

吕宋海峡附近海域水团分布及季节变化特征

刘增宏^{1,2}, 许建平^{1,2}, 孙朝辉¹, 朱伯康¹

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 利用 2003 年 2 月至 2009 年 4 月期间在吕宋海峡附近海域由 Argo 剖面浮标观测的温、盐度资料, 对该海域的水团分布及季节变化特征进行了探讨。结果表明, 在 120.5°—122.75°E、19°—23°N 范围内, 水团特征介于南海水和北太平洋水之间, 而 19°N 以南区域的水交换并不显著。北太平洋热带水(NPTW)和北太平洋中层水(NPIW)通过吕宋海峡入侵南海的趋势在夏季较弱。秋季, NPTW 入侵南海的趋势增强, 而到了冬季, 受东北季风控制, 北太平洋水的入侵程度最强, 然而并无 NPIW 进入南海的迹象。值得指出的是, 整年没有发现明显的 NPIW 进入南海, 而南海中层水可以通过海峡流入太平洋, 其强度在秋、冬季节达到最大。

关键词: 水团; Argo 剖面浮标; 吕宋海峡; 南海; 北太平洋

中图分类号: P731.21 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)01-0011-09

The characteristics of water mass distribution and its seasonal variation near the Luzon Strait

LIU Zeng-hong^{1,2}, XU Jian-ping^{1,2}, SUN Chao-hui¹, ZHU Bo-kang¹

(1. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The Luzon Strait is located between Taiwan and Luzon islands, connecting the Philippine Sea and the South China Sea. The characteristics of water mass distribution and its seasonal variation in this region were discussed using the Argo temperature and salinity data from February 2003 to April 2009. The analysis suggested that in the area of 120.5°–122.75°E and 19°–23°N the water mass has the properties between the South China Sea Water and the North Pacific Water; in the area south of 19°N, the water exchange is not significant. The intrusion of the North Pacific Tropical Water (NPTW) and the North Pacific Intermediate Water (NPIW) into the South China Sea is relatively weak in summer. The intrusion of the NPTW is strengthened in fall and winter. When the northeasterly monsoon becomes fully developed, the intrusion reaches its most. However, there is no evidence of the NPIW water flowing into the South China Sea. It should be pointed that there is no indication that the NPIW enters the South China Sea in any seasons, while the intermediate water from the South China Sea can flow into the Pacific through the Luzon Strait, reaching its maximum strength in fall and winter.

Key words: water mass; Argo profiling float; Luzon Strait; South China Sea

吕宋海峡位于台湾岛与吕宋岛之间, 宽约 350km, 平均深 2500m, 是南海与北太平洋进行水交换的重要通道。该海峡主要由巴士、巴林塘和巴布延 3 个海峡组成, 其中巴士海峡最宽, 约 185km, 其最大深度可达 5126m。吕宋海岭和恒春(Heng-Chun)海岭分别形成了吕宋海峡的东西两侧, 其中恒春海岭中部

深, 最大可达 2500m, 而吕宋海岭中部较浅。

吕宋海峡是黑潮沿太平洋西边界北上途中遇到的一个明显的边界豁口, 北太平洋水与南海通过该海峡的水交换一直是南海海洋研究的热点问题之一, 北太平洋与南海有显著的水交换, 影响着整个南海的水团构成和南海内部的热力和动力过程^[1-3]。前人

收稿日期: 2009-06-24; 修订日期: 2009-09-15。孙淑杰编辑

基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项(200706022); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JT0804)

作者简介: 刘增宏(1977—), 男, 江苏省无锡市人, 助理研究员, 主要从事海洋观测分析研究。E-mail: davids_liu@263.net

利用历史水文观测、卫星遥感海表温度(SST)等资料进行的分析表明,太平洋水通过吕宋海峡入侵南海具有明显的季节变化特征^[4-8],但也有些学者的研究结果认为,黑潮水入侵南海是一种整年存在的现象^[9-11]。Qu^[12]利用历史溶解氧资料的分析结果表明,吕宋海峡水交换具有“三明治”状的垂向结构,即中层水流出南海,而上层和底层水从太平洋流入南海。Chen等^[13-14]发现,尽管存在季节变化,350—1350m范围内的南海水都能通过吕宋海峡流出南海。利用1989—2002年布放在菲律宾海和南海的Argos卫星跟踪浮标,Centurioni等^[15]分析了北太平洋表层水通过吕宋海峡进入南海的变化特征,发现浮标只在10月至翌年3月间通过吕宋海峡进入南海,而其他月份,浮标可随黑潮以“流套”形式跨过海峡并沿台湾南部返回太平洋。国内更多的研究工作是利用吕宋海峡附近取得的现场CTD资料,通过对该水域的水团结构和分布状况的分析,进而研究北太平洋水入侵南海的特征^[16-20]。然而,上述研究所使用的资料,无论在时间还是在空间尺度上都比较稀疏,无法描绘出该海区水团分布和变化的详细特征。

本文通过近些年在吕宋海峡附近海域获得的大量Argo剖面浮标观测资料,分析了吕宋海峡附近海域的水团结构及其变化特征,并较详细讨论了北太

平洋热带水(NPTW)和北太平洋中层水(NPIW)通过吕宋海峡入侵南海的季节变化特征。

1 数据和方法

本文使用的温盐度剖面资料来自全球Argo计划。该计划自2000年正式启动实施^[21],并于2007年底全面建成,即在全球海洋上建起了一个由3000多个剖面浮标组成的Argo实时海洋观测网,到目前为止,大约25个成员国已经在全世界海洋上布放了近6000个浮标。该观测网使用了一种新颖的观测仪器设备,称为“Argo剖面浮标”,能每隔10d观测一个0—2000m水深范围内的温度和盐度剖面,并通过Argos卫星或铱卫星系统发送观测数据。本文中使用的Argo资料取自中国Argo实时资料中心(<http://www.argo.org.cn>),时间从2003年2月至2009年4月,研究区域为116°—125°E和17°—23°N所包围的吕宋海峡附近海域,共收集到了约71个Argo剖面浮标所观测到的1399条温盐度剖面,其观测位置如图1所示。大部分浮标的漂移深度为1000dbar,只有少量浮标的漂移深度为500dbar或2000dbar。需要说明的是,有些漂入水深较浅海域(或陆架)而搁浅的浮标,通过自身的调节仍可进行剖面的观测,但其剖面的最大深度也将变浅。

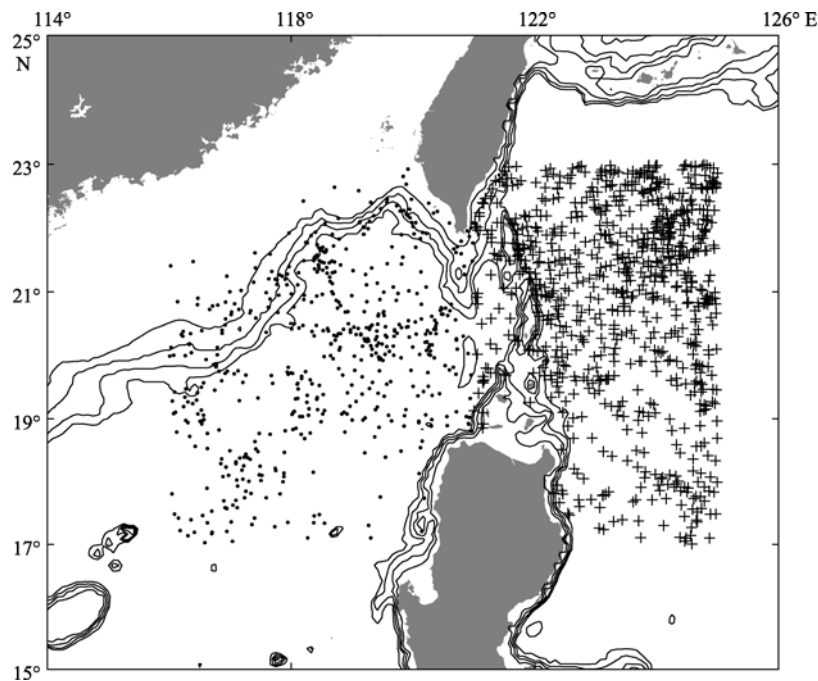


图1 2003年2月—2009年4月期间吕宋海峡附近Argo观测剖面分布

黑色点表示121°E以西的剖面位置,黑色十字形表示121°E以东(太平洋)的剖面位置,黑色细线表示500—2000m等深线,间隔为500m

Fig. 1 Argo profile data distributions from Feb. 2003 to Apr. 2009 near the Luzon Strait. The dots indicate Argo profile data collected west of 121°E, and the crosses are profile data collected east of 121°E. The 500, 1000, 1500, 2000m isobaths are shown by black contours.

全部 Argo 数据经过中国 Argo 实时资料中心的质量控制,剔除了观测层次过少(小于 5 层)以及 100dbar 以浅没有观测数据的剖面;并把所有剖面按 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 方区进行划分,剔除每个方区内 120dbar 以下温、盐度偏离 5 倍标准偏差的数据。此外,由于浮标装载的电导率传感器在长时间工作后还会发生漂移^[22],导致其盐度观测值产生较大的误差。因此,通过仔细检验每个浮标的盐度观测值时间序列,对电导率传感器存在明显漂移故障的浮标观测剖面进行了删除处理。这里没有对这类浮标的观测盐度进行延时模式校正,是因为在这些浮标中,只发现一个浮标存在明显的电导率传感器漂移故障,且该浮标位于西边界流区,无法从历史资料中得到一个稳定的水团来进行校正。最终,有 1378 条温盐度剖面通过了质量控制,用于本文研究中。

2 水团结构及其季节变化特征

2.1 水团结构

图 2 显示了研究海区所有 $T-S$ 点聚,同时为了区分南海水与北太平洋水,以 121°E 界线,对吕宋海峡东西两侧的水团结构及其分布特征进行比较分析。图中灰色十字形表示位于北太平洋区域的浮标观测剖面,而黑色圆点表示位于南海区域的浮标观测剖面,实线和虚线分别为典型的南海水和北太平洋水的平均温—盐特征曲线,由 121°E 两侧温、盐观测值的平均得到。从平均 $T-S$ 点聚可以看出,北太平洋水和南海水的性质区别明显,特别在次表层和上层,两者的盐度存在较大差异,即北太平洋水在次表层的盐度高于南海水,而在中层盐度低于南海水。在次表层,西北太平洋一侧的水体盐度极大值层被称为北太平洋热带水(NPTW),形成于 20°N 、 140°E — 160°W ,盐度在 34.75‰ — 35.25‰ 之间,随北赤道流(位于 10° — 25°N 之间)而向西扩散^[23-24]。在中层,西北太平洋一侧的盐度极小值层水体为北太平洋中层水(NPIW),其形成于北太平洋混合水区(位于本州岛以北),盐度小于 34.40‰ ,位于 $26.5\sigma_{\theta}$ — $26.8\sigma_{\theta}$ 之间^[25]。

在表层($<100\text{dbar}$),可分为北太平洋热带表层水和南海表层水,具有高温低盐的特征,且前者的温、盐度比后者更高。在盐度极大的次表层,太平洋水暖于南海水,且盐度更高,前者的盐度平均最大值约 34.87‰ ,主要分布在 $24.4\sigma_{\theta}$ 密度层上,深度约 180dbar,而南海水在次表层的盐度平均最大值约 34.58‰ ,分布在 $25.1\sigma_{\theta}$ 密度层上,深度约

170dbar。吕宋海峡以东次表层水盐度最大可以超过 35.00‰ ,而其西侧南海水盐度均低于 35.00‰ 。在水温 5—10 之间,南海水和北太平洋水均存在盐度极小值,其中南海水盐度平均最小值约 34.42‰ (主要分布在 $26.67\sigma_{\theta}$ 密度层),深度在 430—500dbar 之间,而北太平洋水其盐度最小值平均为 34.25‰ (密度约 $26.72\sigma_{\theta}$),所处深度约 600dbar,温度也略低于南海水,在 7.6—7.8 之间。次表层与中层水之间 $T-S$ 点聚相对集中(表示水体均匀)的一片水体,在南海为次—中层混合水^[26],而在太平洋被称为北太平洋副热带模态水^[27],前者的温、盐度范围分别为 11—16 和 34.42‰ — 34.65‰ ,后者的温、盐度范围为 12—18 及 34.40‰ — 34.80‰ 。

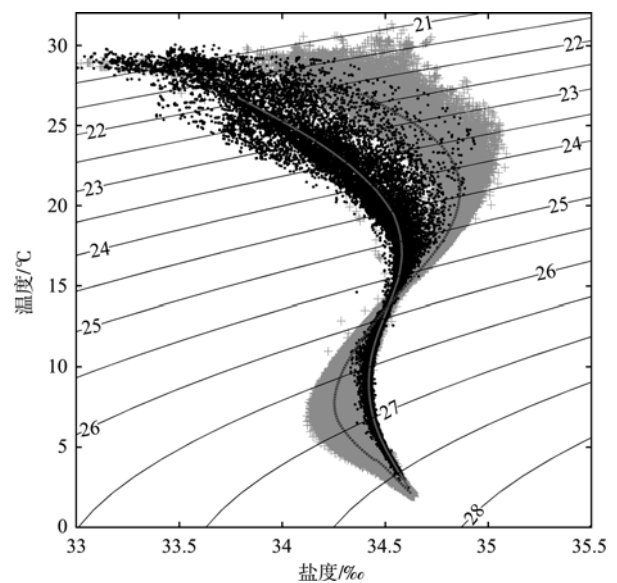


图 2 $T-S$ 点聚图

黑色点表示 121°E 以西的剖面,灰色十字形表示 121°E 以东的剖面,灰色实线为黑色点的平均 $T-S$,而灰色虚线表示灰色十字形的平均 $T-S$ 。Fig. 2 Scatter plot of temperature vs salinity. The black dots indicate profile data collected west of 121°E , and the gray crosses are profile data collected east of 121°E . The gray line is the average $T-S$ of black dots, and dashed line is the average $T-S$ of gray crosses.

2.2 水团分布

为了研究需要,将所有温盐度资料按 $2.25^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的方区画出 $T-S$ 点聚图,实线和虚线分别为南海和北太平洋的平均温-盐特征曲线(图 3)。从该图可以看出,研究海区 120.5°E 东西两侧的水团特征差异十分明显,东侧以北太平洋水(次表层高盐、中层低盐)为主,而其西侧则为南海水(次表层次高盐、中层次低盐)。位于 120.50° — 122.75°E 、 19.00° — 23.00°N 范围内,次表层和中层盐度(盐度极小值层)分布比较分散,海水特征介于南海水和北太平洋水之间,

越往东, 水团性质越接近北太平洋水, 其中 122°E 以东海域具有明显北太平洋水特征。19°N 以南区域,

温-盐分布相对比较集结, 反映了南海水和北太平洋水在吕宋海峡南部的交换并不显著。

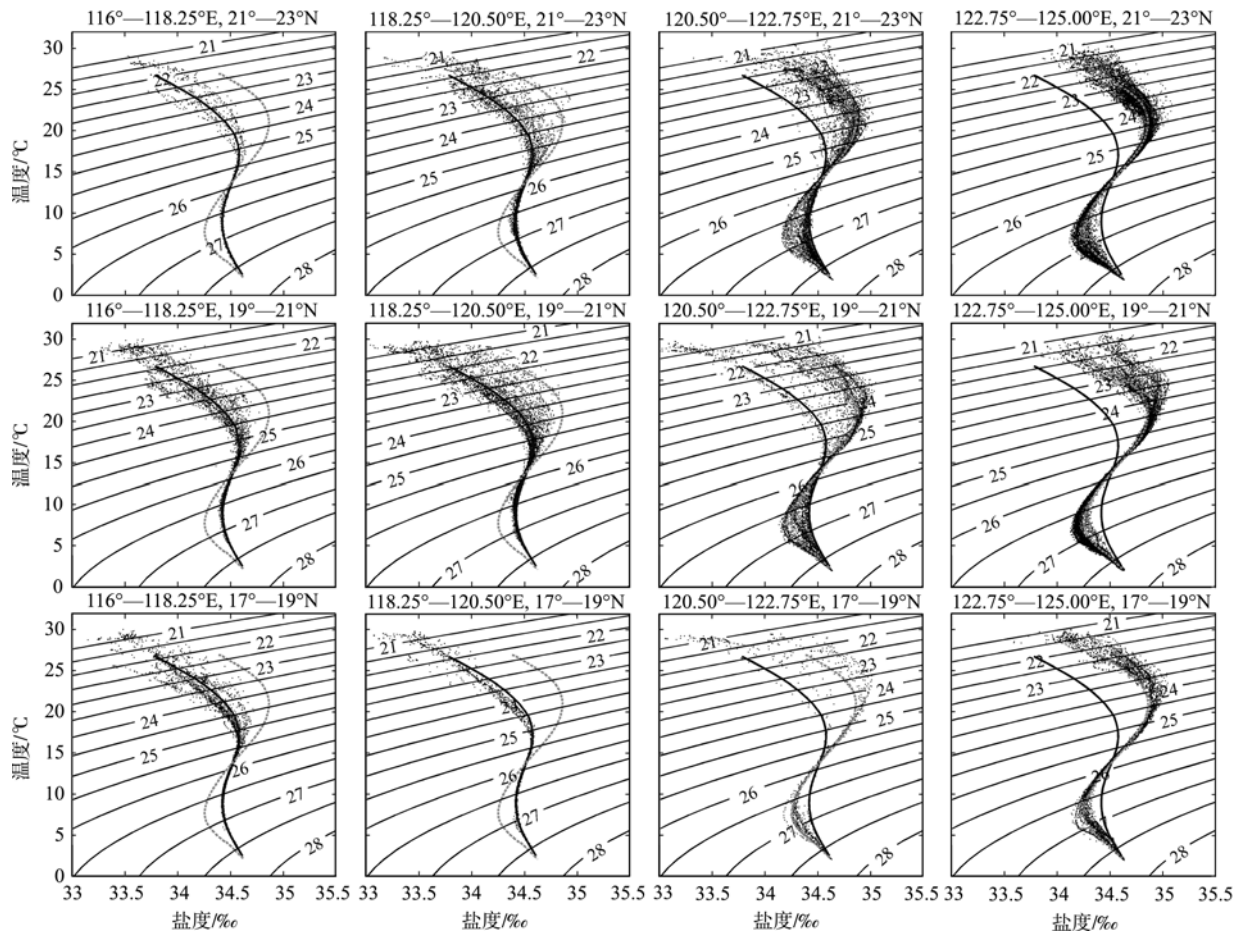


图 3 研究海区的 $T-S$ 分布

黑色实线表示南海水, 灰色虚线表示北太平洋水

Fig. 3 Scatter plot of temperature vs salinity on a $2.25^\circ \times 2.00^\circ$ grid ranged from $116^\circ\text{--}125^\circ\text{E}$ and $17^\circ\text{--}23^\circ\text{N}$. The solid line indicates the South China Sea water, and the gray dashed line is the North Pacific Water.

2.3 季节变化特征

研究海区位于东亚季风区, 冬季由东北季风控制, 而夏季为西南季风所控制。9 月, 东北季风首先出现在南海北部, 至 10 月和翌年 3 月扩展到整个南海; 西南季风 5 月中旬至 8 月在南海盛行, 但其强度没有东北季风强^[28]。吕宋海峡水交换受季风的影响, 有显著的季节性变化, 且这里的水团分布同样存在明显的季节性特征。

图 4 显示了 2003 年 2 月—2009 年 4 月吕宋海峡两侧温-盐度点聚的季节分布。夏季(6—8 月), 黑色点表示的南海水和灰色十字形表示的北太平洋水相对都比较集结(图 4b), 即吕宋海峡东西两侧的北太平洋水和南海水区分明, 次表层内北太平洋水盐度明显高于吕宋海峡西侧的南海水, 而南海水在

中层性质非常均匀, 说明无论是高盐的 NPTW 还是低盐的 NPIW, 通过吕宋海峡入侵南海的趋势均非常弱。夏季, 由于受沿岸径流(夏季径流量大于冬季)影响, 南海(121°E 以西)表层水盐度明显低于其他季节^[16]。秋季(9—11 月), 南海表层水仍表现出低盐特征, 而次表层和中层明显受到来自北太平洋的 NPTW 和 NPIW 影响, 使温跃层以上海水盐度升高, 而中层的海水变淡, 说明东北季风的暴发促进了北太平洋水进入南海并进行混合。冬季(12 月至翌年 2 月), 次表层以上海水温度明显降低, 受东北季风控制, 北太平洋水的入侵程度最强, 使部分南海表层水的盐度甚至超过了北太平洋水在该季节的平均值, 同时研究海区混合强烈, 使南海表层水盐度明显升高, 而沿岸径流量的减少, 也使南海表层水变

咸。值得注意的是, 尽管东北季风有利于太平洋水入侵南海, 但并无明显迹象表明 NPIW 进入南海, 这可能与冬季南海 300—700m 范围内平均经向翻转流为北向运动, 遏制了 NPIW 的入侵有关^[29]。通过图 4a 同样不难发现, 春季(3—5 月), 次表层的 NPTW 存在一定程度的入侵, 而 NPIW 入侵南海并不明显。

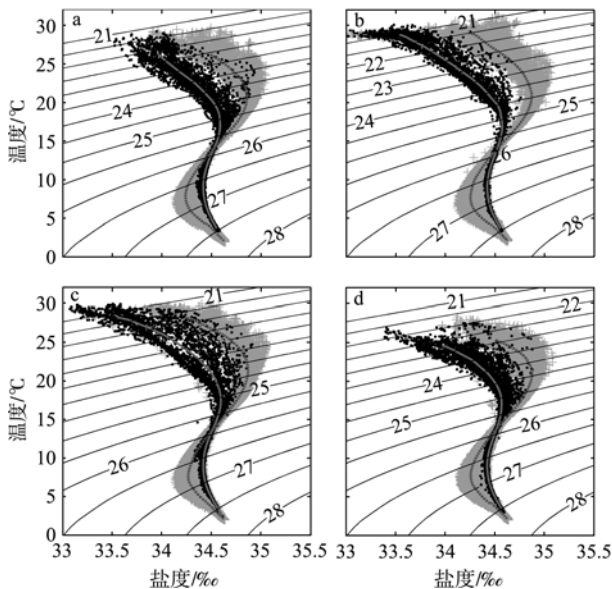


图 4 T-S 点聚图

a. 春季(3—5 月); b. 夏季(6—8 月); c. 秋季(9—11 月); d. 冬季(12、1、2 月)。黑色点表示 121°E 以西的剖面, 灰色十字形表示 121°E 以东的剖面

Fig. 4 Scatter plots of temperature vs salinity in spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d). The dots indicate Argo profile data collected west of 121°E, and the gray crosses are profile data collected east of 121°E

3 吕宋海峡附近海域的水交换

3.1 浮标漂移轨迹与盐度剖面分布

虽然吕宋海峡 120.50°—122.75°E、19.00°—23.00°N 范围内的水体特征介于南海水和北太平洋水之间, 但无论是布放在西北太平洋还是布放在南海的 Argo 浮标, 只有 3 个越过海峡进入或漂出南海(图 5)。其中有两个浮标分别从海峡南部和北部漂出南海, 仅有一个浮标从海峡中部进入南海, 这似乎反映了通过吕宋海峡的水交换并不显著。然而, 大部分浮标的漂移深度为 1000dbar, 且大部分时间在该深度自由运动, 即浮标漂移轨迹主要反映了其在停留深度上的漂移。所以, 从浮标的漂移轨迹似乎只能说明中层以下(~1000dbar)的水交换并不明显。

以图 5 中进入南海的浮标为例, 该浮标由中国 Argo 实时资料中心于 2008 年 10 月布放在吕宋海峡西侧 122.3°E、19.6°N 附近(WMO 编号为 2901172; 漂移深度 1000dbar; 观测周期为 10d), 并在 2008 年 12 月 18—28 日期间从 20.5°N 附近穿过吕宋海峡进入南海, 平均西向漂移速度约 $3.7\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 6a), 从该浮标观测的盐度时间断面分布(图 6b)可以看出, 随着浮标穿过吕宋海峡进入南海(图中的第 7 个剖面位置), 位于 100—200dbar 之间的北太平洋次表层高盐水(盐度 $>34.8\text{‰}$)突然消失, 似乎表明 2008 年 12 月中旬 NPTW 在海峡中部入侵南海的趋势比较弱, 而浮标之所以能漂进南海, 应该与浮标漂移深度(~1000dbar)附近的北太平洋中层水进入南海有关。当然, 仅仅靠一个浮标是很难让人信服的, 需要有更多的 Argo 浮标(漂移深度设置为 1000dbar 左右)漂移轨迹来证实。

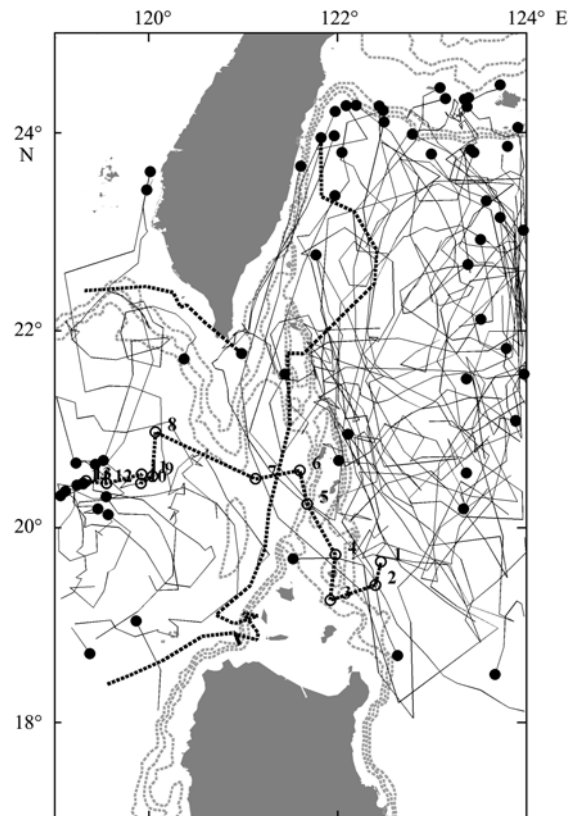


图 5 Argo 剖面浮标漂移轨迹

黑色点表示浮标的最后位置, 黑色虚线代表进入或漂出南海的浮标, 圆圈表示 2901172 号浮标的剖面位置, 数字代表其剖面号。灰色细线为 1000—2000m 等深线, 间隔为 500m

Fig. 5 Trajectories of Argo profilers. The black dot is the last position of each float. The profilers entered or exited the South China Sea are shown by black dashed lines. The circles indicate the profiles' positions of float 2901172, and its cycle numbers are also shown. The 1000, 1500, 2000m isobaths are shown by gray dashed

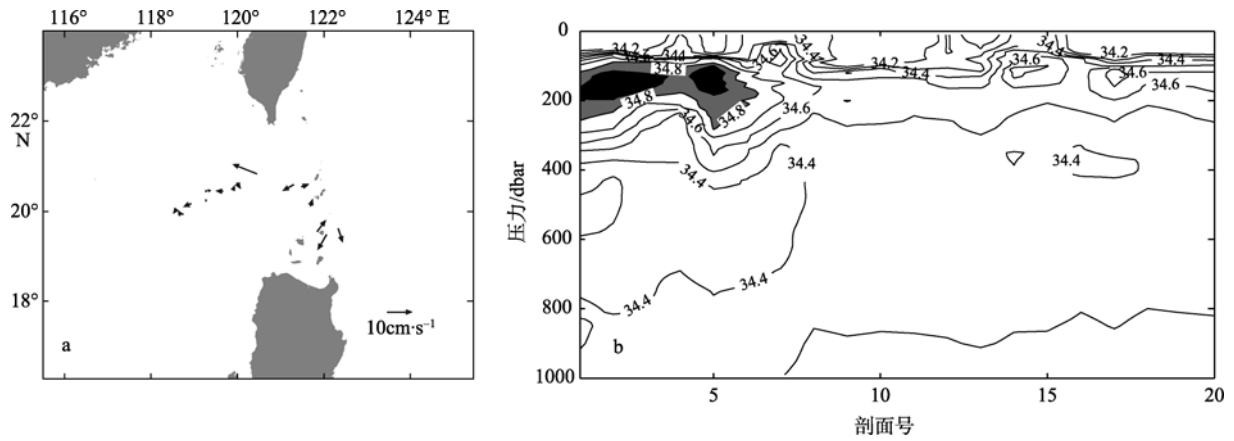


图 6 由 2901172 号浮标估算的中层(~1000 dbar)流速(a)以及该浮标观测的盐度时间断面分布(b)
 Fig. 6 The mid-depth (~1000 dbar) estimated from float 2901172 (a), and its salinity time-depth section (b)

3.2 次表层和 中层水团分布

为了研究北太平洋水通过吕宋海峡与南海水进行交换的过程,我们特选取密度为 $25.0\sigma_\theta$ 的次表层水来追踪 NPTW 在研究海区的分布状况。Qu^[9]认为, NPTW 通过吕宋海峡入侵南海是整年存在的现象,

且存在明显的季节变化特征,冬季入侵最强,而夏季强于春、秋季;刘长建等^[29]有类似研究结果,但夏季 NPTW 的入侵比较弱,仅局限在 115°E 以东、18°N 以北海域。图 7 为 2003—2009 年 4 月,春、夏、秋、冬 4 个季节 Argo 浮标在 $25.0\sigma_\theta$ 密度上的盐度

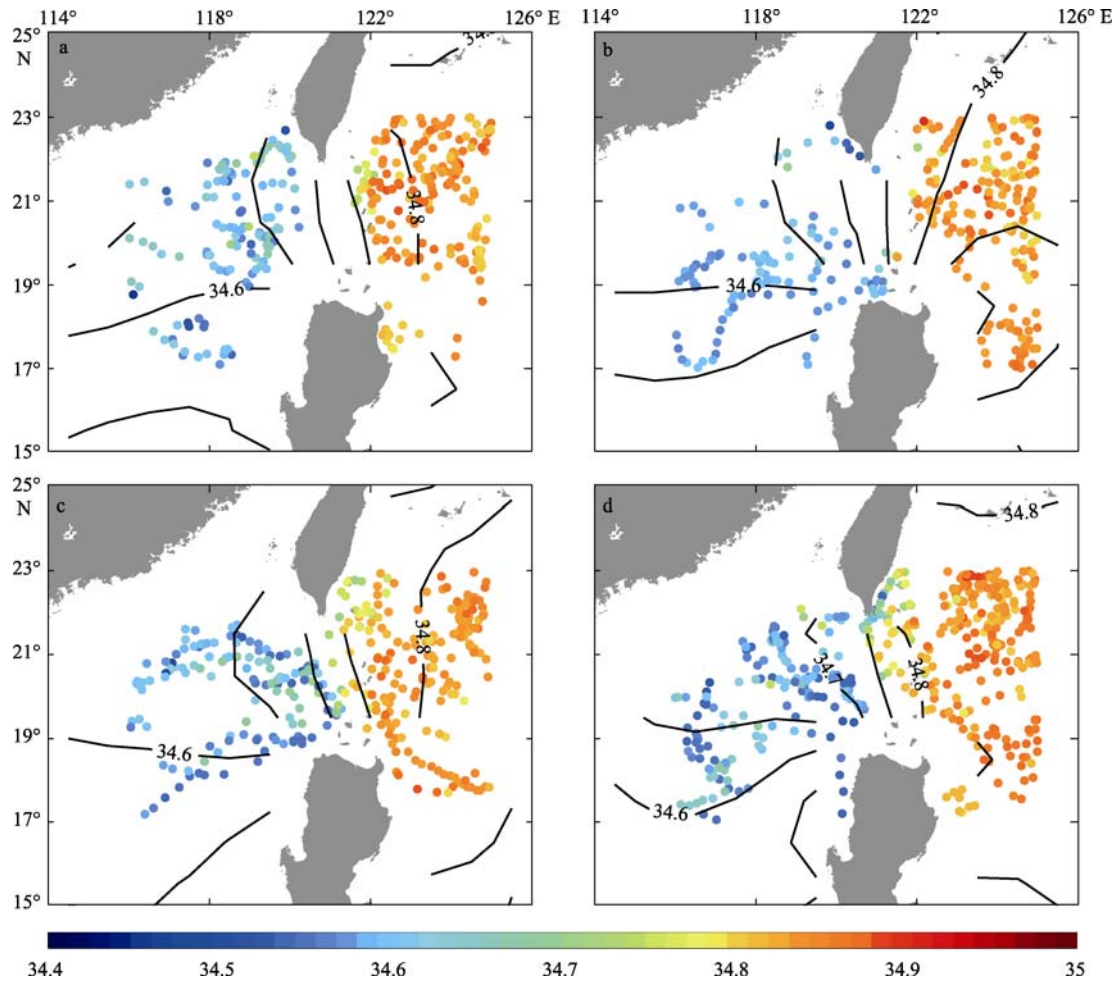


图 7 春(a)、夏(b)、秋(c)和冬季(d) $25.0\sigma_\theta$ 密度层上盐度(单位: ‰)分布
 等值线为该密度层上 Levitus(WOA2005)盐度分布

Fig. 7 Salinity (units: ‰) distributions on the $25.0\sigma_\theta$ surface of spring (a), summer (b), autumn (c), and winter (d). The contours are salinity distributions from Levitus climatology (WOA2005).

观测值。首先,从各个季节剖面位置分布可以看出,秋、冬季节有更多的浮标漂入吕宋海峡进行观测,春季则最少,这也从一定程度上反映了秋、冬季节可能是吕宋海峡水交换更为频繁的时期。春季,虽然没有北太平洋水通过吕宋海峡进入南海的迹象,但海峡西侧次表层仍有部分高盐水存在,可能是冬季北太平洋水入侵后保留下来的部分水体。夏季,NPTW 入侵南海的势力相对比较弱,而沿台湾岛以南有南海水流出南海进入黑潮的迹象。秋季,受东北季风暴发的影响,NPTW 入侵南海的势力比较强,而在海峡中部到 20°N 附近,明显有一股北太平洋次表层水进入南海,与 Centurioni 等^[15]利用 Argos 卫星跟踪漂流浮标的分析结果相一致。冬季,NPTW 通过吕宋海峡中北部进入南海的趋势较明显,同时沿台湾岛以南陆坡,有小股南海水向北被带入黑潮,似与北太平洋水以反气旋“流套”形式入侵南海有关。Yuan 等^[30]利用卫星遥感资料分析了表层黑潮路径在吕宋海峡的变化特征时发现,每年约 $1/3$ 的时

间,黑潮以反气旋式路径入侵,以冬季最为显著,偶尔可以观测到黑潮以“流套”形式入侵,且夏季比冬季更为频繁,其结论可以用来解释 Argo 浮标观测到夏、冬季节,有南海水从海峡北部流出南海的迹象。

从图 8 可以看出,对于密度为 $26.73\sigma_{\theta}$ 代表的中层水,整年没有发现明显的 NPIW 进入南海的迹象,只有在秋季,部分低盐的 NPIW 通过吕宋海峡中部($\sim 20^{\circ}\text{N}$)进入南海。而高盐的南海中层水可以通过吕宋海峡流入太平洋。春季,太平洋靠近吕宋海峡的一侧发现有高盐的南海中层水,且越往东盐度逐渐下降。夏季,有部分南海水通过海峡南北两端流出南海,但其势力相对比较弱。秋季,南海中层水流入太平洋的趋势明显增强,南海中层水和 NPIW 在整个海峡混合,而在台湾岛东南可以发现少量来自南海的高盐水。冬季,尽管研究海区受东北季风控制,但并无明显的 NPIW 进入南海的迹象,相反,南海水通过吕宋海峡北部流出南海,并随黑潮北上。

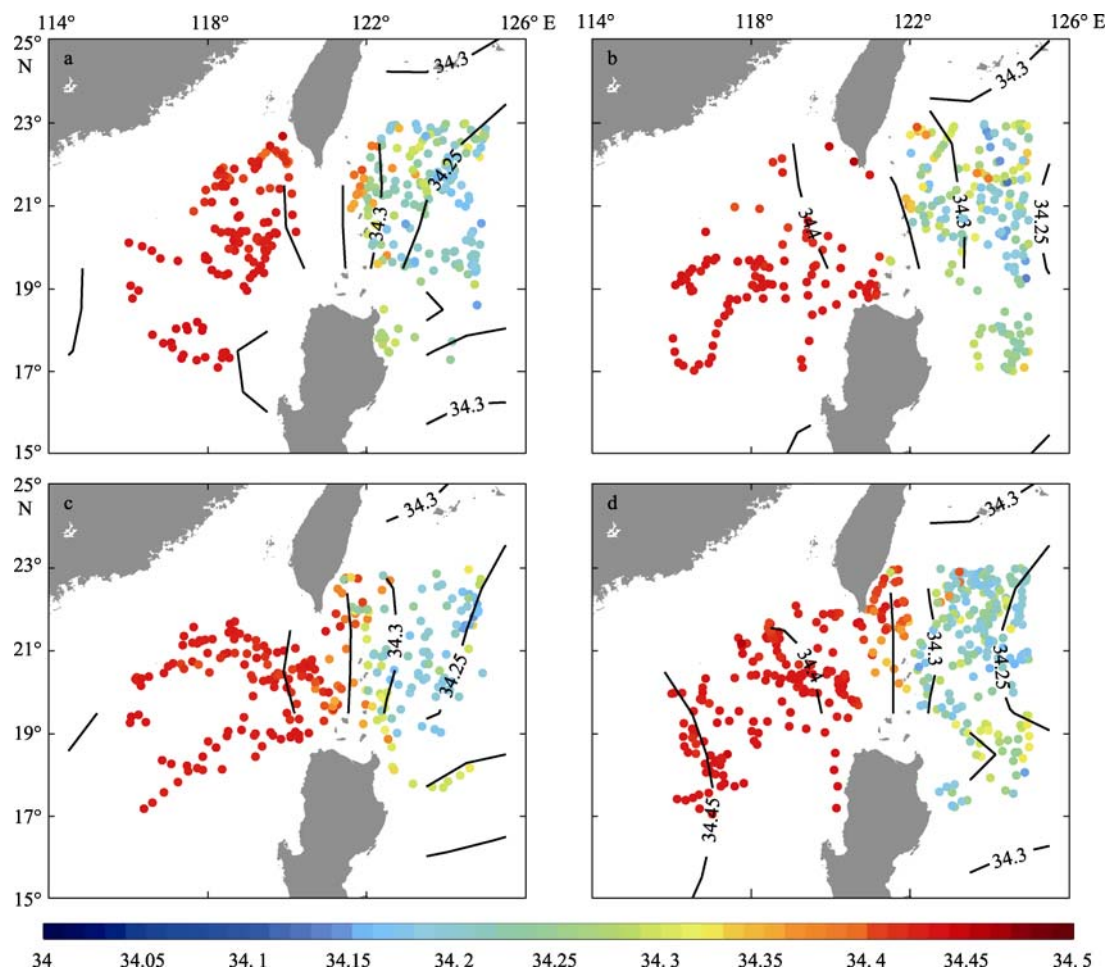


图 8 春(a)、夏(b)、秋(c)和冬季(d) $26.73\sigma_{\theta}$ 密度层上盐度(单位: ‰)分布

等值线为该密度层上 Levitus 盐度分布

Fig. 8 Same as Fig. 7, except on the $26.73\sigma_{\theta}$ surface. The contours are salinity distributions from Levitus climatology.

4 结论

本文通过近几年布放在吕宋海峡附近海域的 Argo 剖面浮标观测资料, 分析了吕宋海峡附近的水团分布及其季节变化特征, 并着重讨论了南海水和北太平洋水在次表层和中层的水交换特征, 得出以下主要结论: 在 $120.50^{\circ}\text{E}—122.75^{\circ}\text{E}$ 、 $19.00^{\circ}\text{N}—23.00^{\circ}\text{N}$ 范围内, 水团特征介于南海水和北太平洋水之间, 而在吕宋海峡南部的的水交换并不显著。次表层上, 太平洋热带水盐度高于南海水, 主要分布在 $24.4\sigma_{\theta}$ 密度层上, 而南海水在次表层分布在 $25.1\sigma_{\theta}$ 密度层上; 在中层, 南海水主要分布在 $26.67\sigma_{\theta}$ 密度层, 而北太平洋水分布在 $26.72\sigma_{\theta}$ 等密层。

研究海区的水团分布存在明显季节性特征。夏季, 无论是高盐的 NPTW 还是低盐的 NPIW, 通过吕宋海峡入侵南海的趋势均非常弱, 沿台湾岛以南, 有南海水流出南海进入北太平洋的迹象。秋季, 东

北季风的暴发促进了北太平洋水进入南海并进行混合, NPTW 入侵南海的趋势增强。冬季, 受东北季风控制, 北太平洋水的入侵程度最强, 然而并无明显迹象表明 NPIW 进入南海, 沿台湾岛以南陆坡, 有部分南海水向北被带入黑潮, 似与北太平洋水以反气旋“流套”形式入侵南海有关。整年没有发现明显的 NPIW 进入南海的迹象, 而高盐的南海中层水可以通过海峡流入太平洋, 在秋、冬季节尤为明显。

近年来, 随着 Argo 浮标在吕宋海峡附近海域布放数量的不断增加, 为该海域水团分布与变化研究提供了一种新的手段及长时间序列剖面资料, 同时, 利用 Argo 剖面浮标定位信息估算的中层和表层流, 可为研究黑潮入侵南海及吕宋海峡水交换特征提供观测依据。当然, 受吕宋海峡海域地形、强西边界流以及季风等因素的影响, 如何为浮标选取合适的漂移深度、观测周期、布放位置和季节, 以便在该海域获取更多的观测资料显得十分重要, 本研究工作也许能为其提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] CHU T Y. A study of water exchange between the Pacific Ocean and the South China Sea[J]. *Acta Oceanogr Taiwanica*, 1972, 2: 11–24.
- [2] QU T, GIRTON J B, WHITEHEAD J A, et al. Deepwater overflow through Luzon Strait[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111, C01002, doi: 10.1029/2005JC003139
- [3] 赵伟, 侯一筠, 乐肯堂, 等. 吕宋海峡水交换季节变化的数值研究[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(6): 496–504.
- [4] WYRTKI K. *Physical oceanography of Southeast Asian waters*[M]//NAGA Report. La Jolla, Calif: Scripps Institution of Oceanography, 1961: 2: 1–195.
- [5] NITANI H. *Beginning of the Kuroshio: Its physical aspects of the Japan current*[M]//STOMMEL H, YOSHIDA K. *Kuroshio*. Seattle: Univ of Washington Press, 1972: 129–163.
- [6] LEVITUS S. *Climatological atlas of the world oceans*, NOAA/ERL GFDL Professional Paper 13[R]. Washington D C: U S Govt Print Off, 1982: 173.
- [7] SHAW P T. Seasonal variation of the intrusion of the Philippine seawater into the South China Sea[J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 821–827.
- [8] FARRIS A, WIMBUSH M. Wind-induced Kuroshio intrusion into the South China Sea[J]. *J Oceanogr*, 1996, 52: 771–784.
- [9] QU T. Upper layer circulation in the South China Sea[J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 1450–1460.
- [10] CHU P C, LI R. South China Sea isopycnal-surface circulation[J]. *J Phys Oceanogr*, 2000, 30: 2419–2438.
- [11] SHAW P T. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan[J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 18213–18226.
- [12] QU T. 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.
- [13] CHEN C T C, HUANG M H. A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water[J]. *J Oceanogr*, 1996, 52: 17–25.
- [14] CHEN C T C, WANG S L. Influence of the intermediate water in the western Okinawa Trough by the outflow from the South China Sea[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 12683–12688.
- [15] CENTURIONI L R, NILLER P P, LEE D K. Observations of inflow of Philippine sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait[J]. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 113–121.
- [16] 许建平, 苏纪兰. 黑潮水入侵南海的水文分析. 1994年8~9月期间的观测结果[J]. *热带海洋*, 1997, 16(2): 1–23.
- [17] 李薇, 刘秦玉, 杨海军. 吕宋海峡海洋环流的基本特征[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(3): 345–351.

- [18] 刘增宏, 李磊, 许建平, 等. 1998 年夏季南海水团分析[J]. 东海海洋, 2001, 19(3): 1-10.
- [19] 李凤岐, 李磊, 王秀芹, 等. 1998 年夏、冬季南海的水团及其与太平洋的水交换[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 329-336.
- [20] 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.
- [21] ROEMMICH D, BOEBEL O, DESAUBIES, et al. Argo: the global array of profiling floats[M]// KOBLINSKY C J, SMITH N R. Observing the Oceans in the 21st Century. Melbourne, Australia: Godae Project Office, Bureau of Meteorology, 2001: 248-258.
- [22] OKA E. Long-term sensor drift found in recovered Argo profiling floats[J]. Journal of Oceanography, 2005, 61: 775-781.
- [23] TSUCHIYA M. Upper waters of the intertropical Pacific Ocean[J]. Johns Hopkins Oceanogr Stud, 1968, 4: 50.
- [24] FINE R A, LUKAS R, BINGHAM F M, et al. The western equatorial Pacific is a water mass crossroads[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 25063-25080.
- [25] TALLEY L D. Distribution and formation of north pacific intermediate water[J]. J Phys Oceanogr, 1993, 23: 517-537.
- [26] 李磊, 李凤岐, 苏洁, 等. 1998 年夏、冬季南海水团分析[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 393-401.
- [27] 巢纪平. 热带西太平洋海气相互作用综合研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [28] HELLERMAN S, ROSENSTEIN M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates[J]. J Phys Oceanogr, 1983, 13: 1093-1104.
- [29] 刘长建, 杜岩, 张庆荣, 等. 南海次表层和上层水团年平均和季节变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(1): 55-64.
- [30] YUAN D, HAN W, HU D. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data[J]. J Geophys Res, 2006, 111, C11007, doi: 10.1029/2005JC003412.