

南海障碍层的季节变化及其 与海面通量的关系^{*}

杜 岩^{1,2)} 王东晓¹⁾ 施 平^{1,2)}
郭佩芳²⁾ 陈 举¹⁾

1) (中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州 510301)

2) (中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266003)

摘 要 对气候平均态的温度和盐度分析证实, 夏、秋季南海南部上层海洋存在障碍层现象。决定障碍层出现的关键因素是净淡水通量, 而障碍层的深度和厚度分布则受风场的显著影响, 障碍层受混合层和等温层发展的调制。夏季, 南海南部上层海洋在东南向 Ekman 水平输运以及东侧下降运动双重因素作用下, 较淡的水体在南海东南侧堆积, 混合层底部高温水脱离混合层保留在等温层中, 造成障碍层在南海东南侧最为深厚, 达到 30 m。最厚障碍层出现的位置和最厚“南海暖水”出现的位置几乎重合, 障碍层的“热障”作用促进了“南海暖水”的发展。

关键词: 南海; 障碍层; 净淡水通量; 风场

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0101-11 **中图分类号** P732 **文献标识码** A

1 引言

温度、盐度、密度在上层海洋存在明显的梯度分布, 形成相应的以温度、盐度、密度定义的跃层。通常, 将温度跃层和密度跃层之间的水层称为障碍层 (barrier layer), 一般温度跃层要深于或等于密度跃层, 障碍层厚度为等温层厚度和用密度定义的混合层厚度之差^[1]。障碍层区别于其他跃层在于它由温盐分布不一致造成。海洋的上层经常有大量的淡水注入, 使得盐度在上层海洋存在梯度, 形成盐度跃层^[2,3]。盐度跃层和障碍层内的温度相同, 盐度不同。障碍层对热量的垂直交换起“热障”的作用, 使混合层和温跃层无法进行有效的热量交换^[4]。从海洋对气候影响的角度来看, 障碍层的出现减弱了混合层内夹卷的冷却效应, 从而对海洋热收支、海面温度、以及海洋与大气的热交换都有影响^[5,6]。从障碍层影响海洋和大气的耦合作用角度, Anderson 等^[7]认为障碍层可能影响了 ENSO 循环的过程。在赤道太平洋, 表层的淡水通量和强风对赤道障碍层的出现起主要作用^[2,5]。

有研究发现了南海南部存在障碍层现象。最早, 邱章等^[8]分析南沙海区的航测资料, 发现了密度跃层深度和温度跃层深度不一致, 但未将该现象和障碍层联系起来。

2002-07-31 收到, 2002-12-30 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40176006、“十五”社会公益研究专项 2001DIA50041 和国家重点基础研究发展规划项目 G1999043806 联合资助

随后，方欣华于 1999 年申请设立了国家自然科学基金“南海障碍层及其成因和热力学特性”等项目，开始在国内引起对南海障碍层研究的重视。最近，贾旭晶^[9]通过分析南海季风实验（SCSMEX）期间的温度和盐度航次资料，发现在南海南部和北部的障碍层深度最大分别为 23 m 和 28 m（平均为 2 m 和 4 m），远远薄于赤道西太平洋的最大深度 92 m（平均为 19.8 m）。吴巍等^[10]对南海 1989~1999 年 6 个航次的 CTD 资料分析发现，在南海南部海域存在具有季节变化的障碍层，秋季显著，夏冬较弱，障碍层厚度与混合层内温度呈正相关关系，障碍层的位置与暖水区的位置相一致。同样，朱良生和邱章^[11]根据航测资料分析了南海南部海区障碍层的地理分布和季节变化，探讨了障碍层强度及其对下层水温的影响。这些研究侧重障碍层的现象分析，对其产生机理和季节变化的机制尚缺乏研究。本文从气候温度和盐度资料描述南海障碍层的空间分布和时间演化特征，并通过海面风场、净淡水通量、净热通量等资料结合海洋的动力调整初步分析南海障碍层结构的成因。

2 资料与方法

本文采用的数据有两种：其一为多年气候平均的逐月温盐资料^[12]；另一种为 UWM/COADS 1945~1989 年的气候平均场资料，主要包括风场、净淡水通量、净热通量等^[13]。为了计算混合层和等温层的深度，多年气候平均的逐月温盐资料^[12]经过三次样条内插。

障碍层研究涉及到如何定义混合层和等温层的问题。当资料的垂直分辨率较高，如航测资料和测站资料，障碍层用拐点定义的混合层和等温层之间的深度差给出^[14]；当资料的垂向分辨率低，而且经过平均与平滑，不适用拐点定义方法，如气候平均的温度和盐度资料，只能通过温度和密度的差异判据得到混合层和等温层的深度。本文中等温层定义为比参考深度处的温度（参考温度）低 0.5℃ 深度以上的水层^[15]。混合层深度定义为由参考深度上的盐度和比参考温度低 0.5℃ 的温度计算得到的密度所在的深度^[16]，其中密度根据文献 [1] 计算得到。许多研究将参考深度定义在海面^[3,15]，本文遵从 Kara 等^[16]将参考深度设定为海洋 10 m 深度，目的是忽略海洋表层异常热力过程的影响，例如淡水的输入，急剧的蒸发以及仪器测量误差等。图 1 是气候平均的温度、盐度和密度的垂直廓线，混合层和等温层根据上述判

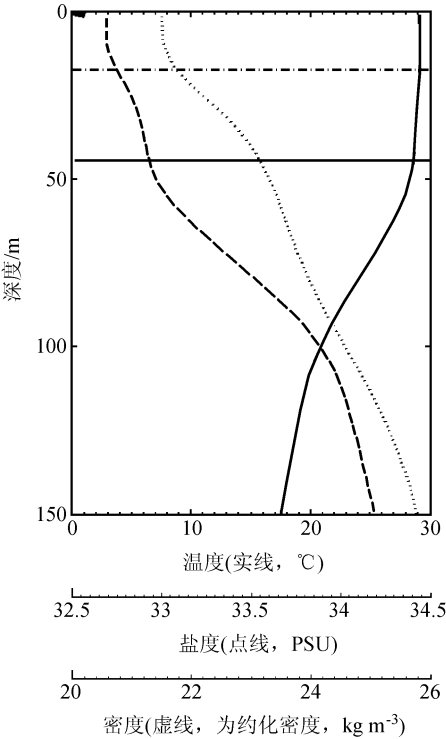


图 1 南海（7°N，115°E）位置上 8 月份的温度、盐度和密度的垂直剖面
横点虚线为混合层深度，横实线为等温层深度，两者之间为障碍层；PSU 为实用盐度单位（Practical Salinity Unit）的缩写

据计算得到。与吴巍等^[10]的图 1 比较, 可以看到相对于现场观测资料气候平均资料非常平滑, 但障碍层的结构仍然非常清晰, 这表明在南海应用这些方法和判据是合理的。

3 南海障碍层的深度和厚度

障碍层的垂向分布在南海的南北、东西差异表明了不同海面动力过程的作用。图 2 115°E 子午向剖面给出了障碍层深度和厚度的南北分布。从 6 月份开始, 南海南部混合层与等温层开始分离, 最大障碍层厚度出现在 18~30 m 深度上, 8、10 和 12 月南部最大障碍层深度分别出现在 20~40 m、25~55 m 和 20~38 m 深度上, 其中 10 月份达到最厚并且所处的深度也是最大。10 月份随着冬季风的发展, 受北部表层冷却和负的风应力旋度的影响, 北部的等温层与混合层以相同的趋势变深, 12 月份达到最深, 障碍层厚度也整体变薄。

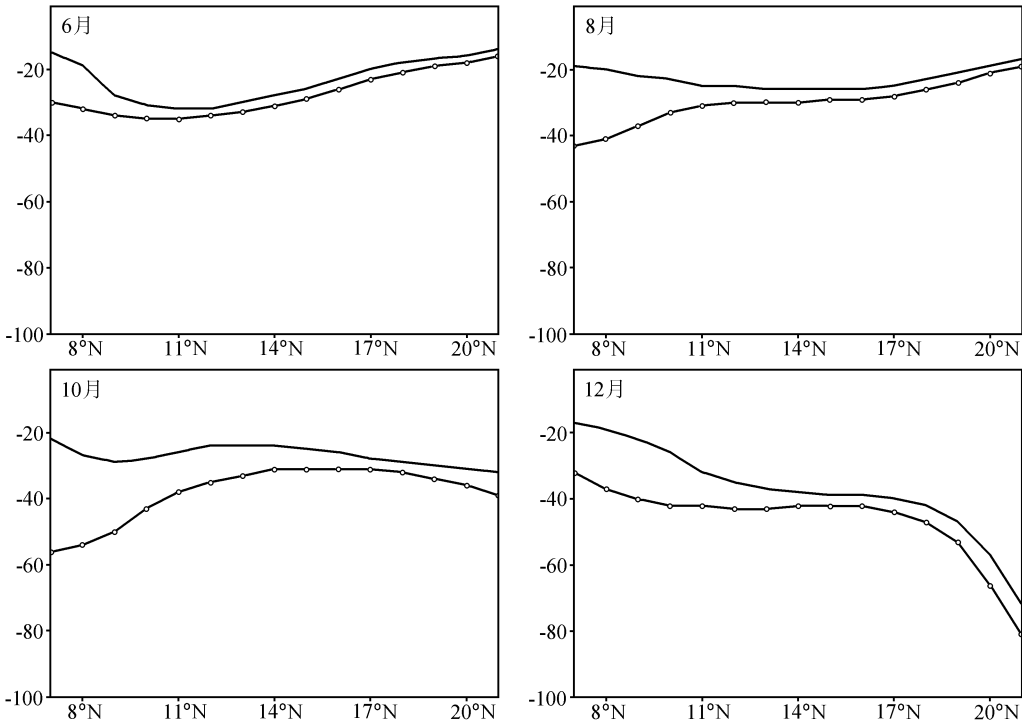


图 2 115°E 断面上混合层和等温层深度的分布 (单位: m)
带圆点的实线: 等温层; 实线: 混合层

纬向剖面给出障碍层深度和厚度的东西分布, 以 9°N 代表南海南部的障碍层分布 (见图 3)。1 月~5 月, 混合层底与温跃层顶几乎处于同一深度上, 障碍层几乎不存在 (图略)。6 月份开始, 混合层底与温跃层顶分离, 薄的障碍层出现, 东西深度位置约在 30 m, 几乎一致。8 月份, 东西两侧障碍层分别位于 20~30 m 和 30~40 m。10 月份, 东西障碍层厚度和深度位置表现很大的差异, 东西两侧分别为 23~37 m 和 28~55 m。12 月份, 东侧和西侧障碍层深度位置分别为 25~33 m 和 20~47 m, 相对 10 月

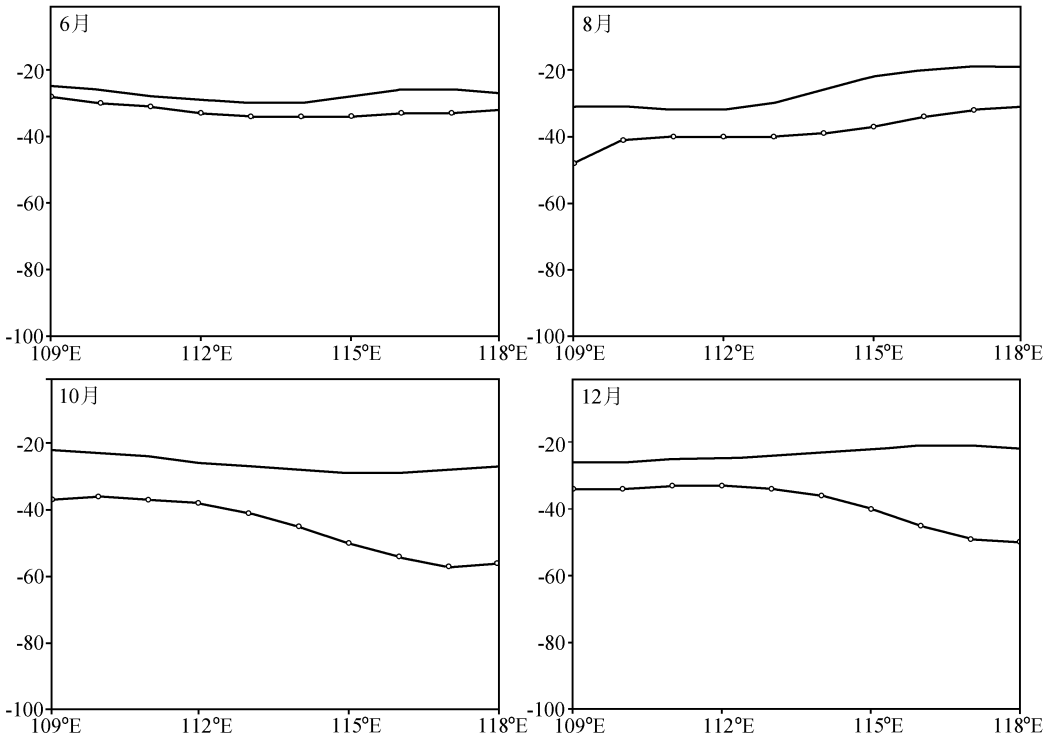


图 3 9°N 断面上混合层和等温层深度的分布，其余同图 2

份障碍层位置整体抬升。以 14°N 代表南海中部的障碍层分布（图 4）。6 月份，障碍层尚不明显；8 月份，障碍层呈现东部强化特征，西侧混合层（等温层）浅薄，几乎没有障碍层出现，东侧混合层与等温层深厚，障碍层在 30~45 m 深度，分布形态明显受夏季上层海洋风生环流的影响。

分析同一时期对应位置的 COADS 风应力旋度分布（图 5），发现在南海南部风应力旋度分布西侧为正、东侧为负。根据风生环流理论，Ekman 效应会在西侧的混合层底部造成上升运动，东侧的混合层底部造成下降运动；上升运动遏制了混合层与等温层的发展，淡水通量的效应无从体现，混合层与等温层几乎处于同样的深度上；下降运动则促进了混合层与等温层的深化，表层的淡水通量造成混合层与等温层的分离，表现为更加深厚的障碍层。10 月份，冬季风开始控制南海，东侧混合层和等温层深度均向下深化，障碍层厚度表现为从海洋的东侧到西侧几乎无差异。12 月份，障碍层表现为东西两侧厚、中间薄，比 10 月份障碍层整体加深 10 m，厚度稍稍变薄。冬季南海中部为南北两个气旋式涡旋的分界处，整个区域在正的风应力旋度作用下，等温层受 Ekman 抽吸的作用并不十分明显，但受摩擦风速作用显著。混合层的湍动能收支分析表明，低阶近似下混合层厚度与 u_*^3 成正比^[18]，COADS 摩擦风速三次方 u_*^3 （图 6）显示 12 月份 14°N 处 在海盆的中部最大，这造成混合层在中部最厚，两边较薄。同时冬季南海气旋式环流的辐散效应在海盆边缘造成辐合下降，等温层相对混合层显得深厚，障碍层表现为两边较厚、中间较薄。12 月份之后，由于没有淡水的继续输入，混合层和等温层主要受 u_*^3 的影响，障碍层几乎消失。

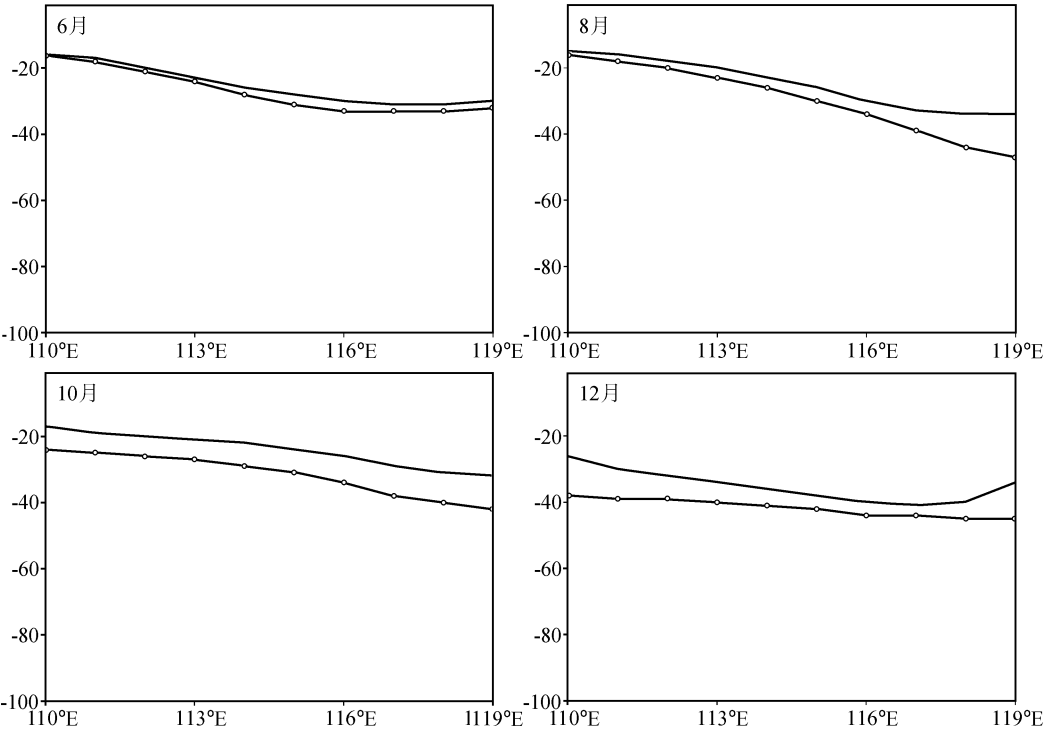


图 4 14°N 断面上混合层和等温层深度的分布，其余同图 2

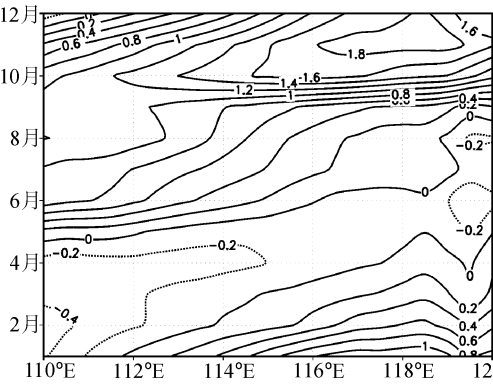


图 5 14°N 风应力旋度年循环
(单位： $10^{-6} \text{ Pa m}^{-1}$)

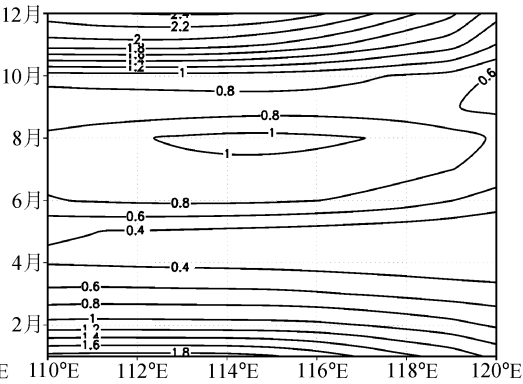


图 6 14°N 摩擦风速三次方年循环
(单位： $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-3}$)

4 南海障碍层及其与南海暖水的关系

障碍层的水平分布可以体现其海盆尺度特征，其季节变化体现了对海面通量季节强迫的响应。双月份的障碍层厚度分布显示了障碍层的全年变化（图 7）。4 月份在整个南海几乎没有障碍层出现。6 月份，夏季风建立后，在西南季风的右侧，出现大范围的障碍层，大于 12 m 厚度的障碍层高中心出现在加里曼丹岛西北侧海域，范围在 8°N

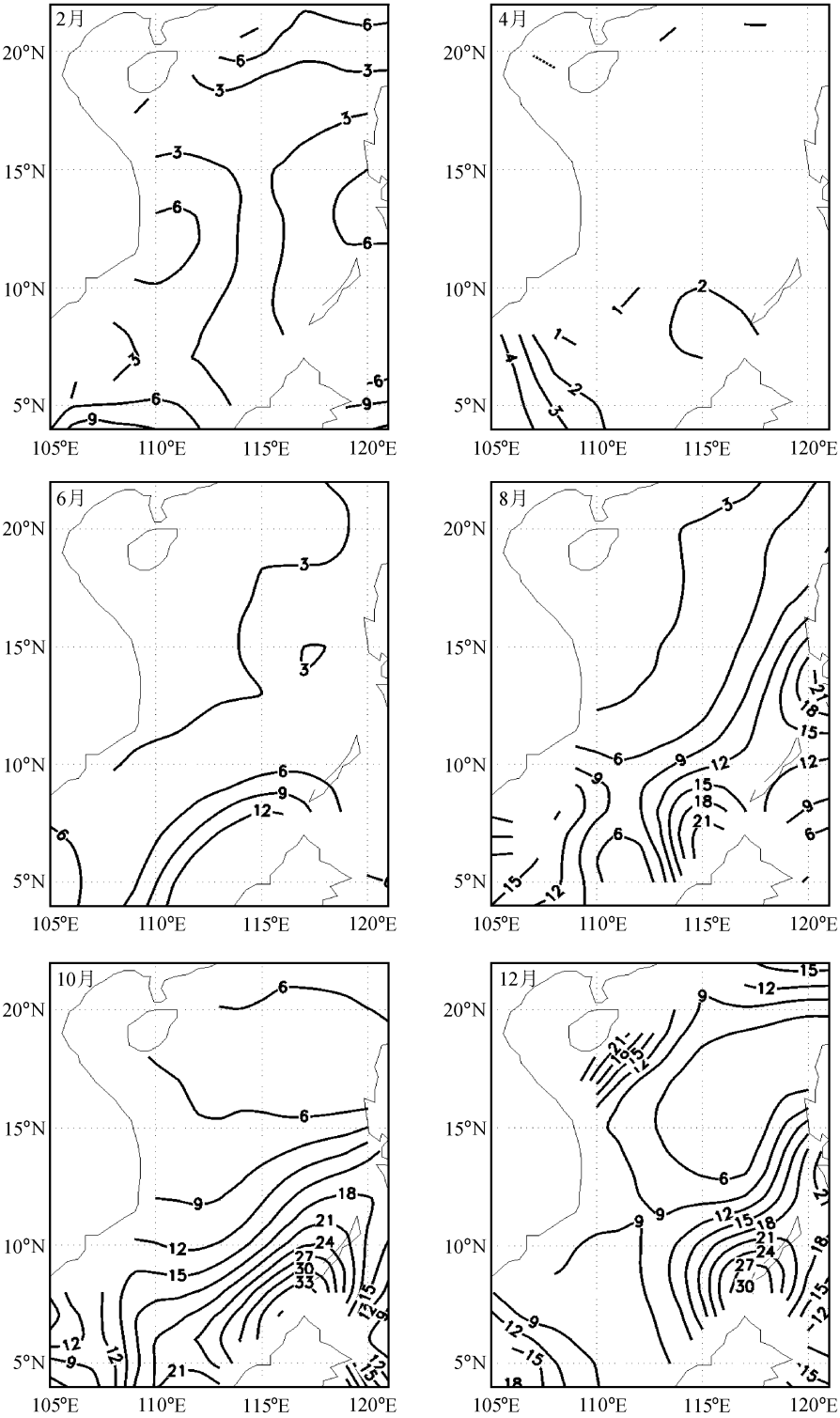


图 7 双月份的障碍层厚度分布 (单位: m)

以南。8 月份，大于 12 m 厚度的障碍层高中心几乎扩展到从加里曼丹岛到菲律宾岛之间西北侧海域，北达 15°N，最大强度核心仍然位于加里曼丹岛西北侧海域，达到 21 m。10 月份西南季风减弱、消退，12 m 厚度的障碍层等值线在南海南部的西北侧推到 10°N。12 月份，障碍层厚度在海盆的中部维持低值，边缘高值分布，与冬季反气旋式环流在海盆中部的辐散上升、海盆边缘的辐合下降相适应。2 月份，整个海盆的障碍层分布仍然维持中部低值、边缘高值的分布，但已经大大减弱。障碍层的年变化显示南海的障碍层主要是南部夏季和秋季出现的现象，秋季发展最为充分，冬季衰退，春季消失。这种障碍层的季节分布规律在航测 CTD 资料分析中也有所体现^[10,11]。

上述描述表明南海障碍层具有明显的季节特征，季风变换是影响障碍层空间结构分布的主要因素。障碍层首先在夏季南海南部出现，并且高值中心一直维持在南海的东南部，水平结构上最大强度核心和夏季 Ekman 输运水体堆积的位置一致，同时障碍层在南海北部不存在或者非常微弱。冬季障碍层整体比较弱，主要是夏秋两季生成的障碍层的衰退过程，冬季南海的海盆尺度气旋式环流结构一方面通过表层环流将上层较淡的水在整个海盆内重新分配，另一方面会造成海盆中部辐散上升、海盆边缘辐合下降，与此相应障碍层也呈现中间薄、边缘厚的分布，显示出大尺度环流对障碍层结构的影响。

对比南海暖水^①的研究^[19~21]，可以发现最厚障碍层出现的位置和南海暖水出现的位置密切相关，这也与西太平洋暖池区障碍层现象^[3,4]相一致。障碍层的“热障”作用最明显体现在混合层热收支上，混合层通过卷夹作用将混合层之下的水体卷入到混合层内，正常情况下卷入的水体为温跃层中较冷的水体，两种水体混合会降低混合层内水体的温度；当混合层之下为一障碍层时，障碍层内的水体温度几乎和混合层内水体温度相同，卷夹造成的水体混合不会改变混合层内水体的温度，结果造成即使表层较小的海面加热也会在混合层内积累，有利于暖水的发展。COADS 的净热通量表明，6~9 月份，在南海暖水维持最厚的南海东南部^[19]，净热通量是整个南海最小的海域（图 8），但障碍层在此时期从开始出现并发展强盛。南海障碍层的存在改变了南海东南部上层海洋的热含量分布，最终促进了南海暖水的发展。

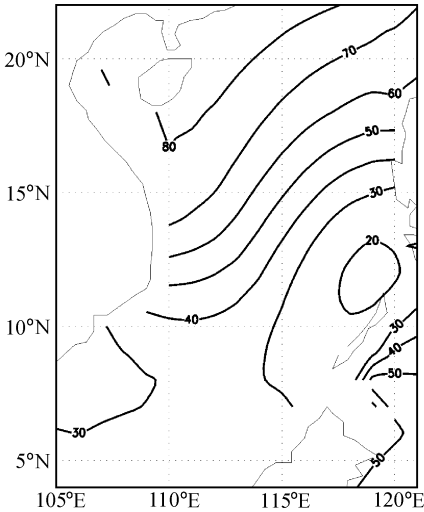


图 8 南海 6~9 月份平均的 COADS 净热通量
(单位：W m⁻²)

5 影响南海障碍层季节变化的因素

5.1 淡水通量

夏季和秋季是南海形成的障碍层主要季节，障碍层在冬季逐渐衰退，并在春季完

① 沿用 Wyrтки 对西太平洋暖池定义，南海暖水定义为温度大于 28℃ 的水体。

全消失。障碍层的形成完全可以从同期 COADS 的蒸发减降水 (EMP) 年循环分布 (见图 9) 得到解释, 是否出现净的淡水通量是决定障碍层是否存在的关键因素。从混合层的湍动能角度而言, 淡水通量会改变混合层的垂向稳定度, 使充斥着暖而淡的表层水垂直稳定性大大增强, 混合很难穿越到更深的层次^[17]。6~10 月份, 整个南海降水大于蒸发, 南海得到净的淡水通量, 并且净淡水通量在南海的东侧要大于西侧。11、12 月份, 南海的南部仍然是净的淡水通量, 障碍层仍能维持。1~4 月份, 南海蒸发大于降水, 海洋失去水分, 障碍层逐渐变薄, 并在 4、5 月份完全消失。结合混合层的垂向分布, 类比 Anderson 等^[7]对赤道障碍层的分析, 南海南部障碍层出现是由于 5、6 月份南海夏季风的爆发产生的强风将混合层加深到温跃层顶部, 混合层与温跃层在 5 月份几乎完全重合, 6 月份, 降水和表面加热的影响增加了表面浮力, 形成了相对暖而轻的混合层, 同时障碍层出现。另外, 通过对比南海周围的河流分布, 可以确定陆地径流对南海障碍层的分布的影响是次要的。

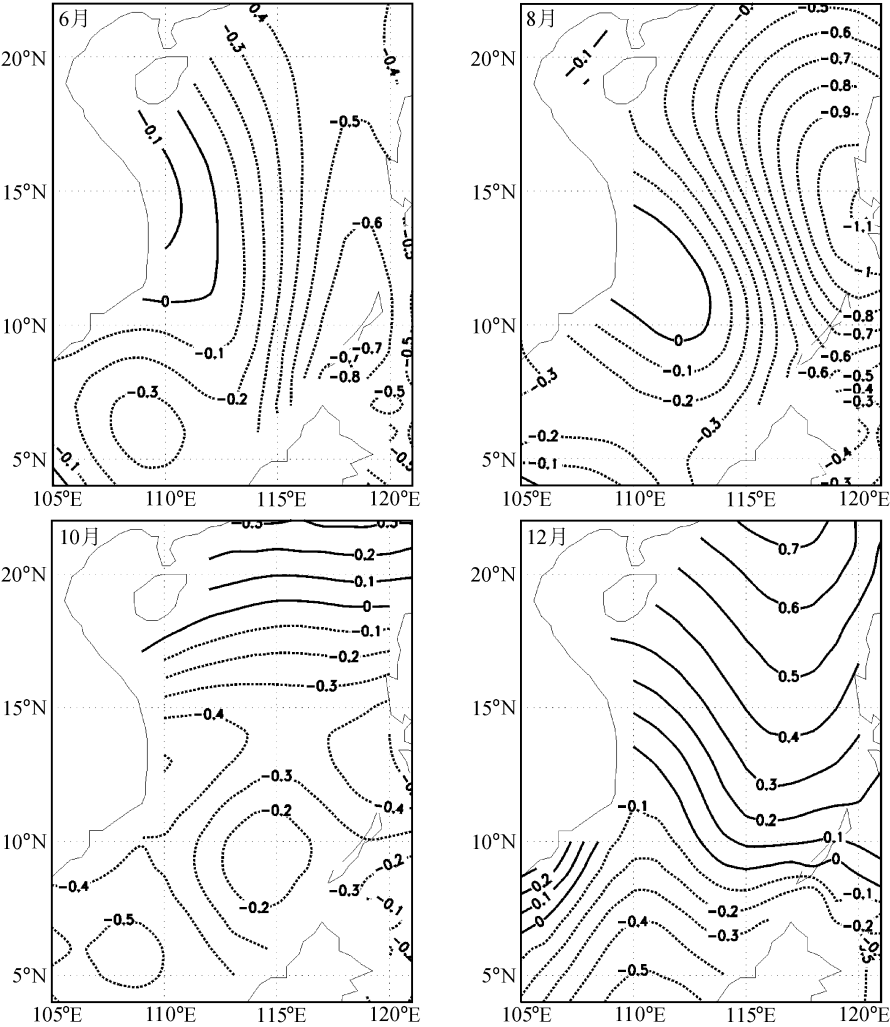


图 9 COADS 蒸发减降水的净淡水通量 [单位: mm (3 h)^{-1}]

净淡水通量是南海障碍层出现的首要因素，但是受海洋环流动力调整作用，障碍层厚度的水平分布和净淡水通量在南海的分布不相一致。这主要是风生环流的 Ekman 效应对上层海洋水体再分配造成的。

5.2 风场的效应

南海上层海洋的层结结构显著受风场影响。如同风场对混合层的作用^[20]，风场通过影响混合层间接影响障碍层分布结构。一方面，风场的大小或摩擦风速直接影响混合层的深度，混合层厚度与摩擦风速三次方成正比，摩擦风速越大，混合层越厚，障碍层的垂向分布随之改变。另一方面，风场的对表层海洋的 Ekman 水平输运会改变上层淡水通量的分布，影响用密度定义的混合层的深度。再者，风应力旋度造成 Ekman 垂向抽吸，决定着穿越混合层底的垂向水体输运，控制了等温层的深度。Ekman 水平输运和 Ekman 垂向抽吸的联合效应调制最大障碍层出现的深度位置以及决定障碍层的厚度和深度的分布。

前述对障碍层水平分布以及障碍层厚度和深度分布的分析表明，障碍层出现最为深厚的时期和位置都直接受到风场的这种联合效应的动力调整。例如 7~9 月份，西南季风在海洋表面造成东南方向的 Ekman 水平输运，将表层较淡的水体在南海东南堆积，此时南海南部风场的结构是东南风应力旋度为负、西北风应力旋度为正（见图 10）。南海南部风应力旋度的分布产生的 Ekman 垂向输运在西北为抽吸作用，东南为泵压作用。抽吸作用导致上升运动，温跃层中的水体上升进入等温层，遏制等温层的发展。抽吸作用与 Ekman 水平输运一起，遏制了障碍层在南海南部的西北侧的发展，使障碍层几乎不出现。与此截然相反，泵压作用导致下降运动，混合层内下部的水体脱离混合层。此部分脱离水体具有混合层内的高温特征，并不进入温跃层中，仍然保留在等温层中，于是混合层与等温层分离，这种作用与 Ekman 水平输运一起，促进了障碍层在南海东南部的发展，使最厚的障碍层出现。

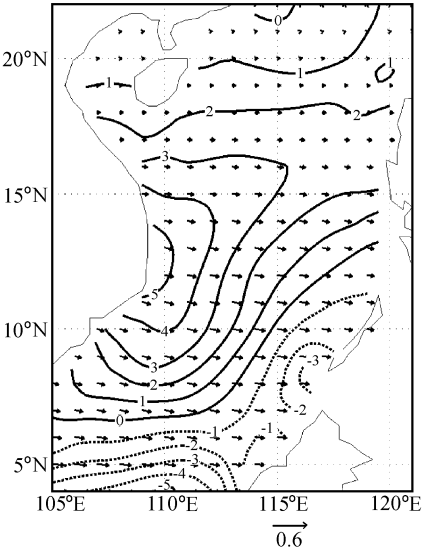


图 10 南海 6~9 月份平均 Ekman 水平输运（箭头，单位： $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ）和 Ekman 垂直抽吸（等值线，单位： m month^{-1} ）

6 小结

南海障碍层出现在夏、秋两季，冬季衰减，春季消失，是典型的夏季现象。最大障碍层厚度位于南海东南靠近加里曼丹至菲律宾的西北侧海域，达到 30 m。最厚障碍层出现的位置和最厚南海暖水出现的位置几乎重合，“热障”作用可能是促进南海暖水发展的内部原因。净的淡水通量是决定障碍层是否形成的关键因素，障碍层的厚度和深度的分布显著受风场的影响。风速的大小决定混合层的深度；风向则决定 Ekman 水平输运的方向，改变上层较淡水体的重新分布，影响混合层的深度；风应力旋度的正

负方向决定穿越混合层底 Ekman 垂向抽吸的方向, 影响混合层和等温层的深度。风场的这三种效应决定了障碍层深度的水平分布。夏季, 南海南部上层海洋在 Ekman 水平东南向输运以及西侧上升运动、东侧下降运动双重因素作用下, 较淡的水体在南海东侧堆积, 混合层底部高温水受泵压脱离混合层保留在等温层中, 造成障碍层在南海东南侧最为深厚。

致谢: 本文的完成得力于甘子钧教授和方欣华教授的宝贵意见, 特此感谢。

参 考 文 献

- 1 Tomczak, M., and J. S. Godfrey, *Regional Oceanography: An Introduction*, Pergamon, 1994, 414 pp.
- 2 Lukas, R., and E. Lindstrom, The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**, 3343~3357.
- 3 Sprintall, J., and M. Tomczak, Evidence of the barrier layer in the surface layer of tropic, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 7305~7316.
- 4 Godfrey, S., and E. R. Lindstrom, The heat budget of the equatorial western Pacific surface mixed layer, *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**, 8007~8017.
- 5 Ando, K., and M. J. McPhaden, Variability of surface layer hydrography in the tropical Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 23063~23078.
- 6 Swenson, M. S., and D. V. Hansen, Tropical Pacific Ocean mixed layer heat budget: The Pacific cold tongue, *J. Phys. Oceanogr.*, 1999, **29**, 69~81.
- 7 Anderson, S. P., R. A. Weller, and R. B. Lukas, Surface buoyancy forcing and the mixed layer of the western Pacific warm pool: Observation and 1D model results, *J. Climate*, 1996, **9**, 3056~3085.
- 8 邱章、徐锡祯、龙小敏, 1994 年 9 月南沙群岛调查海区的跃层特征, 热带海洋, 1996, **15** (2), 61~67.
- 9 贾旭晶, 1998 年南海季风爆发期间海洋上混合层动力特征及形成机制, 青岛海洋大学硕士学位论文, 2000.
- 10 吴巍、T. Tomczak、方欣华等, 南海南部海区的障碍层, 科学通报, 2001, **46** (7), 590~594.
- 11 朱良生、邱章, 南海南部海区障碍层季节变化及其对垂向热传输的影响, 海洋学报, **24** (增刊 1), 171~178.
- 12 Levitus, S., and T. Boyer, World Ocean Atlas 1994, Vol. 4: Temperature, NOAA Atlas NESDIS 4, U. S. Gov. Printing Office, Wash., D. C., 1994, 117pp.
- 13 Silva, D. A., C. Young, and S. Levitus, Atlas of Surface Marine Data 1994, Vol. 1: Algorithms and Procedures, NOAA Atlas NESDIS 6. U. S. Gov. Printing Office, Wash., D. C., 1994, 83pp.
- 14 国家技术监督局, 中华人民共和国国家标准: 海洋调查规范——海洋调查资料处理, GB12763.7—91, 北京: 中国标准出版社, 1992, 68~70.
- 15 Price, J. F., R. A. Weller, and R. Pinkel, Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response diurnal heating, cooling, and wind mixing, *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**, 8411~8427.
- 16 Kara, A. B., P. A. Rochford, and H. E. Hurlburt, An optimal definition for ocean mixed layer depth, *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**, 16803~16822.
- 17 UNESCO, Processing of Oceanographic Station Data, By JPOTS editorial panel, 1991, 138pp.
- 18 Niiler, P. P., and E. B. Kraus, One dimensional models of the upper ocean, Kraus, E. B. ed., In: *Modeling and Prediction of the Upper Layers of the Ocean*, Pergamon, New York, 1977, 143~177.
- 19 贾英来、刘秦玉、孙即霖, 南海暖水的季节变化特征及数值模拟, 海洋与湖沼, 2000, **31** (4), 354~362.
- 20 施平、杜岩、王东晓等, 南海混合层年循环特征, 热带海洋学报, 2001, **20** (1), 10~17.
- 21 张庆荣、杜岩、王东晓, 南海暖水形态特征, 热带海洋学报, 2001, **20** (1), 69~76.

Seasonal Variation of the Barrier Layer in the South China Sea and Its Relationship to the Sea Surface Flux

Du Yan^{1,2)}, Wang Dongxiao¹⁾, Shi Ping¹⁾, Guo Peifang²⁾, and Chen Ju¹⁾

- 1) (*Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301*)
- 2) (*Marine Environmental College, Ocean University of China, Qingdao 266003*)

Abstract Analysis of the climatological temperature and salinity shows the evidence of the barrier layer (BL) in the southern South China Sea (SCS) in the summer. The net fresh water flux is a key factor to determine the occurrence of the BL. The structure and distribution of the BL is dominated by the wind fields, and adjusted by the development of the mixed layer (ML) and isothermal layer (IL) . During summer, the SCS boundaries restrict the easterly Ekman transport, and the Ekman pumping is negative in the eastern SCS. Those two effects result in the fresher water pile up in the southeastern SCS. The high temperature waters detrain from ML and retain in IL, which cause the most deepest and thickest BL in southeastern SCS. The maximum reaches 30 m. The thickest BL occurs where the SCS Warm Water occurs, so the “heat barrier effect” facilitates the development of the SCS Warm Water.

Key words: South China Sea; barrier layer; net fresh water flux; wind field