0254-6124/2023/43(6)-1069-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HU Jingwen, WANG Qixiang, GUO Zhiqian, LIU Xiaoyan, WU Zhihong, DONG Wenlong, TIAN Lin. Analysing Interannual Variation of Changjiang Diluted Water Spreading and Its Influencing Factors Based on Remote Sensing Observations (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1069–1080. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023-0059

基于遥感数据的夏季长江冲淡水年际间扩展规律及其影响因素*

胡静雯[1,2] 王其翔[2] 郭志谦[1,3] 刘晓燕[4]
吴志宏[2] 董文隆[2] 田 林[5]

1(潍坊市卫星遥感智能解译技术重点实验室 潍坊 261021)

2(山东省海洋预报减灾中心 青岛 266000)

3(山东省地质矿产勘查开发局第四地质大队 潍坊 261021)

4(齐鲁工业大学 (山东省科学院) 海洋仪器仪表研究所 青岛 266000)

5(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 长江冲淡水向外海扩展对于黄、东海水文生物环境以及物质循环有重大影响。通过分析 1998－2014 年连续 17 年卫星观测结果，研究夏季长江冲淡水向外海扩展的年际间变化规律，分析径流量和风场对其变化的影响。结果显示，夏季长江冲淡水向外海的扩展路径主要有东北偏北型、东北型和偶见型三类，以东北型为主；冲淡水向东扩展位置主要分布在 123°－126°E 区间，年际间差异显著。扩展过程的年际变化主要体现在扩展路径是否转向、向东扩展的态势呈现 7 弱 8 强还是 7 盛 8 衰。长江径流量的多寡对冲淡水向外海扩展的远近起到重要影响作用，径流量较大时，冲淡水向东扩展较远，径流量较小时，冲淡水向东扩展的距离会受到明显的限制。风向的变化是导致冲淡水扩展过程呈现多样性的一个重要原因。东南风、东风对于冲淡水向东北方向扩展起到促进作用，对于向东南方向扩展起到一定的阻碍作用，东北风对冲淡水向外海的扩展起到阻碍作用，迫使冲淡水盘踞在长江口近岸海域。

关键词 空间遥感，长江冲淡水，年际变化

中图分类号 P732

Analysing Interannual Variation of Changjiang Diluted Water Spreading and Its Influencing Factors Based on Remote Sensing Observations

* 潍坊市卫星遥感智能解译技术重点实验室开放基金资助（SYS202303）

2023-05-31 收到原稿，2023-07-26 收到修定稿

E-mail：hujingwen@shandong.cn. 通信作者 田林，E-mail：tianl@cma.gov.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

HU Jingwen[1,2] WANG Qixiang[2] GUO Zhiqian[1,3] LIU Xiaoyan[4]
WU Zhihong[2] DONG Wenlong[2] TIAN Lin[5]

1(*Weifang Key Laboratory of Satellite Remote Sensing Intelligent Interpretation Technology, Weifang* 261021)

2(*Shandong Marine Forecast and Hazard Mitigation Service, Qingdao* 266000)

3(*Shandong Provincial NO.4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang* 261021)

4(*Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao* 266000)

5(*National Satellite Meteorological Center, Beijing* 100081)

Abstract Expansion of the Changjiang Diluted Water (CDW) to the outer sea has a significant impact on the hydrobiological environment and material cycle in the Yellow Sea and the East China Sea. Based on 17 years of satellite fusion data from 1998 to 2014, this paper studies the inter-annual variations of the CDW spreading to the outer sea in summer, analyzes the influences of runoff and wind field on these changes. The result shows that the expansion path is mainly divided into three types: northeast-north type, northeast type and occasional type, in which northeast type is in the majority. The eastern boundary of the CDW expansion appears obviously inter-annual variations, and it mainly distributes in the range of 123°E to 126°E. The inter-annual variation of the expansion process is mainly reflected in the changes of expansion path and the distance of eastern expansion from July to August. The amount of runoff plays an important role in the distance of CDW expansion to the outer sea. When the runoff is large, the diluted water expands farther eastward, while when the runoff is small, the diluted water is limited near the Yangtze River estuary. The diversity of expansion process is obviously affected by wind direction. Southeast wind and east wind promote the expansion of diluted water in the northeast direction, and prevent the expansion in the southeast direction to some extent. Northeast wind prevents the expansion to the outer sea, forcing the diluted water staying near the Yangtze River estuary.

Key words Remote sensing data, Changjiang diluted water, Interannual variation

0 引言

长江是注入东海及西太平洋最大的河流，近10年(2012－2021年)平均每年入海径流量约为9397×10^8 m^3，超过全国入海总量的64%[1]。长江巨量径流出口门后直接浮置于较重的外海水之上，形成一股以低盐、高营养盐、高悬浮体含量为特征的长江冲淡水。随着冲淡水逐渐向外海扩展，水域开阔及外海水渗混，水体盐度逐渐增高，含沙量不断降低，对黄、东海海区的水文生物环境以及西太平洋的物质循环有重大影响。近几年沿海经济快速发展，城市人口急剧增加，分析长江口附近海域的水体运移规律及其影响机制，对渔业生产、生态环境保护以及灾害预警防御等方面具有重要意义。

长江口外海域地形复杂，且受长江径流、风场以及台湾暖流和临近海区冷涡的影响，水动力过程十分复杂。长江冲淡水向外海的扩散，在冬季主体基本上是在一条狭窄带内沿岸直接向南输送；在夏季，若不考虑其他因素的影响，长江冲淡水出口门后，在地转偏向力作用下，应该向右偏转，即向东南方向运动，但诸多研究结果显示，夏季冲淡水向外海扩展呈现出不同的形态。2001年Zou等[2]通过分析1997年7月和1998年8月航次观测所得的资料指出，这两年长江冲淡水均有向南黄海扩展的迹象，1998年8月长江冲淡水先由口门附近冲向东南，然后再转向东北直指济州岛，形成明显的冲淡水舌。2003年Zhu等[3]通过对2000年8月现场观测资料的分析指出，当年夏季长江冲淡水主轴在出长江口门后，即朝东北偏北方向伸展。2009年Zhou等[4]根据现场观测数据的分析指出，1999年8月冲淡水东北分支扩展距离与气候

态接近, 东南分支则较气候态离口门处较远; 而2006 年 8 月冲淡水主要向东南方向扩展, 在江口的东北方向并未形成舌形。除了基于现场观测资料进行研究外, 数值模拟也是分析夏季长江冲淡水扩展规律的常用手段。Wu 等[5] 运用 EOF(Empirical Orthogonal Function)方法对模型结果进行分析, 提出长江冲淡水扩展主要有三条路径, 即传统认识上的夏季向东北扩展和冬季向南扩展, 以及在多个季节受潮致余流的影响沿苏北海岸向北扩展。Guo 等[6] 利用区域海洋模式 ROMS(Regional Ocean Modeling System)研究发现, 夏季长江冲淡水主要有三种扩展形态, 即向东北方向、东南方向和东南-东北双向扩展, 其中东南方向占比最高。诸多结果显示, 夏季长江冲淡水向外海的扩展存在多种路径, 而且年际间差异显著。此外, 冲淡水向外海扩展呈现多样性的影响因素分析也一直是学者们关注的热点。Zhao 和 Wang[7] 通过对现场观测资料的分析, 提出径流量的逐月增长促进了长江冲淡水的扩展范围, 风向则控制冲淡水的转向。在风场和径流的共同作用下, 决定了春季长江冲淡水出口门后的扩散模式。Liu 等[8] 用 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 数值模型得到的结果显示, 风对长江冲淡水的扩展有显著的影响, Ekman 输运使得水流向风的右侧扩展, 东风、东南风、南风、西南风时冲淡水离岸扩展明显, 其余风向对冲淡水离岸扩展有限制作用。虽然针对夏季长江冲淡水向外海的扩展规律及影响机制已有部分结论, 但以往的研究多基于短期的现场观测数据, 具有时间特殊性, 不同的数值模型得到的结果也受到边界参数选择的影响, 具有一定局限性, 冲淡水的扩展规律还有科学问题尚未发现, 影响机制尚有争议需要解决, 基于更多的观测资料对其进行进一步探索验证具有重要意义。

基于长时间连续、同步的观测资料分析长江冲淡水的扩展规律和影响机制更能反映客观事实, 具有重要科学价值。遥感观测具有大范围、全天时的特点, 数据具有时空上的同步性和连续性, 弥补了传统观测方式的不足, 能够满足研究长江冲淡水年际变化的需要。本文利用连续 17 年(1998－2014 年)的水色卫星融合数据, 对夏季长江冲淡水扩展变化进行了年际间的统计分析, 并探讨了风场和径流量对冲淡水扩展变化的影响。考虑到 7 月和 8 月份冲淡水向外海的扩展基本进入全盛时期, 其扩展形态能较好地反映夏季特征, 因此本文选择这个时期进行分析。

1 数据与方法

1.1 数据来源

使用的遥感资料来源于欧空局 GlobColour 计划的多卫星融合数据, 是将 MODIS, SeaWiFS, MERIS 和 VIIRS 四颗极轨水色卫星的数据基于加权平均算法得到的数据集*。该数据集的数据已经在全球尺度上进行了一定的验证分析与应用, 具有较高的精度和可靠性[9,10]。本文使用的数据空间分辨率是 4 km, 时间范围是 1998 年至 2014 年。由于时间跨度较长, 期间个别卫星退役, 新的卫星投入使用, 所以不同年融合数据的来源也略有差异。1998 年 1 月至 2002 年 4 月数据来源于 SeaWiFS 卫星, 2002 年 5－6 月为 MERIS 和 SeaWiFS 的融合数据, 2002 年 7 月至 2010 年 12 月则是 MERIS, MODIS, SeaWiFS 三个传感器的融合数据, 2011 年 1 月至 2012 年 1 月为 MERIS 和 MODIS 的融合数据, 2012 年 2－4 月为 MERIS, MODIS 和 VIIRS 三个传感器的融合数据, 2012 年 5 月至 2014 年 12 月为 MODIS 和 VIIRS 的融合数据。

以大通站作为代表站位表征长江径流量, 数据来源于 1998 年至 2014 年《长江泥沙公报》中的逐月径流量实测资料。本文研究所使用的风场资料来源于 NOAA(National Climatic Data Center)提供的多卫星融合的日平均数据**, 数据空间分辨率为 0.25°×0.25°, 风速为(30°－33°N, 122.5°－125°E)区域内的平均风速。

1.2 盐度遥感反演方法

在研究长江冲淡水问题时, 一般以海表盐度(Sea Surface Salinity, SSS)表征其影响范围[11]。现场观测是最早用于获取海表盐度的方法, 但由于空间覆盖率有限, 时间无法同步, 导致其更适用于小区域、短时间序列的科学研究, 难以描述不同时空尺度的变化[12,13]。采用遥感手段获取观测资料, 在避免因叠加导致的时空错位误差的同时, 也能够发现更多的科学细节。Aquarius/SAC-D, SMOS(Soil Moisture and Ocean

* http://globcolour.info

** http://www.ncdc.noaa.gov/rsad/blendedseawinds.html

Salinity)和 SMAP(Soil Moisture Active Passive)是3种可以提供海表盐度数据的遥感卫星,SMAP是目前在轨运行且主要提供数据的卫星。但受限于较低时空分辨率、易受陆地射频干扰等问题,其在近海岸特别是河口区域存在较大局限性[14,15]。有色可溶性有机物(Colored Dissolved Organic Matter, CDOM)是水体的重要组成部分,由于其在海洋中具有保守性和稳定性,常被用来作为海水的固有示踪物。河口区是富含CDOM、悬浮泥沙等有色物质的河流淡水与高盐度海水交汇过渡区,很多研究表明,CDOM的吸收(a_{CDOM})与海表盐度之间存在较好的相关关系[16–19]。

Zhang[20]利用黄东海现场测量数据调整了Dong等[21]建立的遥感反演算法中的部分参数,调整后的模型更适用于黄东海a_{CDOM}的反演。Bai等[18]基于现场调查数据(2006−2011年期间囊括四个季节和完整盐度范围的9个航次的东海现场调查资料)建立起CDOM在355 nm处的吸收系数$a_{\mathrm{CDOM(355)}}$与海表盐度之间的相关关系,并与国际上应用较为广泛的反演模型进行对比,结果表明其具有更高的精度。

利用Dong等[21]、Zhang[20]和Bai等[18]的反演模型,以a_{CDOM}为中间量建立起卫星数据中443 nm处遥感反射率$R_{\mathrm{rs(443)}}$, 555 nm处遥感反射率$R_{\mathrm{rs(555)}}$, 670 nm处遥感反射率$R_{\mathrm{rs(670)}}$与海表盐度的相关关系,具体如下。

计算443 nm处颗粒物的吸收系数$a_{\mathrm{d(443)}}$:

$$a_{\mathrm{d(443)}} = 0.795 \times \sigma^{0.821}. \tag{1}$$

式中,$\sigma = 0.05 \times a_{\mathrm{nw(443)}} + b_{\mathrm{bp(555)}} \times 1.4^{\frac{R_{\mathrm{rs(555)}}+R_{\mathrm{rs(670)}}}{R_{\mathrm{rs(443)}}}}$,443 nm处的非水总吸收$a_{\mathrm{nw(443)}}$, 555 nm处颗粒物的后向散射系数$b_{\mathrm{bp(555)}}$由QAA(Quasi-Analytical Algorithm)算法[22]得到。

计算任意波段颗粒物的吸收系数:

$$a_{\mathrm{d}}(\lambda) = a_{\mathrm{d(443)}} \times \mathrm{e}^{-S_{\mathrm{ad}} \times (\lambda - 443)}, S_{\mathrm{ad}} = 0.012. \tag{2}$$

计算CDOM和浮游植物的总吸收值:

$$a_{\mathrm{phg}}(\lambda) = a_{\mathrm{nw}}(\lambda) - a_{\mathrm{d}}(\lambda). \tag{3}$$

计算CDOM在443 nm处的吸收系数:

$$a_{\mathrm{CDOM(443)}} = a_{\mathrm{phg(443)}}/(1+9.56\times10^4\times\mathrm{e}^{-11.13\times\psi}). \tag{4}$$

式中,

$$\psi = \frac{a_{\mathrm{phg}(\lambda_2)}}{a_{\mathrm{phg}(\lambda_0)}} + \frac{a_{\mathrm{phg}(\lambda_1)} - a_{\mathrm{phg}(\lambda_2)}}{a_{\mathrm{phg}(\lambda_0)}} \times \frac{\lambda_2 - \lambda_0}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$\lambda_0 = 443, \lambda_1 = 412, \lambda_2 = 490.$$

计算CDOM在355 nm处的吸收系数:

$$a_{\mathrm{CDOM(355)}} = a_{\mathrm{CDOM(443)}} \times \mathrm{e}^{S_{\mathrm{CDOM}} \times (443-355)},$$
$$S_{\mathrm{CDOM}} = 0.014. \tag{5}$$

计算海表盐度的值:

$$S_{\mathrm{al}} = 35.595 - 14.151 \times a_{\mathrm{CDOM(355)}}. \tag{6}$$

需要说明的是,文中使用的通过a_{CDOM}反演SSS的算法适用于长江口海表盐度在2～33 psu之间的区域。另外,由于遥感观测数据在临近岸边的海域往往反演失败,所以本算法更适用于研究长江冲淡水自122.2°−122.5°E转向后的扩展过程。

2 长江冲淡水向外海扩展的年际变化特征

图1和图2显示了1998−2014年夏季(7月和8月)长江口外海域表层盐度的月平均分布情况,选取28 psu等盐度线为外缘线的水舌主轴方向作为扩展路径,28 psu等盐度线的东侧最远边界表征冲淡水向东扩展的距离。结果显示,夏季长江冲淡水在扩展形态以及同年夏季月际间的扩展过程上都存在显著的年际变化。

2.1 扩展形态的年际变化

通过对图1和图2的分析可知,夏季长江冲淡水自122.2°−122.5°E转向后在不同年份呈现出不同的形态。从扩展路径的角度分析,基本分为东北偏北型(NE-N)、东北型(NE)和偶见型(东北偏东(NE-E)、东北–东南双向扩展(NE-SE)以及无明显指向(None)等特异形态)三种类型(见图3),不同扩展路径及对应年份如表1所示。

由统计结果可知,1998−2014年间,长江冲淡水夏季的扩展路径以东北指向为主(>50%),其次是东北偏北型,约占26%,偶见型中无明显指向型比例较大,占12%,东北偏东以及东北–东南双向的路径出现概率较小。从向东扩展距离(以7和8月中最大值表征当年夏季的东扩距离)的角度分析,通常情况下(>70%)夏季长江冲淡水会东扩至124°−125.5°E区间,个别年份会出现向东扩展较远或者限制在近口门附近海域的情况(见图4)。如1998年和2007年,冲淡水向东最远扩展至125.5°E以东,而2001年和2012年则停留在123.5°E附近。

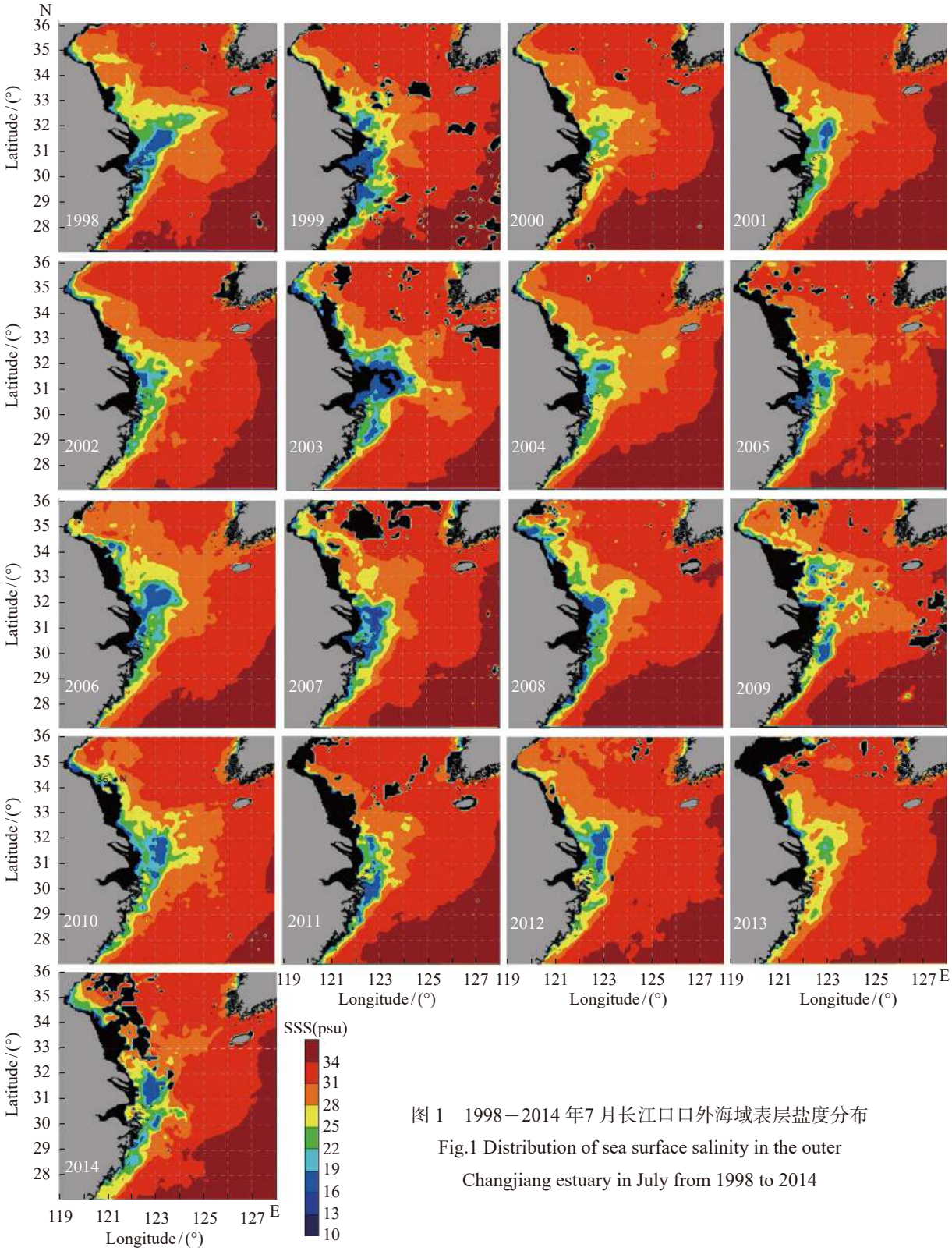


图 1 1998－2014 年7 月长江口口外海域表层盐度分布

Fig.1 Distribution of sea surface salinity in the outer Changjiang estuary in July from 1998 to 2014

2.2 扩展过程的年际变化

在以往研究中, 通常只关注冲淡水扩展形态的变化, 对于冲淡水夏季扩展过程的变化研究较少。冲淡水向外海的扩展过程受多种动力因素相互影响制约后, 最终呈现出某种态势, 摸清扩展过程的年际变化对于深入理解长江口外海域多种动力机制的走向及

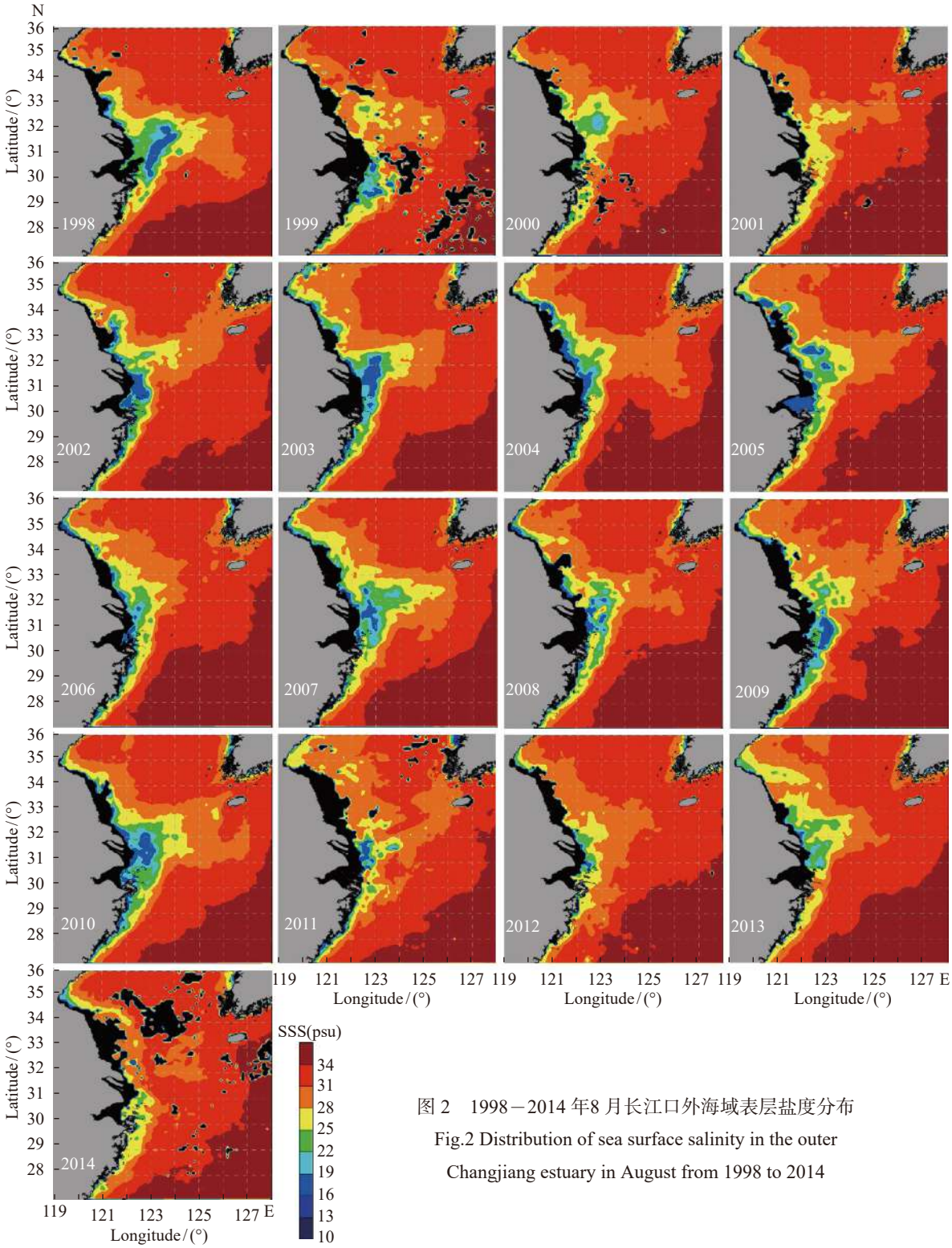


图 2 1998－2014 年8 月长江口外海域表层盐度分布

Fig.2 Distribution of sea surface salinity in the outer Changjiang estuary in August from 1998 to 2014

变化具有重要参考价值。冲淡水向外海的扩展通常在 7 和 8 月达到全盛，在这两个月内冲淡水的扩展变化往往比较剧烈，通过对图 1 和图 2 的对比可以看出，在不同年份的 7 和 8 月间，冲淡水扩展过程的多样性主要体现在扩展路径是否转向、向东扩展的态势是逐月增强还是由盛转衰两方面。具体分类如下。

（1）扩展路径变化显著。例如 2003 年 7 月，28 psu 等盐度线包围的冲淡水呈现同时向东北和东

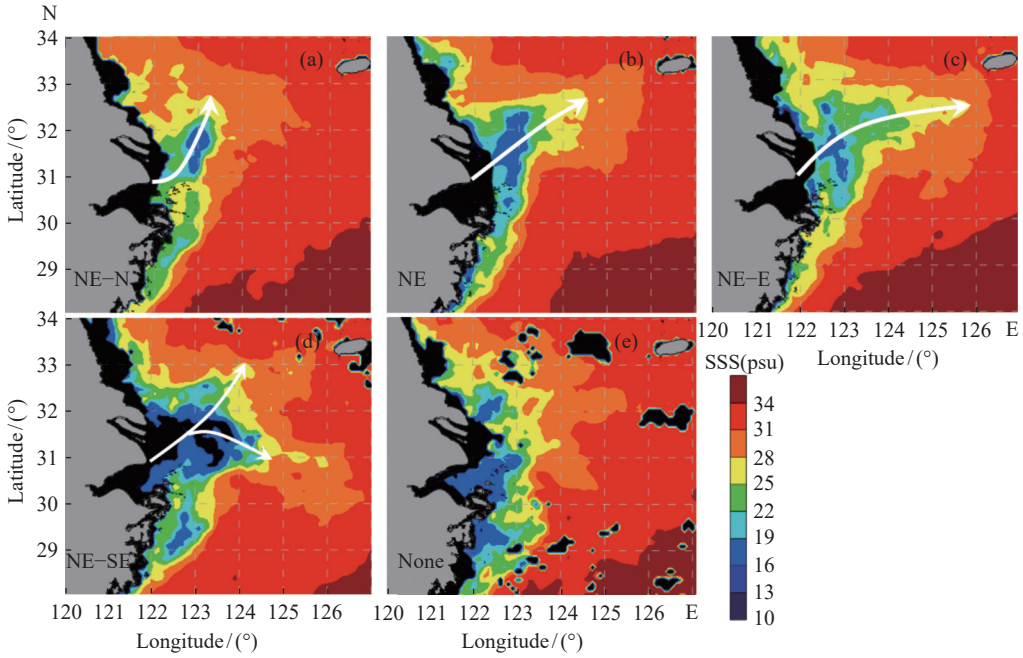


图 3 东北偏北型（NE-N）（a）、东北型（NE）（b）、东北偏东型（NE-E）（c）、东北–东南双向型（NE-SE）（d）和无明显指向型（None）（e）5 种扩展路径示例图。白色箭头代表扩展路径

Fig. 3 Samples of five types of expansion path: northeast-north type (NE-N), northeast type (NE), northeast-east type (NE-E), northeast-southeast type (NE-SE) and no-direction type (None). White arrow represents expansion path

表 1 1998—2014 年 7 月和 8 月长江冲淡水扩展路径及对应年份

Table 1 CDW expansion path and corresponding year on July and August from 1998 to 2014

冲淡水路径		7月	8月
东北偏北型		2001, 2007, 2008, 2012	2000, 2001, 2004, 2008, 2012
东北型		1998, 2000, 2002, 2005, 2006, 2009, 2011, 2013	1998, 2002, 2003, 2005, 2006, 2009, 2011, 2013
偶见型	东北偏东	2010	2007, 2010
	东北–东南	2003, 2004	
	无明显指向	1999, 2014	1999, 2014

南两个方向扩展，且东南方向的分量呈较强的态势（东北方向扩展东至 124.2°E，而东南方向扩展则接近 125°E）。进入 8 月后，冲淡水东南方向扩展的分量消失，冲淡水舌完全指向东北，且冲淡水向东北方向伸展到更远，达到 124.6°E 附近。与之类似的还有 2000 年、2004 年和 2007 年，冲淡水在 7—8 月向外海扩展的过程中，扩展路径均发生了转向，有的由东北偏北方向转为东北偏东，有的由东北方向上抬向更北的方向伸展，还有的水舌不再突出，没有明显指向。

(2)向东扩展距离变化显著。有些年份，7 月份冲淡水盘踞在近岸海域，进入 8 月份，冲淡水舌迅速形成，达到向外海扩展的全盛时期，呈现 7 月弱 8 月强的态势。与之相反的是，有些年份在 7 月份已达到向外海扩展的全盛时期，进入 8 月，冲淡水扩展势头已然衰退，甚至有的冲淡水舌已经消失，呈现 7 月盛 8 月衰的态势。例如 2005 年和 2014 年，前者在 7 月时冲淡水向外扩展态势初步形成，28 psu 等盐度线包围的冲淡水没有形成明显的冲淡水舌，到了 8 月份冲淡水向外海的扩展进入全盛时期，水舌形成，舌轴指向东北方向，28 psu 等盐度线的东边界达到 124°E 以东。后者在 7 月时 28 psu 等盐度线的东侧边界已经到达 124.2°E，进入 8 月份冲淡水不再呈现向外海扩

展的趋势，而是停留在长江口沿岸，123.3°E 以西海域，冲淡水舌消失。与之类似，2007 年呈现 7 月弱 8 月强，而 2006 年呈现 7 月盛 8 月衰的形态。

还有部分年份，冲淡水的扩展在 7—8 月份比较均衡，路径未发生转向，扩展态势也没有明显差异。例如 2010 年和 2013 年，冲淡水流向保持一致，前者均为东北偏东，后者均为东北方向，扩展态势也基本保持稳定，向东扩展距离的变化不超过 0.2°E。

3 长江冲淡水扩展年际变化的影响因素分析

长江口门外海域水文环境动力复杂，冲淡水从河口扩展到东海和黄海大范围海域时，会横穿河口–陆架海域，易受到海底地形、径流量、风场、背景流场以及邻近海域涡旋多重势力的作用。由于长江径流量巨大和偏南季风盛行是长江口夏季的显著特征，很多研究将冲淡水的扩展变化与两者联系起来。本文将长江径流量和风场变化，分别与冲淡水扩展的年际间变化特征进行相关性分析，探讨两者在冲淡水向外海扩展中起到的作用。

3.1 径流量对冲淡水扩展年际变化的影响

早期针对径流量的多寡是否影响冲淡水向外海的扩展路径问题存在争议。有研究认为冲淡水区夏季扩展路径变化与长江月平均径流量的多寡有关[23,24]。有研究认为径流量的大小对长江冲淡水的作用，主要体现在改变近口门处冲淡水东南和东北扩展的势力以及水文环境要素，对向外海扩展路径并不起决定性作用[4]。

图 5 显示了 1998—2014 年 7 和 8 月长江径流量

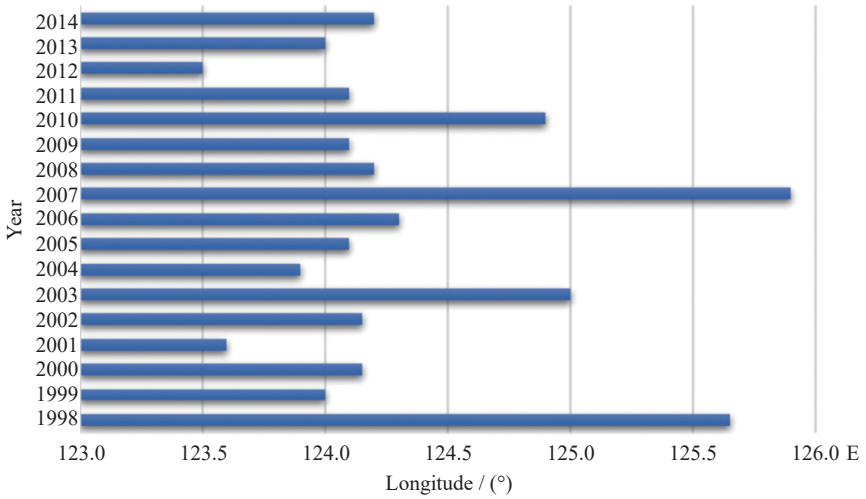


图 4 夏季长江冲淡水向东扩展距离的年际变化

Fig. 4 Inter-annual changes of CDW eastern expansion position in summer

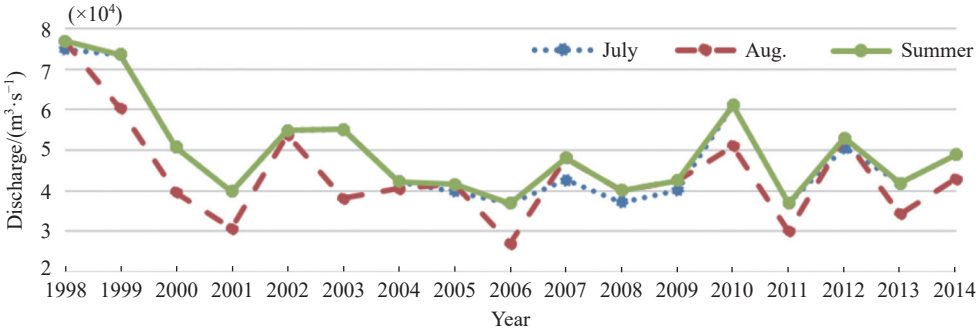


图 5 7 月和 8 月长江径流量年际变化。夏季径流量取当年 7 月和 8 月中的较大值

Fig. 5 Inter-annual changes of Changjiang River discharge in July and August. The discharge in summer is the larger value in July and August of the same year

的年际变化, 考虑到径流量对冲淡水的扩展可能存在滞后影响, 选取每年 7 和 8 月中的较大值表征当年夏季径流量的数值。 结合表 1 进行分析可以看出, 不同年份间夏季的径流量变化显著, 年际间差距最大可达 4.00×10^4 $m^3\cdot s^{-1}$, 但与冲淡水扩展路径的年际多样性没有呈现出规律性的关联。例如夏季径流量均超过 7.35×10^4 $m^3\cdot s^{-1}$ 的 1998 年和 1999 年, 其扩展路径一个呈现典型的东北型, 一个却无明显指向; 径流量均小于 3.70×10^4 $m^3\cdot s^{-1}$ 的 2006 年和 2011 年, 冲淡水扩展路径一个为东北型, 一个无明显指向; 径流量在多年平均值(4.96×10^4 $m^3\cdot s^{-1}$)附近的 2000 年、2007 年和 2014 年扩展路径也各不相同; 而扩展路径保持一致的 2001 年、2008 年以及 1998 年和 2013 年, 2001 年和 2008 年径流量相差无几, 1998 年和 2013 年径流量差别高达 3.51×10^4 $m^3\cdot s^{-1}$。由此验证了径流量对冲淡水扩展路径的选择影响不大的观点。

虽然径流量的多寡对冲淡水扩展路径的选择上没有决定性作用, 但有研究提出, 其与冲淡水向外海扩展的远近存在较大相关性[25], 本文的研究结果证实了这个观点。将夏季长江径流量与当年冲淡水向东扩展距离进行相关性分析(见图 6)。结果显示, 除了个别年份(1999 年、2007 年和 2012 年), 径流量的多寡确实对冲淡水向东扩展的远近起到重要作用, 两者的相关系数达到 0.86。在径流量较大的年份, 往往冲淡水向东扩展较远, 例如径流量超过 5.50×10^4 $m^3\cdot s^{-1}$ (1998 年、2003 年、2010 年), 冲淡水均向东伸展至 124.5°E 以东; 而当径流量较小时, 往往冲淡水向东扩展的距离有限, 局限在 124°E 以西海域。

由于径流量对于冲淡水扩展作用存在滞后现象, 即使有些年份 8 月份径流量开始减弱, 但冲淡水向外海的扩展仍然会受到 7 月入海淡水的作用, 因此冲淡水在夏季 7−8 月间扩展过程的年际间差异性应该与径流量的变化关系不大。综上所述, 径流量年际间的多寡变化主要对冲淡水向外海扩展的远近起到重要影响作用。

3.2 风场对冲淡水扩展年际变化的影响

由于长江口海域处于东亚季风区, 夏季多盛行南风, 很多研究将夏季冲淡水的向外海扩展路径的选择与风场联系起来。有研究认为与其他因素相比, 风场效应可以忽略, 不足以使冲淡水转向[26]。也有研究认为风场对长江冲淡水的扩展路径的选择十分关键[27,28], 且冲淡水对于风场变化的响应较快, 只是不同

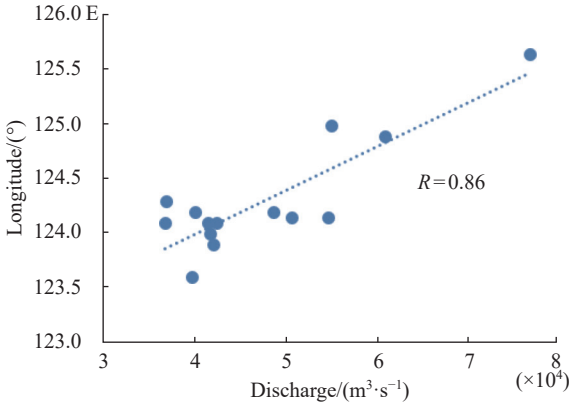


图 6 夏季长江径流量与冲淡水向东扩展距离的关系

Fig. 6 Relationship between Changjiang River discharge and CDW eastern expansion position in summer

的风向的风究竟对冲淡水的扩展方向起着怎样的作用, 目前尚无定论, 甚至存在相反的说法[29]。此外, 风速的影响也需要更多的观测资料进行验证说明。

图 7 显示了 1998−2014 年 7 月和 8 月长江口附近海域风场年际变化(见图 7a)以及提取出的风速的年际变化(见图 7b)情况。可以看出, 夏季风场的年际变化显著, 从风速的角度来看, 7 月和 8 月风速在 4.60～7.62 $m\cdot s^{-1}$ 浮动, 年际间差异最大值超过 2.50 $m\cdot s^{-1}$, 同一年中, 7 月和 8 月风速变化年际间差异也从最小的 0.06 $m\cdot s^{-1}$ 变化到最大的 2.44 $m\cdot s^{-1}$。从风向的角度分析, 7 月份均为偏南风, 东南风占大多数, 个别年份呈现西南风。8 月份以偏东风为主, 东南风出现的频率明显高于东北风。

3.2.1 对扩展形态年际变化的影响

通过图 7 和表 1 的对比分析, 可以看出风速的变化与冲淡水扩展路径的选择没有明显相关性。例如 2013 年 7 月风速和 2012 年 8 月风速均高于 7.20 $m\cdot s^{-1}$, 但冲淡水扩展路径一个为东北型, 一个无明显指向; 1998 年、2002 年和 1999 年 7 月, 风速均在 5.10 $m\cdot s^{-1}$ 上下, 但前两年冲淡水扩展都指向东北方向, 后者却无明显指向。将 7 月和 8 月长江口附近海域的风速与当月冲淡水向东扩展距离进行相关性分析(见图 8), 结果显示, 风速的大小对于冲淡水向东扩展的远近也不起决定性作用。当风速较大时, 例如 2012 年 8 月和 2013 年 7 月, 冲淡水向东扩展的距离依然局限在 124°E 以西; 当风速较小时, 例如 1998 年, 冲淡水也会出现向东伸展至很远的现象; 当风速相当时, 例如

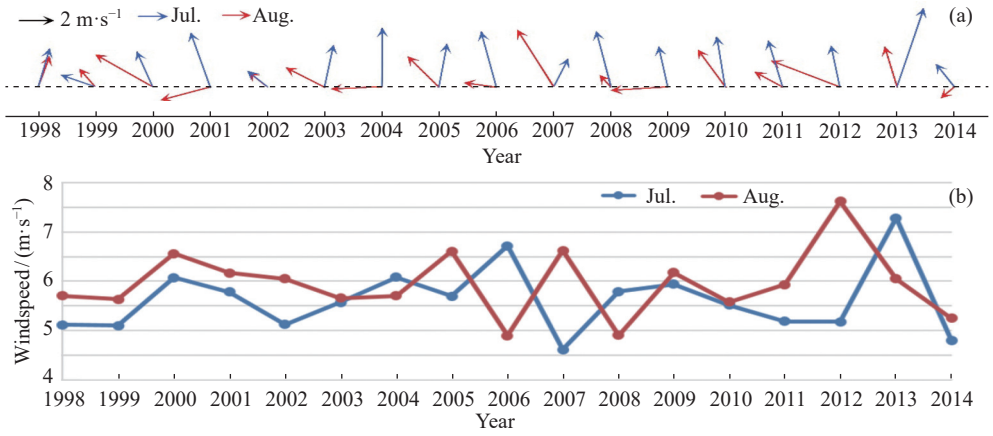


图 7 7 月和 8 月长江口附近海域风场分布（a）及风速（b）的年际变化

Fig. 7 Inter-annual changes of wind field (a) and wind speed (b) in July and August

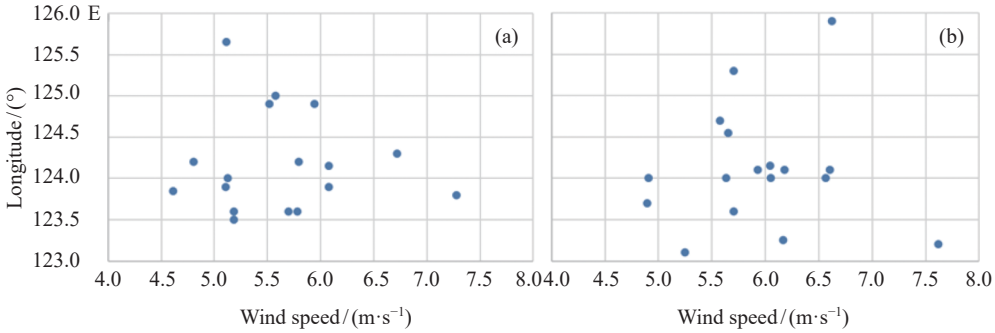


图 8 7 月（a）和 8 月（b）风速大小与当月冲淡水向东扩展距离的关系

Fig. 8 Relationship between wind speed and CDW eastern expansion position in July (a) and August (b)

1998 年、2002 年和 1999 年 7 月，冲淡水分别东扩至 125.7°E、124°E 和 123.9°E，最大距离差接近 200 km。

综上所述，风速的年际间差异不是冲淡水扩展形态呈现多样性的根本原因。

3.2.2 对扩展过程年际变化的影响

与径流量的滞后作用不同，冲淡水在从近河口向外海扩展的过程中，持续不断地受风场影响，对风场变化的响应也十分迅速。由此推测，7 月和 8 月间风场变化的年际多样性可能是冲淡水扩展过程出现年际变化的重要因素，下文从风速和风向两个角度进行验证分析。

2006 年、2007 年和 2012 年，7 月和 8 月间的风速差均大于 1.8 $m\cdot s^{-1}$，但 2006 年冲淡水持续向东北伸展，2007 年和 2012 年则由东北偏北分别转向为东北偏东和无明显指向。2003 年和 2010 年，7 月和 8 月间风速几乎不变，但前者冲淡水由东北东南双向扩展转为东北单向，后者则稳定为东北偏东方向。由此推测，风速的变化与否，对冲淡水的路径没有显著影响。通过对 1998－2014 年 7 月和 8 月长江口附近风向的统计分析可知，17 年中同年 7 月和 8 月份风向发生改变的概率接近 50%，主要为东南转向东北、西南转向东南两类（见表 2），其余年份夏季期间风向基本保持为东南风。选取风向发生转变的年份，对冲淡水扩展过程进行分析，可以发现，冲淡水夏季的扩展过程与当年风向变化密切相关。

2001 年、2009 年和 2014 年 7 月和 8 月间，风向均由东南方向转为东北，风速均是 8 月明显强于 7 月，冲淡水的扩展在路径没有改变的情况下，呈现出 7 月强盛而 8 月衰退的形态。以 2014 年为例，7 月东南偏南风盛行，冲淡水向东扩展至 124.2°E。进入 8 月份，主导风向转为东北偏北，冲淡水舌几乎消失，冲淡水回缩至 123°E 附近。由此推断东北风遏制冲淡水向外海的扩展。

当 7 月和 8 月间风向由西南转为东南时，冲淡水

表 2 7 月和 8 月风向转变情况及对应年份

Table 2 Changes of wind direction from July to August and corresponding year

7月和8月风向转变	对应年份
东南–东北	2001, 2009, 2014
西南–东南	2003, 2005, 2007, 2013
南–东北	2004
未发生转向（东南–东南）	1998, 1999, 2000, 2002, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012

大部分都呈现出向东大幅扩展的形态。例如 2005 年和 2007 年, 7 月份冲淡水主要聚集在长江口邻近海域, 水舌初步形成, 东扩水体限制在 123.5°E 附近。进入 8 月份后, 冲淡水向外海扩展的势力明显增强, 水舌向东伸展的位置分别东移至 124°E 以东海域, 2007 年已经接近 126°E。由此推断东南风促进冲淡水向外海扩展。 2013 年风向也由西南转为东南, 但冲淡水向东扩展态势增加不明显, 这可能与当年 8 月的径流量降低、风速减弱起到了互抵作用导致。

值得注意的是, 2003 年 7 月和 8 月期间风向由西南偏南风转为东南风, 而 2004 年 7 月和 8 月期间由南风转为东南偏东风, 均导致了冲淡水中向东南方向扩展的分量消失, 前者表现为向东北方向延伸至更远, 后者则表现为扩展路径转向东北偏北。由此猜测, 东南风、东风对于冲淡水向东北方向扩展起到促进作用, 对于向东南方向扩展起到一定的阻碍作用。Liu 等[8] 也得到类似的结论, 也符合东南风驱动的 Ekman 输运促使冲淡水向风向右侧输运的机制。

4 结论与展望

以 a_{CDOM} 为中间量建立起 R_{rs} 与海表盐度的相关关系, 利用 1998－2014 年卫星融合数据, 从长时间尺度上对夏季长江冲淡水向外海的年际间扩展规律进行研究, 并分析径流量和风场对于冲淡水扩展呈现年际间多样性的作用和影响, 主要得出如下结论。

(1)夏季长江冲淡水向外海扩展形态存在显著的年际变化。扩展路径表现为东北偏北型、东北型和偶见型(东北偏东、东北–东南双向扩展以及无明显指向等特异形态)三类, 以东北指向为主; 冲淡水向东扩展位置分布在 123°－126°E 区间, 年际差异明显。

(2)长江冲淡水在的 7－8 月间的扩展过程呈现出年际多样性, 有的年份扩展路径明显转向, 有的年份向东扩展距离呈现 7 月弱 8 月强或者 7 月盛 8 月衰, 还有的年份冲淡水的扩展在 7 月和 8 月份比较均衡, 路径未发生转向, 扩展态势也没有明显差异。

(3)长江径流量的多寡不能改变冲淡水的扩展路径, 但其是冲淡水向东扩展远近的重要影响因素, 即径流量较大时, 冲淡水向东扩展较远, 径流量较小时, 冲淡水向东扩展的距离会受到明显的限制。

(4)冲淡水的扩展对于风场变化响应迅速, 风向的变化是导致冲淡水在 7－8 月间扩展过程呈现多样性的一个重要原因。东南风、东风对于冲淡水向东北方向扩展起到促进作用, 对于向东南方向扩展起到一定的阻碍作用。东北风会对冲淡水向外海的扩展起到阻碍作用, 迫使冲淡水收缩在长江口近岸海域。

通过本文的研究结果可知, 径流量和风场都不是冲淡水扩展路径呈现年际多样性的主要影响因素, 这可能是因为冲淡水在向外海扩展过程中, 受到了北侧黄海冷涡夹挤和诱导, 南侧台湾暖流的顶托, 东侧北部海区冷涡的阻碍等多种势力的影响, 而这几股势力的位置和强弱年际间存在明显差异, 可出现各种各样的耦合关系, 所以在不同年份其对长江冲淡水向外海扩展的综合作用有一定差别, 导致冲淡水的扩展形态呈现多样性[2], 接下来将通过更多的研究手段和实测数据去探讨其相关关系。

参考文献

[1] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2021 China River Sediment Bulletin[R/OL]. (2022-07-04)[2023-05-30]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb/202207/t20220704_1583075.html

[2] ZOU E'mei, GUO Binghuo, TANG Yuxiang, *et al*. An analysis of summer hydrographic features and circulation in the Southern Yellow Sea and the northern East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, **32**(3): 340-347 (邹娥梅, 郭炳火, 汤毓祥, 等. 南黄海及东海北部夏季若干水文特征和环流的分析 [J]. 海洋与湖沼, 2001, **32**(3): 340-347)

[3] ZHU Jianrong, DING Pingxing, HU Dunxin. Observation of the diluted water and plume front off the Changjiang River Estuary during August 2000[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, **34**(3): 249-255 (朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000 年 8 月长江口外海区冲淡水和羽状锋的观测 [J]. 海洋与湖沼, 2003, **34**(3): 249-255)

[4] ZHOU F, XUAN J L, NI X B, *et al*. A preliminary study on variations of the Changjiang Diluted Water between August 1999 and 2006[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, **31**(4): 1-12

[5] WU H, SHEN J, ZHU J R, *et al*. Characteristics of the Changjiang plume and its extension along the Jiangsu

Coast[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, **76**: 108-123

[6] GUO Yaru, RONG Zengrui, CHI Yutao, *et al*. The modeling study of interannual variability of Changjiang River plume in summer season[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(4): 30-41 (郭亚茹, 荣增瑞, 迟玉涛, 等. 夏季长江冲淡水年际变化的数值研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2020(4): 30-41)

[7] ZHAO Yuxi, WANG Zhenyan. The monthly changes and its influencing factors of the Changjiang Diluted Water off the estuary in spring[J]. *Marine Sciences*, 2021, **45**(10): 81-92 (赵玉喜, 王珍岩. 春季长江冲淡水在口门外海域逐月变化及其影响因素分析 [J]. 海洋科学, 2021, **45**(10): 81-92)

[8] LIU B C, LI J P, FENG L C. A modeling study of the effect of wind on Changjiang (Yangtze) River diluted water in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, **35**(1): 25-37

[9] MORADI M. Evaluation of merged multi-sensor ocean-color chlorophyll products in the Northern Persian Gulf[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, **221**: 104415

[10] TONG Ruqing, SONG Qingjun, XIA Guangping, *et al*. Validation and analysis of multi-sensor merged chlorophyll datasets in offshore China[J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2023, **57**(1): 69-76 (童如清, 宋庆君, 夏光平, 等. 中国近海多传感器合并叶绿素数据集检验与分析 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2023, **57**(1): 69-76)

[11] MAO Hanli, GAN Zijun, LAN Shufang. A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing processes[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, **5**(3): 183-206 (毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨 [J]. 海洋与湖沼, 1963, **5**(3): 183-206)

[12] LIANG Wenhao, WANG Xiaochun, WU Qiong, *et al*. Validation and application of SMAP SSS observation in Chinese adjacent seas[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, **37**(4): 565-573 (梁文浩, 王晓春, 吴琼, 等. SMAP 卫星海表盐度观测在中国近海的验证与应用 [J]. 海洋科学进展, 2019, **37**(4): 565-573)

[13] ZHAO Wenjie, LI Hongping, LIU Haixing. Remote sensing retrieval of sea surface salinity based on RBF neural network from SMAP satellite[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, **40**(3): 513-522 (赵文杰, 李洪平, 刘海行. SMAP 卫星的 RBF 神经网络海表盐度遥感反演 [J]. 海洋科学进展, 2022, **40**(3): 513-522)

[14] NIU Yuan, QIU Zhiwei, LIU Ruixiang, *et al*. Quality assessment and characteristic analysis of global sea surface salinity products based on SMAP[J]. *Journal of Oceanographic Research*, 2021, **39**(3): 53-62 (牛原, 邱志伟, 刘瑞翔, 等. SMAP 卫星海表盐度产品精度评定与全球海表盐度特征分析 [J]. 海洋学研究, 2021, **39**(3): 53-62)

[15] WANG Z H, ZHANG J, LIU Y X. Retrieval of sea surface salinity from the microwave radiometer onboard HY-2A[J]. *Marine Forecasts*, 2022, **39**(2): 14-19.

[16] HE Yingqing, FENG Youbin, FU Qinghua, *et al*. A study on optical remote sensing inversion of sea surface salinity in the Pearl River Estuary[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, **36**(6): 40-47. (何颖清, 冯佑斌, 扶卿华, 等. 珠江河口海水表层盐度光学遥感反演研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2020, **36**(6): 40-47)

[17] SUN D Y, SU X P, QIU Z F, *et al*. Remote sensing estimation of sea surface salinity from GOCI measurements in the Southern Yellow Sea[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(7): 775

[18] BAI Y, PAN D L, CAI W J, *et al*. Remote sensing of salinity from satellite-derived CDOM in the Changjiang River dominated East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, **118**(1): 227-243

[19] YU X, XIAO B, LIU X Y, *et al*. Retrieval of remotely sensed sea surface salinity using MODIS data in the Chinese Bohai Sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, **38**(23): 7357-7373

[20] ZHANG G P. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Yellow Substance in Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015

[21] DONG Q, SHANG S L, LEE Z. An algorithm to retrieve absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from ocean color[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **128**: 259-267

[22] LEE Z P, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5755-5772

[23] ZHAO B R. Diversion mechanism of diluted water in Changjiang River[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, **13**(5): 600-610

[24] BEARDSLEY R C, LIMEBURNER R, YU H, *et al*. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, **4**(1/2): 57

[25] WANG Jianfeng, WANG Yu, WANG Gang. Analysis of direction change mechanism of the Changjiang River diluted water based on FVCOM and observation[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(2): 194-201 (王建丰, 王玉, 王刚. 基于 FVCOM 数值模拟和观察资料的长江冲淡水转向机制分析 [J]. 地球科学进展, 2012, **27**(2): 194-201)

[26] LE Kentang. A preliminary study of the path of the Changjiang diluted water – II. The effect of local wind on the path[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, **20**(2): 139-148 (乐肯堂. 长江冲淡水路径问题的初步研究——Ⅱ. 风场对路径的作用 [J]. 海洋与湖沼, 1989, **20**(2): 139-148)

[27] XUAN J L, HUANG D J, ZHOU F, *et al*. The role of wind on the detachment of low salinity water in the Changjiang Estuary in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, **117**(C10): C10004

[28] WU H, ZHU J R, SHEN J, *et al*. Tidal modulation on the Changjiang River plume in summer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, **116**(C8): C08017

[29] WANG Lei, HUANG Daji, HE Shuangyan. A short-term extension process of coastal water tongue adjacent to the Changjiang River Estuary[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2013, **31**(4): 17-25 (王磊, 黄大吉, 贺双颜. 长江口邻近海域近岸水舌向外海的短期扩展过程分析 [J]. 海洋学研究, 2013, **31**(4): 17-25)