

南海海面高度、动力地形和环流的周年变化 ——TOPEX/Poseidon 卫星测高应用研究*

李 立 许金电 靖春生 吴日升 郭小钢

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

摘要 用 1993~1999 年的 TOPEX/Poseidon 卫星测高资料, 分析了南海海面高度距平场(SSHA)的平均周年变化; 结合历史水文资料, 反演了多年平均的逐月海面动力地形; 探讨了南海动力地形及其所反映的上层环流季节特征和演变规律. 分析表明, 南海大尺度环流的周年演替可分为 4 个阶段. 冬季(11~2月)南海环流表现为以北部气旋环流为主的气旋型双圈结构, 相关的特征还包括吕宋海峡的黑潮入侵和加里曼丹岛西北外海的东北向离岸流. 春季(3~4月)气旋型双圈结构解体, 北部的气旋型环流依然维持, 南部环流则向反气旋型演变, 大尺度环流结构呈现偶极子特征. 夏季(5~7月)和秋季(8~10月)海盆内部不存在明显封闭的大尺度环流, 环流以西南-东北流向的季风急流为主要特征, 但夏、秋流态有较大差别. 5~7月季风急流贴中南半岛北上, 在海南岛东南 18°N 附近沿地形折向东形成反气旋型弯曲, 穿越南海后再折向东北. 8~10月季风急流在 13°N 附近即离开中南半岛海岸进入海盆中部, 其流态转变为气旋型. 在春、夏、秋三季, 黑潮的入侵都不明显. 上述变化规律显示南海环流的动力调整在季风盛期过后就已经开始.

关键词 南海 卫星测高 海面高度 动力地形 环流

南海是一个半封闭的深水海盆, 海底地形复杂多样, 既有宽广的大陆架, 又有陡峭的大陆坡和辽阔的深水海盆. 南海夏季盛行西南季风, 冬季则东北季风强劲. 季风的变换不仅使南海的环流呈现明显的季节差异, 而且使南海的环流结构处在不断的演变之中. 受观测手段的限制, 在卫星高度计投入业务化运行之前, 阐明南海环流的季节演变过程和规律一直是摆在海洋学家面前的一道难题.

卫星测高是 1980 年代以后发展起来的对海面高度变化进行直接观测的手段, 它的出现使我们有可能对全球海面高度场实现长时间、大范围的连续监测^[1]. 例如, 1992 年 8 月发射的 TOPEX/Poseidon(简称 T/P)高度计卫星采用间隔约 10 d 精确重复轨道, 已在轨运行了近 9 a, 是迄今为止定轨和测量精度最高的卫星之一^[2]. 因此, T/P 为研究南海海面动力地形的平均周年变化提供足够长的时间序列, 使得南海环流季节演变过程的研究成为可能.

最近已有若干著者将 T/P 卫星高度计资料应用于南海海面高度场周年和年度间变化的研究^[3~7]. Shaw 等^[3]和 Ho 等^[4]的结果表明南海海平面波动的两个主要 EOF 分量均呈年周期变化,

2002-05-10 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(编号: G1999043807, G1999043805)、国家自然科学基金(批准号:49976010)和科学技术部攀登计划资助项目

但相互间位相不同. 二者都注意到夏季在越南中部可能存在离岸急流, 还都讨论了厄尔尼诺对南海的海平面的可能影响, Ho 等^[4]并成功地分离出与厄尔尼诺关联的第三 EOF 模态(占 10% 方差).

以上著者^[3-5,7]所讨论的“海面高度”实际上多为海面高度距平, 即将某一空间位置的“海面高度”定义为相对该点某一参考时段平均海平面的差值, 以避免共线法处理卫星高度计资料时所带来的问题. 因此, 在上述工作中“海面高度”只包含变异, 不包含平均高度场, 比如在吕宋海峡黑潮两侧的海面高差就没有反映出来. 为此, 我们在前一工作中将历史水文资料和卫星高度计资料结合, 反演海面动力地形, 研究了南海冬、夏季典型季风期表层多年平均环流的结构^[6]. 本文采用类似的方法处理 1993~1999 年的 T/P 卫星高度计资料, 研究南海多年平均动力地形的季节变化规律和表层环流的季节演替过程.

1 T/P 海面高度距平资料及其处理

本文采用美国太空总署(NASA)下属 Goddard Space Flight Center 提供的网格化 T/P 卫星高度计逐月海面高度资料¹⁾. 该资料给出 T/P 数据相对 1993 年平均参考面的逐月海面高度共线差值(SSHA, 即海面高度距平, 下同), 共线数据所依据的卫星星历的轨道精度的均方值约 2~3 cm. 数据业经各类必要校正并内插到 1° 经度 × 1° 纬度的整数经、纬度网格点上. 内插采用各向同性高斯函数加权平均, 加权半径为 3°.

从上述资料中 1993 年 1 月至 1999 年 12 月南海海域的数据出发, 我们首先求出各网格点 7 年的 SSHA 均值作为新的参考面, 导出新的 SSHA 时间序列, 然后计算各月的多年平均值, 从而求出南海多年平均的逐月 SSHA 场. 由于我们关注的主要是南海海盆本身, 泰国湾、巽他陆架和苏禄海的数据不包含在分析之中.

与文献[3~5]类似, 本文仍采用 NASA 给出的标准潮汐校正方法, 对浅水区未做进一步的改正, 但剔除了北部湾等少数离岸过近、潮汐影响过大的网格点(图 1). 虽然标准潮汐校正未能完全扣除浅海处潮汐导致的测量误差, 但有关分析表明, 经过低频平滑后 SSHA 时间序列与相邻南海沿岸沿潮站的月平水位时间序列间的均方误小于 4 cm^[8]. 由于本文分析得是 7 年资料的平均结果, 就每个月而言, 大约有 21 独立观测样本参加平均, 残余的潮汐误差因此得到进一步平滑和抑制.

2 南海海面高度季节波动能量的空间分布

图 1 给出根据上述逐月 T/P 资料求得的各格点 SSHA 振幅(均方根值)的空间分布, 以揭示南海海面高度季节波动的能量分布特征. 图中南海海面高度季节波动最为激烈的海域有两处: 一处位于南海东北部吕宋岛西北侧, 高值区沿东北—西南走向呈带状分布, 另一处位于加里曼丹岛北侧, 二者中心振幅均高于 11 cm. 除此之外, 图中还显示了台湾岛以东海域也有一个强波动区.

Ho 等^[4]曾做过类似的方差分析, 并在吕宋岛西北至越南南部外海一线识别了 3 个动力上活跃的区域, 中心分别位于 A: (17°N, 118°E)、B: (15°N, 114°E)、C: (12.5°N, 110°E)附近, 振幅分别为 11, 8, 10 cm. 不过他们所依据的不是网格化的月平值, 而是每次卫星过顶时的 SSHA

1) Koblinsky C J, Ray R, Beckhey B D, et al. NASA Ocean Altimeter Pathfinder Project. Report 1: Data Processing Handbook, NASA/TM- 1998-208605, NASS, GSFC, Geenbelt, 1999

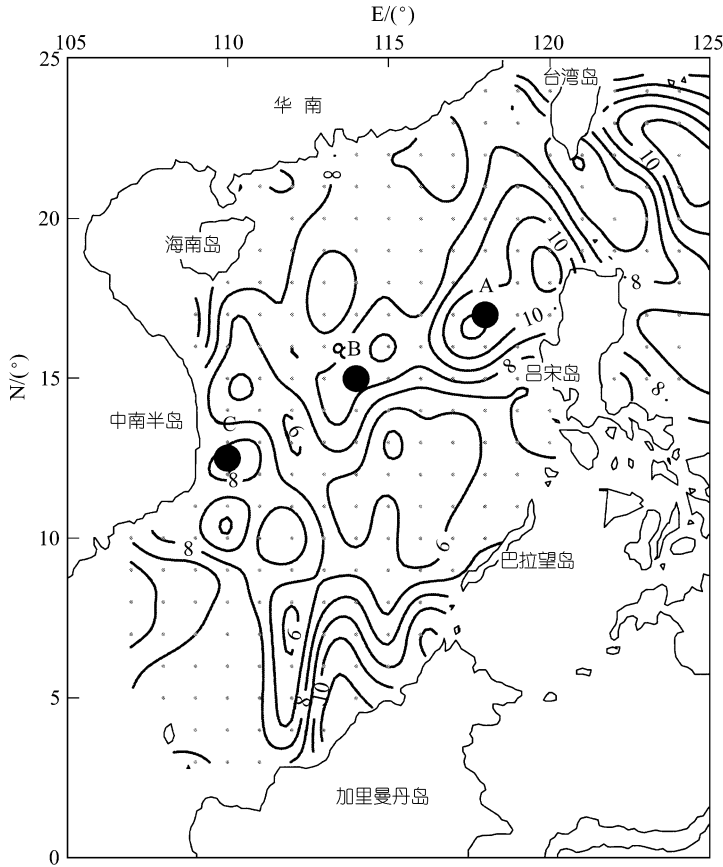


图 1 本文所引用的 T/P 卫星高度计网格化 SSHA 数据点及其 SSHA 振幅 (均方根值)的空间分布

测值. 比较表明, 图 1 同样揭示了沿吕宋岛西北至越南南部外海一线分布的高值带, 但 C 区的能量明显偏低, A 区则向吕宋海峡延伸. 由于 Ho 等^[4]所依据的是大约 10 d 一次的沿轨测值, 而图 1 所依据的是网格化的月平均值, 一些中尺度能量在网格化过程中已被平滑所滤去. 因此, 上述比较表明 C 区的能量有相当一部分应为中尺度过程所致, 该海域为中尺度变异活跃的海区.

此外, 图中位于加里曼丹岛北侧和台湾以东的高能区表明这两个海域的海面高度也存在很强的季节变化. 有观测表明冬季加里曼丹岛北侧一带(112°E 附近)有北向逆风流发育^[9](文献[10]称之为纳土纳离岸流), 地转流速达 80 cm/s. 因此, 这一高能区可能与该强流的季节性发育有关. 台湾以东的高能区位于南海之外, 不属本文研究范围, 但值得今后深究.

3 南海 SSHA 的平均周年变化

图 2 给出根据 1993 年 1 月~1999 年 12 月 T/P 卫星高度计观测结果导出的南海多年平均 SSHA 的逐月分布图. 此前, Ho 等^[5]依据 1992 年 12 月~1997 年 11 月的 T/P 资料也曾做的类似分析. 比较表明, 虽然本文所依据的资料长度增加了 40%(2 年), 并包含了一次强 El Niño 事件, 两项分析结果基本一致, 说明南海海平面的周年变化相当规律, 同时也验证了本文资料处理方法的合理性.

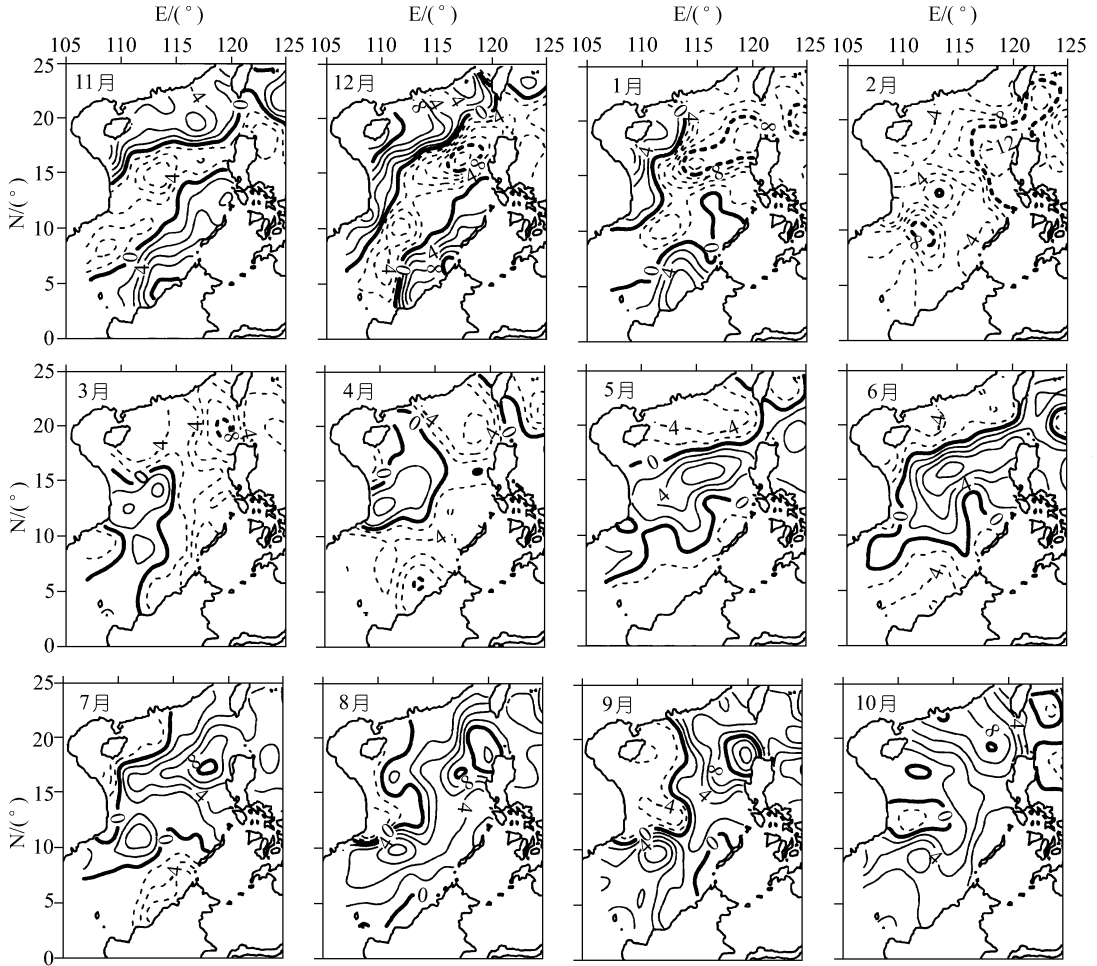


图 2 从 T/P 资料(1993 年 1 月~1999 年 12 月)导出的南海多年平均逐月海面高度距平分布(单位: cm) 虚线为负值

由于本分析不包含北部湾、泰国湾和巽他陆架的数据, 因此避开了这一带沿岸很强的季节性增减水信号影响, 使得 Ho 等^[5]所强调的东西向海平面季节波动显得没那么突出. 从图 2 不难看出, 南海海盆 SSHA 周年变化的轴线呈西南-东北走向, 其两侧的 SSHA 波动均与之位相反. SSHA 的分布主要有两种模态, 在东北季风的强盛期(11, 12, 1 月)低水位沿该轴线呈带状分布, 两侧(亚洲大陆和加里曼丹、巴拉望岛沿岸)为高水位. 相反, 在西南季风的强盛期(5~8 月)高水位沿该轴线呈带状分布, 两侧为低水位. 一般认为南海的东北季风强盛期为 12~2 月, 西南季风强盛期为 6~8 月, 因此水位场两种模态间的转变似乎比季风的转换早大约 1 个月.

在多数月份沿轴线分布有南北两个同相位的中心(或高或低). 主中心在北面, 位于吕宋岛以西外海, 较强; 次中心在南面, 多出现在中南半岛东南, 较弱. 在季风转换月份(3, 4 月和 10 月)南北两中心水位相位相反, 呈弱偶极子结构, 3, 4 月份北低南高, 10 月份则北高南低, 反映了 SSHA 分布从冬(夏)季模态向夏(冬)季模态转变过程中, SSHA 分布的调整.

Shaw 等^[3]曾以 1994 年 8 月一个 T/P 周期的结果为例, 认为常年夏季南海的 SSHA 呈南北

分布的偶极子结构. 我们的结果表明, 就多年平均而言这种偶极子结构并不显著, 不是夏季 SSHA 分布的主要特征. 由于只引用了一个 T/P 周期的观测结果, 而南海环流结构又处在不断的变化之中, Shaw 等^[3]之所见很可能只是某一较短时段的情况而已.

图 2 还表明中南半岛中部外海确是一个动力学上值得注意的区域^[3,5]. 在冬、夏季风强盛期之末、季风转换开始之前, SSHA 分布格局的转变均首先出现于此. 从 2 月开始沿北纬 13°N 有一脊线出现, 并逐月向东发展, 5 月 SSHA 分布已呈夏季模态. 与此类似, 从 8 月开始沿北纬 13°N 有一谷线发展, 至 11 月 SSHA 分布转变为冬季模态. 关于 SSHA 分布的季节转变在中南半岛中部外海首先出现的原因目前尚难得出结论. 这里是中南半岛凸出之处, 陆架最窄, 地形似乎是不可忽视的原因之一.

从上述分析不难看出, 就多年平均而言, SSHA 分布表明冬季南海的环流总体呈气旋型发展, 夏季则呈反气旋型发展, 这与我们早先的研究结果一致^[6]. 但是必须指出, 由于 SSHA 系距平值, 图 2 所给出的只是南海海平面的季节波动分量, 所反映也只是环流的季节波动分量的发展形态. 南海平均海平面的高度分布, 以及它所反映的平均背景环流并不包含在图 2 的分析之中.

4 动力地形的反演

深海环流通常满足地转近似, 因此海面高度场是环流场的反映. 由于以往没有大范围观测海面高度的有效手段, 海洋研究中习惯用海面相对某一等压面的“动力高度”来间接估算海面高度, 描述环流场. 海面动力高度(H_d)实际上是对海面重力势高低的一种近似测度, 它用海面因水柱密度不均匀而造成的海面高度异常(h_s)来度量海面的重力势, 在国际标准单位制中它被更准确地称之为重力势异常:

$$H_d = gh_s,$$

式中 g 为重力加速度. 通常也把海面重力势异常的分布称为动力地形.

显然, 海面重力势异常 H_d 由其均值($\overline{H_d}$)和变异(H'_d)两部分构成:

$$H_d = \overline{H_d} + H'_d = \overline{H_d} + gh'_s, \quad (1)$$

式中第 1 项为多年平均的海面重力势异常, 可由研究海区的多年平均温、盐度场求得. 卫星高度计则提供了第 2 项中 h'_s 的近似估计. 由于卫星高度计导出的 SSHA 是实际的海面高度异常, 包含其正压海面高度距平分量, 通过上式求得的 H_d 与完全由海洋水文测量导出的海面重力势异常有所差异(后者不含正压分量). 这种差异在浅海陆架较为明显, 应予注意.

本文用上式估算海面重力势异常, 计算时 g 作为常数处理. 该方法在南海的应用已在前面工作中得到验证^[6,11], 其结果与 ARGOS 漂流浮标、走航式 ADCP 等海流直接观测, 以及 CTD 动力计算所得出的南海大尺度环流特征相一致.

5 南海海面动力地形的周年变化分析

采用 Levitus94^[12]所提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 温、盐度平均场, 我们计算了相对于 1000 m 参考面的南海海面平均重力势异常分布(即平均动力地形, 详见文献[6]之图 5). 对水深小于 1000m 的海域, 采用了经典的沿底积分法向岸延拓. 然后根据(1)式, 从月平均海面高度距平求出相应的重力势异常的距平值, 叠加在该格点的平均重力势异常值上, 得到南海各月的海面的动力地

形(图 3). 南海逐月海面重力势异常的分布大致可分为 4 种形态, 其出现时段分别为: 11~2 月, 3~4 月, 5~7 月, 8~10 月.

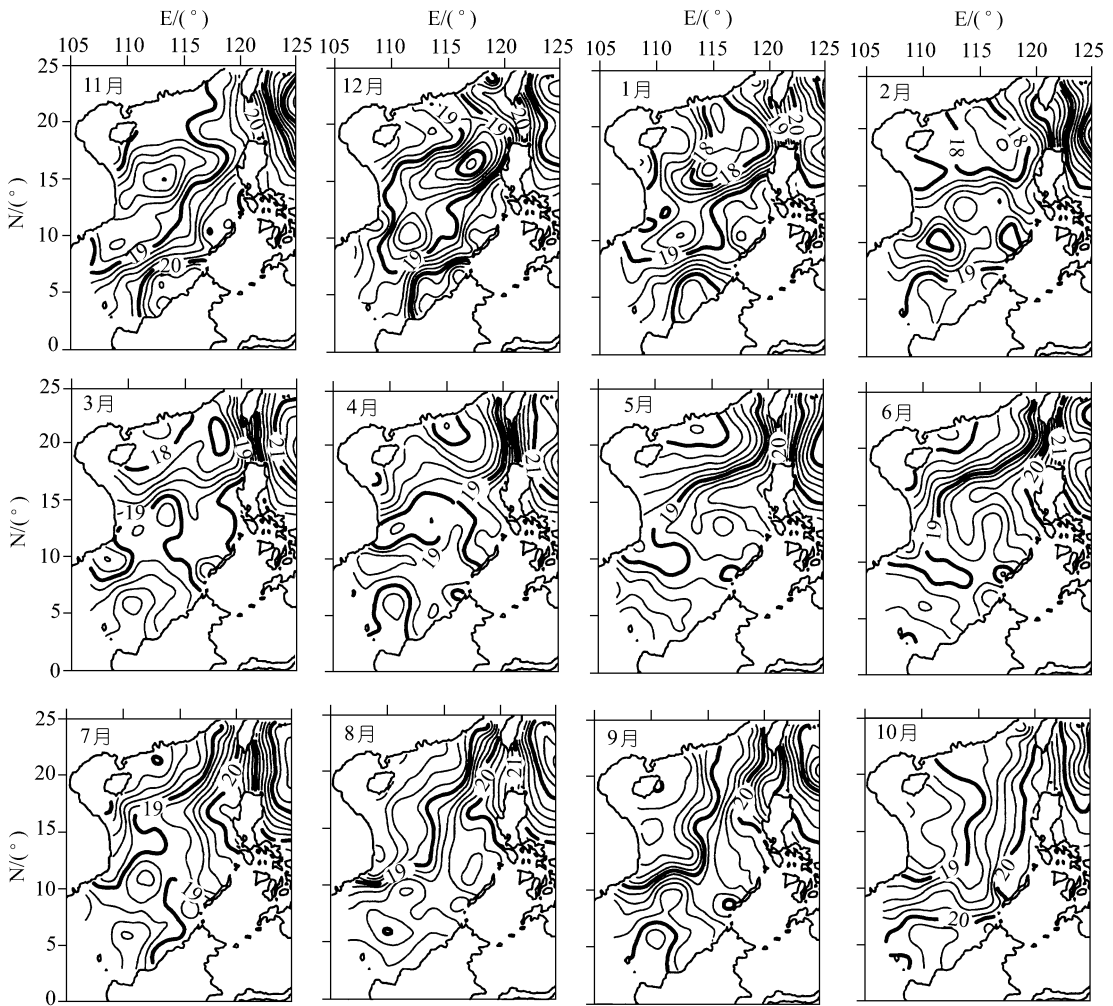


图 3 从 T/P 资料(1993 年 1 月~1999 年 12 月)反演的南海相对 1000 m 参考面的多年平均逐月海面动力地形(单位: m^2/s^2)

11~2 月南海的动力地形属冬季形态, 以 12 月和 1 月最为典型. 其海面动力地形的分布格局, 大致呈盆状, 海盆中部为一低槽, 四周沿岸较高. 低槽大抵沿西南-东北方向轴线伸展, 南北各有一个低中心沿轴线分布, 其中北中心的空间尺度明显偏大. 这一格局反映了冬季以北部次海盆尺度气旋环流为主的气旋型双圈(double gyre)环流结构, 是南海冬季环流的基本特征, 与以往的认识一致^[13,6]. 此外, 冬季海面动力地形分布的基本特征还包括: (i) 台湾岛西南部海域有一高位水舌自吕宋海峡向西北延伸进入南海东北部, 其脊线直逼闽粤近海, 反映了冬季黑潮入侵对南海东北部环流的影响; (ii) 在加里曼丹岛西北沿岸动力地形偏高, 陆架外缘等位线密集, 大致呈西南-东北走向, 表明有较强海流发育. 上述冬季形态在 2 月份已有所变化,

不过总体上依然呈现气旋型双圈环流特征。

3~4 月份是季风的转换期。随着东北季风的减弱,南海南部的低中心明显缩小、强度减弱,并西移到湄公河口一带,已不成为此间动力地形分布的主要特征。4 月有一脊线沿 12°N 发育,海盆中部和南部已被较高重力势所控制。与此相反,北部的低中心虽有所减弱,并向闽粤沿岸靠近,但仍是支配南海北部的主要特征。因此,春季南海动力地形分布的总体形态呈偶极子状。此外,加里曼丹岛西北沿岸的高位区及其所伴随的密集等值线亦趋于消失。上述变化表明,3,4 月间南海环流已进入调整期,冬季北部的气旋型次海盆尺度环流仍然维持,南部则向反气旋型环流演变,气旋型双圈结构解体。因北部的气旋型次海盆尺度环流向东北方向移动,黑潮入侵似乎被逼退,其影响减弱。

夏季西南季风通常在 5 月中旬爆发,但 5 月的海面动力地形分布已呈夏季形态(参见文献[6]之图 6(b))。5~7 月的分布形态大体相似,南海西北侧(华南和中南半岛沿海)动力地形偏低,其东南侧(吕宋、巴拉望岛一线)则偏高,沿 15°N 有一脊线自吕宋岛向西延伸。在大陆一侧,等值线密集,大致为西南-东北走向,呈反气旋型弯曲。5~7 月的分布表明这一时期南海海盆的环流大致呈反气旋型(以 6 月最为典型)。南海季风急流沿中南半岛北上,在海南岛东南 18°N 附近沿地形折向东,穿越南海后再折向东北,在台湾海峡南口形成局部的气旋型弯曲。

南海海面动力地形分布特征的一个重要变化出现在 8 月。此时总体分布形态仍然维持西北低、东南高的格局,但是原来位于大陆一侧的密集等值线向东推移,其大尺度形态由反气旋型弯曲变成气旋型弯曲。在中南半岛南部等值线密集,表明有离岸海流发育,其位置与越南离岸流^[3,4,10]相符。8 月出现的这一分布形态在 8~10 月间得以维持(在 10 月得到进一步发展),为方便起见我们称之为秋季形态,虽然一般认为 8 月属夏季。8~10 月动力地形的分布形态表明从 8 月开始南海环流已有重要调整,随着越南离岸流的出现,环流形态从反气旋型向气旋型转变,酝酿着 11 月的下一个突变。对于夏秋间的转变越南离岸流的形成似乎是一个重要的标志。

必须说明,夏秋两季(5~10 月)南海内部的大尺度环流均呈西南-东北流向,不存在明显封闭的大尺度环流,上面有关气旋(或反气旋)形态的相关讨论仅指其流态而已。

6 讨论

6.1 南海大尺度环流季节演变的基本特征

综上所述,南海海面动力地形的平均周年变化表明南海大尺度环流的周年演替大致可分为四个阶段(表 1)。冬季(11~2 月)南海环流的基本特征是以北部次海盆尺度气旋环流为主的气旋型双圈环流结构。与该结构关联的特征还包括吕宋海峡的黑潮入侵和加里曼丹岛西北外海的东北向离岸流。春季(3~4 月)是南海环流的转换期,北部的次海盆尺度气旋型环流依然维持,南部则向反气旋型环流演变,大尺度环流结构呈现偶极子特征,与此同时吕宋海峡黑潮入侵和加里曼丹岛西北外海的东北向离岸流减弱或消失。夏季(5~7 月)南海内部的大尺度环流呈西南-东北流向,不存在明显封闭的大尺度环流。南海季风急流沿中南半岛北上,在海南岛东南 18°N 附近沿地形折向东形成反气旋型大弯曲,穿越南海后再折向东北,在台湾海峡南口形成局部的气旋型弯曲。秋季(8~10 月)大尺度环流仍为西南-东北流向,但随着越南离岸流的出现,南海季风急流在 13°N 以北离开中南半岛海岸,其流态从反气旋型向气旋型转变。在春、夏、秋 3 季,黑潮的入侵都不明显。

表 1 南海环流主要特征的周年变化

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
北部气旋型环流	++	++	++	++							++	++
南沙气旋	++	++									+	++
黑潮入侵	++	++									++	++
纳土纳离岸流 ^{a)}	++	++									++	++
东北向季风急流(反气旋弯曲)					++	++	++					
东北向季风急流(气旋弯曲)								++	++	+		
越南离岸流 ^{a)}								++	++	+		

a) 借用文献[10]的名称

表 1 给出了各月南海平均环流的主要特征, 加号的多寡代表特征的强弱. 表中多数特征都有明显的季节性, 惟独南海北部的气旋型环流持续时间长达 6 个月(某些年份可更长^[11]), 横跨冬、春两季. 一些研究表明该气旋环流的形成和维持与南海北部风的旋度有关^[3,14,15].

以上分析揭示的另一个重要现象是: 南海海洋环流结构季节调整比我们通常所理解的开始的早. 一般认为, 南海 12~2 月为冬季(东北季风盛期), 6~8 月为夏季(西南季风期), 其间为转换期. 而本文识别的环流形态季节转变的发生时间除春季外都提前一个月, 显示南海环流的动力调整在季风盛期过后就已经开始. 海洋的这种调整及其所伴随的 SST 变化, 可能进一步影响大气, 成为南海上空大气环流变化的诱因之一.

6.2 南海两种不同类型的中尺度环流

80 年代以来的一系列观测表明南海常呈现复杂的多涡环流结构. 例如, 1980 年代南沙调查揭示了南海南部冬(夏)季以南沙(反)气旋为主, 嵌套多个局部涡旋的多环结构^[9]; 1992 年南海东北部环流合作调查^[16]和 Soong 等^[17]报道了冬、春季南海北部“(吕宋)冷涡”; 以及 1998 年南海季风实验期间在春夏之交越南以东外海的反气旋强涡(“越南暖涡”)^[18,11]等等.

从本文的结果看来, 上述中尺度环流结构可分为两类. 其中一类在上述分析中清晰可见, 说明它们存在相当规律的季节变化, 属于南海季节环流的一部分. 冬、春季南海北部的气旋型次海盆尺度环流和冬季南海南部南沙气旋即属此类. 作者以为, 文献[16]和[17]所描绘的冬、春季南海北部的“(吕宋)冷涡”实际上都是北部的气旋型环流在某一时刻的映象.

另一类中尺度环流结构虽有充分的观测证据表明他们的存在, 但在上述分析中并不明显, “越南暖涡”即属此类. 1998 年 6 月间的各项观测均表明, 在越南南部外海以 12°N, 111.5°E 为中心有一反气旋涡, 其最大流速接近 1 m/s, 尺度大于 300 km^[18,11]. 可是在图 2 和图 3 的同期分析中该现象并不显现. 这一差距表明, “越南暖涡”可能具有较强的中尺度变异性, 这种变异性使它呈现较大的年度间和空间变化, 从而在上述分析中无法显现.

本文前面的分析系多年平均结果, 所涉及的仅仅是南海上层环流的多年平均的定常结构. 因为通常中尺度变异过程(如黑潮入侵、中尺度涡环、锋面涡、上升流事件等)的时间尺度要比周年变化小一个量级, 其变化不具备或者不完全具备季节性, 所以在上述平均处理的过程中, 中尺度过程的非季节性的特征多被平滑所滤除. 这一解释还得到了对图 1 中海面高度季节波动能量空间分布所作讨论的支持.

同理, 本文涉及黑潮的入侵, 所指的也只是具有定常特征的黑潮季节性侵入. 事实上黑潮的入侵常常表现为非季节性的中尺度变异过程, 而这类过程并不包含在上述分析之中.

6.3 关于方法的两点说明

目前卫星高度计资料只给出相对于某一平均海平面的海面高度距平值(SSHA),它给出海洋变异(包括季节变化)的重要信息,但不含长期平均意义上的背景环流信息.为研究包括背景环流在内的环流特征,本文用 Levitus94^[12]的历史平均温、盐资料重建相对 1000m 表面的多年平均海面动力地形,然后与 T/P 资料结合反演动力地形.比较图 2 和图 3 可以看出二者的分布特征有明显不同,因此南海的背景环流不宜忽略.然而,由于 Levitus94 资料本身的局限性(引用历史测点的数量和质量、过分的平滑等),用它导出的多年平均海面动力地形的误差可能还比较大,有待以后改进.采用数值模型导出的平均海面高度^[19]是另外一种可能的选择,但对模型有很高的要求,并须严格的验证.

作者在早先南海环流的卫星测高研究中指出西部强化的南海季风急流是南海环流最主要的特征^[6].在该文资料处理过程中我们采用的是沿轨平均的 T/P SSHA 资料,平均区间为一个纬距,清楚地再现了南海季风急流.本文所引用的 1°×1°网格化 T/P 资料业经加权平均所平滑(加权半径为 3°),季风急流两侧的海面高度梯度因此被较强的平滑所减弱,因此南海季风急流的特征不如前一工作明显.

参 考 文 献

- 1 Calman J. Introduction to sea-surface topography from satellite altimetry. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1987, 8(2): 206~211
- 2 Fu L.-L., Christensen E J., Yamarone C A Jr. TOPEX/POSEIDON mission overview. J Geophys Res, 1994, 99: 24369~24382
- 3 Shaw P T., Chao S -Y, Fu L.-L. Sea surface height variations in the South China Sea from satellite altimetry. Oceanologica Acta, 1999, 22(1): 1~17
- 4 Ho C -R, Kuo N -J, Zheng Q, et al. Dynamically active areas in the South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data. Remote Sens Environ, 2000, 71: 320~328
- 5 Ho C -R, Zheng Q, Soong Y -S, et al. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/POSEIDON altimeter data. J Geophys Res, 2000, 105(6): 13981~13990
- 6 李 立, 吴日升, 郭小钢, 等. 南海的季节环流-TOPEX/POSEIDON 高度计应用研究. 海洋学报, 2000, 22(6): 13~26
- 7 Liu Q, Jia Y, Wang X, et al. On the annual cycle characteristics of the sea surface height in the South China Sea. Adv Atmos Sci, 2001, 18: 613~622
- 8 李 立, 吴日升, 李燕初, 等. TOPEX/POSEIDON 高度计浅海潮汐混淆的初步分析. 海洋学报, 1999, 21(3): 7~14
- 9 方文东, 郭忠信, 黄羽庭. 南海南部海区的环流观测研究. 科学通报, 1997, 42(21): 2264~2271
- 10 Fang G, Fang W, Fang Y, et al. A survey on the South China Sea upper ocean circulation. Acta Oceanographica Taiwanica, 1998, 37(1): 1~16
- 11 许金电, 李 立, 郭小钢, 等. 1998 年夏季季风爆发前后南海环流的多涡特征. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 44~51
- 12 NODC/NOAA. World Ocean Atlas CD-ROM Series 1994. NOAA/NODC, 1994
- 13 徐锡铨, 邱 章, 陈惠昌. 南海水平环流的概述. 见: 中国海洋湖沼学会水文气象学会编. 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议(1980)论文集. 北京: 科学出版社, 1982. 137~145
- 14 王卫强, 王东晓, 施 平, 等. 南海季风性海流的建立与调整. 中国科学, D 辑, 2002, 32(12): 995~1002
- 15 Liu Z, Yang H, Liu Q. Regional dynamics of seasonal variability in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 2001, 31: 272~284
- 16 许建平, 苏纪兰, 仇德忠. 黑潮入侵南海的水文分析. 见: 南海东北部海区环流课题组编. 中国海洋学文集(6), 南海东北部海区环流研究. 北京: 海洋出版社, 1996. 1~12
- 17 Soong Y S, Hu J -H, Ho C -R, et al. Cold-core eddy detected in the South China Sea. EOS, 1995, 76: 345~347
- 18 苏纪兰, 许建平, 蔡树群, 等. 南海的环流和涡旋. 见: 丁一汇, 李崇银, 主编. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 66~72
- 19 魏泽勋, 方国洪, 崔秉昊, 等. 南海的海面高度和输运流函数: 全球变网格模式结果. 中国科学, D 辑, 2002, 32(12): 987~994