

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018091701

1981—2010年东海及毗邻的西北太平洋表层盐度的气候态分布特征

徐芬, 康建成

上海师范大学地理系, 城市生态与环境研究中心, 上海 200234

摘要:使用 SODA 表层盐度月平均数据, 通过计算逐点逐年盐度均值、月际差, 绘制等值线分布图, 分析在新的 30 年气候基准期(1981—2010 年), 东海及毗邻的西北太平洋海域表层盐度场气候态分布特征, 为进一步研究该地区长时间序列的气候变化奠定基础。结果表明: (1) 在研究区表层平均盐度从西北到东南逐渐升高, 形成 3 个明显的盐度特征场区: 东海大陆架海区、东海黑潮海区以及西北太平洋海区; (2) 研究区月际表层盐度存在明显的周期性变化, 其中, 盐度最小值的周期性规律最显著; (3) 在月际变化中, 1—4 月为盐度高值季节, 以 3 月份盐度最高, 为 27.5psu; 5—8 月为盐度低值季节, 以 8 月份盐度最低, 为 22psu; 9—12 月为盐度上升季节; (4) 依据盐度场的分布, 结合地形、气候、海流等特征和前人研究, 在研究区选取了 22 个特征点, 从特征点看, 位于西北太平洋海区的特征点盐度月振幅最小; 位于长江入海口附近的 D1 和位于杭州湾南部的 D2 盐度月振幅较大, 但 D1 与 D2 月际变化曲线呈现较为明显的反相关特征, 这可能与长江冲淡水水舌夏季北移抑制苏北沿岸流南下和北上的台湾暖流夏强冬弱有关。

关键词: 盐度; 新气候基准期; 表层; 东海; 西北太平洋

中图分类号: P736.4 **文献标识码:** A

The climatological distribution of surface salinity in the East China Sea and adjacent northwest Pacific Ocean during 1981—2010

XU Fen, KANG Jiancheng

Urban Ecology and Environment Research Center, Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract: Counter maps of the East China Sea and the adjacent northwest Pacific Ocean are compiled and analyzed based on the annual mean data, monthly average data, monthly difference and inter-monthly difference data of SODA surface salinity for the past 30-year climate reference period (1981-2010). The climatic distribution patterns of the surface salinity field in the Pacific Ocean have provided a solid foundation for further study of the long-term climate changes in the region. As it is observed that: (1) The average surface salinity in the study area gradually increase from northwest to southeast, with three distinct salinity subareas: the area of the East China Sea continental shelf, the part of East China Sea where the Kuroshio current passes through and the area of Northwest Pacific Ocean; (2) There is a significant cyclical change in the salinity of surface water in the study area, among which the periodicity of the minimum salinity is the most significant; (3) In terms of monthly changes, high salinity appears in January-April, with a highest of 27.5 psu in March, while the low salinity in May-August, with a lowest of 22psu in August, ; The season from Sept-Dec is the period of salinity rising; (4) According to the salinity distribution patterns and their relation with topography, climate and sea currents, 22 points for reference are selected. The lowest reference points of monthly salinity mostly occur in the northwestern Pacific Ocean; Highest amplitude is observed at D1 near the Yangtze River estuary and D2 in the south of Hangzhou Bay. However, the monthly correlation curves at D1 and D2 are obviously opposite, probably caused by the northward shifting of dilute water of the Yangtze River in summer, when the southward flow of the north Jiangsu coast current is inhibited by the Taiwan warm current, which is strong in summer and weak in winter.

资助项目: 国家自然科学基金项目“东海黑潮区温、盐、流、海面高度多尺度变化过程及其机理研究”(41340045); 上海师范大学科研发展项目(KF201824)

作者简介: 徐芬(1993—), 女, 研究生, 主要从事海洋气候环境变化研究, E-mail: 252082489@qq.com

通讯作者: 康建成(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事全球气候环境演化过程及其影响研究, E-mail: Kangjc@126.com

收稿日期: 2018-09-17; **改回日期:** 2018-11-23. 蔡秋蓉编辑

Key words: salinity; new climate base period (1981—2010); sea surface; East China Sea; northwest Pacific

海洋是气候系统的重要组成部分,对气候系统的能量平衡和物质平衡起着至关重要的作用^[1]。

盐度是表征海水物理化学特征最基本的参数之一,海洋中盐度的时空分布和变化是海洋学研究最基本的内容之一,它几乎与海洋中所有现象都有密切的联系^[2]。海洋盐度变化是气候变化的重要指标之一^[3],是气候系统的重要调节器,对局部和全球气候变化产生显著影响^[4]。对海洋中过去盐度场分布特征的研究,不仅能够恢复过去的海洋环境,同时能够从区域盐度变化历史中识别出区域气候变化的过程,为过去环境的重建提供一个有用的指标^[5]。

某一海域海水盐度的变化除了河流径流和相邻海域海水交换带来的影响外,在局地气象系统内,盐度的变化还受降水和蒸发为主的淡水通量和夏季风场、气压场等局地气象要素的影响;在全球范围内,海水盐度还与 ENSO、PDO 等气候变化信号有关^[6]。

东海及毗邻的西北太平洋,是影响我国气候的重要区域之一。在东海的大陆的沿岸存在着稳定的台湾暖流、对马暖流、长江冲淡水以及苏北沿岸流等,在大陆架外缘区则终年存在着一支高温高盐的强大海流——东海黑潮,邻近的西北太平洋海域中存在有琉球海流等,这些众多洋流都会对这片海域的盐度场产生深远影响,从而对中国和东亚的气候产生重大的影响^[7]。

前人已对东海海洋的气候环境要素做过大量的研究,但是大部分研究集中于海水的温度,如曾广恩等利用 TRMM/TMI 卫星遥感 1998—2004 年的海面温度数据对东海表层温度的季节分布特征和影响机制进行了分析^[8];于非等利用 AVHRR 反演的海面温度资料分析了 1991—2001 年东海表面温度的变化趋势^[9]。而对于盐度的研究比较少,且有关的研究多是集中于东海黑潮或者一些典型断面,如浦永修使用 1975—1999 年夏季东海 30°N 断面资料分析,指出多数分布类型都具有代表性的冲淡水分布状态,且长江冲淡水的扩散形态与台湾暖流有密切关系^[10];苗庆生等使用 1976—2013 年 2 月份表底层温盐度资料分析 30°N 断面冬季温盐分布及年际变化特征,指出盐度空间分布呈现东、中、西 3 段^[11];白志鹏等使用 1967—2003 年期间的温盐度资料分析了 137°E、PN、TK 断面温盐特征及其年际变化^[12,13];任慧茹等分析东海黑潮表层盐度的月际变化特征及与温度、降水等因素的相关关系^[14]。总

之,一方面前人的研究缺乏对东海及毗邻的西北太平洋海域表层盐度的整体研究;另一方面,前人研究多关注冬、夏季节表层盐度的特征变化,对东海及毗邻的西北太平洋整个海域表层盐度场的月际变化缺乏系统的探讨。

为了适应不断加快的气候变化研究的需求,世界气象组织(WMO)气候学委员会于 2015 年正式提出,将 1981—2010 年之间的 30 年作为最新的气候变化的基准值(https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_997_en.html)对比研究气候变化。在此背景下,急需对新的气候基准期东海及毗邻的西北太平洋海域表层盐度结构的气候态分布特征进行深入剖析,了解东海及毗邻的西北太平洋海表盐度的年均分布特征和月际变化,为研究区域气候变化过程、影响机理,预测未来气候环境变化奠定基础。

鉴于此,本文利用新的气候基准期 1981—2010 年共 30 年的 SODA 月平均盐度数据,分析东海及毗邻的西北太平洋海表盐度的年均分布特征和月际变化。

1 区域地质背景

本文选择的研究区域是东海及毗邻的西北太平洋海域(21.25~33.25°N、116.25~134.25°E),区域范围见图 1。

研究区域特征为:

(1)区域地质背景,见图 1。本文研究的海域西面紧邻我国大陆,北至长江入海口北部、济州岛南部、九州岛中部、四国岛南部一线,南达台湾岛以南的巴士海峡,向东直达 134.25°E 的西北太平洋,呈东北—西南走向的琉球群岛将东海与太平洋划分开。在海底地形方面,西部为平均深度不超过 160m 的宽广的东海大陆架^[17],中部是最大深度为 2716m 的东北—西南走向的冲绳海槽和间隔琉球群岛、最大深度达到 7507m 琉球海沟,东部为主体深度达到 5000~6000m 深的西北太平洋海盆。

(2)在气候方面,研究区主体部分属于亚热带海洋性季风气候,气温夏季较热,冬季不冷,降水集中在夏季,冬季较少;部分位于北回归线以南的海域为热带季风气候,全年温度较高,一年中最冷月平均气温高于 15℃,降雨干湿季分明,雨量多集中于夏季且降水量大;长江口北岸的启东嘴至济州岛西南角

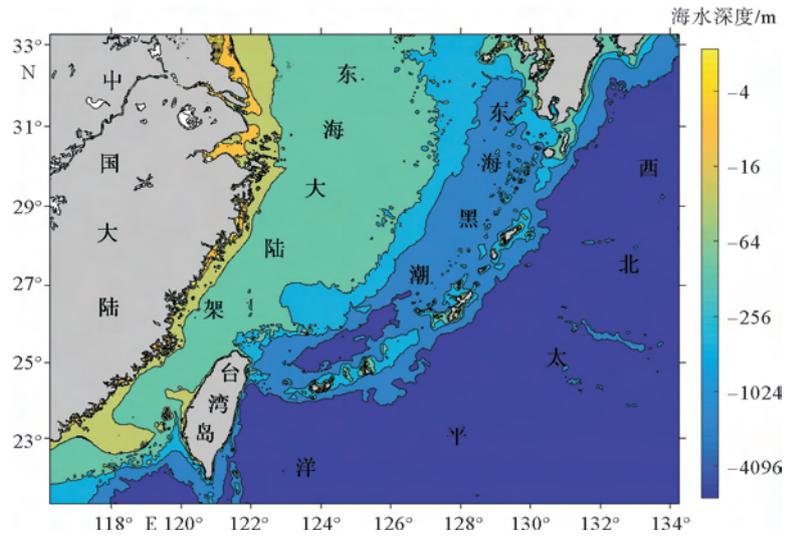


图1 研究区域示意图

Fig.1 Geographic map of research area (color column indicates depth)

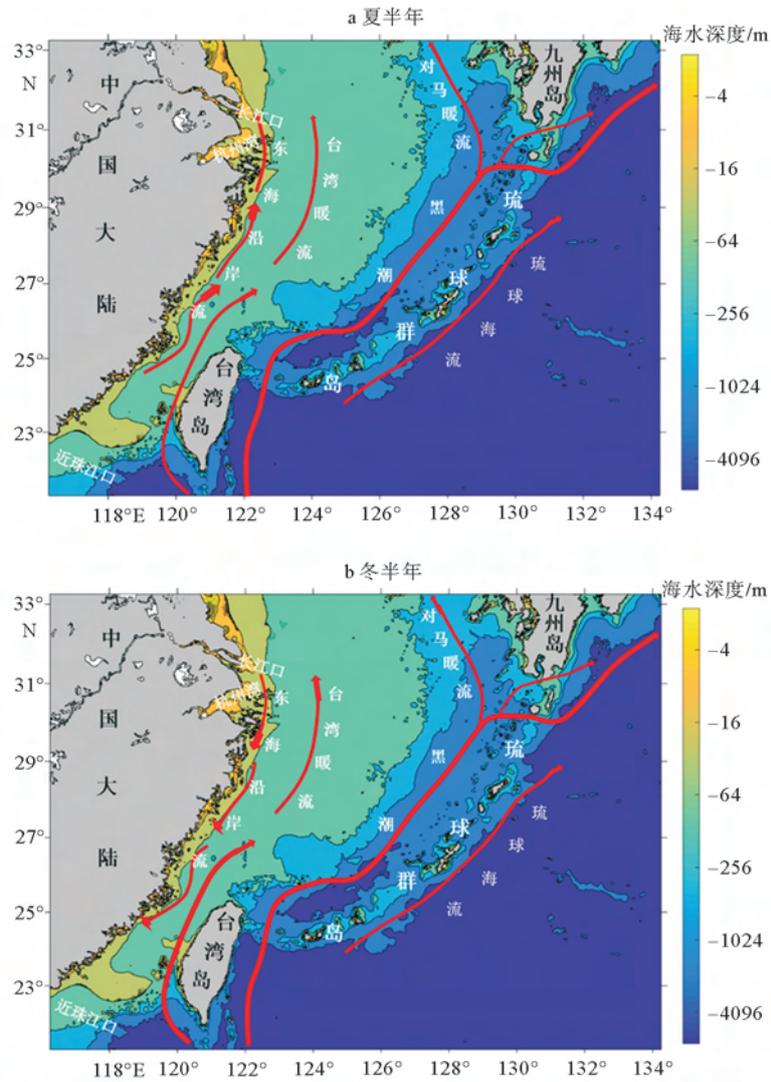


图2 研究区域夏半年(4—9月)、冬半年(10—翌年3月)主要海流示意图(据文献[15,16]修改)

Fig.2 Schematic map of main currents in the study area during the summer half year (April-September) and the winter half year (October-Next year March)

连线以北的地区为温带季风气候区,四季交替明显。

(3)在海流方面(图 2),在大陆东缘是长江入海口,长江冲淡水伸入东海,势力强大;大陆沿岸有台湾暖流、对马暖流、东海沿岸流等。在东海大陆架边缘,有东海黑潮,呈 NE 走向,为流速强、流向稳定、流动的宽幅比较窄的强密度高温高盐的海流。在西北太平洋海域,有琉球群岛海流。

2 材料与方 法

2.1 资料来源

2.1.1 盐度数据

本文所用资料来源于美国马里兰大学(UMD)和德州农工大学(TAMU),利用全球简单海洋资料同化系统分析得到的再分析资料—SODA-2.2.4 月平均数据资料^[18](数据下载网址: http://dsrs.atmos.umd.edu/DATA/soda_2.2.4/)。

SODA 月平均海洋同化数据是网格化的数据文件,时间跨度为 1871 年 1 月—2010 年 12 月,共 140 年 1680 个月;经纬度范围是 75.25°S~89.25°N、0.25°~359.75°E,水平网格为 0.5°×0.5°,在经度方向和纬度方向上的格点数分别是 720 和 330;从海表向纵深垂直方向上分为不等间距的 40 层。该数据集包括温度、盐度、纬向海流速度、经向海流

速度、纬向海表风应力、经向海表风应力、海表面高度共 7 个变量。

本研究从 SODA 数据集的月平均盐度数据,选取空间范围为 21.25~33.25°N、116.25~134.25°E,时间范围为 1981—2010 年共 30 年的资料。

2.1.2 地形数据

地形数据来源于美国国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)2009 年发布的全球海底地形深度数据库(1-Minute Gridded Global Relief Data(ETOPO1))。数据库的网格为 1'×1',网格点海底深度精度到 1m^[19]。本文利用该数据绘制东海及毗邻的西北太平洋的地形图,其精度能够满足研究的需求。

2.2 分析思路

选择新的气候基准期(1981—2010 年)的盐度资料,计算逐年逐点的年均值、月均值、年差值、月差值,绘制等值线分布图,分析东海及毗邻的西北太平洋海域海表盐度场的气候态分布,划分不同气候类型分布区,结合地形、气候、海流等特征和前人的研究,确定代表性的特征点;分析对比特征点、典型断面的月际变化特征,为以后长时段的气候变化研究提供参考基准。

分析思路流程如下(图 3):

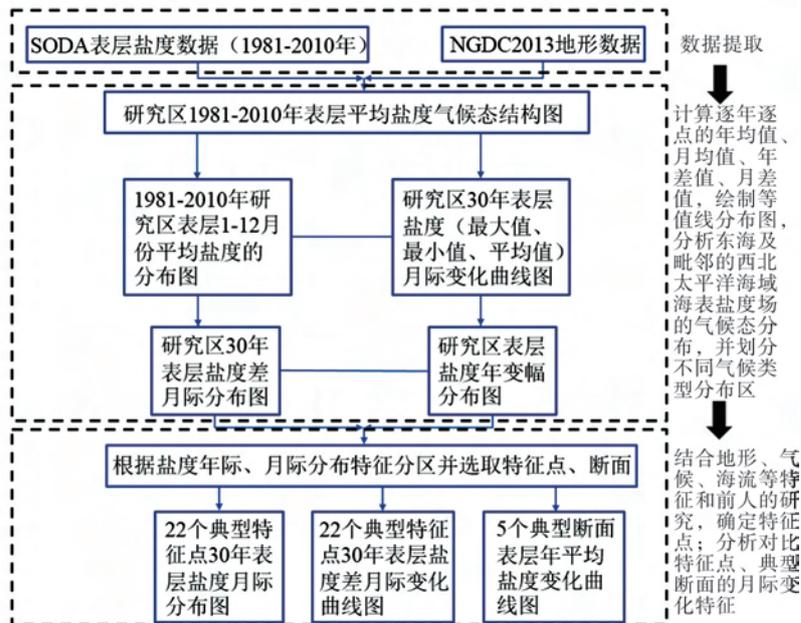


图 3 研究思路与技术路线图

Fig.3 Thought analysis diagram of the paper

3 研究区表层盐度场的结构

3.1 表层 30 年(1981—2010 年)平均盐度分布特征

利用 SODA 数据集表层盐度资料,绘制 30 年表层平均盐度分布图,如图 4,其中等盐线间距为 0.25psu。

由图可见,盐度的分布可以分为 3 个海区:

东海大陆架海区,盐度的分布范围大致为 26.25 ~ 34.25psu。盐度最低值处为 26 ~ 26.25psu,盐度最低值区主要分布在 30~33.25°N、122°E(长江口附近)。在 22°N、116.25°E 附近有一个次低值中心,盐度值范围为 33.5~33.75psu。盐度的高值范围为 34~34.25psu,分布区位于 33.25°N、131.25°E~21.25°N、118°E 的区域,近似于东北—西南走向,呈现一个宽带状的高盐区。盐度值沿着东海大陆架向东南方向递增。等盐线的走势在东海大陆架区域可明显分为 2 种形态:一种是在长江入海口附近,等盐线围绕长江口呈近似环带状分布,盐度由长江入海口向外海递增,盐度值范围大致为 26.25~31.75psu;在 121.75~124°E 的区域,等盐线分布顺着海岸呈南北走向。另一种是大约从 124°E 往东,等盐线开始呈现东北—西南走向,等盐线在经纬网格中的斜率约为 1。大约从 123°E 开始往东,盐度分布比较均匀,等盐线分布逐渐稀疏,盐度值范围为 31.75~34.25psu。在整个东海大陆架

海域,等盐线的分布很密集,水平梯度很大(6 个经距有 32 条等盐线)。

在东海黑潮海区,盐度值为 34.25~34.5psu,总体盐度要高于东海大陆架,盐度沿着东海黑潮流径呈现西低东高的分布态势。盐度等值线沿着东海黑潮的路径呈东北—西南走向,条带状分布。

在西北太平洋海区,绝大部分海域的盐度值为 34.5psu,表层盐度分布比较均匀一致,在研究区中此海域盐度值最高。靠近东海黑潮海域的盐度值稍低一点,盐度值为 34.25~34.5psu,而东海黑潮以东或者以南的毗邻的西北太平洋海域盐度值稳定在 34.5psu。等盐线也呈东北—西南走向,等盐线非常稀疏(11 个经距只有一条等盐线)。

总体来看,研究区盐度分布是西北低、东南高,由东海大陆架向西北太平洋呈现出递增的趋势。东海 30 年表层平均盐度值变化范围大致为 26.25~34.5psu。盐度最小值出现在长江入海口附近,盐度高值出现在西北太平洋海区。

3.2 表层盐度的月际变化

为了进一步探究东海及毗邻的西北太平洋海域表层盐度的月际变化过程,观察在不同月份研究区表层盐度的最大值、最小值与平均值的月际变化、差异性、变化明显的特征月,绘制出了 30 年 12 个月表层盐度的最大值、最小值以及平均值的月际变化曲线图,展示整个研究海域盐度的月际变化周期(图 5)。

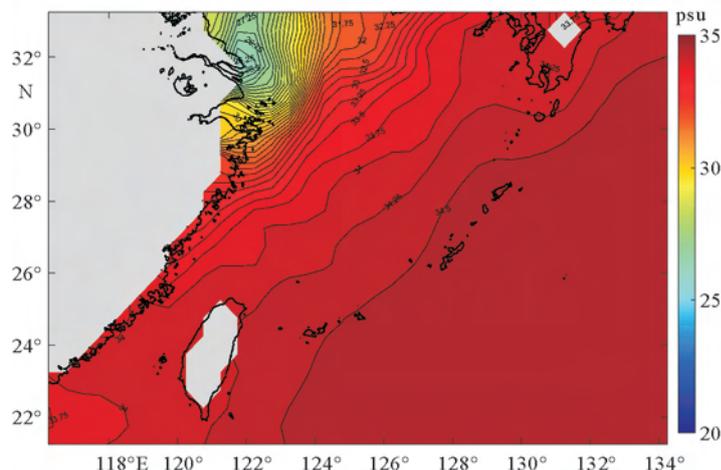


图 4 研究区 1981—2010 年表层盐度气候态结构图

Fig.4 The framework of climate dependant surface salinity of the study area in 1981-2010

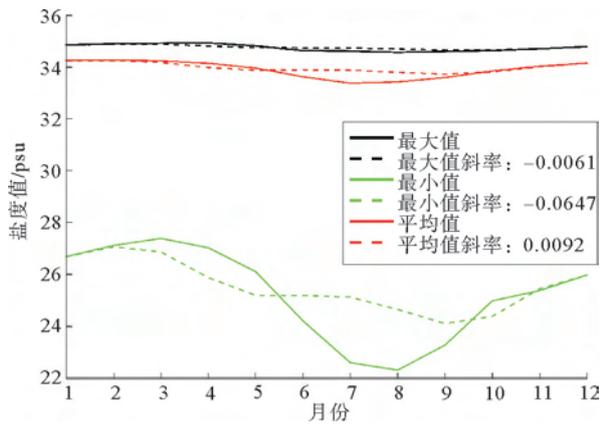
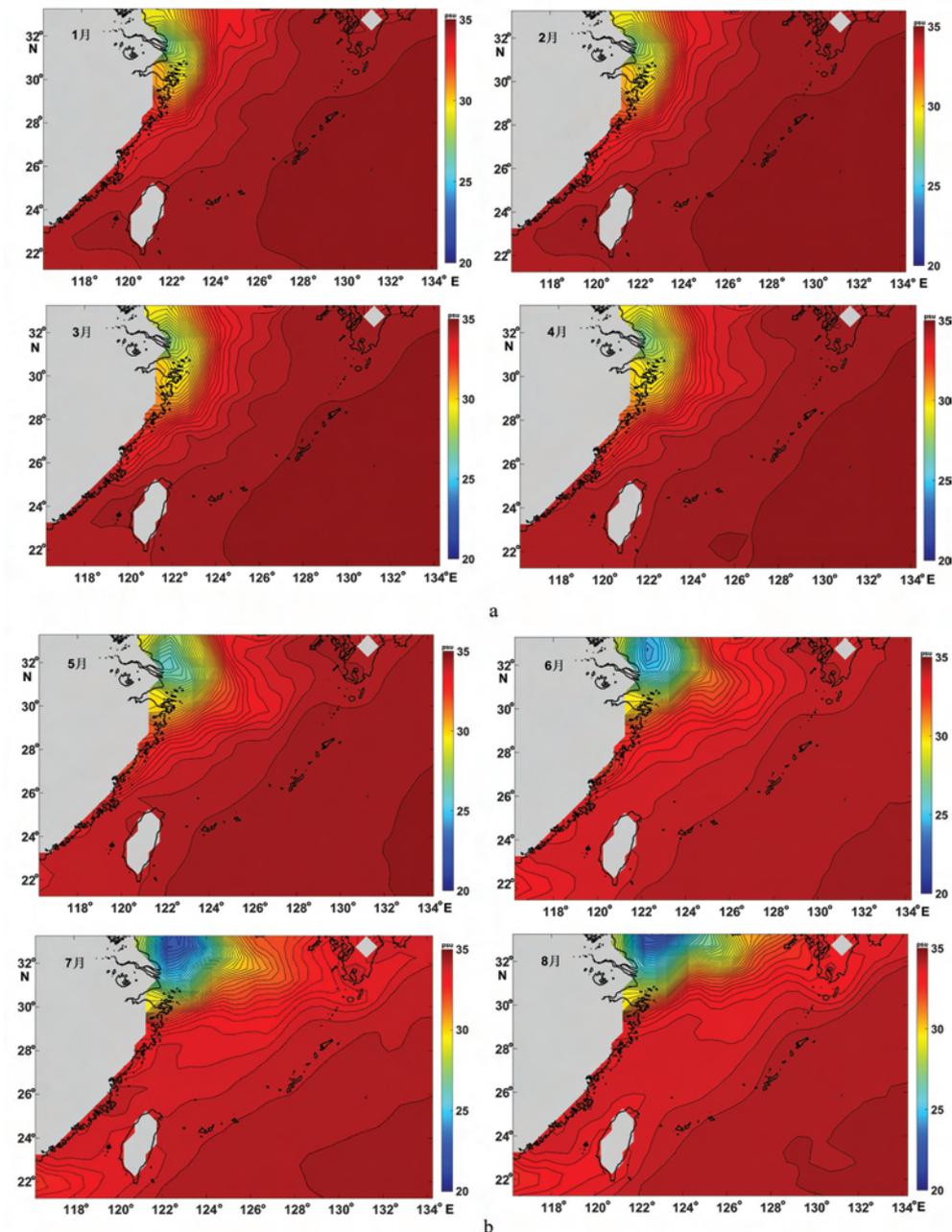


图 5 30 年表层盐度月际变化曲线图
Fig.5 Monthly change curve of surface salinity for the past 30 years

从图 5 中可以看出,研究区表层盐度月际变化曲线存在明显的周期性变化。盐度最小值的周期性最显著,整个变化曲线呈现为一个拉伸的“S”形,为一个峰值、一个谷值,峰值出现在 3 月份,谷值出现在 8 月份;盐度最大值曲线与平均值曲线变化趋势比较一致,在 7 月份都有一个稍凹的谷值,而全年的盐度最大值和平均值总体相差不大。总体来看,8 月份研究海区表层盐度最低,3 月份最高,其余月份为过渡阶段。

对 1981—2010 年这 30 年的表层各个点盐度数据进行逐月平均,获得这 30 年 1—12 月份各个点每月的盐度平均数据,绘制研究区表层逐月气候态盐度结构图(图 6),其中等盐线的间距为 0.25psu。



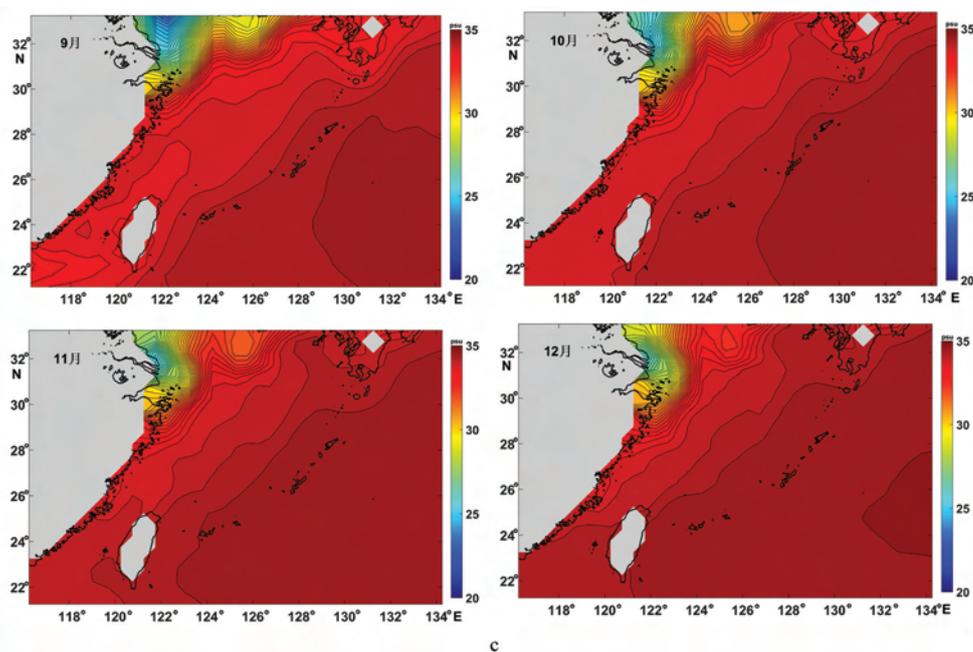


图6 1981—2010年研究区表层1—12月份平均盐度的分布图

色柱表示盐度范围,a代表1—4月,b代表5—8月,c代表9—12月

Fig.6 Distribution of average salinity from January to December in the study area from 1981 to 2010

color column indicates salinity range, figure 5a represents the months from January to April, figure 5b represents the months from May to August, and figure 5c represents the period from September to December

结合上述图示,对比分析可见:

在8月份,整个东海及毗邻的西北太平洋表层盐度分布为22.5~34.5psu,盐度最低值并不是位于长江正入海口,而是在长江入海口的东北部海域,即33.25°N、123.75°E附近,盐度最低值为22psu。在广东、福建附近海域,存在一个盐度的次低值中心,为32.75psu。8月份的盐度最高值出现在西北太平洋海域,为34.5psu。等盐线总体上由长江入海口附近向西北太平洋海域逐渐变稀疏。其中,在长江入海口处等盐线围绕33.25°N、123.75°E为中心呈近似环带状分布;在广东、福建附近海域的河流入海口附件,等盐线也呈现出以河口为中心的环状分布;由东海大陆架往西北太平洋其余海域,等盐线大体都是呈现东北—西南走向。

在3月份,整个东海及毗邻的西北太平洋表层盐度分布为27.5~34.75psu,盐度最低值位于长江正入海口、为27.5psu,而盐度最高值同样出现在西北太平洋海域、为34.75psu。等盐线由长江入海口附近向西北太平洋逐渐变稀疏,在长江入海口附近呈环状分布,东海黑潮区的等盐线走向为东北—西南方向,盐度值为34.5~34.75psu,而毗邻的西北太平洋海域表层盐度分布很均一,在3月份只分布一条等盐线即34.75psu。

在从盐度最高值的3月向盐度最低值的8月之间的过渡月份,由于受到长江径流及口外台湾暖流、苏北沿岸流以及季风的影响,盐度最低值中心逐月由长江正入海口向其东北部移动,一直到8月移至最北端33.25°N、123.75°E附近;长江冲淡水水舌的消长和运动方向与前人研究的长江冲淡水3个时期基本吻合:6—8月朝东北方向扩展时期、10月—翌年4月沿岸南下时期、5月和9月为过渡时期^[20]。在这几个月份中,整个研究海域的盐度最低值在逐月降低,盐度最高值则一直稳定在西北太平洋海域,但是整个研究海域的表层盐度值都在逐月降低。东海黑潮区的等盐线由3月份东北—西南走向慢慢偏转为近似东西走向,而东海大陆架和西北太平洋海域的等盐线形态分布月际变化不大,低盐中心还是呈现环状分布,不过位置随月份有所偏转。

8月份到次年的2月份,盐度最低值中心又逐渐由33.25°N、123.75°E附近移回长江入海口,盐度最高值也一直稳定在西北太平洋海域,整个研究区海域的表层盐度值又在逐月升高,东海黑潮区的等盐线也由近似东西走向恢复到东北—西南走向。

其中值得注意的是,在5月在广东、福建附近海域,出现一个盐度的次低值中心;且这个次低值中心的盐度值在5—8月逐月盐度降低,等盐线也逐月密

集;过了 8 月份,盐度值又在慢慢升高,等盐线也在变稀疏;到 10 月份,这个次低盐中心消失。

这里盐度展现出的季节性变化,除了珠江口流域夏季河流冲淡水入海径流量增大外,风和水位差也会影响珠江水的外扩:风是珠江冲淡水在陆架区扩展的主要控制因子,夏季的西南季风有助于珠江冲淡水同时向粤东和粤西两个方向扩展,粤东沿岸流也仅在夏季诱导冲淡水东扩,而东北季风驱使珠江冲淡水向西扩展并制约其向外海扩展,除夏季外其余季节以向西扩展为主;粤东海域与珠江口海域的水位差有利于夏季冲淡水东向扩展^[21,22],因此,夏季入海径流量增加、风及水位差等因素都会导致研究区中靠近珠江口的海域夏季表层盐度降低。

3.3 表层盐度的年变幅特征

为了突显研究海域表层盐度季节变化的区域差异,把研究区各个点 30 年表层最高值的 3 月份平均盐度值减去最低值的 8 月份平均盐度值,得出研究区各点表层盐度的年振幅;绘制出研究区表层盐度年变幅分布图,如图 7。

总体来看,除海洋沿岸的边缘区有几个异常较大的区域外,从大陆沿岸向海洋盐度的年变幅减小,在大陆架区域为 0.6~0.8 psu,在冲绳海槽区—东海黑潮区为 0.6 psu,到西北太平洋 ≤ 0.4 psu。

其中,有 3 个区域盐度的年变幅是海域正常变幅的 2~15 倍。

盐度年变幅最大的正值中心出现在长江入海口

的东北部海域,即 33.25°N、123.75°E 附近,高达 9.52psu,表明 8 月份此海域海水盐度要远低于 3 月份,这可能与夏季长江冲淡水低盐水舌转向东北方向有关^[23]。

在 21.25°N、116.25°E 即珠江出海口外侧的粤东沿岸,出现一个盐度年振幅的次高正值中心,值大约为 1.5psu。虽然同是位于河流入海口且表层盐度都是夏季盐度低于冬季,但是靠近珠江口的粤东海域年振幅明显低于长江口,这与长江入海径流量远远大于珠江、年平均径流量是珠江的 2.6 倍有一定的相关性^[20]。

在 29°N、122°E 附近,出现盐度年变幅最大值中心,接近-3psu,说明此海域 8 月份表层盐度反而要高于 3 月份,这与研究区其他海域存在明显的差异。前人^[20]曾以 2 月份代表东海的冬季,发现由于长江冲淡水在冬季顺岸南流,而在春季(5 月)长江冲淡水转向东北,同时阻止了苏北沿岸水南下,而且也有简化的理论模式分析表明苏北沿岸流诱使和长江口外地形的共同作用使得夏季低盐水舌指向东北,同时要考虑台湾涌升流夏强冬弱的影响^[23,24],以上各种因素共同导致这一区域沿岸的海水盐度比夏季还要低。

为了直观地分析整个研究区盐度月际变化的空间差异,将 30 年表层月平均的盐度值中,各个点后一个月的值减去前一个月,绘制出 12 个月份盐度差的月际分布图(图 8)。

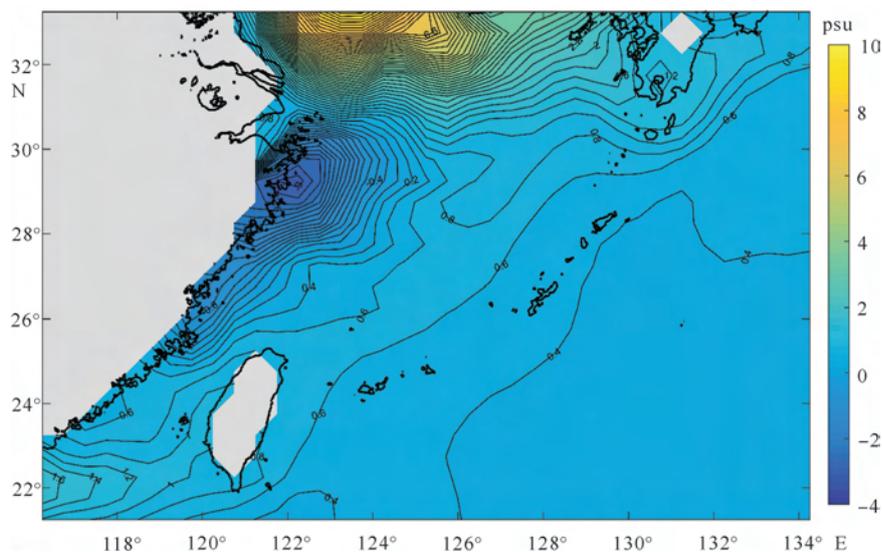


图 7 研究区表层盐度年变幅分布图

Fig.7 Annual variation in surface salinity in the research area

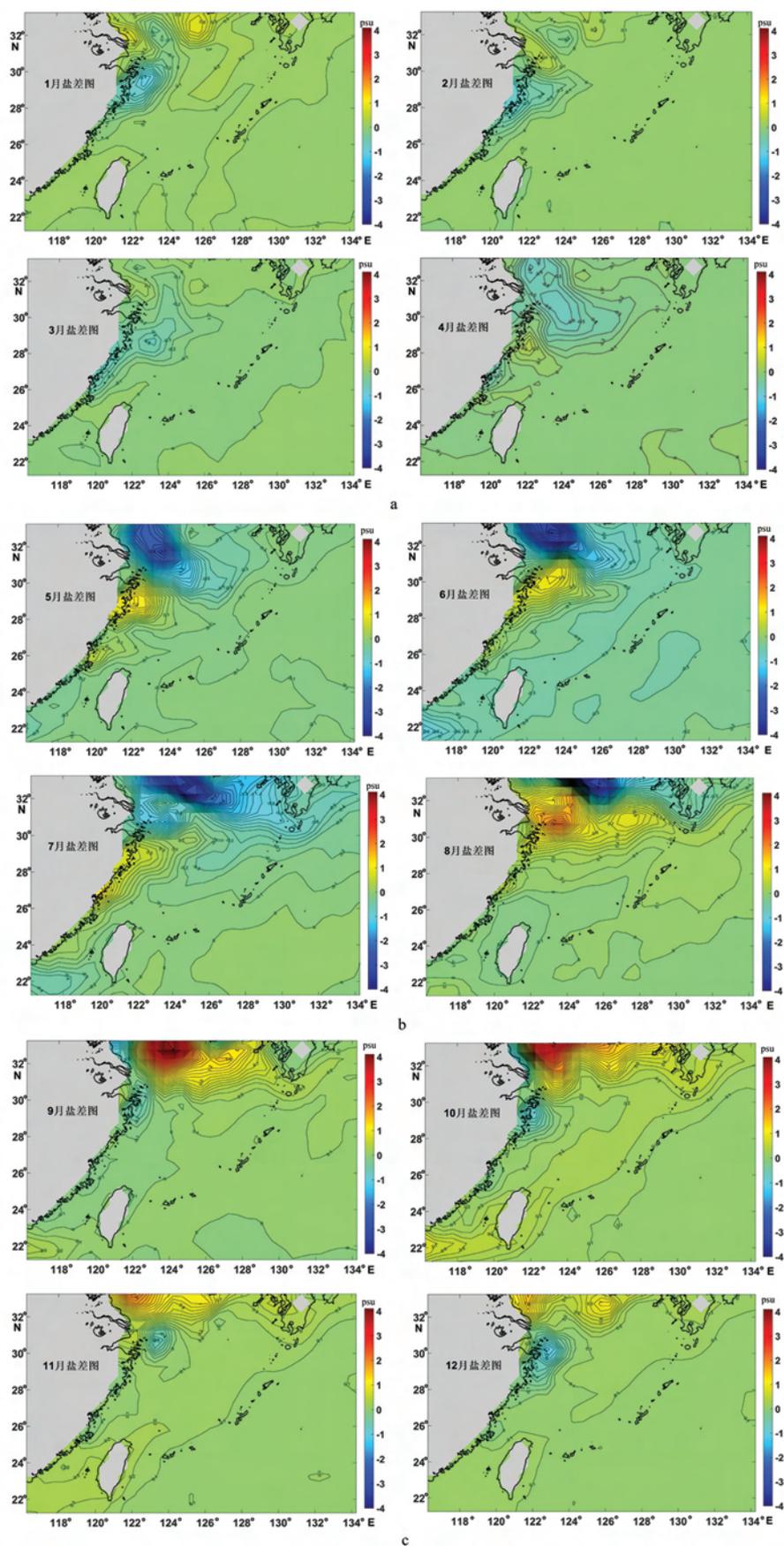


图 8 盐度差月际分布图 (a 代表 1—4 月, b 代表 5—8 月, c 代表 9—12 月)

Fig.8 The monthly distribution of surface salinity (a represents the months from January to April, b represents the months from May to August, and c represents the months from September to December)

由图 8 可知,总体上,12 个月中盐度差值线密集程度、盐差值月际变化较大的区域都在东海大陆架区,盐度差的最大正值和负值也出现在此区域;东海黑潮和西北太平洋海区的盐度差值线分布较稀疏、月际变化较小;尤其在西太海域,盐度差值的月际变化更是均一;不过值得注意的是,在西太海域中,在 22.25°N 、 129.75°E 和 29.25°N 、 133.75°E 处附近,盐度差的月际变化与整个西太海域存在差异。

从图 8 中可以看出,研究区盐度差月际空间差异最大的是 8 月份,盐度差的变化范围为 $-3.4\sim 2.2\text{psu}$;也就是说,从 7 月份到 8 月份研究海域的表层盐度值月际变化明显。在 8 月份的盐差图中,盐度差最大负值出现在 33.25°N 、 126°E 附近,即朝鲜海峡附近海域;最大正值出现在 30.75°N 、 124°E ,为长江入海口东部海域;前者代表 7 月份的表层海水盐度高于 8 月份,后者恰好相反。出现这种情况主要是夏季长江入海口的冲淡水低盐中心北移同时阻止苏北沿岸流南下同时夏季台湾暖流涌升造成的,前文也已提到,在此不再赘述。

研究区盐度差月际空间差异最小的是 3 月份,盐度差的变化范围为 $-0.5\sim 0.2\text{psu}$,盐度差最大负值出现在 28.25°N 、 123°E 附近,即杭州湾偏南部的浙江沿海;最大正值出现在长江正入海口;整个西北太平洋和东海黑潮地区的盐度差值为 0psu ,表明从 2 月份到 3 月份长江入海口附近盐度值略有升高,

但是其余海域从 2 月到 3 月盐度月际变化不大。

从 12 幅图中可以比较明显的看出,盐度差变化较大的是 5—10 月,其中 8 月最大,剩余月份盐度差变化较小,其中 3 月最小。总体来看,盐度差变化在夏秋季节较大,冬春季节较小。

4 研究区气候结构的分区及典型特征点、断面的选取

4.1 研究区盐度分布的气候分区

根据前面的 30 年表层盐度分布特征图、盐度的年振幅特征图及盐差图,研究区表面的盐度分布结构可以做出以下分区:东海大陆架区、东海黑潮区及西北太平洋区。

4.2 盐度分布气候特征点的选取和各个特征点的月际变化

为了分析这 3 个海区 30 年表层盐度的差异性,选取了以下 22 个典型的特征点来具体分析一下(图 9):

D1: 31.75°N 、 124.25°E ,位于盐度年变幅最大正值中心的边缘区、长江冲淡水影响区的中外围,选择此点可以观察长江口附近盐度的月际变化,可以表征长江冲淡水的强度和范围的变化。

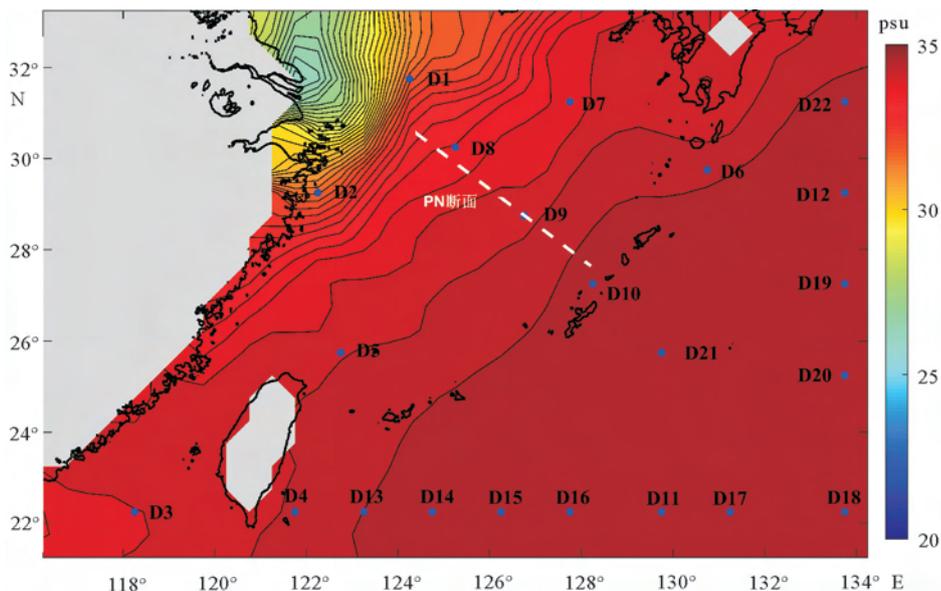


图 9 22 个典型特征点平面分布图(白色虚线为 PN 断面:西起 30.5°N 、 124.5°E ,东至 27.5°N 、 128.25°E [26])

Fig.9 Plane distribution map of reference points (white dotted line represents PN section: 30.5°N , 124.5°E in the west, and 27.5°N , 128.25°E in the east)

D2: 29. 25°N、122. 25°E, 从前面的表层盐度年变幅特征图以及月际盐差图中可以看出, 此处的海水表层盐度出现明显的负异常。

D3: 22. 25°N、118. 25°E, 位于珠江冲淡水影响范围区, 选择此点可以观察河流冲淡水对该处盐度月际变化的影响, 同时可以与长江冲淡水的月际变化特征进行对比。

D4: 22. 25°N、121. 75°E, 位于东海黑潮入口附近, 此点可以观察东海黑潮入口处表层盐度的月际变化特点。

D5: 25. 75°N、122. 75°E, 位于东海黑潮入口后第一个大拐弯附近, 这里是台湾东北部的上升流区^[27], 选择此点是观察黑潮对东海大陆架水域表层海水盐度的影响。

D6: 29. 75°N、130. 75°E, 位于东海黑潮出口附近, 此点一方面可以分析东海黑潮出口处表层盐度的月际变化特点, 另一方面可以对比分析东海黑潮出口处与入口处表层海水盐度的月际变化差异。

D7: 31. 25°N、127. 75°E, 位于东海黑潮流系往对马海峡的通道处, 选择此点的目的在于观察东海黑潮往对马海峡方向流系的表层盐度的月际变化特点。

D8、D9、D10: 分别为 30. 25°N、125. 25°E, 28. 75°N、126. 75°E, 27. 25°N、128. 25°E。前人对东海 PN 断面的观测研究较多, 这 3 个点在位置上接近 PN 断面, 选择这 3 个点来分析 PN 断面附近表层盐度的变化情况; 可以结合前人实测资料, 检验本研究的结果。

D11: 22. 25°N、129. 75°E, D12: 29. 25°N、133. 75°E, 在西北太平洋海域之所以选择这 2 个点是由于观察 12 个月的盐差月际分布图发现这 2 处的海水盐度月际变化与西北太平洋海域其他区域的差异较大, 选择这 2 点作为西北太平洋的典型代表点。

在 D11 点同一纬度取 D4、D13、D14、D15、D16、D17、D18 点, 这几个点同处于 22. 25°N, 经度分别为 121. 75°E、123. 75°E、124. 75°E、126. 25°E、127. 75°E、131. 25°E 和 133. 75°E, 目的在于分析西太海域海水盐度随经向的变化。

D19、D20、D22 与 D12、D18 的经度相同, 都是 133. 75°E, 纬度分别为 27. 25°N、25. 75°N、31. 25°N, 目的是探究西太海域海水盐度随纬向的变化。

D21: 25. 75°N、129. 75°E, 位于西北太平洋中部, 同时, 也位于 PN 断面的延长线上。

在以上 22 个点中, D1—D3 可以归于东海大陆

架海区, D4—D10 归于东海黑潮海区(这其中包括靠近 PN 断面的 3 点), D11—D22 归于西北太平洋海区。

下面提取以上 22 个点中每个点 30 年 1—12 月份表层盐度的平均值, 绘制出典型特征点 30 年表层平均盐度的月际分布曲线图, 如图 10。

从图 10 中盐度的月际分布曲线可以看出:

在东海大陆架区, 5 个点中除了位于杭州湾南部的 D2 的月际分布与剩余 4 点相反外, 其余 4 个点的月际分布趋势基本一致, 都在夏秋季(6—8 月)盐度较低, 冬春季盐度较高。

表层海水盐度月际变化最大的是位于长江入海口附近的 D1, 盐度月际分布曲线呈现深“V”形, 近似形成以 7 月为轴的对称分布模式: 1—4 月盐度整体较高, 4—7 月盐度迅速下降, 7—10 月盐度又迅速上升, 到 10—12 月海水盐度又逐月缓慢上升至与 1—3 月相近的盐度值范围, 说明长江冲淡水在 4—10 月势力最强, 在其余月份势力较弱。

月际变化最小的是位于珠江入海口附近的 D3 点, 表层盐度的月际变化趋势与 D1 很相似: 夏季盐度低, 冬季盐度高, 但是此处的海水盐度全年远远高于位于长江口附近的 D1, 夏秋季节的盐度降低幅度也小于 D1 处, 其中的机理前文中已经做过相应解释, 在此不再赘述。

位于东海黑潮往对马海峡流向的 D7 和位于 PN 断面处的 D8 在夏秋季节盐度值都较低, 这可能是受到夏季长江冲淡水影响; D7 处除了在 7、8 月盐度值低于 D8 处外, 其余月份都要高于 D8, 这可能是由于夏季长江冲淡水水舌北移导致纬度位置稍高一点的 D7 在夏季盐度降到比 D8 低。

位于杭州湾南侧的 D2, 与其余点盐度月际变化有明显的差异: 在夏秋季(6—8 月)盐度较高, 其中 8 月份盐度最高, 冬春季盐度较低, 3 月份最低。这主要是由于夏季长江冲淡水水舌 8 月份扩延至最北端, 从而抑制了苏北沿岸流的南下^[23], 导致 8 月份此处的海水盐度达到一年中的最大值, 而 8 月过后随着长江入海淡水量的减少, 低盐中心又慢慢逐月移回长江入海口, 对苏北沿岸流往南流的抑制作用逐月减弱, 在 3 月份流量最大, 从而出现此处 3 月份表层盐度最低的情况。

在东海黑潮区, 5 个点都呈现出夏秋季盐度低、各点之间盐度差值较大, 冬春季盐度高、差值较小的特点。盐度总体上比较高的是位于 PN 断面上的 D10, 较低的是同处于 PN 断面上的 D9, 这可能是由于 D9 较 D10 距长江口更近、受长江冲淡水的影响

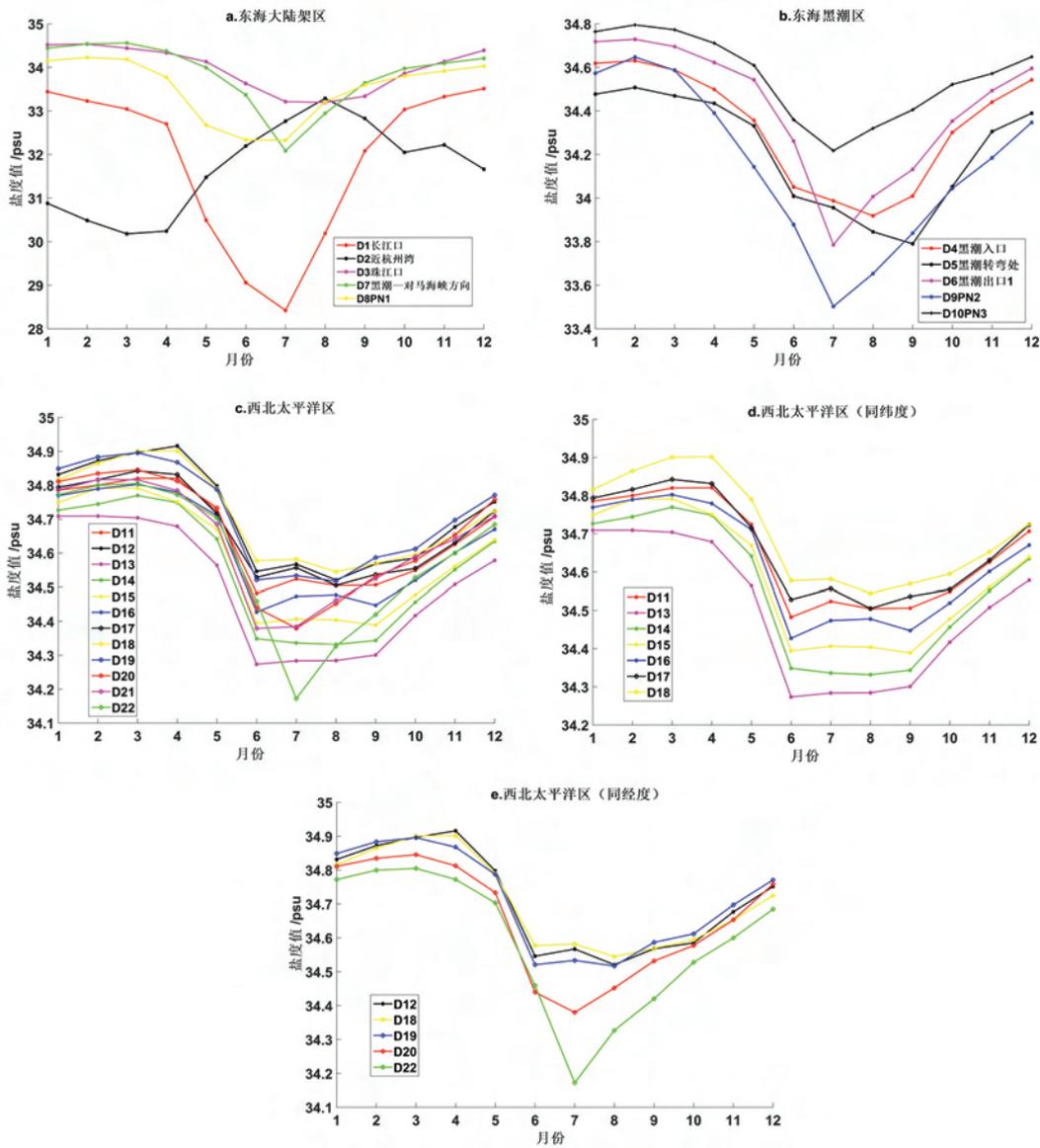


图 10 22 个典型特征点 30 年表层盐度月际分布图

a 图、b 图、c 图分别表示位于东海大陆架、东海黑潮区及西太海区特征点 30 年表层盐度月际变化；
d 图与 e 图分别表示除 D21 外位于西太海域的同纬度与同经度特征点 30 年表层盐度月际变化

Fig.10 Curves of the monthly average surface salinity for the past 30th years at the 22 reference points figure a, figure b and figure c respectively show the variation in surface salinity in the East China Sea continental shelf, the part of East China Ssea where Kuroshio current passes through and the western Pacific region over the past 30 years. Figure d and figure e respectively show the monthly surface salinity variations at the reference points of same latitude and longitude in the western Pacific Ocean except D21

更明显,总之,选取的靠近 PN 断面的 D8、D9 和 D10 越靠近陆架一侧盐度越低、盐度年变化幅度越大,反之越靠外海,盐度越高、盐度的年变化幅度越小,这与前人对 PN 断面表层盐度的研究结果一致^[28,29]。处于东海黑潮出口处的 D6 除了在 7 月份盐度值低于入口的 D4 和转弯处的 D5 外,其余季节均高于这两点。D4 与 D5 盐度月际变化具有一致性,但 12 个月入口处的盐度始终略高于转弯处。

在西北太平洋区,12 个点 12 个月的表层盐度值都较高,盐度变化趋势比较一致,总体上在 3、4 月盐度达到最高值,在 7、8 月盐度达到最低值,这也许是与夏秋季(6—9 月)为西北太平洋的雨季、降水较多,冬春季为旱季、降水较少有关^[30]。

同一纬度(22.25°N)的 D11、D13、D14、D15、D16、D17、D18 点盐度的月际变化曲线总体都呈现出一种拉伸型的“S”状,在 3、4 月盐度达到最高值,

在7、8月盐度达到最低。除D11点外,其余点随着经度值增加,12月盐度值也在增加;D11位于同一纬度的D16和D17之间,12月盐度值低于D17,却高于D16,这一现象较其余点比较反常,目前原因尚不清楚,或许与该处存在特殊环流有关。

同一经度(133.75°E)的D12、D18、D19、D20和D22,其中D12、D18、D19这3点12月盐度值相差不大,纬度位置位于D18和19之间的D20则呈现出一些差异性:12月盐度都要低于D12、D18、D19,且在夏季(6—8月)最为明显,对于这种现象的原因

尚不清楚,可能与局部环流有关。纬度最高的D22在同一经度(133.75°E)5个点中盐度值最低,尤其在夏秋季(6—10月)盐度值与其余4点差异比较明显。总体来说,随着纬度增加,盐度值没有出现随之增加或者减少的现象。

而位于太平洋中部的D21,除了在7月份盐度值高于D22外,其余月份盐度值均是西太海域12个点中最低的。

对比上述各个特征点盐度值的月际变化,做出了22个特征点的盐度月际差变化曲线图,如图11。

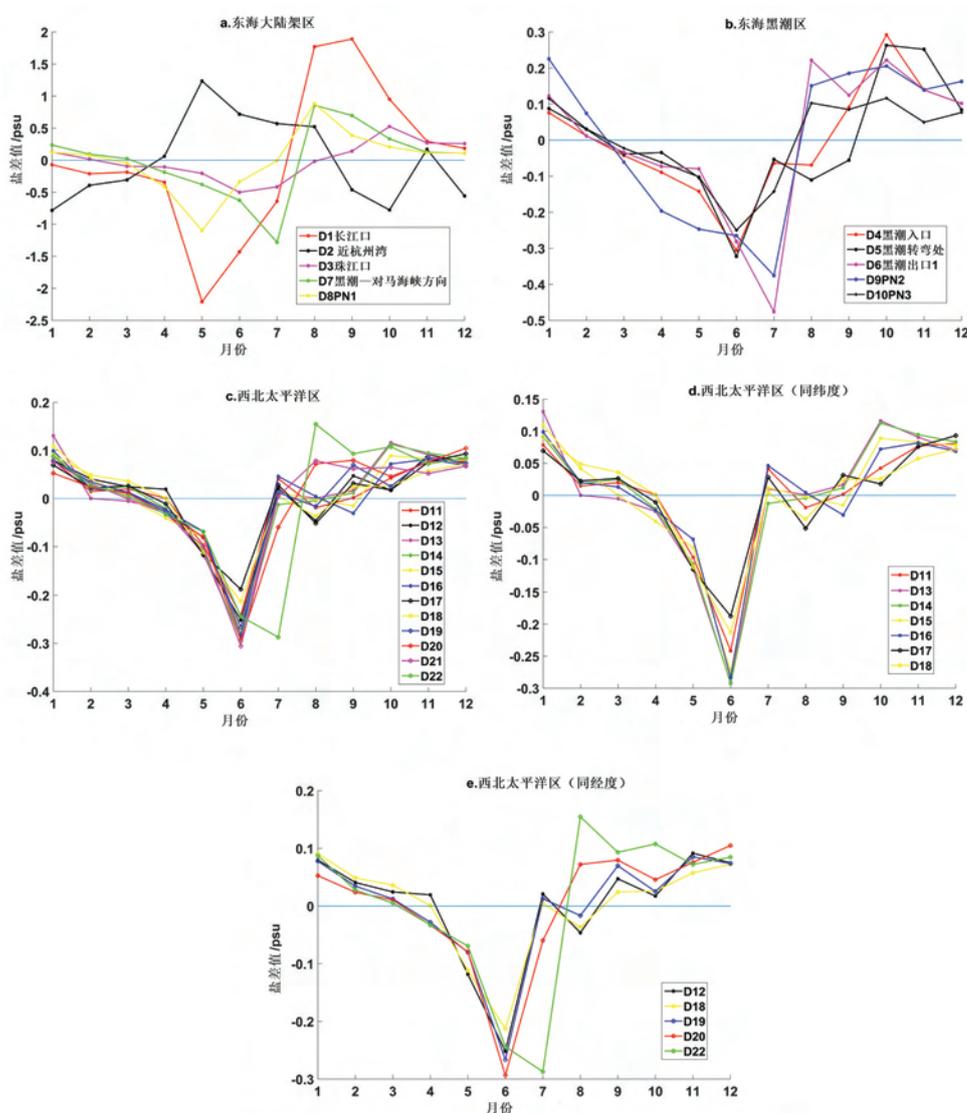


图11 22个典型特征点30年表层盐度差月际变化曲线图

a图、b图、c图分别表示位于东海大陆架、东海黑潮区及西太海区特征点30年表层盐度差月际变化;

d图与e图分别表示除D21外位于西太海域的同纬度与同经度特征点30年表层盐度差月际变化

Fig.11 Monthly variation curves of surface salinity difference for 22 typical reference points in the past 30 years figure a, figure b and figure c respectively show the monthly variation of surface salinity on the East China sea continental shelf, the part of East China Sea where kuroshio current passes through and the western Pacific region over the past 30 years. Figure d and figure e respectively show the monthly variation of surface salinity difference of 30 years at the same latitude and longitude reference points in the western Pacific Ocean except D21

从图 11 盐度差月际变化曲线可以看出:

位于东海大陆架区的 D1、D2、D3, D1 和 D3 虽然都是位于河流入海口,但是很明显长江入海口处的盐度月际变化要远远大于珠江口附近,珠江口表层盐度月际变化比较和缓,而长江口盐度差最大负值出现在 5 月份,最大正值出现在 9 月份,表明其从 4 月到 5 月这一个月期间降盐幅度最大,而在 8 月到 9 月这期间盐度增加的最快。而 D2 的盐度差变化曲线与 D1 刚好相反,这种现象与前文图中两点的表层盐度月际变化情况的结果相一致,原因前文已做阐述,在此不做赘述。

位于东海黑潮往对马海峡方向的 D7 与位于 PN 断面的 D8,总体上盐度差曲线的走势与位于长江口的 D1 类似,但是变化幅度明显要小一些。D7 盐度差最大负值出现在 7 月份,最大正值出现在 8 月份, D8 盐度差最大负值则与长江口处的 D1 出现月份一样,出现在 5 月份,最大正值与 D7 一样出现在 8 月份。

东海黑潮区选取的 5 个点中,盐度差月际变化较大的是位于东海黑潮出口处的 D6 和处于 PN 断面附近的 D9。D7 盐度差最大负值出现在 7 月份,最大正值出现在 8 月份,而 D8 最大负值出现在 5 月份,最大正值也出现在 8 月份。剩余的 3 个点,盐度差值月际变化比较一致且波动幅度不是很大,表

明这几处的海水盐度各月增加或减小比较平稳。

西北太平洋区的 12 个特征点盐度差的月际变化趋势总体上比较统一:在 6、7 月份出现盐度差的最大负值,大体上都是在 12 月份呈现盐度差的最大正值(D22 点除外),这也表明西北太平洋海区的表层盐度变化特征比较一致。其中纬度最高的 D22 与其余点相比来说,盐度差的月际变化幅度更大一些,在 7 月份出现盐度差的最大负值,大体上都是在 8 月份呈现盐度差的最大正值,显示出此处 7—8 月盐度迅速上升。与盐度的月际变化不同,同一纬度上,盐度差值并没有呈现出随着经度的增加而变化的趋势。

4.2 不同断面盐度的空间分布特征

根据研究区气候态表层盐度特征结构及分区状况,在研究区选择了 6 个典型断面,分别为 a、b、c、d、e、f 断面,来进一步解析东海及毗邻的西北太平洋海域的盐度分布的空间变化特征(图 12)。

其中:

a 断面即 32.25°N 断面,经度范围为 $121.75^{\circ}\sim 134.25^{\circ}\text{E}$,此断面西起长江口附近,中部经过东海黑潮的末端,向东至西北太平洋,此断面横切了等盐线分布非常密集、盐度差异比较大的海域,故选取此断面进行研究分析。

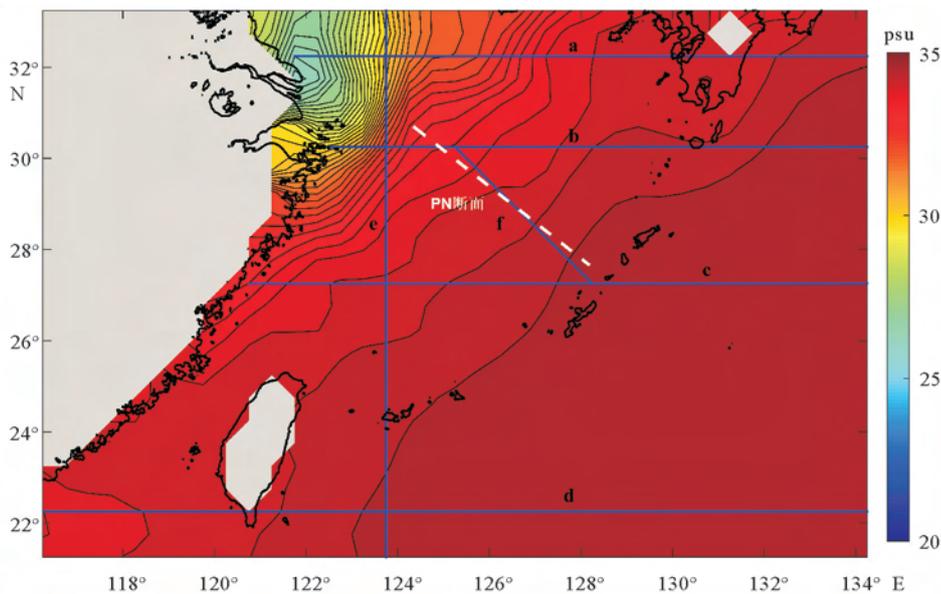


图 12 研究区气候态表层盐度结构图

a、b、c、d、e、f 为选取的 6 个典型断面,白色虚线为 PN 断面;西起 30.5°N 、 124.5°E ,东至 27.5°N 、 128.25°E ^[26]

Fig.12 The framework of climate dependant surface salinity of the study area

a, b, c, d, e, f are selected 6 typical sections, and the white dotted line is PN section: 30.5°N , 124.5°E in the west, and 27.5°N , 128.25°E in the east

b断面为 30.25°N 断面, 经度范围是 $122.25^{\circ}\sim 134.25^{\circ}\text{E}$, 前人^[28] 已经对东海的 30°N 断面冬季的温盐度分布以及年际变化特征进行了分析, 选择此断面可以与前人的分析结果进行对照研究。

c断面为 27.25°N 断面, 经度范围是 $120.75^{\circ}\sim 134.25^{\circ}\text{E}$, 此断面恰好位于整个研究区的中部, 断面西部受长江冲淡水的影响不像 a、b 断面那么强烈, 断面东部又横切过东海黑潮的中段位置, 故选取此断面。

d断面为 22.25°N 断面, 经度范围是 $116.25^{\circ}\sim 134.25^{\circ}\text{E}$, 此断面西部海域位于福建、广州附近, 较少受到长江冲淡水的影响, 更多是受到珠江及其附近河流冲淡水的影响, 盐度值比同纬度其他海域低一点, 此断面刚好又横切了东海黑潮的入口处, 向东延伸到毗邻的西北太平洋海域。

e断面为 123.75°E 断面, 纬度范围是 $21.25^{\circ}\sim 33.25^{\circ}\text{N}$, 此断面自北向南分别穿过长江冲淡水影响区、东海黑潮流经区以及西北太平洋高盐海水区, 此断面的选取可以看到海水盐度随纬度的变化情况。

f断面, 具体坐标为, 西起 30.25°N 、 125.25°E , 东至 27.25°N 、 128.25°E , 前人已经对 PN 断面的温盐度不同季节的年际/年代际变化^[31,32] 做出了相应的研究, 前人^[26] 确定的 PN 断面的具体坐标为, 西起 30.5°N 、 124.5°E , 东至 27.5°N 、 128.25°E , 选取的 f 断面在经纬度位置上比较接近 PN 断面, 故想选此断面与前人研究结果进行对照分析。

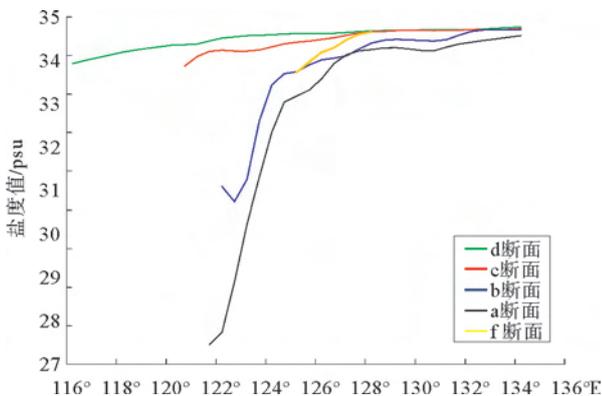


图 13 a、b、c、d、f 5 个典型断面表层年平均盐度随经度的变化曲线

Fig.13 Annual mean salinity of surface layer with longitude at five typical sections a, b, c, d and f

从图 13 中 5 个典型断面表层平均盐度随经度的变化曲线可以看出:

a 断面西段正处于长江入海口附近, 受长江冲淡水影响最为明显, 盐度值在 $121.75^{\circ}\sim 127.25^{\circ}\text{E}$ 之间增长变化最为显著, 盐度值从最低值 26.51psu 迅速增至 34.01psu, 盐度值变化率约为 1.364psu/度, 之后随着经度值的增加, 盐度值变化很小, 基本保持平稳, 其中从 129.25°E 到 130.75°E 之间略微有降低趋势, 盐度值大约降低了 0.085psu。随着向西北太平洋海域靠近, 盐度值继续有缓慢增加, 但变化不大。

b 断面表层盐度值总体都要高于 a 断面, b 断面最西边 30.25°N 、 122.25°E 的盐度值为 30.59psu, 到 30.25°N 、 122.75°E 盐度值一下子下降到 30.20psu, 这是由于受到了长江冲淡水的影响导致了盐度值下降。随着经度值增加, 盐度值在 $122.25^{\circ}\sim 124.25^{\circ}\text{E}$ 之间迅速增加, 随着越往东受长江冲淡水影响越小, 海水盐度值变化率也在变小, 总体呈缓慢增加的趋势。

c、d 断面分别是 27.25°N 和 22.25°N 断面, 由于纬度较低、离长江入海口较远, 所以受到长江冲淡水影响较小, 盐度值在 123.75°E 往西要远远高于 a、b 断面的盐度值, 而且 c、d 断面的盐度值总体变化幅度很小, 不超过 1psu, 但自西向东有缓慢增加的趋势。

f 断面西起 30.25°N 、 125.25°E , 此处点的表层年平均盐度值为 33.57psu, 随着经度值的增加, 东至 27.25°N 、 128.25°E , 此时表层年平均盐度值已经上升至 34.61psu, 盐度值变化率约为 0.347psu/经度, 在 $125.25^{\circ}\sim 128.25^{\circ}\text{E}$ 这一经度范围内, 为 a、b、c、d、f 这 5 条断面中是表层盐度值变化率较大的一个断面。

总之, 从上面 4 条纬度断面和 1 条斜断面 f 可以看出, 盐度值自西向东是逐渐增加的, 越靠近长江入海口, 受长江冲淡水影响就越大, 盐度值变化也就越大。

e 断面是 123.75°E 断面, 在 $21.25^{\circ}\sim 24.25^{\circ}\text{N}$ 之间, 由于主体是受西北太平洋和东海黑潮高盐海水的影响, 海水盐度值变化很小, 基本稳定在 34.5psu, 随着纬度的增大, 海水盐度值降低趋势逐渐明显, 其中在 $28.75^{\circ}\sim 31.75^{\circ}\text{N}$ 盐度值变化最大, 盐度值变化了 3.09psu, 其中在 32.75°N 处海水盐度值达到最小值 30.41psu(图 14)。

5 结论

(1) 东海及毗邻的西北太平洋 30 年表层平均盐度从西北到东南逐渐升高, 形成了 3 个明显的盐

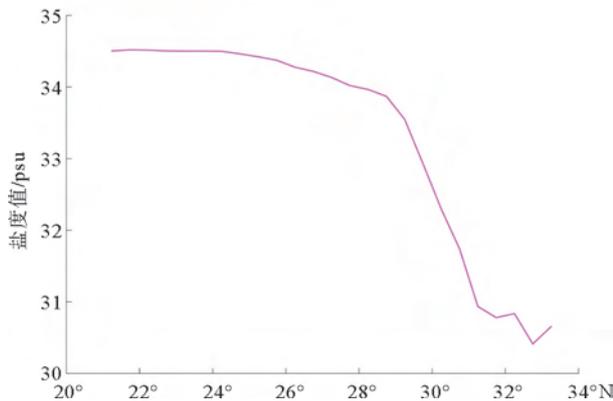


图 14 e 断面表层年平均盐度随纬度的变化曲线

Fig.14 Curve of annual mean salinity of surface layer vs latitude at section e

度特征区:东海大陆架海区、东海黑潮海区以及西北太平洋海区。在东海大陆架海区,有 3 个区域盐度的年变幅是海域正常变幅的 2~15 倍;其中,两处正异常出现在河流入海口附近;一处负异常位于 29°N、122°E,即杭州湾偏南部的浙江沿海,这与长江冲淡水以及台湾暖流的影响关系密切;

(2) 在研究区 30 年表层盐度的月际变化中,各月等盐线总体以长江口为中心向东向南逐渐变稀疏,其中长江口偏北地区盐度月际变化最大,越往东南盐度月际变化越小。表层盐度月际变化存在明显的周期性;其中,盐度最大值和平均值的月际变化不明显,最小值的月际变化显著,呈现为拉伸的“S”型曲线,峰值出现在 3 月份,谷值出现在 8 月份;

(3) 通过对选取的 22 个典型特征点分析可见:珠江口的变化幅度明显小于长江口,这与二者入海径流量的大小差异有一定的关系;越靠近陆架一侧盐度越低、盐度年变化幅度越大,反之越靠外海,盐度越高、盐度的年变化幅度越小;夏季杭州湾附近海域由于苏北沿岸流被抑制难以沿岸南下同时受到台湾暖流涌升的影响,此处盐度的月际变化呈现出与研究区其他海域相反的特征:夏季盐度高于冬季。在西太海域,除特殊点外,同一纬度上,总体上盐度随着经度的增大而增大,但在同一经度上,盐度没出现随纬度的增加而增大或者减小的现象;与盐度的月际变化不同,同一纬度上,盐度差值并没有呈现出随着经度的增加而变化的趋势;

(4) 在研究区选取了 5 个断面,分析盐度的空间变化,从中可以看出:盐度值自西向东是逐渐增加的,越靠近陆架盐度越高,越靠近长江入海口,受长江冲淡水的影响,盐度值变化也越大。

参考文献 (References)

- [1] Fang G H, Wang Y G, Wei Z X, et al. Inter-ocean circulation and heat and freshwater budgets of the South China Sea based on a numerical model[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47: 55-72.
- [2] 冯士筭. 海洋科学导论[M]. 高等教育出版社, 1999:431-441. [FENG Shizuo. *Introduction to Marine Science* [M]. Higher Education Press, 1999:431-441.]
- [3] Henocq C, Boutin J, Petitcolin F, et al. Vertical variability of near-surface salinity in the tropics: Consequences for L-band radiometer calibration and validation[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2012, 27(1):2761.
- [4] 王绍武. 现代气候学研究进展[M]. 气象出版社, 2001:51-60. [WANG Shaowu. *Advances in Modern Climatology*[M]. China Meteorological Press, 2001:51-60.]
- [5] 向荣, 阎军. 表层海水古盐度重建[J]. 海洋科学, 2002, 26(4):17-20. [XIANG Rong, ZHAI Jun. Ancient salt salinity reconstruction of surface seawater[J]. *Ocean Science*, 2002, 26(4): 17-20.]
- [6] 匡晓迪. 气候变化对渤海盐度年际变化及长期变化的影响[D]. 中国海洋大学, 2009. [YAN Xiaodi. *Impact of climate change on interannual and long-term changes in the salinity of the Bohai Sea* [D]. Ocean University of China, 2009.]
- [7] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 海洋出版社, 2005. [SU Jilan. *China's Offshore Journal*[M]. Marine Press, 2005.]
- [8] 曾广恩, 练树民, 程旭华, 等. 东、黄海海面温度季节内变化特征的 EOF 分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(2):146-155. [ZENG Guang'en, LIAN Shumin, CHENG Xuhua, et al. EOF analysis of seasonal variation characteristics of surface temperature in the East and Yellow Seas[J]. *Progress in Marine Science*, 2006, 24(2): 146-155.]
- [9] 于非, 许一. 东海海面温度长期变化趋势研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4):477-481. [YU Fei, XU Yi. Study on the long-term trend of sea surface temperature in the East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(4): 477-481.]
- [10] 浦泳修. 夏季东海 30°N 断面的盐度分布类型[J]. 海洋学研究, 2002, 20(1):2-14. [PU Yongxiu. The distribution of salinity at the 30°N section of the East China Sea in summer [J]. *Oceanographic Studies*, 2002, 20(1):2-14.]
- [11] 苗庆生, 杨锦坤, 杨扬, 等. 东海 30°N 断面冬季温盐分布及年际变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2016, 46(6):1-7. [MIAO Qingsheng, YANG Jinkun, YANG Yang, et al. Winter temperature and salt distribution and interannual variation characteristics of the 30°N section in the East China Sea[J]. *Ocean University of China, Natural Science*, 2016, 46(6):1-7.]
- [12] 白志鹏, 鲍献文, 吴德星. 137°E 断面温盐年际变化特征分析[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2007(s1):44-52. [BAI Zhipeng, BAO Xianwen, WU Dexing. Analysis of the interannual variation characteristics of temperature and salt in section 137°E[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2008

- (s1):44-52.]
- [13] 白志鹏. 137°E、PN、TK 断面温盐流年际变化特征及其相关分析[D]. 中国海洋大学, 2007. [BAI Zhipeng. Characteristics of interannual variation of temperature and salinity flow in 137°E, PN and TK sections and their correlation analysis [D]. Ocean University of China, 2007.]
- [14] 任惠茹, 康建成, 李卫江, 等. 东海黑潮表层盐度分布特征及其影响因素[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(5):55-61. [REN Huiru, KANG Jiancheng, LI Weijiang, et al. The distribution characteristics of surface saline salinity in the East China Sea and its influencing factors[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(5):55-61.]
- [15] 管秉贤. 东海海流结构及涡旋特征概述[J]. 海洋科学集刊, 1986, 27:1-22. [GUAN Bingxian. Overview of ocean current structure and vortex characteristics in the East China Sea[J]. Marine Science Collection, 1986, 27, 1-22.]
- [16] 韩树宗, 徐常三. 琉球海流起源及其变化特征的初步分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(z1):8-16. [HAN Shuzong, XU Changsan. Preliminary analysis of the origin and variation characteristics of Ryukyu current [J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science), 2012, 42(z1):8-16.]
- [17] 刘忠臣, 陈义兰, 丁继胜, 等. 东海海底地形分区特征和成因研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2):160-173. [LIU Zhongchen, CHEN Yilan, DING Jisheng, et al. Study on the zoning characteristics and genesis of the seabed topography in the East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(2):160-173.]
- [18] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA)[J]. Monthly Weather Review, 2008, 138(136):2999.
- [19] Amante C, Eakins B W. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis [J]. Psychologist, 2009, 16(3):20-25.
- [20] 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 海洋出版社, 2003. [SHEN Huaanting, MAO Zhichang, ZHU Jianrong. Saltwater Intrusion in the Changjiang Estuary[M]. Ocean Press, 2003.]
- [21] 杨阳, 李锐祥, 朱鹏利. 珠江冲淡水季节变化及动力成因[C]//热带海洋科学学术研讨会暨广东海洋学会会员代表大会论文集. 2013:36-44. [YANG Yang, LI Ruixiang, ZHU Pengli. Seasonal changes and dynamic genesis of the Pearl River dilute water[C]. Tropical Ocean Science Symposium and Guangdong Ocean Society Member Congress Papers, 2013:36-44.]
- [22] 欧素英. 珠江口冲淡水扩展变化及机制研究[J]. 中科院机构知识库, 2005. [OU Suying. Research on the change and mechanism of diluted water expansion in the Pearl River estuary[J]. The Institutional Knowledge Base of the Chinese Academy of Sciences, 2005]
- [23] 乔方利. 中国区域海洋学. 物理海洋学[M]. 海洋出版社, 2012:251-252. [QIAO Fangli. Regional Oceanography in China. Physical Oceanography[M]. Ocean Press, 2012:251-252.]
- [24] 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[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 1998(4):536-542. [LUO Yiyong, YU Guangyao. Numerical calculation of upwelling flows in the East China Sea coast caused by wind and Taiwan warm current[J]. Journal of Ocean University of China(Natural Science Edition), 1998(4):536-542]
- [25] 张庆华, 乔方利. 海底地形和沿岸流对长江冲淡水分布的影响[J]. 海洋学报, 1993(6):1-15. [ZHANG Qinghua, QIAO Fangli. Effects of seabed topography and coastal currents on the distribution of dilute water in the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Oceanography, 1993(6):1-15.]
- [26] 陈红霞, 袁业立, 华锋. 东海黑潮主段 G-PN 断面的多核结构[J]. 科学通报, 2006, 51(6):730-737. [CHEN Hongxia, YUAN Yeli, HUA Feng. The multi-nuclear structure of the G-PN section in the main Kuroshio Current in the East China Sea[J]. Science Bulletin, 2006, 51(6):730-737.]
- [27] 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[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(6):6-13. [WANG Tiantian, KANG Jiancheng, LI Weijiang, et al. Three-dimensional structure of winter and summer temperatures of cold vortex-upflow system in the northeastern Taiwan Basin[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(6):6-13.]
- [28] 顾玉荷, 孙湘平, 许兰英. 137°E 经向断面上的副热带逆流[J]. 海洋学报, 1999, 21(5):22-30. [GU Yuhe, SUN Xiangping, XU Lanying. Subtropical convection on the meridional section of 137°E[J]. Acta Marine Sinica, 1999, 21(5):22-30.]
- [29] 顾玉荷, 孙湘平. 137°E 经向断面温、盐度的年际变异[J]. 海洋学报, 1999, 21(6):9-16. [GU Yuhe, SUN Xiangping. Interannual variation of salinity at 137°E meridional section temperature[J]. Acta Marine Sinica, 1999, 21(6):9-16.]
- [30] 邓银银, 孟赫, 高会旺, 等. 中国近海及西北太平洋海域降水量变化及其与气溶胶光学厚度的关系[C]. 中国大气环境科学与技术大会暨中国环境科学学会大气环境分会, 2012. [DENG Yinyin, MENG He, GAO Huiwang, et al. Precipitation change and its relationship with aerosol optical thickness in China's offshore and Pacific Northwest seas[C]. China Atmospheric Environment Science and Technology Conference and Chinese Society for Environmental Sciences Atmospheric Environment Branch, 2012.]
- [31] 谭能志. 1945—2010 年东海黑潮区 PN 断面温度的季节/年际/年代际变化[D]. 上海师范大学, 2013. [TAN Nengzhi. Seasonal/interannual/interdecadal variations of PN section temperature in the Kuroshio region of the East China Sea from 1945 to 2010[D]. Shanghai Normal University, 2013.]
- [32] 刘运运. 东海黑潮区 PN 断面盐度不同季节的年际/年代际变化[D]. 上海师范大学, 2013. [LIU Yunyun. The interannual/interdecadal variations of the salinity of the PN section in the Kuroshio region of the East China Sea [D]. Shanghai Normal University, 2013.]