一致, 表明冬季苏北沿岸水海域缺乏淡水输入, 盐度普遍提升了 1 以上。此外, 在强盛的偏北风作用下, 沿岸水向南流动, 其变性水(盐度为 31.0—33.0)向东南入侵东海, 前锋可达到(124.0°E, 31.5°N)。

春季苏北沿岸水的范围与冬季相当, 盐度锋在四季中最强; 等盐线不完全平行于岸线, 沿岸区内出现 2 处盐度小于 30.0 的水舌, 展示了沿岸水向外冲溢的特征。其中最显著的是在射阳河口附近呈现出一东南向伸展的低盐舌, 但由于春季入海径流量较小, 这一低盐舌的势力不强, 盐度较高, 核心区盐度略小于 30.0。而低盐的长江冲淡水的一小部分向北扩展, 达到启东附近时, 主要部分向东伸展, 形成低盐水舌; 另一小部分则有北向进入浅滩区之势。

夏季苏北沿岸水向外海冲溢态势在四季中最强, 沿岸水外缘的盐度锋面较弱。沿岸水的扩展主要在两个方向上: 其一是向北扩展, 海州湾至日照沿岸区都在苏北沿岸水范围内; 其二从射阳河口向东南伸展, 低盐水舌入侵到深水区, 前锋达到 122.5°E 附近。图 2b 清楚显示长江冲淡水向济州岛方向扩展的过程中, 有相当一部分入侵到南黄海, 其边界达 33.5°N; 同时, 夏季从长江口北水道绕过启东向北到达 32.0°N 的沿岸区有一盐度小于 23 的低盐带, 但比苏北外海的盐度明显低 4 以上。总体来看, 该股低盐水与长江口低盐水一脉相承, 并与苏北沿岸水相接在江苏近岸外

形成一与岸线平行的狭窄低盐带(盐度 $S < 28$), 低盐带内盐度梯度大。此外, 在吕四港外有一比较弱的向外冲溢的盐度舌出现, 这应当与从当地排入海的长江流域支流淡水有关。

秋季 30.0 等盐线向岸靠近, 苏北沿岸水明显减弱, 其范围基本被限制在沿岸区内, 只是在射阳 ($33^{\circ}45'N$ 附近) 31.0 等盐线向东凸出, 显示出沿岸水向外冲溢的迹象。

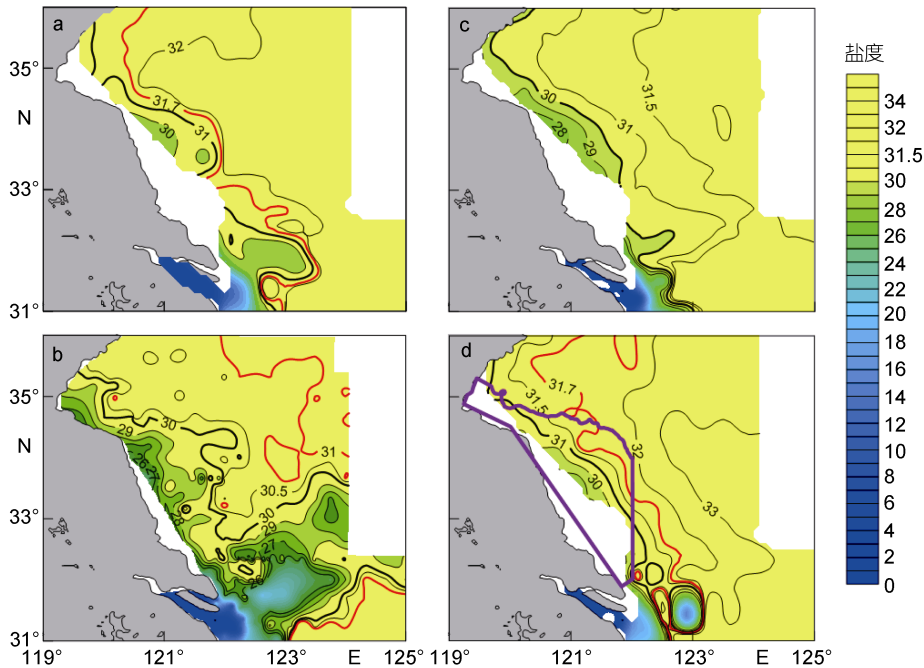


图 2 2006—2007 年春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)表层实测盐度分布

Fig.2 The salinity distribution at the sea surface in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d) in 2006—2007
黑色实线为 30.0 或者 31.0 等盐线, 表示沿岸水的核心范围; 红色实线为 31.0 或者 31.7 等盐线, 表示与外海水的界线; 紫色实线标示 2.2 部分中涉及的研究海域

2.2 苏北沿岸水的淡水来源估算

苏北沿岸水在夏季向大海冲溢明显, 尤其在 $34.5^{\circ}N$ 附近 30.0 等盐线可向东越过 $122.0^{\circ}E$, 形成很强的冲溢水舌。但江苏沿岸多年平均入海水量不大, 通常只有约 200 多亿立方米, 且斗龙港以北各河流入海水量占总入海水量的 90% 以上(杨宏忠, 2012)。入海水量年内分配亦不均匀, 多集中在春、夏季, 连续最大四个月(7—10 月)入海淡水总量为 $210.7 \times 10^8 m^3$, 占年总量的 70.8%; 汛期四个月(6—9 月)入海淡水总量为 $202.7 \times 10^8 m^3$, 连续最小四个月(12 月—翌年 3 月)多年平均入海淡水总量为 $31.6 \times 10^8 m^3$, 仅占年总量的 10.6%(杨宏忠, 2012)。以上淡水是否足以形成冲溢淡水水舌, 为了弄清这一问题, 本节综合考虑入海径流、降水/蒸发通量与研究海区本地高盐水在苏北沿海引起的盐度变化估算了当地的淡水来源。首先假定冲淡水的影响范围为 $119^{\circ}—122^{\circ}E$ 、 $32^{\circ}—35.3^{\circ}N$ 间的近三角形区域(见图 1 中近三角形框区), 取该研究区

为平底, 水深为 10m, 则研究域内水体的体积为 $V \approx 4265.6 \times 10^8 m^3$; 假定外海水盐度取 $S_0 = 31.0$, 沿岸水混合盐度取 $S_1 = 29.0$ 。参考长江口水样盐度值大都在 0.9—1.81 间(王真祥等, 2000)、莱州湾内河流站点盐度低于 5(张锦峰等, 2015), 并考虑到这两处为特殊河口区, 我们这里入海径流水盐度取 $S' = 3.0$, 则需要入海径流量 $x(m^3)$ 。设定苏北沿岸水仅由入海径流、降水/蒸发通量与研究海区本地高盐水的混合组成, 下面考虑两种情况:

(1) 入海径流水先把研究区内等量海水排挤出, 而后混合, 区内水体积保持不变, 则有

$$\begin{aligned} S'x + S_0(V-x) &= S_1V \\ x &= V(S_0 - S_1)/(S_0 - S') \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 入海径流水先在研究区内混合, 而后一部分排出研究区, 一部分使海面升高, 则有

$$\begin{aligned} S_0V + S'x &= S_1(V+x) \\ x &= V(S_0 - S_1)/(S_1 - S') \end{aligned} \quad (2)$$

计算结果显示: 大概需要 $x = 304 \times 10^8 m^3$ 或 $x =$

$328 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的入海淡水。显然所需入海淡水体积比计算区域内水体总体积小 1 个量阶, 因此这种简单估算是可行的。以上是两种极端的情形, 实际结果应介于两者之间。从冬季和春季的盐度分布(图 2d,a)可看出: 31.0 等盐线都在计算域之内, 入海径流量小, 入海径流淡水基本留在苏北沿岸区内, 因此接近第一种情形。夏季是丰水期, 入海径流量大, 图 2b 显示出多处出现淡水向外海溢出, 因此接近第二种情形。因为沿岸区盐度变化主要在夏季, 下面将采用第二方案做进一步计算。基于图 1 和图 2 显示苏北沿岸区水深和盐度分布从岸边向深水域呈阶梯状变化, 计算域等分成 9 个阶梯进行估算。又考虑到冬季是枯水期, 入海径流影响不大, 我们取冬季盐度分布(图 2d)为初始盐度场; 而夏季入海径流影响最大, 夏季盐度分布(图 2b)被视为入海径流注入后混合的结果。那么公式(2)就变成

$$x_j = V_j(S_{0j} - S_{1j}) / (S_{1j} - S') \quad (3)$$

公式(3)的变量同前, 下脚码 j 表示每个阶梯水域

的顺序。整个计算域内需要总淡水量为 $x = \sum_{j=1}^9 x_j$ 。

具体计算数据见表 1。

表 1 依据公式(3)估算得到的淡水量记录表($S'=3.0$)
Tab 1 The estimated freshwater ($S'=3.0$) amount calculated with formula (3)

j	$V_j (\times 10^8 \text{ m}^3)$	S_{0j}	S_{1j}	$x_j (\times 10^8 \text{ m}^3)$
1	286.8/123.5	28.0/29.0	25.0/27.5	39.1/7.6
2	465.9/204.0	29.0/30.5	26.0/28.5	60.8/16.0
3	516.2/198.5	29.5/31.0	28.0/29.5	31.0/11.2
4	520.6	30.0	28.5	30.6
5	495.0	30.5	29.0	28.6
6	465.9	31.5	29.2	40.9
7	435.9	31.5	29.8	27.7
8	345.9	31.7	30.0	21.8
9	291.2	31.8	30.2	17.1
$\sum_{j=1}^9$	4349.5			332.3

j 表示每个阶梯水域的顺序; V_j 表示各阶梯水域的体积; S_{0j} , S_{1j} 表示研究海域各阶梯水域内初始场盐度和混合盐度值; S' 表示径流入海时的盐度值; x_j 表示各阶梯水域内所需的淡水量; 当 $j=1, 2, 3$ 时, 海州湾内各参量选取与其他沿岸区略有不同, 特单独列在表中相应“/”后面

通过上述估算, 得到计算海域需要入海淡水水量约为 $332 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。上述结果是根据冬季(12 月)到夏季(8 月)盐度场的变化估计出来的。由于当地径流入海

量多集中在春季和夏季, 秋冬季是枯水期, 我们研究的相应期间(12 月中旬—8 月中旬)径流入海量约占 2006 年入海水量的 75%(即 $208 \times 10^8 \text{ m}^3$), 故此当地的入海水量约占苏北沿岸水的淡水来源总量的 63%。须指出的是, 前面的估算参考长江口和莱州湾内河流的盐度值(王真祥等, 2000; 张锦峰等, 2015)选取入海径流水盐度为 $S'=3.0$, 为了免除江苏沿岸实际径流水的盐度选取对估算结果的影响, 我们又取不同的径流水盐度应用公式(3)进行了计算, 得到需要的总淡水水量, 如图 3 所示。入海径流盐度值取得越小, 最终计算的需水量越小, 越接近当地上半年的入海径流量, 当地入海径流量在所需淡水水量中占的比重越大, 对苏北沿岸水的淡水来源构成贡献越大。当入海淡水盐度取 0.0 的极端情形下, 需要大概 $296 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的总淡水水量, 当地 2006 年上半年的入海径流淡水所占比重变为约 70%; 而实际入海径流的盐度要大于 0.0, 苏北沿岸水所需的总淡水水量要比此极端情况下略大些, 入海径流量所占比重也相应略小些。综合考虑, 可以认为入海径流水约占 65% 的比重。

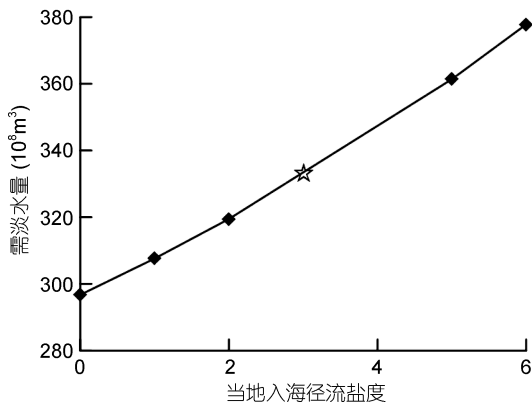


图 3 入海淡水盐度值的选取与所需淡水水量的变化关系图

Fig.3 Relationship between the salinity of the local runoff into the sea and the required freshwater amount (图中星号表示入海淡水盐度值取 3.0 的计算结果)

除了径流水, 还要考虑该海域的降水量、蒸发量等因素。图 4 给出了江苏外海几处(见图 1)多年平均降水量和 2006 年蒸发量的逐月分布。降水量 12、1 月份最小, 7、8 月份最大; 而蒸发量 5、6 月份最小, 9—11 月份最大。全年蒸发总量略大于降水量。本文主要关注与图 2 所用观测资料同期(12 月下半月至翌年 8 月上半月间)的苏北沿岸水变化, 这期间降水总量略大于蒸发量(图 4), 大约高出 182mm, 在当地可

提供约 $70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的淡水量, 约占估算淡水量的 20%。总之, 降水/蒸发通量与当地入海径流水的总和约占当地水源的 85%。除此之外, 长江冲淡水沿江苏沿岸的北上分支也可能是苏北沿岸水的另一水源, 但所占比重相对较小。从夏季苏北沿岸区盐度的分布态势 (图 2b) 可以看出长江冲淡水有一分支贴近启东沿岸进入苏北浅滩区, 但不超过吕四港, 其以北浅滩区看不到向北伸展的低盐水舌。

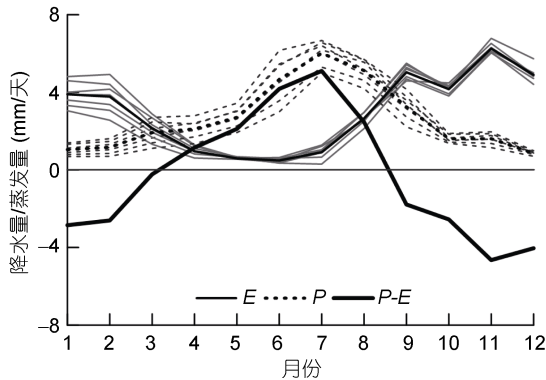


图 4 江苏外海多年平均降水量(P)和 2006 年蒸发量(E)的逐月分布

Fig. 4 Distribution of monthly-mean precipitation (P) and evaporation (E) in 2006 off the Jiangsu coast

灰色点线和细实线分别为图 1 中黑色菱形标示的 7 个点的多年平均降水量和 2006 年蒸发量逐月分布; 黑色点线和细实线分别代表上述 7 点资料平均得到的江苏外海降水量和蒸发量逐月分布; 黑色粗实线是 7 点平均的逐月降水量和蒸发量的差值

2.3 苏北沿岸水的去向与黄海西部环流的关系

冬季苏北沿岸水受东北季风驱动顺岸南下, 在离开苏北浅滩后转向东南进入东海, 这已是人们的共识。从图 2d 也清楚地显示出冬季苏北沿岸水从海州湾南岸水域开始一路向东南, 但盐度小于 31 的水体被限制在沿岸范围内。夏季苏北沿岸水的去向比较复杂, 图 2b 显示出苏北低盐的沿岸水分多支流出沿岸区, 其中主要有 3 支。第一支从弶港北开始向东流出沿岸区; 第二支从射阳河口出发向东偏北流出沿岸, 这支流最强, 其淡水舌继续向东伸展到 122.5°E 。这两支最终都融入夏季南黄海表层环流中。第三支从灌河口开始向北偏东进入海州湾外海。海州湾外海至日照外海位于青岛冷水团环流的西边缘, 其流为南向, 但较弱。黄海表层流具有明显的 Ekman 漂流特征(乔方利等, 2011), 季风驱动的流与青岛冷水团环流流向刚好相反, 当偏南风强时, 北向的 Ekman 流占优势, 因此这一带水域常出现间歇性的表层北向流。

3 结论

本文基于 2006—2007 年春、夏、秋、冬四季的 CTD 观测盐度资料分析了苏北沿岸水季节变化特征, 利用冬、夏季苏北沿岸区盐度场的变化估算了苏北沿岸水的冲淡水来源, 结果表明: 冬季苏北沿岸水受东北季风驱动顺岸南下, 在离开苏北沿岸浅水区后转向东南进入东海。夏季苏北低盐的沿岸水分多支流出沿岸浅水区, 其中主要有 3 支: 第一支从弶港北开始向东流出; 第二支从射阳河口向东偏北流出, 这支流最强, 其淡水舌继续向东伸展, 最终汇入夏季南黄海表层环流中; 第三支从灌河口开始向北偏东进入海州湾外海, 夏季当偏南风强时, 在海州湾外海至日照近海北向的 Ekman 流强于该处冷水团环流, 因而造成这一带水域间歇出现北向表层流。苏北沿岸水的淡水主要来源于江苏沿岸的入海径流、降水/蒸发通量, 其中江苏当地的入海径流贡献最大, 约占总水量的 65%。夏季长江冲淡水有一紧靠启东海岸线向北指向苏北沿岸水域的分支, 但它影响范围有限, 对苏北沿岸水的水源贡献相对不大。

致谢 夏季苏北沿岸区的部分盐度资料由南京大学地理与海洋科学学院、海岸与海岛开发教育部重点实验室的汪亚平教授提供, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王 辉, 1996. 东海和南黄海夏季环流的斜压模式. 海洋与湖沼, 27(1): 73—78
- 王 然, 于 非, 司广成, 2014. 淮河流域 5~6 月降水的年际及年代际变化. 海洋科学, 38(2): 1—5
- 王真祥, 胡国栋, 2000. 入海河流河口及其近海水域盐度分析方法浅析. 海洋技术, 19(4): 54—57
- 韦钦胜, 王辉武, 葛人峰等, 2013. 南黄海悬浮体的垂直分布特性及其指示意义. 地球科学进展, 28(3): 374—390
- 韦钦胜, 葛人峰, 李 艳等, 2012. 夏季江苏近海水文化要素特征及其对沿岸水东北向扩展的指示. 海洋学报, 34(5): 197—204
- 乔方利, 王关锁, 吕新刚等, 2011. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移输运特征对比. 科学通报, 56(18): 1470—1476
- 邢前国, 郑向阳, 施平等, 2011. 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测. 光谱学与光谱分析, 31(6): 1644—1647
- 刘志亮, 胡敦欣, 2009. 黄海夏季近岸海区环流的初步分析及其与风速的关系. 海洋学报, 31(2): 1—7
- 江苏省水利厅, 2007. 2006 年江苏省水资源公报. http://www.jswater.gov.cn/art/2007/3/22/art_1075_37263.html
- 江苏省水利厅, 2008. 2007 年江苏省水资源公报. http://www.jswater.gov.cn/art/2008/7/14/art_1075_37262.html
- 孙湘平, 2006. 中国近海区域海洋学. 北京: 海洋出版社,

- 109—110
- 李 屹, 2010. 中国东部近海夏季环流特征及其动力机制. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文
- 杨宏忠, 2012. 江苏海岸滩涂资源可持续发展的战略选择. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文, 46—48
- 邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥等, 1999. 秋季南黄海水文特征及海水的混合与交换. 海洋学报, 21(5): 12—21
- 张锦峰, 高学鲁, 李培苗等, 2015. 莱州湾西南部海域及其毗邻河流水体营养盐的分布特征及长期变化趋势. 海洋通报, 34(2): 222—232
- 林锡藩, 刘光章, 1979. 黄海西侧沿岸水及其沿岸流的初步探讨. 海洋研究, (3): 43—54
- 秦 毅, 2009. 江苏近海的环流动力研究进展. 科学技术与工程, 9(12): 3389—3394
- 郭炳火, 许建平, 2005. 中国近海环流. 见: 苏纪兰, 袁业立主编. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社, 174—181
- 潘楚东, 2006. LOESS 客观分析方案及其在中国近海的应用. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 潘楚东, 于 非, 张志欣等, 2007. LOESS 四维客观分析在中国近海的应用. 海洋科学进展, 25(2): 149—159
- Liu D Y, Keesing J K, Xing Q G *et al*, 2009. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. Mar Pollut Bull, 58(6): 888—895, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.01.013>
- Lu J, Li A C, Huang P *et al*, 2015. Mineral distributions in surface sediments of the western South Yellow Sea: implications for sediment provenance and transportation. Chin J Oceanol Limnol, 33(2): 510—524
- Lü X G, Qiao F L, 2008. Distribution of sunken macroalgae against the background of tidal circulation in the coastal waters of Qingdao, China, in summer 2008. Geophys Res Lett, 35(23): L23614, <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL036084>
- Oh K H, Lee J H, Lee S *et al*, 2014. Intrusion of Low-Salinity Water into the Yellow Sea Interior in 2012. Ocean Sci J, 49(4): 343—356
- Wu H, Shen J, Zhu J R *et al*, 2014. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu Coast. Con Shelf Res, 76: 108—123
- Xia C S, Qiao F L, Yang Y Z *et al*, 2006. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model. J Geophys Res, 111(C11): C11S03
- Xing Q G, Tosi L, Braga F *et al*, 2015. Interpreting the progressive eutrophication behind the world's largest macroalgal blooms with water quality and ocean color data. Nat Hazards, 78(1): 7—21
- Xu Q, Zhang H Y, Ju L *et al*, 2014. Interannual variability of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea. Int J Remote Sens, 35(11—12): 4099—4113
- Xu Q, Zhang H Y, Cheng Y C, 2016. Multi-sensor monitoring of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea using different methods. Front Earth Sci, 10(2): 378—388
- Ye N H, Zhuang Z M, Jin X S *et al*, 2008. China is on the track tackling *Enteromorpha* spp forming green tide. Nat Prec, <http://hdl.handle.net/10101/npre.2008.2352.1>
- Yuan D L, Zhu J R, Li C Y *et al*, 2008. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations. J Mar Syst, 70: 134—149
- Zhang Z H, Zhang X L, Xu Z J *et al*, 2015. Emergency countermeasures against marine disasters in Qingdao City on the basis of scenario analysis. Nat Hazards, 75(S2): 233—255

WHEREABOUTS AND FRESHWATER ORIGINATION OF THE SUBEI COASTAL WATER

ZHANG Zhi-Xin^{1, 2, 3}, GUO Jing-Song^{1, 2, 3}, QIAO Fang-Li^{1, 2, 3}, LIU You-Yu⁴, GUO Bing-Huo^{1, 3}

(1. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China; 3. Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China; 4. Ningbo Academy of Oceanology and Fishery, Ningbo 315012, China)

Abstract To understand and estimate whereabouts and freshwater origination of the Subei (North Jiangsu Province) coastal water, we analyzed the CTD salinity data acquired in 2006—2007, and the salinity variation in winter and summer. Results show that in winter, the Subei coastal water flows southward alongshore driven by the northeasterly monsoon, and then turns southeast off the Subei shoal and merges with the East China Sea. In summer, low-salinity coastal water flows away off the Subei coast in three major branches (one northward and two eastward). The eastward ones mingle with cold-water masses in summer in the southern Yellow Sea. Our estimated result indicates that the freshwater off the Subei coastal water comes mainly from local runoff (taking 65% of the total), and those from precipitation/evaporation flux and the northward extension of the Changjiang (Yangtze) River plume along the Jiangsu coast are minor contributors.

Key words coastal water; northern Jiangsu; seasonal variation; the runoff into the sea; precipitation