



南海北部中层水盐度时空变化及盐量输送研究

周 莉, 康建成, 孟祥春, 华宇彤

Spatial-temporal variation and salt transport in the intermediate water of the northern South China Sea

ZHOU Li, KANG Jiancheng, MENG Xiangchun, and HUA Yutong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022031501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

构造-沉积耦合过程的数值模拟: 以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139

东海陆坡—冲绳海槽水体剖面地球化学特征与指示意义

Geochemistry of the water profiles at the slope of East China Sea and Okinawa Trough and its implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 102

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周莉, 康建成, 孟祥春, 等. 南海北部中层水盐度时空变化及盐量输送研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 32-42.

ZHOU Li, KANG Jiancheng, MENG Xiangchun, et al. Spatial-temporal variation and salt transport in the intermediate water of the northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 32-42.

南海北部中层水盐度时空变化及盐量输送研究

周莉, 康建成, 孟祥春, 华宇彤

上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234

摘要:为探讨南海北部中层水盐度的时空分布特征及与外海水的交换, 选用 1871—2010 年共 140 年的月平均海洋同化数据 (SODA2.2.4), 利用 EOF、小波等分析方法, 分析南海北部中层水盐度的时空分布、变化周期、盐通量等特征。结果表明: ①南海北部中层水的盐度月际变化特征为: 1—3 月, 南海北部中层水受到越南东部沿岸向东北方向延伸出的高盐舌的影响 (>34.45 psu), 盐度偏高, 中部盐度较低; 4 月南海北部中层水的盐度分布均一, 盐度范围在 $34.40\sim34.45$ psu; 5—8 月, 夏季南海北部的中层气旋式环流将北太平洋中层水 (North Pacific Intermediate Water, NPIW) 携带至南海中部, 在南海中部偏北形成一低盐水团 (<34.42 psu), 并在此时间段内低盐水团逐渐向东北方向移动, 直至 9—10 月, 上述低盐水团与 NPIW 混合; 11—12 月, NPIW 东撤, 收缩至吕宋海峡西北侧。②过去 140 年, 南海北部中层水的盐度值波动上升, 其中, 1985 年中层水盐度值最高, 可能与当年夏季风爆发早且强有关。1963—2002 年, 存在较强的 16~21 a 的周期性, 小波系数的实部正相位的峰值和负相位的谷值所对应的年份, 与 ENSO 冷事件具有较好的对应。③对 EOF 第一模态分析显示, 整个研究海域为单极子变化特征, 呈一致性变化。第二模态的空间分布呈偶极子形态, 一正一负相位中心沿 NW-SE 走向对称分布。④南海北部中层水全年的净盐通量均由南海向东流入太平洋, 夏季最少, 冬季最多。1871—2010 年的 140 年间, 中层水的盐通量一直处于下降的趋势, 下降的趋势十分缓慢。

关键词: 中层水; 西北太平洋; 海水盐度; 盐通量; 南海

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022031501

Spatial-temporal variation and salt transport in the intermediate water of the northern South China Sea

ZHOU Li, KANG Jiancheng, MENG Xiangchun, HUA Yutong

School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract: To explore the spatial-temporal distribution of salinity in the intermediate water and water exchange with the external waters of the northern South China Sea (SCS), the monthly mean oceanic assimilation data of past 140-year from 1871 to 2010 (SODA2.2.4) were selected, on which the spatial-temporal variation, periodicity, and salt transport of intermediate water salinity in the SCS and adjacent northwest Pacific Ocean were analyzed using wavelet analysis and EOF decomposition. The result show that the monthly salinity variation of intermediate water in the northern SCS is higher in January-March than that of the central part due to northeastward extending of high salinity water from the eastern coast of Vietnam (>34.45 psu). The salinity distribution of the intermediate water in the northern SCS is uniform in April, and the salinity ranged from 34.40 to 34.45 psu. In May-August, there is a cyclonic circulation in the intermediate water of the northern SCS in summer, which can carry the North Pacific Intermediate Water (NPIW) to the central part of SCS, and then forms a low-salinity water lens (<34.42 psu) in the north-central SCS. Meanwhile, the low-salinity water lens move northeastward gradually until mix with NPIW in September-October. In November-December, NPIW withdraws eastward and shrinks to the northwest of the Luzon Strait. In the past 140 years, the salinity of intermediate water in the northern SCS has been rising periodically, reaching the peak in 1985, which may be related to the early and strong summer monsoon. From 1963 to 2002, a strong 16-21-year periodicity is shown, and the years of the maximum (minimum) values of the real part of wavelet coefficients well agree with corresponding ENSO cold events. The first EOF analysis shows that the intermediate water salinity in the northern SCS is in a monopole and consistent variation pattern. The positive and negative phase centers identified by the second mode is symmetrical in distribution in NW-SE strike. The annual net salt fluxes of the intermediate water in the northern SCS flow eastward from the

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)

作者简介: 周莉(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋气候环境变化研究, E-mail: 13166433078@163.com

通讯作者: 康建成(1957—), 男, 博士, 教授, 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: 2022-03-15; 改回日期: 2022-05-23. 张现荣编辑

South China Sea to the Pacific Ocean, the least in summer and the most in winter. During the 140 years from 1871 to 2010, the salt fluxes in the intermediate water has been decreasing constantly and slowly.

Key words: intermediate water; Northwest Pacific; seawater salinity; salt transport; the South China Sea

北太平洋中层水(North Pacific Intermediate Water, NPIW)起源于极地地区,为位势密度为 26.5~27.0 σ_θ 的盐度极小值水层(约 34.0~34.3 psu),深度在 300~800 m。受到海盆尺度环流的影响, NPIW 在北太平洋亚热带地区广泛分布,在南海海域,南海中层水被认为是 NPIW 的延伸^[1-2]。

南海中层水主要是 NPIW 经吕宋海峡进入南海并与南海内部水团混合而成^[3-4],是南海北部海域变性最小的大洋型水团^[5],位于南海次表层水之下,以低盐为主要特征,分布于 400~1 000 m,核心区域深在 500 m 左右^[6-7];中层水团大体上由北向南散布,约在 500 m 层布满南海海区,在 600~800 m 层,边界向北部收缩^[8]。因南海中层水与太平洋相连,因此,中层水的年代际变化可能反映了全球水文气候环境的变化^[9]。

目前,对南海中层水的研究主要集中于 NPIW 在吕宋海峡处与南海水的交换方式及季节变化特点方面。Qu^[10] 根据对历史溶解氧资料的分析发现,吕宋海峡水交换具有“三明治”的垂向结构,即上层和底层水从太平洋流入南海,中层水流出南海;韩钦臣等^[11] 基于对吕宋海峡水交换的月际变化的分析也揭示了类似的特征。多位学者的研究表明,位于水深 350~1 350 m 的南海水能通过吕宋海峡流出南海,入侵太平洋^[12-15];甚至在某些年份,出现无 NPIW 明显进入南海的现象^[3]。NPIW 进出南海受到季风驱动的海洋环流控制,从而影响南海中层水的盐度变化^[9]。气候平均态意义下, NPIW 在南海的入侵局限在吕宋海峡附近很小的区域内,深度为 480~500 m,因此,吕宋海峡东侧的盐度明显小于南海内部的盐度; NPIW 在春季有一定程度的入侵,随后东撤,夏季基本退至吕宋海峡附近,冬季 NPIW 入侵最弱^[1-2,9,16],整个南海的盐度达到全年最大,这与此时南海经向翻转流在中层水深度范围的北向运动的阻碍有关^[16]。南海经向翻转环流驱动南海深层水向南运动并不断上升,持续形成南海中层水^[17]。Liu 等^[9] 研究显示,20 世纪 80 年代的南海中层水盐度比 20 世纪 60 年代要低,系与南海的经向翻转环流的减弱有关。

过去,由于海洋数据的获取难度大,对南海海水盐度的研究数据多来源于观测数据,研究的时段主要集中于某一年份、月份或者某一特殊时期,空

间上主要集中于南海表层及次表层。近年来,海洋再分析产品的发展使得数据获取更方便、全面,促进了南海中层水及深层水的研究,但是少有年代际尺度的研究,而南海中层水作为 NPIW 在南海范围内的延伸,可能同样携带长期气候变化的信息。因此研究南海中层水盐度的时空变化特征,可从中发现 NPIW 在南海的入侵、分布随时间的变化特征,能够为研究南海中层水对世界气候变化的响应提供研究基础和有效依据。

因南海中层水与 NPIW 的混合主要发生在吕宋海峡附近^[4,16],因此本研究在研究区域上,选取南海及毗邻的西北太平洋范围为 12.25~25.25°N, 105.25~140.25°E 的区域,拟用 1871—2010 年再分析资料,分析长时间尺度下,南海北部中层水盐度及其与西北太平洋盐量输送的变化特征。

1 数据和方法

本文所用的盐度数据资料来源于美国马里兰大学和德州农工大学共同研制开发的全球简单海洋同化分析系统 SODA2.2.4 的月平均资料。SODA2.2.4 海洋数据集包括的变量有温度、盐度、海流速度、海表风应力等^[18-19]。水平分辨率为 0.50°×0.50°,垂直方向为不等间距的分辨率,海表以下共有 40 层。时间跨度为 1871 年 1 月—2010 年 12 月,共 140 a 1 680 个月份。ENSO 历史事件统计表来源于中国气象局国家气候中心,下载网址 http://cmdp.ncc-cma.net/download/ENSO/Monitor/ENSO_history_events.pdf。

依据 SODA2.2.4 数据集中不等间距的深度,采用 MATLAB 三维可视化技术,逐层分析,确定南海中层水中变化最为明显的一层(深度),作为核心层,展开南海中层水长时间尺度盐度变化特征的研究;并使用经验正交函数(EOF)方法对中层海水盐度的距平场进行时空分解,获取盐度变化的空间分布和时间系数,通过 Morlet 小波分析其变化趋势和周期特征,揭示盐度的年际变化特征。

为了研究南海与西北太平洋之间的盐量输送关系,取吕宋海峡附近 120.75°E 断面,根据盐通量计算公式(1)^[20-22],计算出断面的盐输送量。

$$F_s = \sum_i \left[\Delta l_i \sum_k S_{i,k} \rho_{i,k} v_{i,k} \Delta z_k \right] \times 10^{-3} \quad (1)$$

式 1 中, i 和 k 分别为断面水平方向和垂向网格序号; $v_{i,k}$ 为网格 (i, k) 中心处的法向流速, 向北为正; Δl_i 和 Δz_k 为第 (i, k) 网格的宽度和厚度; $S_{i,k}$ 为该网格的面积; $\rho_{i,k}$ 为 (i, k) 网格的海水密度。盐运输的单位为 Gg/s(1 Gg/s= 10⁶ kg/s)。

2 南海北部中层水盐度的变化特征

2.1 南海北部中层水盐度多年平均的空间分布状况

在 SODA 数据集中, 1—40 层的不等间距深度范围内, 选择中层水深度 17—23 层(300~1000 m), 分析研究该范围内南海中层水 140 多年平均的空间分布状况。根据刘长建等的研究结果, 34.42 psu 等盐线可很好地展示 NPIW 在南海的分布^[16]; 据此, 本文将 34.42 psu 等盐线作为南海中层水的包络线。

如图 1, 在南海中层水深度范围内, 从 300 m 到 460 m 层, 中层水的盐度值随深度逐渐减小且 NPIW 的分布范围逐渐增加, 并在 460 m 层分布范围最大; 从 460~1 000 m 水层, 海水的盐度值逐渐升高, NPIW 的分布范围逐渐减小, 直至中层水的下界完全消失。南海南部中层水的海水盐度明显高于北部。在南海位于 380~580 m 的中层水是 NPIW

主要存在于南海的深度范围。从 140 a 平均的空间分布状况来看, 南海中层水中的 NPIW 确实只局限于吕宋海峡附近, 与刘长建等^[16]的研究结果相符; 但如果看月际的分布状况, 结果需进一步验证。因此, 下文将对南海中层水盐度多年平均的月际空间分布特征进行分析。

2.2 南海中层水核心层的确定

为更清楚地展现南海北部中层水盐度变化的月际特征, 探究多年平均的月际空间变化, 本文选择中层水的核心层来研究。

本文所指的核心层为南海中层水中对 NPIW 入侵反映最为明显的一层, 即 NPIW 分布最广泛的一层。根据上文 2.1 的研究内容及图 1 可以确定, 在南海, 380~580 m 是中层水中部的范围, 是 NPIW 主要存在于南海的深度范围。其中 460 m 层为 NPIW 分布最为广泛的一层。为了检验核心层的准确性, 选择 120.75°E 与 20.25°N 断面(图 2)来展示中层水在深度上的盐度变化过程; 选择 120.75°E 断面是因为此处为吕宋海峡, 是南海与西北太平洋水交换的唯一深水通道, 此处可以反映 NPIW 最开始进入南海中层水时的低盐特征; 选择 20.25°N 断面的原因是, 中层水的低盐水一般在南海北部比较活跃, 此断面穿过南海北部及吕宋海峡, 且沿该断面, 没有受到陆地的影响, 不存在空值的情况。

从图 3 的断面图中可以看出, 在南海, 低盐水团

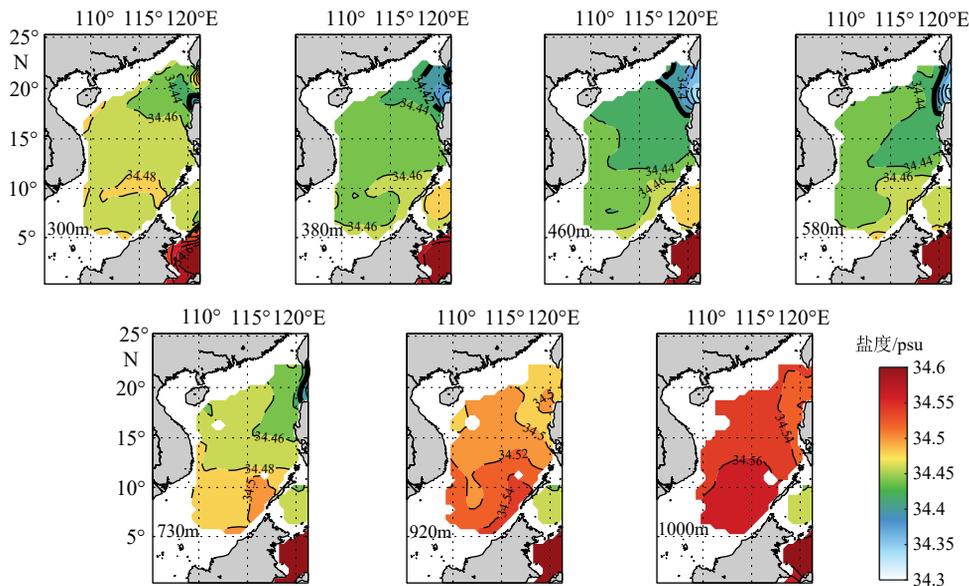


图 1 南海中层水的分布

使用 SODA 数据集, 展示不同深度层中层水的分布范围, 可见 460 m 层中层水的低盐特征最为突出。

Fig.1 The distribution of the intermediate water in the South China Sea

The SODA datasets present the distribution range of the intermediate water at different depths, and the low-salinity is the most prominent in the 460 m layer.

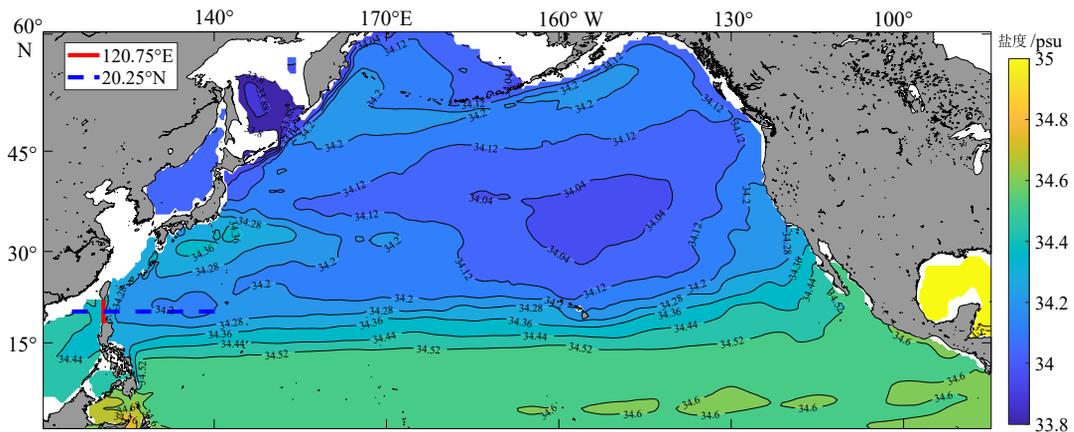


图 2 研究断面位置图

填色为 580 m 层盐度值。

Fig.2 Location map of the transection studied

Fill in the salinity value of the 580 m.

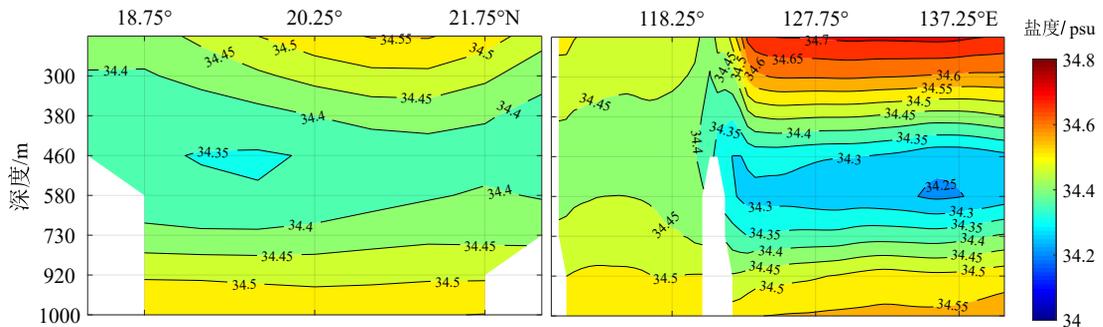


图 3 140 a 南海纵断面盐度的平均状况分布图

左: 120.75°E 断面; 右: 20.25°N 断面。

Fig.3 Distribution of salinity in the South China Sea in the last 140 years

left: 120.75°E transection; right: 20.25°N transection.

常年存在于 18.75~20.25°N 的 460 m 深度层; 而在西北太平洋, 中层低盐水的核部常年在 580 m 深度层, 该水层中 15°N 以北的太平洋海域, 基本被 NPIW 所覆盖 (图 2); 西北太平洋中层水通过吕宋海峡进入南海与南海水团混合后, 低盐核心的位置抬升到 460 m 左右的位置。前人提出, 南海中层水的核心区域在 500 m 左右^[4,6]; 本研究使用 SODA 数据集, 逐层对比, 可进一步确定南海中层水的核心层为 460 m 层, 并以此作为南海中层水的代表层展开研究。

2.3 南海北部中层水盐度的月际变化特征

在研究南海北部中层水盐度的月际变化上, 采用平面与断面相结合的方式能够立体观察其盐度的空间变化特点。平面上选择了上文筛选得到的代表层 460 m 深度; 断面上选择 18.25°N 断面。18°N 断面在研究西北太平洋与南海以及南海内部

的水交换方面具有重要作用, 自 2010 年起, 18°N 断面被纳入国际 CLIVAR 项目中的气候与海洋计划框架^[23]。因受 SODA 数据网格的限制, 本文选取与 18°N 相近的 18.25°N 断面进行研究。

从南海及毗邻的西北太平洋中层水 460 m 处的盐度值月平均分布图 (图 4) 和 18.25°N 断面图 (图 5) 上可以看出, 整体上, 南海北部中层水的盐度分布比西北太平洋更加均一, 盐度波动值较小; 中层低盐水团在西北太平洋主要分布在约 580 m 深度, 盐度核心低于 34.25 psu, 进入南海后主要分布于 400~500 m, 盐度核心低于 34.42 psu。

1—2 月, 南海北部中层水受到位于越南归仁—芽庄—潘切沿岸上升流的影响^[24-25], 将底部较高盐度水体带至中层, 向东北方向延伸出高盐舌 (> 34.45 psu), 南海北部盐度值高于南海中部; NPIW 进入南海后, 沿南海北部入侵, 在南海主要分布在北部 115.25°E 以西的沿岸。

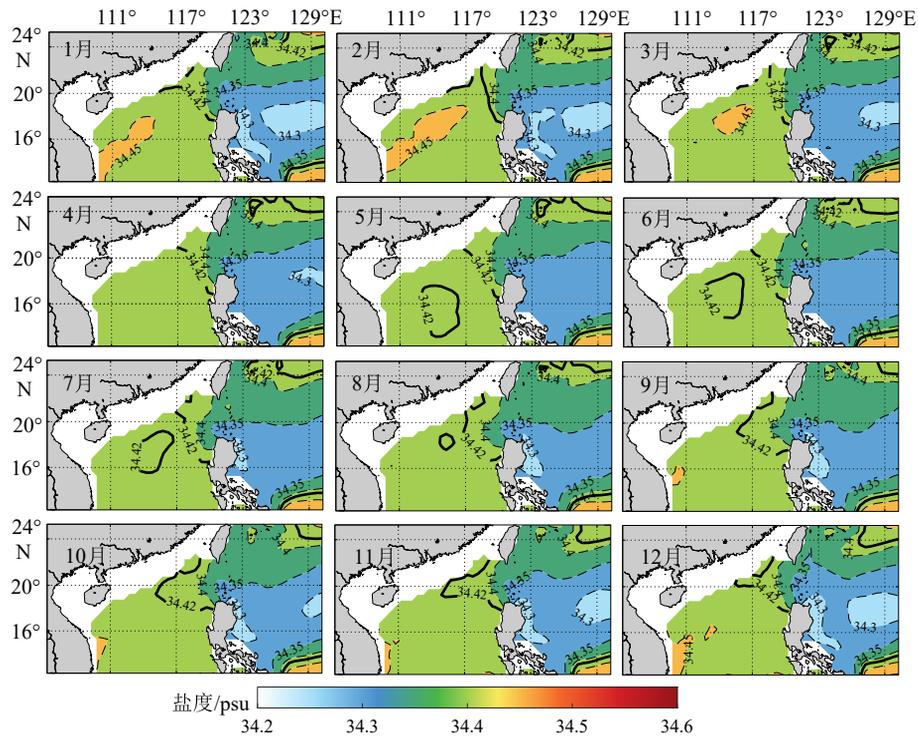


图 4 南海北部中层水核心层（460 m 处）的盐度月平均分布特征

Fig.4 Characteristics of monthly distribution of salinity at 460 m of the intermediate water in the northern South China Sea

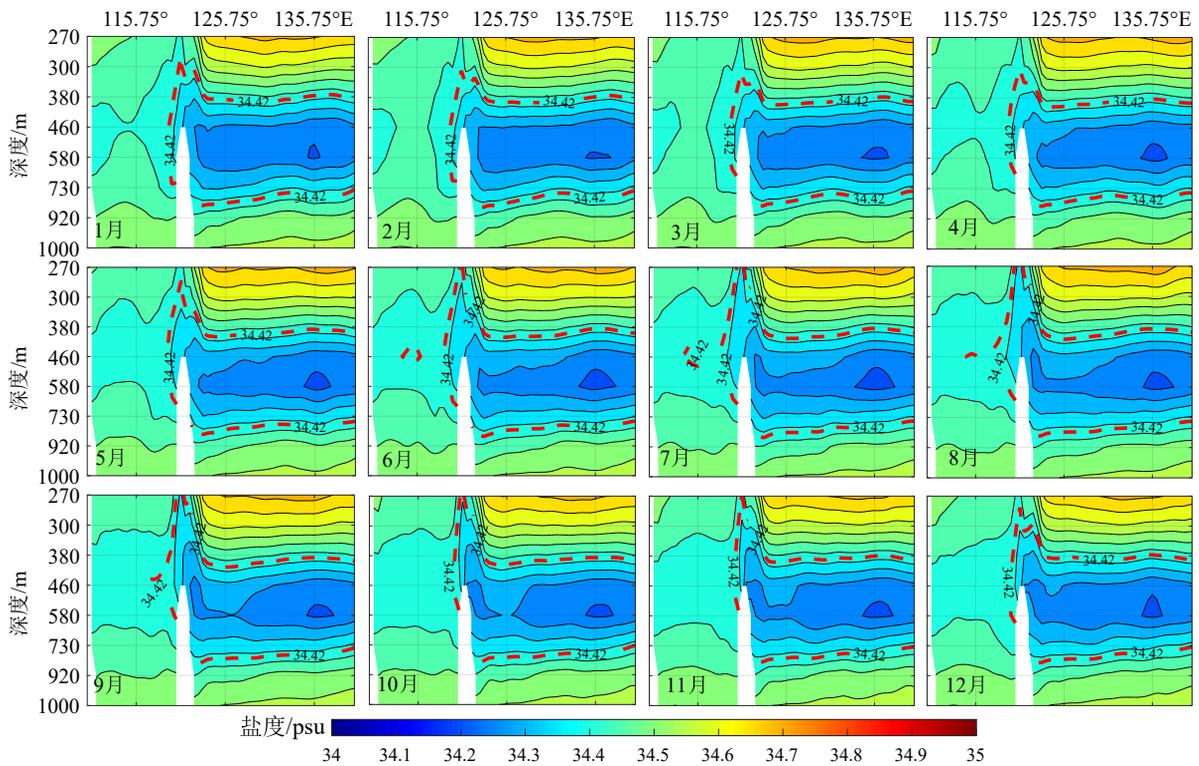


图 5 18.25°N 断面南海中层水平平均月际变化

Fig.5 The monthly variation of the intermediate water in the South China Sea at 18.25°N

3月,上述高盐舌在南海北部分离出一高盐中心(>34.45 psu),此时NPIW在南海沿岸分布范围减少,主要盘踞在吕宋海峡以西。

4月,南海北部中层水的盐度分布最为均一,NPIW在南海连续分布在东北角。根据18.25°N断面图显示,1—4月NPIW进入南海时受到吕宋岛西

北岸外海域上升流的影响,在菲律宾岛沿岸,可使低盐水上升至 300 m 左右。

5 月,南海中部偏北处有一低盐中心 (< 34.42 psu),南海夏季北部的中层有一气旋式环流^[24,26],该低盐中心的形成可能与此气旋式环流有关。此低盐中心在 6—8 月逐渐向东北方向移动且范围逐渐缩小;由 18.25°N 处的断面图可以看出,该低盐中心在 8 月与 NPIW 混合。混合后,9—10 月 NPIW 在南海北部中层水的分布均向西有所延伸。

11—12 月, NPIW 逐渐东撤,主要分布在吕宋海峡东北角。

综上所述,南海北部中层水盐度的月际变化特征为:1—3 月,南海北部中层水受到越南东部沿岸向东北方向延伸出的高盐舌 (> 34.45 psu) 的影响,盐度偏高;在南海中部,中层水的盐度较低。4 月,南海北部中层水的盐度分布均一,盐度为 $34.40 \sim 34.45$ psu;5—8 月,南海中部偏北出现一低盐水团 (< 34.42 psu),并在此时间段内逐渐向东北方向移动,该低盐水团的形成可能与海洋环流有关。根据前人研究可知,南海夏季北部中层水有一气旋式环流^[4,24-26],该气旋式环流可将吕宋海峡附近的 NPIW 携带至南海中部,由此在南海腹地形成低盐水团;9—10 月,上述低盐水团与 NPIW 混合;11—12 月, NPIW 东撤,收缩至吕宋海峡西北侧。

2.4 南海北部中层水盐度的年际变化特征

南海中层水性质比较均一,盐度变化主要受到通过吕宋海峡与西北太平洋水交换的影响;因此,为了更明显地表现出南海中层水盐度 140 a 来年际、年代际的变化特点,取盐度变化受西北太平洋影响最为明显的范围(南海北部 $12.25 \sim 25.25^{\circ}\text{N}$,

$105.25 \sim 120.75^{\circ}\text{E}$, 460 m 核心层)的数据,用 MATLAB 软件求出 1871—2010 年各个年份该范围内盐度的平均值,再加以趋势线分析、四阶线性拟合进行线性分析,并用此数据进行小波分析和 EOF 分析。

从年平均盐度曲线(图 6)可以看出,总体上,南海北部中层水的盐度呈上升的趋势,海水盐度值的波动大多数年份较平缓,在平均值上下,仅在 1925—1945 年间和 1980 年前后有较大的变化。1925—1945 年间,1927 年前后中层水盐度值有明显的下降,在 1945 年前后又有明显的上升;1980 年前,中层水盐度值剧烈下降,1980 年后盐度值剧烈上升。1925—1945 年间和 1980 年前后,中层水盐度值两次在较短的时间段内出现下降、上升的波动,其中后者更剧烈,完成时间更短。

将中层水各个年份的盐度值与平均值对比,可将 1871—2010 年南海北部中层水的盐度变化划分为 4 个阶段:1900 年以前,基本在平均值上下,没有较大的浮动;1920—1960 年,南海北部中层水的盐度值低于平均值,其中 1927 年中层水的盐度值是 34.53 psu,为整个研究时段内的最低值;1960—2006 年,南海北部中层水的盐度值高于平均值,并在 1985 年达到整个研究时段的最高值,为 34.59 psu。根据前人研究结果可知,1985 年为强夏季风年份,且爆发时间早^[27-28],强劲的西南季风影响了 NPIW 向南海推进^[29];2006 年后,南海北部中层水的盐度值开始稍有下降,降至平均值以下。

中层水的盐度变化是否存在周期性变化特征,可根据小波分析图(图 7)来探讨,中层水的盐度变化第一主周期是 21 a,第二主周期是 7 a。根据小波系数实部等值线图(图 7a)可见,在 1929—1946 年

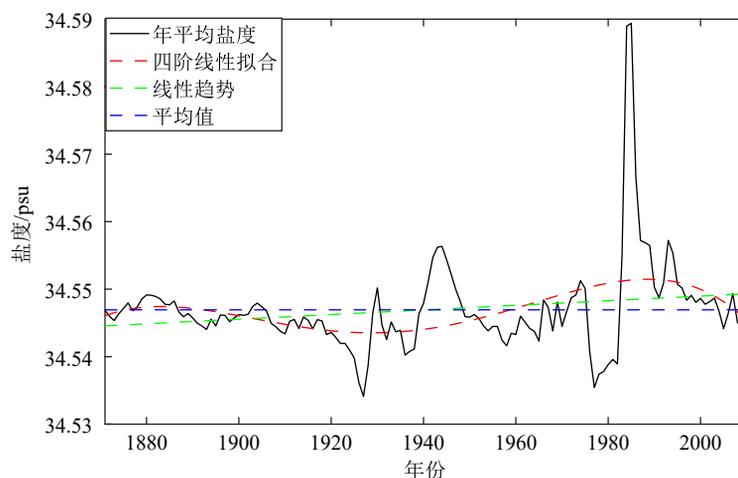


图 6 中层水盐度的年际变化曲线

Fig.6 Interannual variation in salinity of the intermediate water in South China Sea

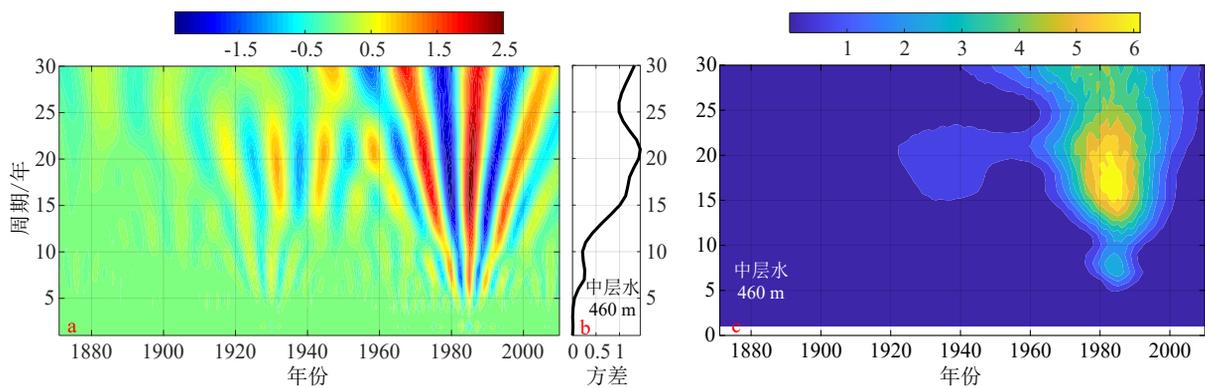


图7 南海北部中层水盐度变化的年际周期小波分析图
a. 实部, b. 方差, c. 模方。

Fig.7 Wavelet analysis of the interannual cycle of salinity in the intermediate water of the South China Sea

a. The real part of wavelet coefficients, b. the variance, c. the modulus.

表1 小波系数的实部正(负)位相年份与 ENSO 事件的对应

Table 1 The years of maximum (minimum) value of the real part of wavelet coefficients vs ENSO events

| 年份 | 小波实部正/负相位 | ENSO事件 | 起止年月 | 峰值时间 | 强度 |
|-------|-----------|---------|---------------------------------|-----------------|------|
| 1965年 | 负相位 | 冷事件 | 1965.05—1966.05 | 1965.11 | 中等 |
| 1972年 | 正相位 | 冷事件 | 1972.05—1973.03 | 1972.11 | 强 |
| 1979年 | 负相位 | 冷事件 | 1979.09—1980.01 | 1980.01 | 弱 |
| 1986年 | 正相位 | 冷事件 | 1986.08—1988.02 | 1987.08 | 中等 |
| 1992年 | 负相位 | 冷事件 | 1991.05—1992.06 | 1992.01 | 中等 |
| 1995年 | 正相位 | 冷事件、暖事件 | 1994.09—1995.03、1995.09—1996.03 | 1994.12、1995.11 | 中等、弱 |

和 1963—2002 年存在 16~21 a 的周期, 其中 1963—2002 年的周期性很强, 这一点在右侧的小波系数数模等值线图(图 7c)中可得到验证; 1979—1991 年存在 7~8 a 的周期。从小波实部分析图(图 7a)中可以看出, 在周期变化最强的 1963—2002 年, 小波系数的实部正相位的峰值(盐度高)和负相位的谷值(盐度低)所对应的年份, 均有不同强度的 ENSO 事件发生(表 1), 尤其是与冷事件(La Nina)具有较好的对应。相关研究表明, 强夏季风年中, La Nina 出现的频率大于 El Nino^[30-31]; El Nino 年, 在西北太平洋会存在一个从冬季维持到次年夏季的反气旋性环流异常, 造成次年(可能为 La Nina 年)夏季风偏强^[32]; 由此, 中层水盐度的周期变化可能是由于 ENSO 冷事件影响了西南季风的强弱变化, 从而影响 NPIW 向南海的推进。

为探讨南海北部中层水盐度多年平均的空间变化特点, 本文使用 EOF 进行时空分解(图 8)。EOF 模态分析的前两个模态的贡献率为 77.08%, 可大致反映原始场的主要信息(表 2)。因此, 选取前两个模态反映该深度盐度分布原始场的主要信息,

结合时间序列, 则可分析得到盐度场在相应时间段内的空间变化特征。

460 m 层 EOF 第一模态的贡献率为 59.73%, 该模态是研究区内中层水盐度值变化的主要形式, 反映出整层的一致性变化。从第一模态值的分布看, 整个研究海域呈单极子变化特征。结合时间系数可知, 1940 年前后和 1986 年前后, 整个研究区域中层水盐度明显地上升到一个极大值, 尤其是南海偏中部 14°~18°N, 盐度上升最为明显。1986 年前后盐度的变化情况比 1940 年更为剧烈。

460 m 层 EOF 第二模态的贡献率为 17.35%, 空间分布上呈偶极子分布形态, 大致可沿 16°N 纬线将正负位相变化一分为二, 16°N 以南为正位相变化, 16°N 以北为负位相变化。正位相变化中心在研究区西南角, 南海西部, 负位相中心在研究区东南角, 吕宋海峡西侧; 一正一负位相中心沿 WN-ES 走向对称分布。结合时间系数可知, 1981—1996 年间吕宋海峡西侧中层水的盐度有明显上升。

总体上看, 在 1871—2010 年的 140 年间, 南海北部中层水盐度值逐渐上升, 1900 年以前, 基本在

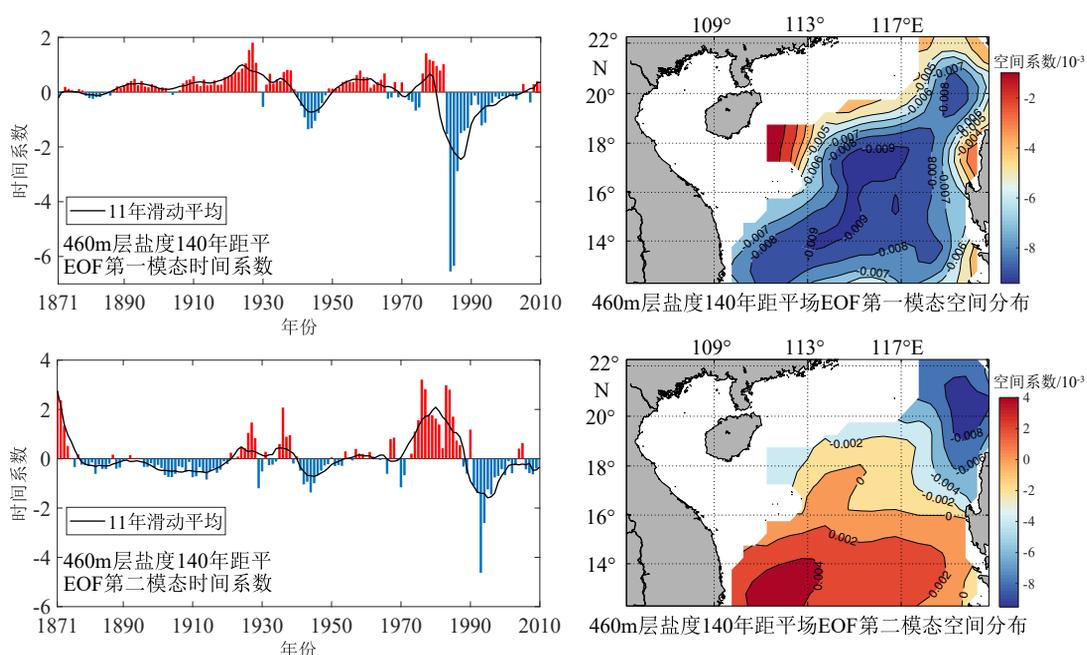


图 8 南海北部中层水盐度的年际模态分析

Fig.8 Interannual modal analysis on the salinity of the intermediate water in the northern South China Sea

表 2 南海中层海水各模态贡献率

Table 2 Contribution of each mode to the intermediate seawater salinity of the South China Sea

| | 第一模态 | 第二模态 | 第三模态 | 第四模态 |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 贡献率 | 0.5973 | 0.1735 | 0.0533 | 0.0397 |

平均值上下浮动; 1920—1960 年南海北部中层水的盐度值低于平均值, 其中 1927 年南海北部中层水盐度值是 34.53 psu, 为整个研究时段内的最低值; 1960—2006 年, 南海北部中层水的盐度值高于平均值, 并在 1985 年达到整个研究时段内的最高值, 为 34.54 psu, 可能与当年夏季风爆发早且强有关。小波分析表明, 1963—2002 年间, 存在较强的 16~21 a 的周期性, 小波系数的实部正相位的峰值和负相位的谷值所对应的年份, 与 ENSO 冷事件具有较好的对应。EOF 第一模态反映出整层的一致性变化, 该模态是研究区内中层水盐度值变化的主要形式, 整个研究海域呈单极子变化特征。第二模态的空间分布上呈偶极子分布形态, 一正一负位相中心沿 WN-ES 走向对称分布。

3 南海北部中层水与西北太平洋中层水的盐交换变化特征

为了解南海北部中层水与西北太平洋中层水的盐交换特征, 选取南海 18.75°~22.25°N、120.75°E,

中层 300~1 000 m 范围内的数据, 选择该范围的原因是 120.75°E 断面为吕宋海峡处, 是西北太平洋与南海北部中层水水交换的唯一深水通道, 18.75°~22.25°N 是在 120.75°E 断面上、南海北部中层水深度范围内, 不受空值和陆地影响的连续范围, 因此选择此范围来计算南海北部中层水与西北太平洋中层水的盐通量, 绘制出南海中层海水 140 年 1—12 月份平均的盐通量月际和 1871—2010 年的年际变化曲线图进行分析。

3.1 南海与西北太平洋中层水盐交换的平均月际变化特征

中层水全年的净盐通量均由南海向东流入太平洋(图 9), 11 月最多为 73.15 Gg/s, 7 月最少为 2.44 Gg/s; 夏季少, 冬季多。7—11 月, 盐通量上升速度比较快, 以每月 20 Gg/s 以上的速率增加, 11—次年 4 月以每月 12 Gg/s 的速率减小, 5—7 月下降的速度很慢, 在每月 1.2 Gg/s 上下。

3.2 南海北部中层水与西北太平洋中层水盐交换的年际变化特征

总体来看(图 10), 1871—2010 年的 140 年间, 南海北部中层水的盐通量一直处于下降的趋势, 但与平均值十分接近, 变化十分缓慢。从长时间尺度中层水盐通量的年平均量来看, 中层水的年平均盐通量绝大多数年份都是向东输送, 南海向西北太平

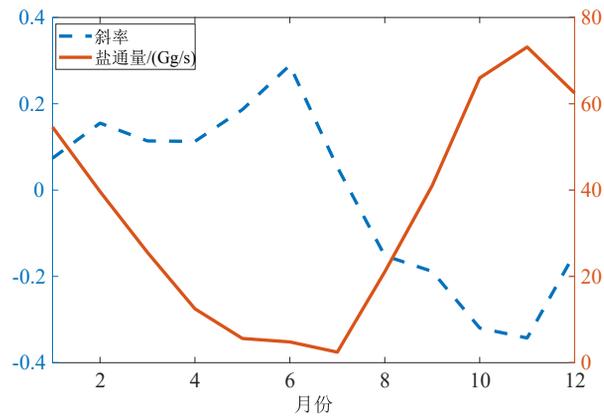


图9 南海北部中层水 120.75°E 断面各月盐通量及变化率

Fig.9 Monthly salt flux and variation at 120.75°E transection of the intermediate water in the South China Sea

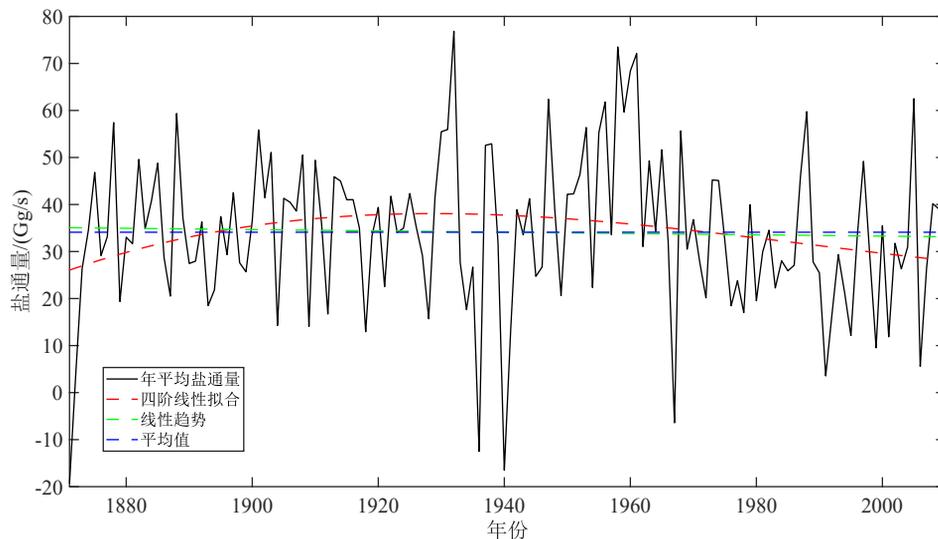


图10 南海北部中层水盐通量的年际变化曲线

Fig.10 The interannual variation of water-salt flux in the intermediate water of the South China Sea

洋输送盐量,仅在1871、1936、1940和1967年中层水的盐通量是西向输送的,由西北太平洋向南海输送盐量。

根据年平均盐通量的趋势线可以将其划分为3个阶段:1926年以前,中层水的盐通量变化基本在平均值34.1 Gg/s上下波动;1926—1968年上下波动较大,出现了最高值为76.84 Gg/s,以及多次出现0 Gg/s以下的盐通量值;1968年之后,中层水的盐通量稍有下降,常在30 Gg/s上下波动。

综上所述,140年间,中层水的盐通量一直处于下降的趋势,下降的趋势十分缓慢。中层水的年平均盐通量绝大多数年份都是东向输送,1926年以前,中层水的盐通量变化基本在平均值34.1 Gg/s上下波动;1926—1968年间上下波动较大,出现了最高值76.84 Gg/s,以及多次出现0 Gg/s以下的盐通量值;1968年之后,中层水的盐通量稍有下降,常在

30 Gg/s上下波动。

4 结论

(1)南海北部中层水的盐度月际变化特征为:1—3月,南海北部中层水受到越南东部沿岸向东北方向延伸出的高盐舌(>34.45 psu)的影响,盐度偏高;南海中部中层水的盐度较低;4月南海北部中层水的盐度分布均一,盐度范围为34.40~34.45 psu;5—8月,在南海夏季北部的中层气旋式环流将NPIW携带至南海中部,在南海中部偏北形成一低盐水团(<34.42 psu),并在此时间段内低盐水团逐渐向东北方向移动,直至9—10月,上述低盐水团与NPIW混合;11—12月,NPIW东撤,收缩至吕宋海峡西北侧。

(2)1871—2010年的140年,南海北部中层水

盐度值逐渐上升, 波动性较弱。1985 年中层水盐度值最高, 可能与当年夏季风爆发早且强有关。1963—2002 年间, 存在较强的 16~21 a 的周期性, 小波实部正相位的峰值和负相位的谷值所对应的年份, 均有不同强度的 ENSO 事件发生, 尤其是与冷事件具有较好的对应。

(3) EOF 第一模态反映出南海北部中层海水的一致性变化, 整个研究海域呈单极子变化特征。第二模态的空间分布上呈偶极子分布形态, 一正一负位相中心沿 WN-ES 走向对称分布。

(4) 南海北部中层海水全年的净盐通量均由南海向东流入太平洋, 夏季最少, 冬季最多。7—11 月, 盐通量上升速度比较快, 以每月 20 Gg/s 以上的速度增加, 11 月—次年 4 月以每月 12 Gg/s 的速度减小, 5—7 月下降的速度很慢, 约每月 1.2 Gg/s。在 1871—2010 年的 140 年间, 中层水的盐通量一直处于下降的趋势, 下降的趋势十分缓慢。

参考文献 (References)

- [1] Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T. Intrusion of the North Pacific waters into the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2000, 105 (C3): 6415-6424.
- [2] You Y Z, Chern C S, Yang Y, et al. The South China Sea, a *cul-de-sac* of North Pacific intermediate water [J]. *Journal of Oceanography*, 2005, 61 (3): 509-527.
- [3] 刘增宏, 许建平, 孙朝辉, 等. 吕宋海峡附近海域水团分布及季节变化特征[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30 (1): 11-19. [LIU Zenghong, XU Jianping, SUN Chaohui, et al. The characteristics of water mass distribution and its seasonal variation near the Luzon Strait [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30 (1): 11-19.]
- [4] 乔方利. 中国区域海洋学-物理海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012. [QIAO Fangli. *Regional Oceanography of China Seas*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012.]
- [5] 范立群, 苏育嵩, 李凤岐. 南海北部海区水团分析[J]. *中国海洋大学学报*, 1989 (S1): 169-180. [FAN Liqun, SU Yusong, LI Fengqi. Analysis of water masses in the northern area of the South China Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 1989 (S1): 169-180.]
- [6] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000. [LI Fengqi, SU Yusong. *Ocean Water Mass Analysis*[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 2000.]
- [7] 田天, 魏皓. 南海北部及巴士海峡附近的水团分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2005, 35 (1): 9-12. [TIAN Tian, WEI Hao. Analysis of water masses in the northern South China Sea and Bashi Channel [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35 (1): 9-12.]
- [8] 李凤岐, 谢骏, 姐婷婷. 大洋性次-中层混合水团隶属函数的拟合及南海水团分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2004, 34 (5): 861-866. [LI Fengqi, XIE Jun, ZU Tingting. Fitting method of membership function of the oceanic subsurface-intermediate mixing water mass and analysis of water masses in the South China Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34 (5): 861-866.]
- [9] Liu C J, Wang D X, Chen J, et al. Freshening of the intermediate water of the South China Sea between the 1960s and the 1980s [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30 (6): 1010-1015.
- [10] Qu T D. Evidence for water exchange between the South China Sea and the Pacific Ocean through the Luzon Strait [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 21 (2): 175-185.
- [11] 韩钦臣, 康建成, HAN Guoqi, 等. 基于海洋分析资料的吕宋海峡水交换的月际变化特征[J]. *地球科学进展*, 2015, 30 (5): 609-619. [HAN Qinchen, KANG Jiancheng, HAN Guoqi, et al. Monthly variation characteristics of water exchange based on the analyzed ocean data in the Luzon Strait [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30 (5): 609-619.]
- [12] Chen C T A, Huang M H. A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water [J]. *Journal of Oceanography*, 1996, 52 (1): 17-25.
- [13] Chen C T A, Wang S L. Influence of intermediate water in the western Okinawa Trough by the outflow from the South China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1998, 103 (C6): 12683-12688.
- [14] Tian J W, Yang Q X, Liang X F, et al. Observation of Luzon Strait transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (19): L19607.
- [15] Yang Q X, Tian J W, Zhao W. Observation of Luzon Strait transport in summer 2007 [J]. *Deep Sea Research Part I:Oceanographic Research Papers*, 2010, 57 (5): 670-676.
- [16] 刘长建, 杜岩, 张庆荣, 等. 南海次表层和中间水团年平均和季节变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39 (1): 55-64. [LIU Changjian, DU Yan, ZHANG Qingrong, et al. Seasonal variation of subsurface and intermediate water masses in the South China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39 (1): 55-64.]
- [17] 王东晓, 刘雄斌, 王文质, 等. 理想海底地形的南海海洋经向翻转数值模拟[J]. *科学通报*, 2004, 49 (7): 740-746. [WANG Dongxiao, LIU Xiongbin, WANG Wenzhi, et al. Simulation of meridional overturning in the upper layer of the South China Sea with an idealized bottom topography [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (7): 740-746.]
- [18] 王世红, 赵一丁, 尹训强, 等. 全球海洋再分析产品的研究现状[J]. *地球科学进展*, 2018, 33 (8): 794-807. [WANG Shihong, ZHAO Yiding, YIN Xunqiang, et al. Current status of global ocean reanalysis datasets [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (8): 794-807.]
- [19] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA) [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136 (8): 2999-3017.
- [20] 方国洪, 魏泽勋, 崔秉昊, 等. 中国近海域际水、热、盐输送: 全球变网格模式结果[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2003, 46 (2): 149-161. [FANG Guohong, WEI Zexun, CHOI C B, et al. Intercontinental water, heat and salt transport in China's offshore waters: results from a global variable grid model [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2003, 46 (2): 149-161.]
- [21] 葛黎丽, 程旭华, 齐义泉, 等. 南海 18°N 断面上的体积和热盐输运[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31 (1): 10-17. [GE Lili, CHENG Xuhua, QI Yiquan, et al. Upper-layer geostrophic volume, heat and salt transports across 18°N in the South China Sea [J]. *Journal of Tropical*

- Oceanography, 2012, 31 (1): 10-17.]
- [22] Qiu C, Zhu J R. Assessing the influence of Sea level rise on salt transport processes and estuarine circulation in the Changjiang River estuary [J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 31 (3): 661-670.
- [23] 赵德平, 王卫强, 覃慧玲, 等. 南海18°N断面中层水的年代际变化[J]. *海洋学报*, 2014, 36 (9): 56-64. [ZHAO Deping, WANG Weiqiang, QIN Huiling, et al. Decadal changes of the intermediate water at 18°N in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36 (9): 56-64.]
- [24] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J]. *海洋学报*, 2005, 27 (6): 1-8. [SU Jilan. Overview of the South China Sea circulation and its dynamics [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27 (6): 1-8.]
- [25] . Qiao F L, Lü X G. Coastal upwelling in the South China Sea [M]//*Satellite Remote Sensing of South China Sea*. Taiwan: Ting-mao Publish Company, 2008: 135-158.
- [26] 李立, 吴日升, 郭小钢. 南海的季节环流: TOPEX/POSEIDON卫星测高应用研究[J]. *海洋学报*, 2000, 22 (6): 13-26. [LI Li, WU Risheng, GUO Xiaogang. Seasonal circulation in the South China Sea a TOPEX/POSEIDON satellite altimetry study [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22 (6): 13-26.]
- [27] 戴念军, 谢安, 张勇. 南海夏季风活动的年际和年代际特征[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5 (4): 363-374. [DAI Nianjun, XIE An, ZHANG Yong. Interannual and interdecadal variations of summer monsoon activities over South China Sea [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5 (4): 363-374.]
- [28] 赵永平, 陈永利. 南海暖池的季节和年际变化及其与南海季风爆发的关系[J]. *热带气象学报*, 2000, 16 (3): 202-211. [ZHAO Yongping, CHEN Yongli. The seasonal and inter-annual variability of the South China Sea warm pool and its relation to the South China Sea monsoon onset [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2000, 16 (3): 202-211.]
- [29] 王雪竹. 南海中层水、中层环流及其与西北太平洋中层水交换研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2010. [WANG Xuezhu. The study of intermediate water, circulation in South China Sea and its intermediate water exchange with northwest pacific [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2010.]
- [30] 冯晓伟, 孙照渤. ENSO对东亚夏季风强度的影响[J]. *南京气象学院学报*, 1998, 21 (2): 196-200. [FENG Xiaowei, SUN Zhaobo. The influence of ENSO on the East Asian summer monsoon intensity [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1998, 21 (2): 196-200.]
- [31] 朱益民, 杨修群, 陈晓颖, 等. ENSO与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化[J]. *热带气象学报*, 2007, 23 (2): 105-116. [ZHU Yimin, YANG Xiuqun, CHEN Xiaoying, et al. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and summer interannual climate variability in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23 (2): 105-116.]
- [32] 徐霁强, 冯娟, 陈文. ENSO冷暖位相影响东亚冬季风与东亚夏季风联系的非对称性[J]. *大气科学*, 2016, 40 (4): 831-840. [XU Peiqiang, FENG Juan, CHEN Wen. Asymmetric role of ENSO in the link between the East Asian winter monsoon and the following summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40 (4): 831-840.]