

南海声速跃层分类及其季节变化

王文杰^{1,2}, 刘宇迪¹, 亓晨³, 张彬²

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 93968 部队气象台, 新疆 乌鲁木齐 830075; 3. 第二炮兵驻济南地区军事代表室, 山东 济南 250031)

摘要: 南海海底地势复杂, 海域内跃层分布有其特殊性, 研究声速跃层分布形态对海上军事活动和海洋战场建设有重要影响。利用 50 a(1958~2007 年)SODA (simple ocean data assimilation)月平均资料, 采用垂直梯度法分别求得 3 种类型声速跃层的特征值。结果表明: 冬季, 3 种类型声速跃层范围全年最小, 厚度最薄, 强度最弱; 夏季, 主跃层、双跃层范围全年最大, 厚度最厚, 深度大都较浅, 强度最强。春秋声速跃层的示性特征介于冬夏之间, 秋季比春季变化明显。

关键词: SODA (simple ocean data assimilation); 南海; 声速跃层; 季节变化

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)08-0082-12

doi: 10.11759/hyxx20120625001

海水温度、盐度、压力分布不均匀, 导致声速在垂向突变产生声速跃层, 跃层分布因时因地而异。海洋中, 声速跃层经常存在, 是物理海洋学研究的重要内容, 并与海洋环流、水团、内波、海气相互作用等现象关系密切。声速反映水声学特性, 其分布体现着海水运动^[1]。声波在海洋中的传播, 与声速大小及垂直梯度类型有关, 深海声道中, 声速跃层对水下通信和潜艇的隐蔽及搜索具有重要作用。

南海约位于 $2^{\circ}30'S\sim 23^{\circ}30'N$, $99^{\circ}10'\sim 121^{\circ}50'E$ 之间, 分别与中国东海、西太平洋、苏禄海、爪哇海及印度洋相连, 面积约 350万 km^2 , 呈长轴为NE-SW走向的半封闭菱形。海底地势西北高, 中部和东南低。从周边至中央, 依次分布着大陆架、岛架、大陆坡、岛坡以及深海盆地。复杂的海底地势, 使这一海域环流和跃层分布有其特殊性。

国内对海洋跃层的相关研究始于 20 世纪 60 年代^[2], 随后, 赵保仁^[3]等学者分别讨论了渤海、黄海、东海、南沙海域中温跃层分布特征及形成机制问题。随着卫星高度计资料广泛使用, 温度、密度、盐度等海洋跃层的空间分布特征、季节变化规律及影响机制不断被揭示, 然而对南海海域三类声速跃层时空变化特征整体研究较少, 尤其是对声速双跃层、负跃层的研究。本文试图利用 SODA (simple ocean data assimilation)资料, 定量、直观地分析和讨论整个南海范围内三类声速跃层整体时空变化特征。

1 声速跃层特征提取与分类

1.1 资料与处理方法

SODA 数据在研究海洋声场结构方面具有优越性^[4], 本文选用 SODA_2.0.4 版本 1958 年 1 月~2007 年 12 月 50 a 的数据集对声速跃层进行统计分析。数据集包含的变量有温度、盐度、经纬向海流速度、经纬向海表风应力和海平面高度。资料水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 垂直方向上不等距分为 40 层。受资料水平分辨率限制, 研究区域设为 $98.75^{\circ}\sim 122.25^{\circ}E$, $1.25^{\circ}S\sim 24.25^{\circ}N$, 基本覆盖南海海区。

海水声速是温度、盐度、压力的函数, 通常以经验公式表示, 本文声速计算采用 UNESCO(联合国教科文组织)推荐的 Chen-Millero^[5]公式。周丰年^[6]研究指出当深度为 $10\sim 10\ 000\text{ m}$ 时, Chen-Millero 算法比较适合该水层的声速计算, 刘贞文^[7]通过对几种声速计算公式的比较, 认为 Chen-Millero 算法与实测声速吻合得最好。本文首先用 Grid Analysis and Display System (Grads)软件提取 SODA 资料中温度、盐度数据, 应用 Saunders^[8]经验公式计算出南海海域各层格点的海水压强, 然后结合 Chen-Millero 公式

收稿日期: 2012-06-25; 修回日期: 2013-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40505024)

作者简介: 王文杰(1987-), 男, 陕西汉中, 助理工程师, 硕士, 主要从事物理海洋学研究, E-mail: wwj10604031987@126.com; 刘宇迪, 通信作者, 副教授, 博士, 主要从事数值模式和微波资料反演研究, E-mail: yd_liu0509@yahoo.com.cn

计算南海海域各年逐月格点上声速序列, 取年平均后得到 50 a 气候平均的逐月声速序列。利用 Akima 插值^[9]得到深度间隔为 1 m 的声速剖面序列。插值运算前, 先做斜率运算和判断, 去掉斜率最大点, 以便改善内插效果。

1.2 声速跃层特征提取和分类

目前, 声速跃层判定方法主要有垂直梯度法、曲率极值法、拟阶梯函数拟合法、三次样条数值函数法等, 4种方法在深水开阔海域、浅水区和陆架坡折区性能各异。南海海域深度变化幅度大, 相对于单次实测数据, 使用月平均的SODA数据, 声速剖面垂直梯度相对较小, 因此, 本文采用垂直梯度法求声速跃层边界深度、厚度和强度这三个特征量。自海表至海底将海水分为 k 层, 每层深度和声速值分别为 z_1, z_2, \dots, z_k 和 V_1, V_2, \dots, V_k , z 以海面为原点向下为正, 单位分别为m和m/s。根据《海洋调查方法》^[10], 声速垂直梯度(G_c)定义为海水中声速随深度的变化率:

$$G_c = dc/dz \quad (1)$$

公式(1)中 c 为声速, 单位m/s, G_c 单位为 s^{-1} 。根据《海洋调查方法》中对中国近海声跃层的规定, 声速垂直梯度在浅海(水深 200 m)超过 $0.5 s^{-1}$ 或在深海(水深 > 200 m)超过 $0.2 s^{-1}$, 并且层顶与层底的声速差 1.0 m/s的水层为跃层。南海海域深度变化幅度大, 声速跃层深海标准和浅海标准相差2.5倍, 若严格按照上述标准会造成深水和浅水间跃层水平分布不连续。由于使用月平均SODA数据后, G_c 相对较小, 因此本文跃层分析采用深海标准临界值 $0.2 s^{-1}$, 以体现跃层细节结构。

根据南海声速剖面特点, 将声速跃层分为主跃层、双跃层和负跃层 3 种类型^[9]。主跃层型: 从海表至海底, 若 G_c 连续大于标准临界值, 并且层顶与层底的声速差 1.0 m/s, 则确定该段为声速跃层, 顶部水深 Z_k 和底部水深 Z_{k+1} 作为跃层上下界深度, ΔZ (即 $Z_{k+1}-Z_k$)为跃层厚度, 该段整个 G_c 为跃层强度 (J)^[10], 如公式(2)所示。对于不连续者, 两跃层之间的间隔若小于 5 m(当上界深度小于 50 m 时)或小于 25 m(当上界深度大于 50 m 时), 将两段合并进行跃层临界值判定。合并后, 若仍大于等于临界值, 则合并为一个跃层段; 若小于临界值, 则以上界深度 50 m 为界, 分别在 50 m 以浅、以深选取跃层强度强者, 如强度相等, 则选取厚度厚者为主跃层段。双跃层型: 声速随深度增加有两段或两段以上满足主跃层条件,

双跃层上界深度, 厚度和强度指垂直方向上从海表至海底的第二主跃层的上界深度, 厚度和强度。负跃层型: 声速随深度增加而升高, 且变化强度超过声速跃层的临界值时, 取负跃层段。实际计算中将跃层中央位置对应深度作为上下界的平均位置来表征跃层位置。

$$I = (\Delta V / \Delta Z)_{\max} = [(V_k - V_{k+1}) / (Z_{k+1} - Z_k)]_{\max} \quad (2)$$

求得 3 类跃层特征量后, 计算海域内 3 类跃层逐月频率分布。对于某一格点来说, 假设 1958~2007 年某月存在主跃层、双跃层和负跃层的样本点数分别为 n, m, l , 样本总数 $N=50$, 则将 $P_1=(n/N) \times 100\%$ 、 $P_2=(m/N) \times 100\%$ 、 $P_3=(l/N) \times 100\%$ 分别称为该格点主跃层、双跃层和负跃层出现概率。

2 声速主跃层的时空变化

表 1 给出 1958~2007 年南海海域声速主跃层四个季节(1、4、7、10 月分别代表冬、春、夏、秋季, 下同)发生概率, 图 1 为四个季节主跃层发生概率的空间分布。结合表 1 可以看出, 夏季主跃层除了在泰国湾、加里曼丹岛以西浅海和湄公河出海口附近陆架出现概率不到 20%外, 在包括台湾西南海域、吕宋西北海域、越南以东外海在内的几乎整个海域出现概率超过 90%, 主跃层出现概率最高, 空间分布最广。受潮流垂直混合作用, 越南以东海域主跃层全年出现概率在 90%以上, 季节变化特征不明显, 而在泰国湾和加里曼丹岛北部岛架夏冬季出现概率达最低。

表2给出了南海海域三类跃层特征量50 a 气候逐月平均值, 可见夏季主跃层深度较浅, 深度季节变化明显。由图2看出, 在南海中部, 主跃层深度较浅, 这主要因为海表风应力在6月前后减小至 $0.1 N/m^2$ ^[11], 并且伴随上层海水温度升高, 西南季风较小, 使得海水层结趋于稳定, 垂向混合减弱, 而

表 1 1958~2007 年南海海域声速主跃层四季发生概率
Tab. 1 Probability of occurrence (%) of the main spring layer in the SCS from 1958 to 2007

季节	声速主跃层发生概率(%)					
	高值区			低值区		
	台湾西 南海域	吕宋西 北海域	越南以 东海域	泰国湾	加里曼丹岛 以西浅海	湄公河 出海口
夏季	90	90	90	20	10	10
冬季	50	80	90	10	10	0
春季	80	90	90	50	30	10
秋季	80	90	90	30	20	10

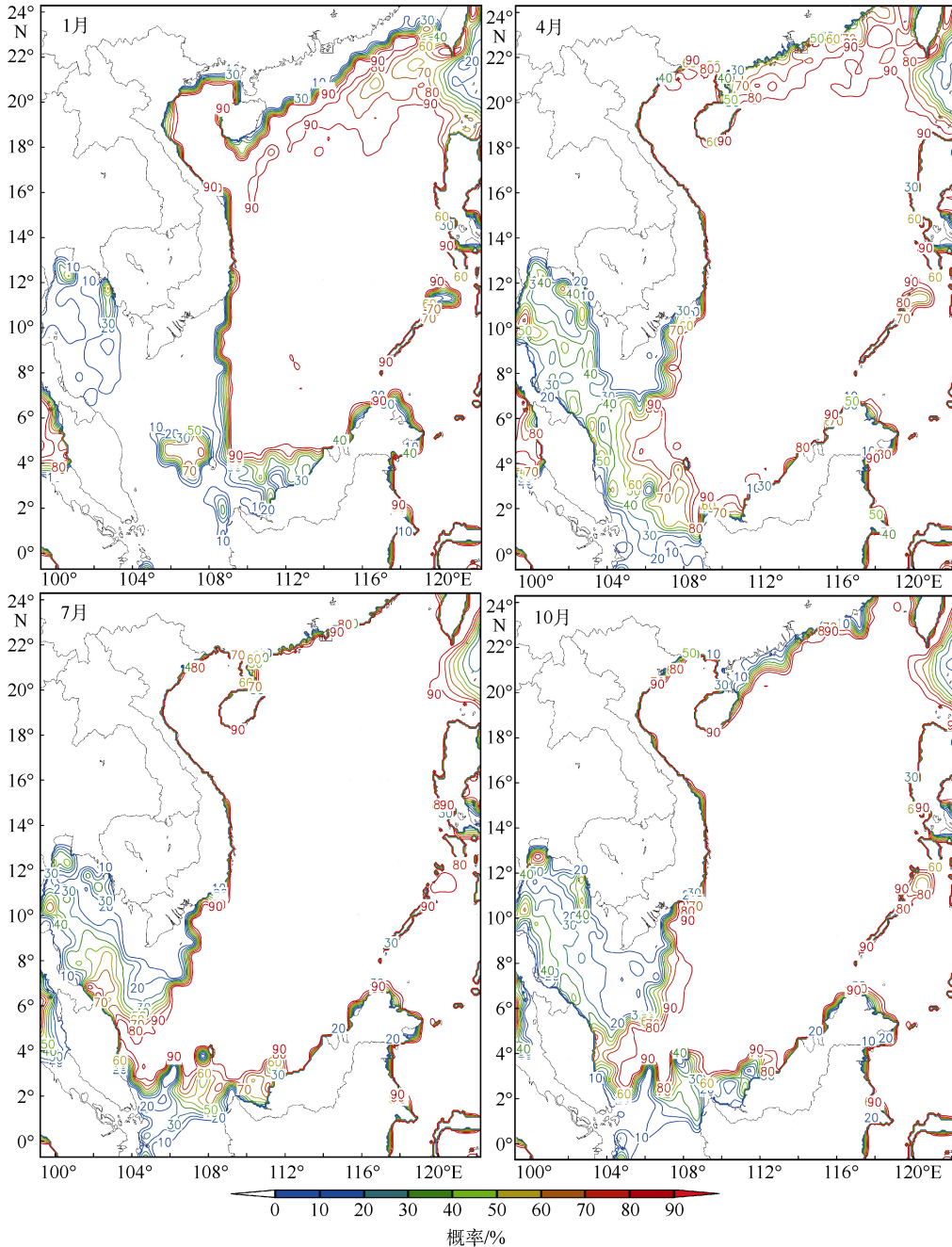


图1 1958~2007年南海声速主跃层1、4、7、10月发生概率空间分布(%)

Fig. 1 Occurrence probability (%) distribution of the main spring layer in the SCS from 1958 to 2007

在吕宋岛西北海域始终存在一个与反气旋涡基本相对应的高值区, 在40 m等值线南侧存在明显的深度高值区^[7](超过60 m), 此高值区基本与南沙反气旋相对应, 南沙反气旋造成海水在海面辐合, 下沉流加强, 导致均匀层增厚, 跃层整体下沉变深。相反, 在40 m等值线的北侧、中南半岛的东部沿岸海域存在跃层深度低值区(10 m), 这一低值区基本与越南冷涡^[11]所在的地理位置相对应, 越南冷涡使海表面水

体辐散, 上升流加强后导致混合层变薄, 跃层整体抬升变浅。

由表2可见, 夏季南海海域主跃层厚度为全年最厚, 结合夏季主跃层厚度空间分布(图略), 进一步发现, 夏季整个南海跃层厚度基本都在50 m以上, 6~7月西沙群岛与东沙群岛海域存在厚度大于100 m的高值中心。整个夏季, 海盆西南侧始终存在一个跃层厚度大值中心(7°N, 110°E), 这可能由于表层

表 2 南海海域三类跃层特征量 50 a 气候逐月平均值

Tab. 2 50-year climatic monthly average eigenvalue of three spring layers in the SCS

月份	深度(m)			厚度(m)			强度(s ⁻¹)		
	主跃层	双跃层	负跃层	主跃层	双跃层	负跃层	主跃层	双跃层	负跃层
12	30.51	23.75	1.13	17.78	5.73	0.40	0.14	0.05	0.02
1	31.41	21.78	1.14	16.26	5.06	0.37	0.13	0.04	0.01
2	30.38	21.58	1.07	15.52	4.95	0.26	0.13	0.04	0.01
3	26.54	23.48	0.81	15.18	5.82	0.15	0.13	0.05	0.01
4	19.79	27.33	0.58	16.34	8.32	0.09	0.16	0.07	0.00
5	16.44	27.10	0.48	19.28	9.75	0.12	0.18	0.08	0.01
6	18.68	26.24	0.64	21.44	8.84	0.11	0.19	0.08	0.01
7	20.96	25.62	0.61	22.01	7.83	0.13	0.19	0.07	0.01
8	22.69	25.37	0.64	22.20	7.38	0.13	0.19	0.07	0.01
9	23.92	24.88	0.73	22.37	7.24	0.19	0.18	0.06	0.01
10	25.85	24.75	0.76	21.22	7.04	0.24	0.17	0.06	0.01
11	28.57	24.13	0.94	19.69	6.26	0.30	0.15	0.05	0.01

Ekman 水平输送间接影响,使得海水有向东南方向的质量输送,造成此处混合层厚度变至最薄,跃层厚度最大。此外,雷州半岛以东海域、东沙群岛与台湾海峡之间以及加里曼丹岛以北海域分布有几个低值中心,越南东南和吕宋岛以北海域的边缘,亦有两个不完整的低值区,可能是受越南冷涡和吕宋冷涡影响。

夏季,太阳辐射强烈,南海表层水温较高,海气交换迅速,浅层海水强烈增温,同时,次表层海水爬坡涌升,占据沿岸浅水区,跃层发展强盛,从表 2 看出,与全年其他季节相比,主跃层强度值达全年最大。夏季主跃层强度等值线与海岸线基本平行,粤东、粤西和北部湾西部近岸跃层强度急剧增大,0.8 s⁻¹ 以上的强度大值区出现在海南岛以东海域和湄公河入海口附近(0.9 s⁻¹),在纳土纳群岛西北出现大于 0.7 s⁻¹ 的强跃层,而越南以东深水海域,跃层强度变化不大,大部分海域强度稳定在 0.3 s⁻¹ 左右。

冬季,声速主跃层发生概率在台湾西南海域、吕宋西北海域明显减小,越南以东海域发生概率始终维持在 90%以上,没有呈现明显的季节性变化特征。泰国湾、加里曼丹岛以西浅海和湄公河出海口发生概率全年最小。

从表 2 可以看出,冬季主跃层深度为全年最深,海域平均最大深度达 30 m 以上,结合图 2(1月)看出,主跃层深度整体呈西深东浅分布型式。在海南岛以东、珠江口外及台湾岛南部近岸海区,有深度大于 100 m 的小范围跃层存在,这主要因为冬季太阳辐射减弱,海表温度降至全年最低,海面东北季风达到

全盛时期,最大风应力可达 0.3 N/m² [12],东北季风加速垂向混合使得深度超过 70 m 的跃层范围变大。此外,无跃区范围较其他季节也最大,表现为南海北部近海浅水区、越南南部东侧和巽他陆架大部无跃层分布。这是因为冬季整个南海 18°N 以北的海水表层,为一气旋式大环流系统控制,表层海水辐散,上升流加强,近岸浅海区进入无跃期;而越南南部东侧沿岸海域,沿岸流离岸后南向运动,由于作为海盆尺度气旋式环流的西边界流大致沿着巽他陆架东缘的陆架坡继续南流,且越往南强度越大,从北向南输送冷水形成沿着陆坡的冬季南海冷舌 [13],从而使这片海域成为无跃区。在中南半岛沿岸的陆架海域、南沙群岛南部、西沙-中沙群岛和台湾岛南部沿岸,跃层深度始终存在四个高值区,根据 Ekman 漂流理论 [14],寒冷且速度较大的东北季风加速表层海水向 SW 方向质量输运,受中南半岛近岸陆架地形阻挡,垂向混合急剧加强,混合层加厚,跃层深度大大增加,在中南半岛沿岸出现深度超过 100 m 的南北向宽、东西向窄的高值区。由于南沙反气旋存在,引起海水在海面辐聚,下降流加强,混合层增厚,主跃层下沉变深,使南沙南部呈现高值区。在西沙—中沙群岛海域,同样存在着一个反气旋式涡旋使得该海域主跃层变深。在台湾岛南部沿岸,沿台湾岛西侧北上的黑潮支流受台湾岛地形阻挡,混合作用加强,跃层变深,而在在吕宋西北部、巴拉望岛的西南部与加里曼丹岛西北海域存在两个跃层深度的低值区,受 Ekman 水平输运效应 [14] 影响,东北季风引起海水在 SW 方向质量输运,使吕宋岛和加里曼丹岛西北海

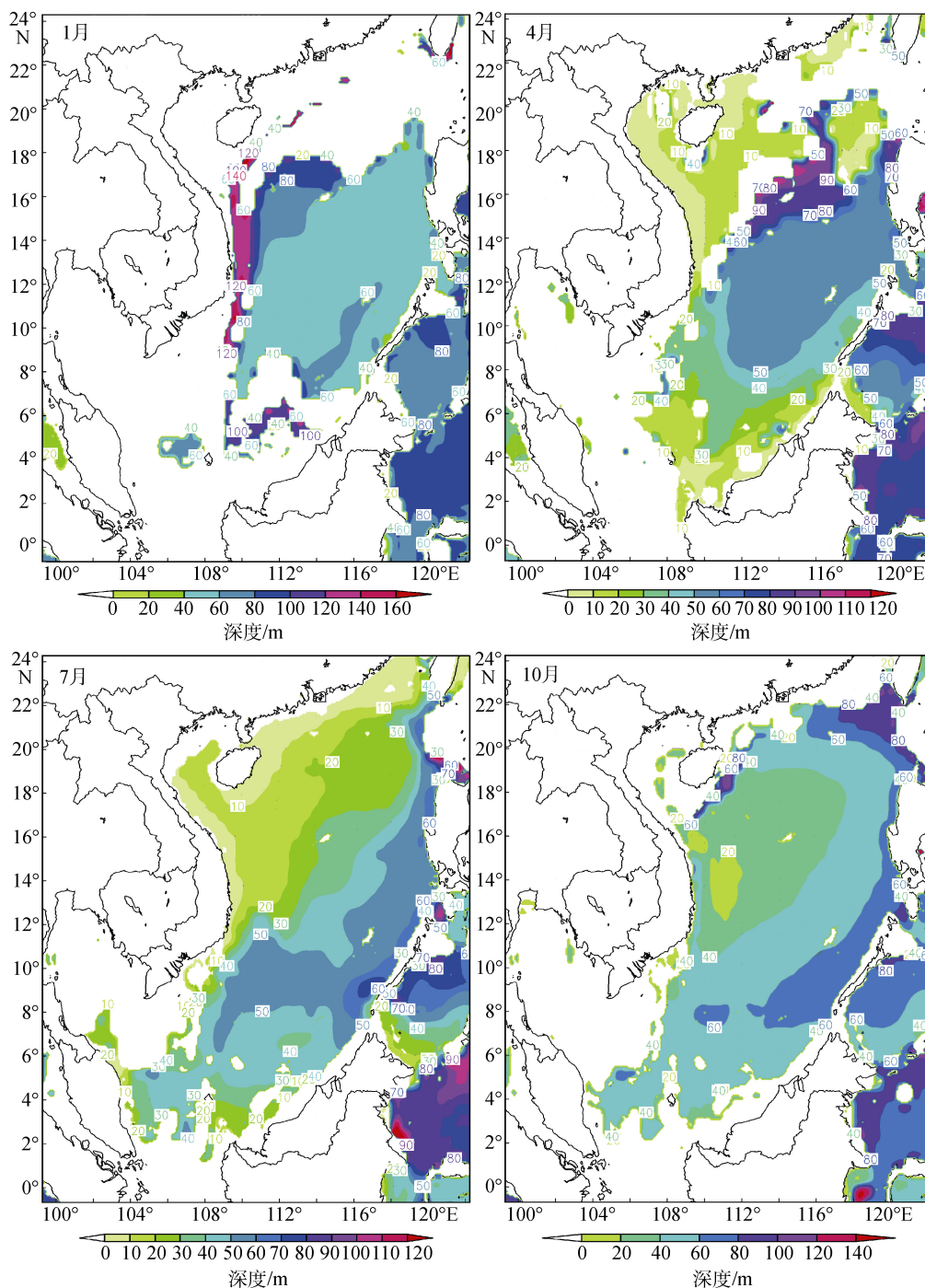


图2 1958~2007年南海声速主跃层1、4、7、10月气候平均深度(m)

Fig. 2 Climatic average depth (m) of the main spring layer in the SCS from 1958 to 2007

域上层海水流失,加之岛屿地形阻挡,水平方向海水质量得不到补偿,使得混合层变薄,跃层变浅,出现跃层深度的低值区;而位于吕宋岛西北海域16°~19°N的吕宋冷涡,对应着系统且连续的沿岸上升流,造成冷水上涌,跃层深度变浅。

冬季全海域主跃层厚度平均值与春季相当,空

间分布显示海盆中央区域跃层厚度较厚,边缘较薄,跃层范围为一年中最小,大部分厚度较薄,厚度超过40m的跃层散布在吕宋岛以西的南海海盆及其以南的深海海域。关于海盆中央区域高值中心的成因,部分学者^[15]认为一是冬季海洋上层气旋式环流沿西边界将水体运输到南部,形成质量堆积,造成主跃

层结构变厚；二是气候平均的次表层环流结构与表层相反，为反气旋结构，造成水体辐合。

从表 2 来看，冬季全海域主跃层强度平均值全年最小，从跃层强度空间分布来看(图略)，大部分海域主跃层强度很弱，仅在西沙群岛、南沙群岛和巴拉望岛东北海域出现三个大于 0.35 s^{-1} 的相对高值区。这可能因为，寒冷且强大的东北季风，导致海水垂向混合发达，表层海水降温，不利于跃层形成，近岸部分浅水区甚至垂向混合达到海底，跃层消失。

春季南海太阳辐射增强，海水开始升温，随着表层温度升高，海水层化逐渐形成，但是 4 月份东北季风明显减退，西南季风尚未完全建立，海域风速为一年中最小，风应力产生的海水混合^[15]也最弱，混合层水在西北陆架区堆积的现象远不如冬季显著。受此影响，主跃层出现概率大于 80% 的区域开始向北向西延伸，到 5 月，台湾西北海域、吕宋西北海域和越南以东海域主跃层出现概率均超过 80%。由表 2 与图 2(4 月)可见，春季主跃层上界深度的全海域平均值在一年中最浅，仅 20 m ^[14]左右，但跃层范围逐渐扩大。4 月， 16°N 附近的南海海域存在一个弱的局地气旋式的环流体系，上升流的抽吸，使这一海域成为无跃区。在吕宋岛西北侧和加里曼丹岛西北侧，存在约为 10 m 的跃层深度低值区，与冬季跃层深度相比更浅，这与兰健等^[14]采用 MOODS 数据分析得到温跃层深度的结果是一致的。冬季到春季交替的过程中，跃层深度低值区迅速向加里曼丹岛西北沿岸海域、北部湾海域和粤东沿岸扩散，跃层范围逐渐加大，而在中部深水区跃层深度逐渐变浅，大值区不断向东南方向萎缩。北部湾以西的越南沿岸，等值线呈舌状呈南北向延伸，范围在 $14^\circ\sim 18^\circ\text{N}$ 。受冬季 Ekman 漂流作用和中尺度反气旋涡影响，南海海盆西北部仍然有跃层深度超过 90 m 的高值区。

由表 2 可见，春季主跃层全海域厚度平均值全年最小，跃层厚度的空间分布图表明(图略)，中沙群岛至南沙群岛海域主要分布一个大致呈 NE-SW 走向的舌状高值区，其厚度均超过 60 m 。近岸和陆架海区，跃层厚度一般不超过 10 m ，由高值区向南北两侧均呈现厚度递减的趋势。主跃层强度全海域平均值较冬季大，较秋季小，强度空间分布图(图略)上大部分海域强度较弱，一般稍大于 0.2 s^{-1} ，4、5 月份，红河以东沿岸海区有大于 0.5 s^{-1} 的高值区。这可能是由于随着时间推移，东北季风已大大削弱，而西南季风开始稳定，且太阳辐射开始增强，使得浅层海水缓慢增温，次表层海水

爬坡涌升占据沿岸底层，形成沿岸强度高值区。

秋季，主跃层发生概率高值区分布型式与春季相似，小于 60% 的区域从湄公河沿海区域向巽他陆架南部延伸，至秋末，珠江口外水深小于 100 m 的浅海区呈现垂直均匀的无跃层结构。由于秋季正值南海台风季节，加之太阳日辐射量逐渐减少，水温开始下降，风浪扰动加速表层热量下传，使得表层海水因水温下降密度增大而下沉，混合层日渐加厚，等温层逐渐向深处延伸。由图 2(10 月)可见，秋季主跃层上界深度分布有一条北部宽、南部窄呈 NE-SW 走向的分界线^[14]，高值区位于东南侧，低值区在西北侧。在分界线西北部和越南以东海域，存在一低值区，低值区主体部分向南延伸至 10°N ，向北至 21°N ，向东延伸至珠江口南侧。这片低值区基本对应着一个次海盆尺度的气旋式环流，气旋式环流的存在导致表层海水辐散，上升流加强，主跃层深度变浅。位于越南沿岸的金兰湾以东海域的大片低值区对应着中心位于 $12^\circ\sim 14^\circ\text{N}$ 的冷涡，但随着太阳辐射减弱，表层海水温度降低，加之西南季风逐渐开始转为风速较强的东北季风，主跃层深度水平分布开始具有冬季的特征。秋末(11 月)，台湾岛西南部至南海东北部的北陆架海域盛行暖涡，导致主跃层逐步加深。而加里曼丹岛西北部海域的主跃层逐渐抬升，低值区开始出现。由于海水温度降低，风速加大，垂向混合加强，南海整体跃层深度加深，海南岛东南沿岸主跃层深度超过 100 m 、南沙海域主跃层深度超过 90 m 、北部湾主跃层深度也超过 30 m 。相反，海水垂直混合加强使一些浅海区主跃层消失， 20 m 跃层上界深度等值线向外海衰退。出现高值区一方面是夏季 Ekman 漂流作用使海水在东南海域堆积；另一方面，东沙反气旋、南沙反气旋对高值区的形成也有贡献。与春季相比，秋季海面风速较大，导致垂向混合较强，跃层深度较春季深。11 月以后主跃层的范围逐渐衰减，近海跃层基本消失，主跃层的分布开始体现冬季的特征。

受太阳辐射减弱、西南季风减弱、东北季风逐渐加强等因素影响，海水垂直混合作用逐渐加强，秋季跃层厚度较夏季明显减弱(图略)，厚度等值线自西北向东南方向递增， 40 m 厚度等值线从海南岛南部和东沙群岛开始向深海衰退。由于表层海水开始降温，与夏季相比，跃层范围明显缩小，而强度也有所减弱(图略)，主要表现在：北部湾强度大于 0.4 s^{-1} 的区域消失，大部分海域强度为 $0.25\sim 0.3 \text{ s}^{-1}$ 。从表 2 看，

相较春季而言, 主跃层厚度较厚, 强度稍强。

3 声速双跃层的时空变化

在 3 种不同水团交汇的海域, 水文要素的垂直分布常因 3 种水团在不同层次互相叠置或相互侵入造成温、盐梯度递增而形成双跃层现象。一般来说, 上跃层是沿岸水(或沿岸变性水)与陆架混合水叠置或由于混合层快速增温形成的, 下跃层是由深底层存在冷水引起的。图 3 为南海四季声速双跃层出现概率。结合表 3 和图 3(7 月), 从季节分布上看, 夏季

双跃层出现概率和出现概率的空间分布范围均为最大, 冬季最小, 总体上呈现夏强冬弱趋势; 从空间分布形态上看, 双跃层出现概率高值区主要分布在台湾西南沿岸海域、北部湾沿岸和加里曼丹岛以东沿岸海域, 且远大于深水海盆出现概率, 说明沿岸海域不同类型水团之间的混合作用明显强于深水海盆。泰国湾-巽他陆架以东的广大海域, 双跃层终年出现概率低于 10%, 湄公河出海口终年无双跃层, 加里曼丹岛以西浅海仅在春季有双跃层出现, 且概率低于 10%。

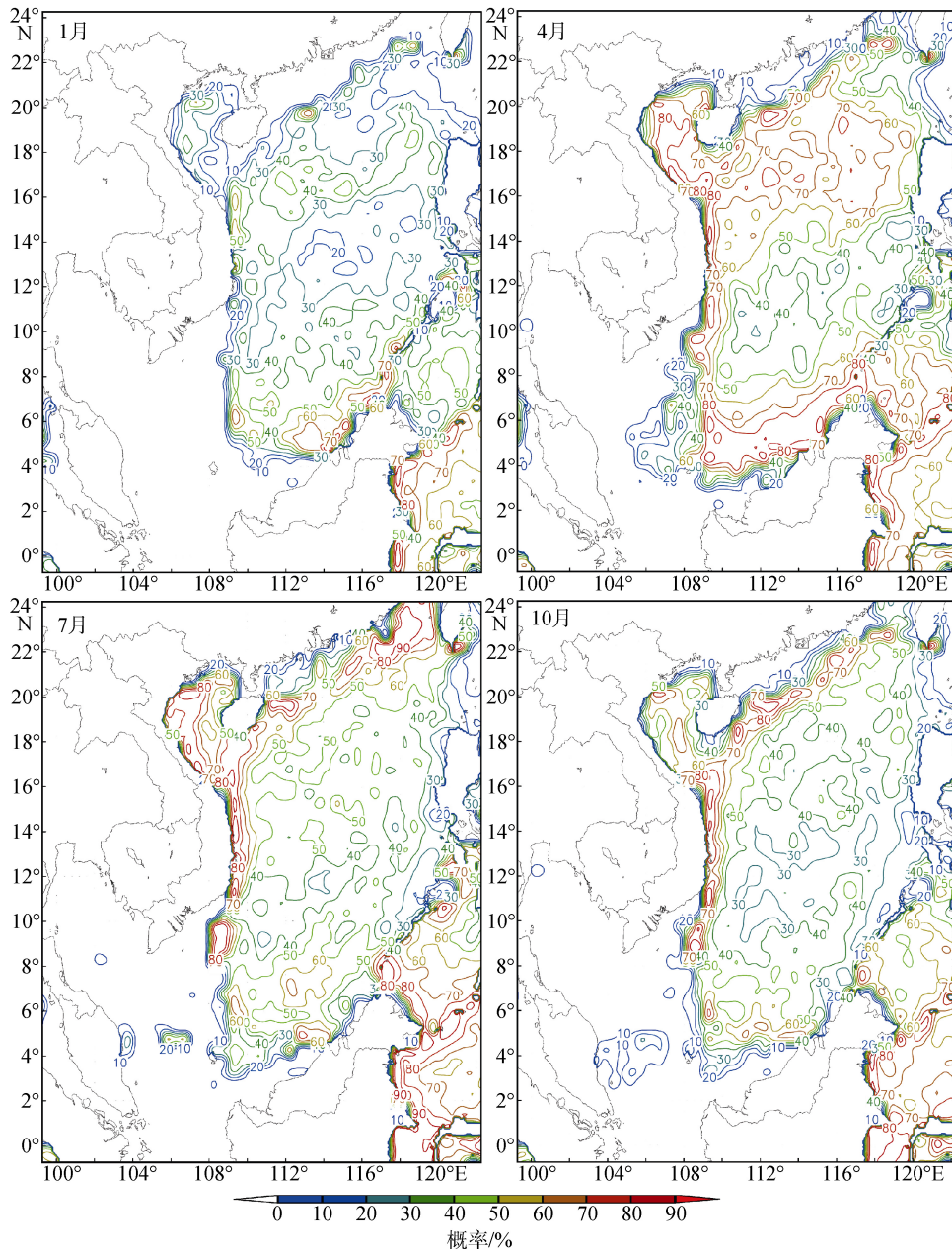


图 3 1958~2007 年南海声速双跃层 1、4、7、10 月发生概率空间分布(%)

Fig. 3 Occurrence probability (%) distribution of the double spring layer in the SCS from 1958 to 2007

表 3 1958–2007 年南海海域声速双跃层四季发生概率
Tab. 3 Probability of occurrence (%) of the double spring layer in the SCS from 1958 to 2007

季节	声速双跃层发生概率(%)					
	高值区			低值区		
	台湾西 南海域	吕宋西北 海域	越南以 东海域	泰国 湾	加里曼丹岛 以西浅海	湄公河 出海口
夏季	80	40	40	10	0	0
冬季	10	30	30	0	0	0
春季	40	70	40	10	10	0
秋季	50	40	30	10	0	0

夏季, 太阳辐射剧烈增强, 高温低盐的北部湾沿岸水向南扩张叠置在高温(比沿岸水低)高盐的暖流水之上(其下为低温水), 因此北部湾沿岸风速双跃层出现概率最高。加里曼丹-巴拉望岛以东海域风速双跃层出现概率在60%以上, 应该是加里曼丹沿岸水、南海南部表层水和加里曼丹近岸混合水团在不同层次相互穿插的结果。由图4(7月)看出, 吕宋岛西北部深海区存在一个中心水深大于450 m 的高值中心, 这可能是夏季太阳辐射增强和表层海水混合共同作用形成的。夏季, 太阳辐射剧烈, 南海北部局地表层水增温显著, 与此同时, 在偏南季风的作用下, 黑潮右边界被向西推移, 而黑潮左边界仍在大陆架边缘, 使得主流幅变窄, 表层流速增加, 流轴也略向西偏移^[16], 在黑潮动力驱动下, 菲律宾以东表层水经巴士海峡与南海表层水混合变性形成这一高值中心。此外, 在加里曼丹岛以东沿岸跃层深度超过100 m, 这可能是沿岸表层水与向西北运动的补偿流混合作用的结果。风速双跃层厚度的空间分布(图略)类似深度空间分布, 与全年其他季节相比, 双跃层强度值达到最大, 大值区形成于春末, 此后不断加强至秋初(9月)开始萎缩减小, 位置与深度大值区一致, 最大中心值达到 2.7 s^{-1} , 但是大值核心位于大值区西南部分。

由图3(1月)可见, 冬季, 随着气温降低, 风力搅

拌作用使得上混合层混合均匀, 南海北部除北部湾以外, 其他海域出现风速双跃层概率较小, 而南海南部加里曼丹-巴拉望岛一线海域双跃层出现概率在60%以上, 这可能是加里曼丹沿岸水、南海南部表层水、加里曼丹近岸混合水团在不同层次相互混合的结果。15°N 以北, 吕宋岛以西海域的双跃层结构逐渐显现, 这可能是在黑潮的动力驱动下, 黑潮水和南海北部局地水体性质不同, 从而菲律宾海表层水进入南海后与南海表层水混合变性所造成的。由图4(1月)可见, 较强的东北季风大大强化了海水垂直混合, 混合层加深, 在浅海区形成温盐的垂直均匀状态, 无跃区全年最多, 跃层范围为一年中最小。上界深度普遍超过60 m, 分布非常零散。厚度不超过30 m, 为全年最薄, 强度在 0.25 s^{-1} 左右, 为全年最弱(图略)。

由图3(4月)可见, 春季, 北部湾以南海域声速双跃层范围逐渐向北扩展, 同时北部湾以南的越南沿岸, 随着气温的升高, 高温低盐的北部湾沿岸水向南扩张覆盖在高温(比沿岸水低)高盐的暖流水(其下为低温水)之上, 因此声速双跃层出现概率最高。5月份随着太阳辐射增强, 珠江冲淡水开始由珠江口外向西南方向扩展, 海南岛以东海域出现大范围的双跃层区, 6月海表面温度急剧升高, 珠江冲淡水向南扩展最远, 跃层范围开始逐渐增大。受冬季 Ekman 漂流作用和中尺度反气旋涡的影响, 越南沿岸开始出现声速双跃层, 而且深度一般大于100 m, 但跃层厚度一般不超过40 m。随着太阳辐射逐渐增强, 双跃层厚度逐渐增大, 在吕宋岛的西北海域和南海海盆中部存在厚度大于60 m 的中心。大部分海域声速双跃层强度仍然较弱, 一般稍大于 0.2 s^{-1} , 不超过 0.4 s^{-1} 。

由图 3(10月)可见, 秋季, 声速双跃层出现概率的空间分布类似于春季, 但概率值有所减小, 尤其是在北部湾和吕宋岛西北海域。至 11 月以后开始呈

表 4 1958–2007 年南海海域声速负跃层四季的发生概率
Tab. 4 Probability of occurrence (%) of the negative spring layer in the SCS from 1958 to 2007

季节	声速双跃层发生概率(%)									
	高值区					低值区				
	红河以 西海岸	泰国湾	马六甲 海峡	珠江口—汕 头海域	湄公河出 海口	巴拉望岛以 南海岸	加里曼丹岛 以西浅海	越南以 东海域	吕宋西北 海域	
夏季	70	30	10	20	60	10	10	0	0	
冬季	50	90	30	50	0	15	10	0	0	
春季	10	60	20	20	10	20	10	0	0	
秋季	30	90	40	40	90	20	40	0	0	

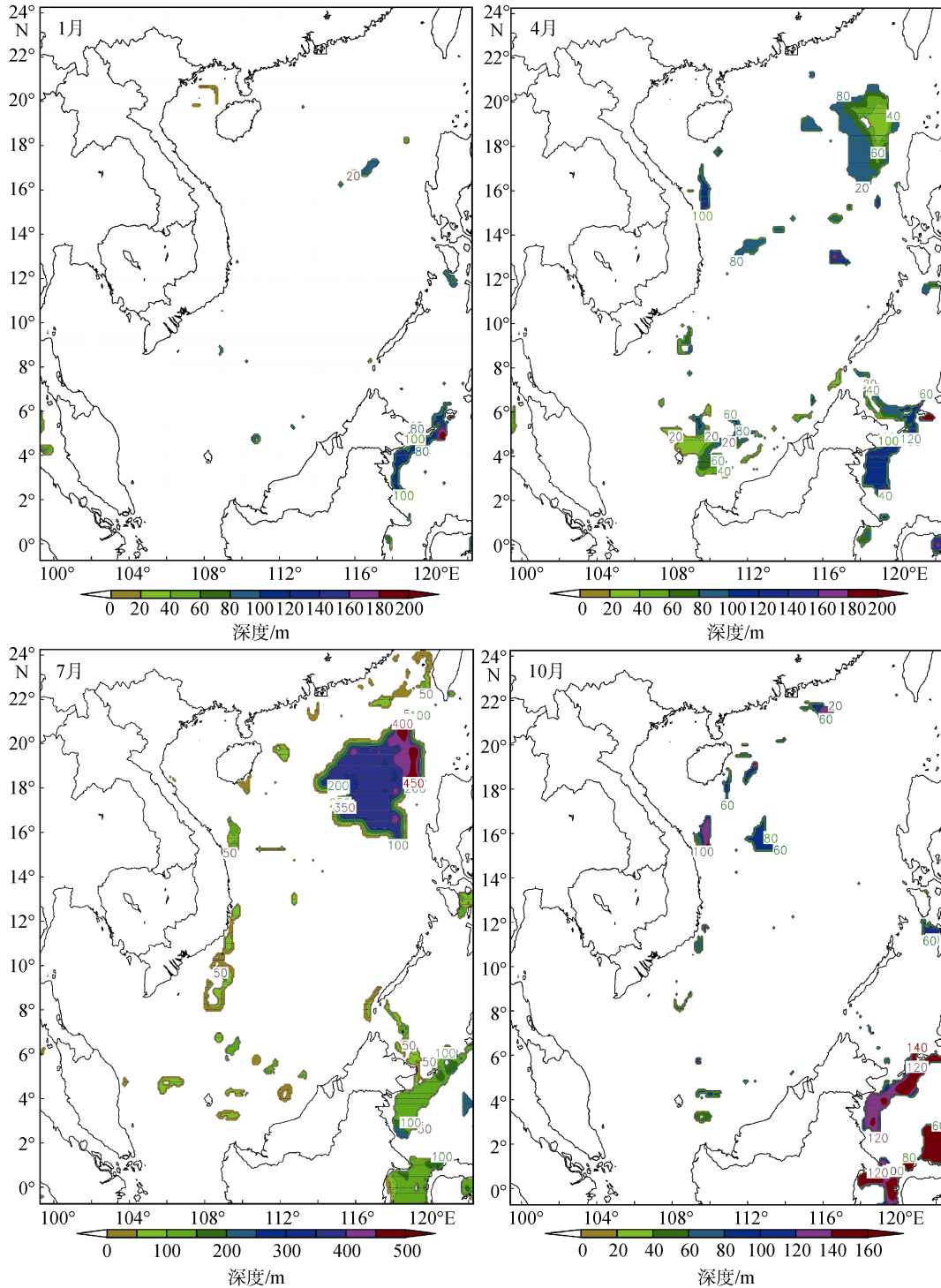


图4 1958~2007年南海声速双跃层1、4、7、10月气候平均深度(m)

Fig. 4 Climatic average depth (m) of the double spring layer in the SCS from 1958 to 2007

现冬季的分布态势，同时又保留了夏季的特征，声速双跃层范围明显缩小。与夏季相比，秋季双跃层厚度和强度明显减弱，强度为 $0.2\sim 0.3\text{ s}^{-1}$ 。声速双跃层范围比春季大，深度比春季深，强度比春季强。

4 声速负跃层的时空变化

沿岸上升流使得下层冷水涌升，在水平流场作用下，近表层低盐冷水向外海夹卷，而次表层外海高盐暖水向海岸夹卷，声速负跃层^[9]由此产生。从表4可以

看出, 声速负跃层 50 年内发生概率高值区主要在泰国湾、红河以西沿岸、珠江口-汕头一线近海、马六甲海峡以及湄公河出海口, 但有的月份也出现于加里曼丹岛西北海域(秋季)。从季节分布(图 5)来看, 负跃层主要发生在秋、冬季, 其概率分布值较全年其他月份大。

从图 5(7 月)和图 5(4 月)来看, 夏季声速负跃层出现概率和范围大于春季, 但是小于冬季和秋季, 主要高值区位于北部湾和湄公河出海口海域, 发生概率在 40% 以上。至 8、9 月份, 声速负跃层发生在

红河, 湄公河, 珠江口海域的概率在 70% 以上, 稳定存在于广东沿海的狭长水域。声速负跃层上界深度夏季最深(图略), 中心深度约 300 m, 分布形态与双跃层深度高值区一致, 厚度、强度分布也和双跃层相应高值区一致, 中心最大值分别为 90 m 和 3.5 s^{-1} , 均为全年最大值。声速负跃层夏季的这三个特征高值中心稳定维持可能与西南季风、黑潮入侵有关。

冬季初期, 在粤东沿岸海区和广东外海深水区域存在一支东北方向的海流, 即南海暖流, 在珠江

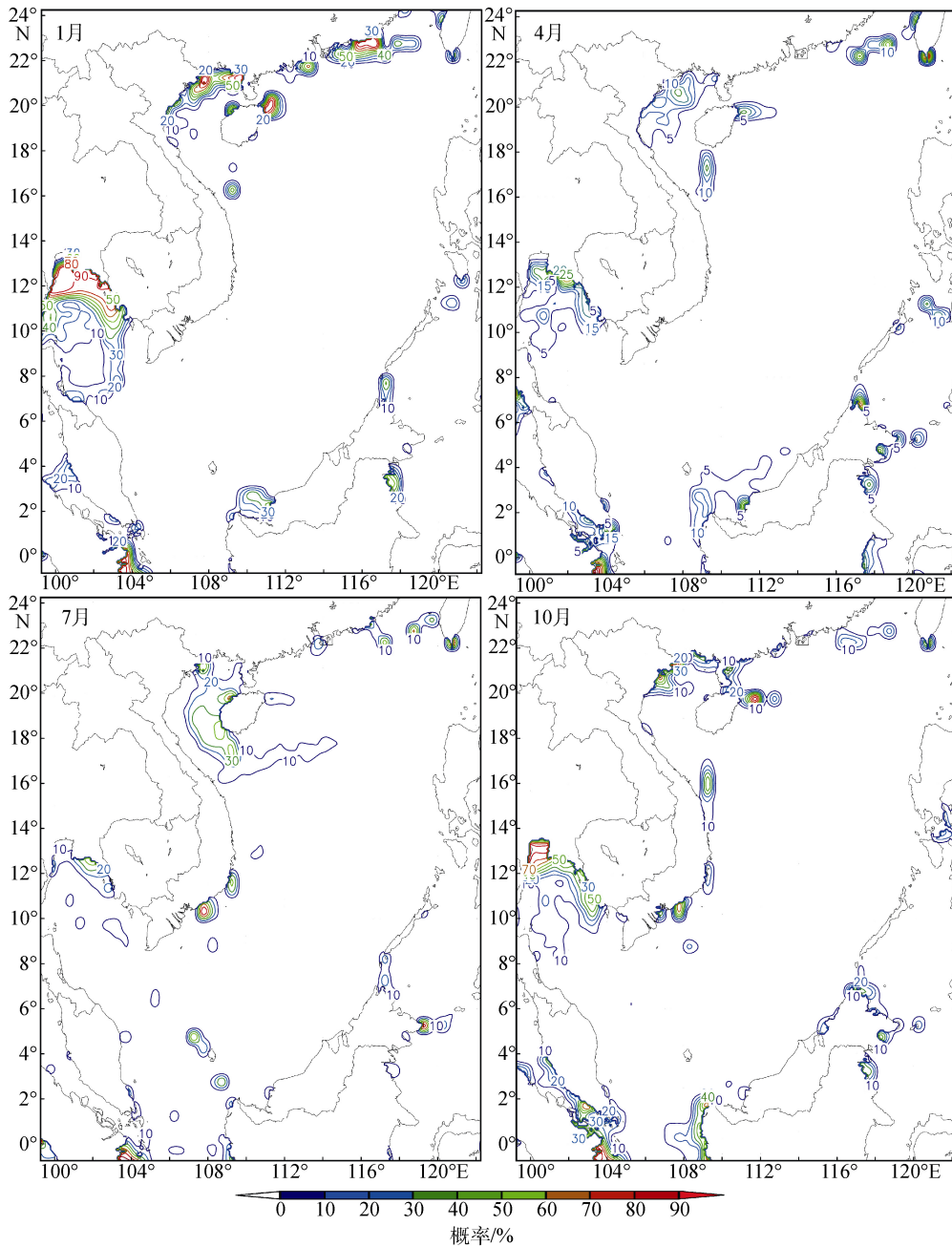


图 5 1958~2007 年南海声速负跃层 1、4、7、10 月发生概率空间分布(%)

Fig. 5 Occurrence probability (%) distribution of the negative spring layer in the SCS from 1958 to 2007

水淡水和南海暖流共同作用的影响下, 22°~23°N 附近存在发生概率高值中心(图 5(1 月))。在珠江至汕头外海、北部湾、泰国湾北部海区, 海南岛以东海区, 声速负跃层出现概率在 80%以上, 尤其是泰国湾和北部湾海区, 终年有声速负跃层存在。这是因为这两大海湾的环流性质与其他流域不同, 终年为气旋式循环, 方向不随季风改变, 这种气旋式环流可造成强烈沿岸上升流, 而南海沿岸海区多为江河径流形成的低盐水系, 外海则主要是来自太平洋的高盐水系, 冬季河口附近海区盐度自上而下几乎成均匀分布, 沿岸上升流将下层冷水涌升, 在水平流场的作用下, 近表层低温、低盐的海水向外海的夹卷以及次表层外海高盐、高温的海水向岸的夹卷作用造成沿岸声速负跃层的出现。冬季声速负跃层深度、厚度和强度远远小于夏季, 大值区均在泰国湾、北部湾和粤东沿海。

春季, 随着气温的增高, 近岸海域表层海水得到加热, 与冬季来自夹卷作用下次表层高盐、高温的海水的垂直梯度减小, 南海海域的声速负跃层范围整体缩小, 出现概率也开始小于 10%, 至 5 月份降到全年范围最小, 珠江至汕头外海的声速负跃层完全消失。

秋季, 受气温降低、季风减弱和沿岸上升流的作用, 声速负跃层出现概率增大, 泰国湾-湄南河出海口附近的声速负跃层发展旺盛, 出现概率均在 90%以上, 有明显南伸的趋势。声速负跃层深度、厚度和强度的分布范围较春季大, 强度较春季强。

5 结论

通过对南海三类声速跃层发生概率及其特征量季节变化的分析, 初步得到以下结论:

- 1) 南海海域三类声速跃层存在明显季节性变化, 且主要表现在声速跃层的深度和分布范围上。
- 2) 夏季, 主跃层出现概率最高, 空间分布最广, 深度大都较浅, 40 m 跃层深度等值线可以作为分界线, 其东南部和西北部呈现相反的变化, 声速主跃层厚度为全年最厚, 基本都在 50 m 以上, 与全年其他季节相比, 声速主跃层强度值达到最大。夏季声速双跃层出现概率和出现概率的空间分布范围均为最大, 最大厚度基本都在 150 m 以上, 与全年其他季节相比, 声速双跃层强度值达到最大。夏季声速负跃层出现概率和范围大于春季, 但是小于冬季和秋季, 北部湾和湄公河出海口海域声速负跃层发生概率在

40%以上, 其深度、厚度和强度值均为全年最大。

3) 冬季, 声速主跃层范围为一年中最小, 跃层上界深度整体呈西深东浅分布且超过 70 m 的跃层范围为全年最广, 跃层厚度较薄, 强度全年最弱, 大都不超过 0.25 s^{-1} 。冬季声速双跃层在沿岸海域发生概率远远大于深水海盆, 无跃区全年最多, 跃层范围为一年中最小, 跃层厚度不超过 30 m, 为全年最薄, 强度仅 0.25 s^{-1} 左右, 为全年最弱。冬季声速负跃层, 在近岸海区尤其是泰国湾和北部湾海区, 出现概率在 80%以上, 声速负跃层深度、厚度和强度远远小于夏季, 大值区均在泰国湾、北部湾和粤东沿海。

4) 春季, 主跃层上界深度的全海域平均值全年最浅, 在近岸和陆架海区, 主跃层厚度一般不超过 10 m, 大部分海域跃层强度较弱, 一般稍大于 0.2 s^{-1} 。春季声速双跃层在北部湾以南的越南沿岸出现概率最高, 海南岛以东海域出现大范围双跃层区, 声速双跃层厚度逐渐增加, 大部分海域跃层强度仍然较弱, 一般稍大于 0.2 s^{-1} , 不超过 0.4 s^{-1} 。春季负跃层范围整体缩小, 出现概率小于 10%, 出现概率在 5 月达全年最低。

5) 秋季, 声速主跃层范围与夏季相比明显缩小, 但较春季大, 深度的低值区开始出现, 深度比春季深, 声速主跃层厚度较夏季明显减弱, 跃层强度比春季强。声速双跃层范围明显缩小, 与夏季相比, 秋季声速双跃层厚度和强度($0.2\sim 0.3 \text{ s}^{-1}$)明显减弱, 跃层范围比春季大, 深度比春季深, 强度比春季强。声速负跃层秋季出现概率增大, 泰国湾-湄南河出海口附近的声速负跃层发展旺盛, 出现概率均在 90%以上, 其深度、厚度和强度的分布范围较春季大, 强度较春季强。

借助于气候平均态的声速序列资料, 分析南海声速跃层的示性特征, 得到的结果具有一定借鉴意义。但是影响声速跃层特别是声速负跃层季节变化的具体物理机制有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Lu Liangang, Chen Hongxia, Yuan Yeli. Spatial and temporal variations of sound speed at the PN section [J]. Journal of Oceanography, 2004, 60: 673-679.
- [2] 毛汉礼, 邱道立. 全国海洋综合调查报告[M]. 第三册. 北京: 科学出版社, 1964.
- [3] 赵保仁. 渤、黄海及东海北部强温跃层的基本特征及形成机制的研究[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 401-410.

- [4] 池建军, 骆永军, 孙祥年. 海洋卫星资料遥感数据同化在海洋声场研究中的应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(2): 63-70.
- [5] Chen C T, Millero F J. Speed of sound in seawater at high pressures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(1): 1129-1135.
- [6] 周丰年, 赵建虎, 周才扬. 多波束测深系统最优声速公式的确定[J]. 台湾海峡, 2001, 20(4): 411-418.
- [7] 刘贞文, 杨燕明, 许德伟, 等. 海水声速直接测量和间接测量结果分析[J]. 海洋技术, 2007, 26(4): 44-46.
- [8] Saunders P M . Practical conversion of pressure to depth[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11: 573-574.
- [9] 郝佳佳. 中国近海和西北太平洋温跃层时空变化分析模拟及预报[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [10] 侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. 海洋调查方法[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2006.
- [11] Chu, P C, Wang G H. Seasonal variability of thermohaline front in the central South China Sea[J]. Journal of Oceanography, 2003, 59: 65-78.
- [12] Chu P C, Fan C W, Lozano C J, et al. An airborne expandable bathythermograph survey of South China Sea, May 1995[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 21637-21652.
- [13] 姜霞. 海洋动力过程对南海海面温度的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [14] 兰健, 鲍颖, 于非, 等. 南海深水海盆环流和温跃层深度的季节变化[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 436-445.
- [15] 杜岩. 南海混合层和温跃层的季节动力过程[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002.
- [16] 侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. 物理海洋学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004.

Classification and seasonal variability of the sound velocity spring layer in the South China Sea

WANG Wen-jie^{1,2}, LIU Yu-di¹, QI Chen³, ZHANG Bin²

(1. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China; 2. Meteorological Station of 93968 Armed Forces, Urumqi 830075, China; 3. Ji'nan Military Representative Office of Second Artillery Force, Ji'nan 250031, China)

Received: Jun., 25, 2012

Key words: simple ocean data assimilation (SODA); the South China Sea; sound velocity spring layer; seasonal variability

Abstract: The distribution of the sound velocity spring layer has important influence on military activities and ocean battlefield construction. The distribution form of the Sound velocity spring layer has its particularity due to the complicated seafloor topography in the South China Sea (SCS). Based on the monthly data of simple ocean data assimilation (SODA) during the past 50 years (1958-2007), the eigenvalue of three types of sound velocity spring layers in the SCS was calculated by using the vertical gradient method. The results show that all the three types of spring layers had maximum range, and minimum thickness and intensity values in winter. On the contrary, the main spring layers and double spring layers were vastest, shallowest, thickest and strongest in summer. The characteristics of three spring layers in autumn changed significantly than that in spring.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)