

印度尼西亚群岛邻近海域 SST 对越赤道气流的影响*

刘秦玉 王韶霞

(青岛海洋大学物理海洋研究所物理海洋实验室, 青岛 266003)

摘 要 利用 COADS 资料研究了印度尼西亚群岛邻近海域海表面温度 (SST) 的季节变化特征, 并根据热带大气扰动量的低阶模式, 分析了印度尼西亚群岛邻近 SST 的季节变化对越赤道气流季节变化的影响。研究结果表明: 印度尼西亚群岛邻近海域年平均 SST 基本上关于赤道对称分布, 最高温度出现在赤道附近; 由于南海 SST 冬季较低, 冬季 (北半球) SST 的经向差最大值 (大于 2°C) 出现在 110°E 附近; 夏季 (北半球) 最大经向温差出现在 130°E 和 110°E 附近, 它有利于 105°E 越赤道气流的形成和维持。

关键词: 越赤道气流; 季节变化; 海表面温度

1 引言

赤道 105°E 处的越赤道气流是亚澳季风系统中一个重要组成部分, 北半球夏季该气流来源于澳大利亚冷性高压, 是南海西南季风的主要成员之一, 其强弱与整个亚澳季风环流中其他成员有密切的关系^[1]。另外, 105°E 越赤道气流位于印度尼西亚群岛的西侧, 印度尼西亚群岛本身的地形与陆面加热过程也会影响到越赤道气流的强弱与大小。除此以外, 印度尼西亚群岛邻近的海域 (南海、东印度洋、班达海、阿拉弗拉海、西太平洋、珊瑚海等) 的 SST 及上层海洋热状况也会通过海气相互作用影响越赤道气流。

根据 COADS (1950~1992 年) 资料得到赤道海面风经向分量季节分布特征图 (图 1)。在印度尼西亚群岛及其邻近海域有两支明显的季风性质越赤道气流: 105°E 附近越赤道气流与 125°E 附近越赤道气流。这二支气流转向时间都在 4 月和 11 月, 北半球冬季 105°E 越赤道气流比 125°E 越赤道气流强, 北半球夏季 125°E 越赤道气流较强。在赤道西太平洋海域 (130°E ~ 165°E) 仅在冬季出现越赤道气流而夏季经向风速几乎为零。研究表明: 海洋大陆赤道缓冲区的对流上升运动, 澳洲大陆冷性高压以及西太平洋副热带高压都是影响夏季越赤道气流的重要因子。其中, 澳洲大陆冷性高压对夏季 105°E 越赤道气流的影响最早、最重要^[2]。海洋大陆赤道缓冲区的对流上升运动必定会受到印度尼西亚群岛邻近海域 SST 的影响, 但是这种影响是加强还是削弱越赤道气流? 在越赤道气流形成中该影响起多大作用? 为了回答上述问题, 在本文的研究中, 不考虑海陆差异引起的季风环流, 只讨论近赤道海域 SST 的季节变化对越赤道气流的影响。

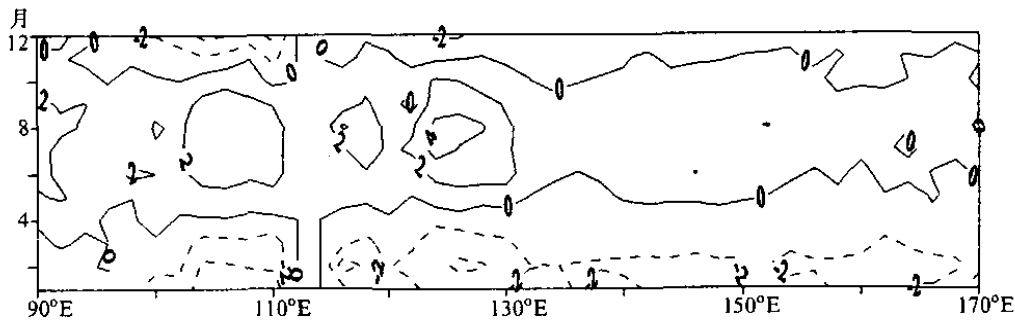


图1 赤道海面风经向分量季节分布特征（根据 COADS 资料，单位：m/s）

Xie^[3~5]曾导出一个简单的海气耦合模式，研究了太阳辐射的季节变化对 ITCZ 结构的影响及气候状态的稳定性问题，揭示了赤道中、东太平洋 ITCZ 的经向非对称特征及形成机制。在 Xie 针对东、中太平洋海气相互作用的讨论中，曾涉及到有关东、中太平洋上越赤道气流的存在问题。与赤道中、东太平洋相比，在印度尼西亚群岛邻近海域，特别是赤道西太平洋，由于暖池的存在，使得 SST 的空间分布与季节变化与赤道东、中太平洋完全不同。在研究赤道东、中太平洋海气相互作用时，完全可以只考虑气候系统在经向的差异而忽略其在纬向的差异^[6]。而在印度尼西亚群岛邻近海域 SST 分布的经向差异和纬向差异都存在，目前对这些差异的季节变化特征还不太清楚，但这种经向、纬向差异会直接通过海气相互作用对此海域出现的越赤道气流产生影响。本文首先根据 COADS（1950~1995 年）资料分析印度尼西亚群岛邻近海域 SST 空间分布的季节变化特征，在此基础上使用 Xie^[4]推导的大气模式，定量地估计该海域 SST 空间分布的季节变化对越赤道气流季节变化产生的影响。

2 印度尼西亚群岛邻近海域 SST 季节变化特征

根据 COADS 资料集中 SST 多年月平均场进行初步的分析，发现整个海域（90°E~170°E，20°S~20°N）年平均 SST 的纬向平均值基本上关于赤道对称（图 2）。最高温度出现在赤道附近，离赤道越远，温度越低，5°N 以北 SST 要比 5°S 以南略高 0.5~0.7℃，这种分布与太阳辐射关于赤道对称有关。

这种关于赤道对称的基本态与文献 [4] 中针对赤道中、东太平洋提出的关于赤道对称的基本态不同（在文献 [4] 中，SST 最高值出现在赤道两侧，赤道上有冷舌）。根据图 1 所示，可取一理想化的对称函数（图 2 中虚线）

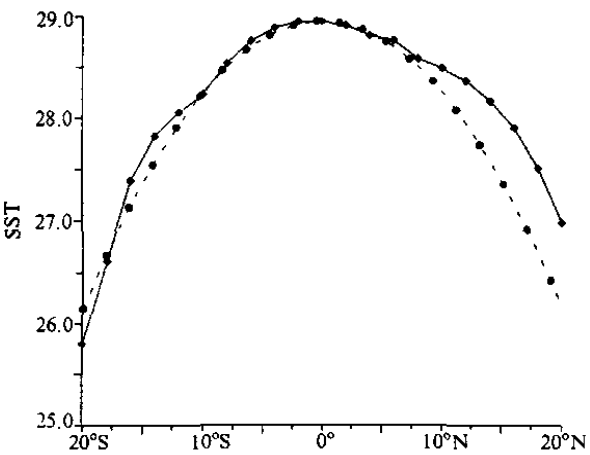


图2 印度尼西亚群岛邻近海域（90°E~170°E）纬向年平均 SST（实线）及关于赤道对称的基本态（虚线）

$$T = -2.8y^2 + 28.94, \quad (1)$$

作为该海域 SST 年平均基本态, 其中 y 为无量纲的经向坐标, 在 20°N 和 20°S 上, y 分别取 +1 和 -1。多年月平均 SST 场扣除 (1) 式所计算的理想化基本态, 得到能反映 SST 场季节变化空间分布的 SST 偏差场。图 3 为 SST 偏差沿 10°N 、 10°S 、 5°N 、 5°S 时间-经度剖面图。

冬季 (北半球) 赤道以北 SST 低于年平均态, 赤道以南 SST 高于年平均态, 夏季 (北半球) 则相反。除具有以上共性以外, 印度尼西亚群岛邻近海域 SST 季节变化场分布有以下特点:

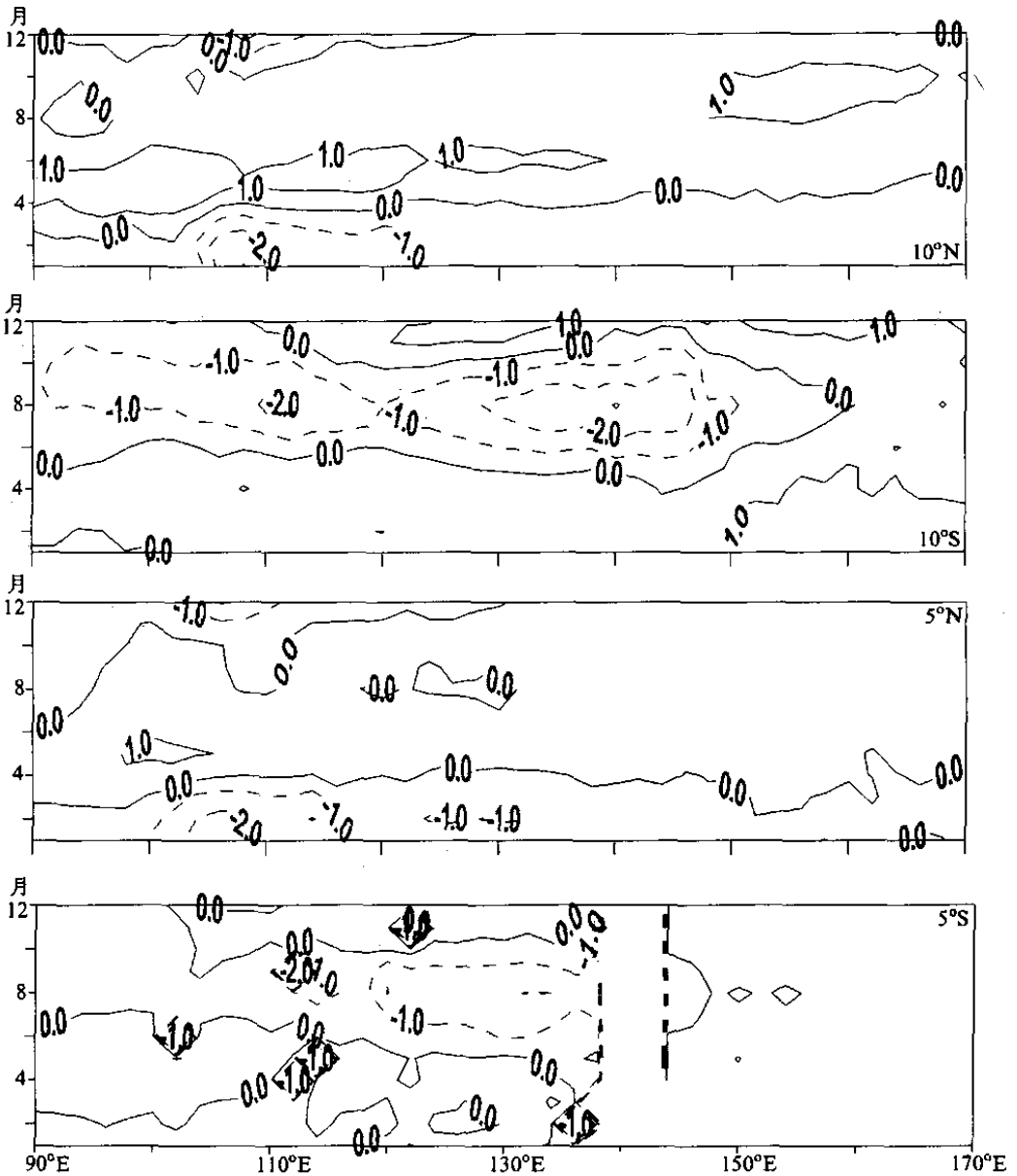


图 3 多年月平均 SST 场扣除 (1) 式理想化基本态得到的 SST 季节变化场
横坐标为经度, 纵坐标为月份, 图中白色区域为数据缺测区或为岛屿区
从上到下依次为 10°N 、 10°S 、 5°N 、 5°S

(1) 近赤道西太平洋和珊瑚海海域 ($160\sim 170^\circ\text{E}$) SST 季节变化较小, 月平均值几乎与年平均值相同, 经向差异也小。

(2) 近赤道西太平洋、班达海和阿拉弗岛 ($120\sim 160^\circ\text{E}$) SST 季节变化以赤道以南的班达海和阿拉弗拉海最明显, 7、8 月能比年平均温度低 2°C 以上。

(3) 尽管近赤道东印度洋和南海 ($90\sim 120^\circ\text{E}$) 冬季也出现北半球 SST 低于气候平均值, 南半球 SST 高于气候平均值的现象, 但是北半球春季 SST 由低于气候平均值转为高于气候平均值的时间, 比近赤道西太平洋同纬度海域提前 $1\sim 2$ 个月, 先于越赤道气流的转换, 这与北半球春季季风转换前大气环流的流型及太阳辐射的变化有关^[7]。特别在南海 ($105\sim 120^\circ\text{E}$), 春季 SST 升温的速度最快, 这是因为从 11 月至第二年 2 月南海与同一纬度其他海域相比 SST 最低, 比赤道西太平洋低 1°C 以上。赤道以南的东印度洋在 7、8 月温度也较低, 几乎与阿拉弗拉海域相同。

从上述 SST 的季节变化特点, 可以推测越赤道气流必定会受到印度尼西亚群岛邻近海域 SST 季节变化的影响。下面我们来估计这种影响的程度。

3 热带大气浅水方程的低阶模式

Matsuno^[6]和 Gill^[8]提出有关热带大气的浅水方程如下:

$$\varepsilon U - YV = -\Phi_x, \quad (2)$$

$$\varepsilon V + YU = -\Phi_y, \quad (3)$$

$$\varepsilon\Phi + U_x + V_y = -Q. \quad (4)$$

式中 U 、 V 分别是大气低层的纬向、经向风速; Φ 是重力位势; X 、 Y 是纬向和经向坐标, 该坐标被赤道变形半径进行无量纲化; $\varepsilon = A/(\beta c)^{1/2}$ 是无量纲的阻尼率, 其中 β 是科里奥利参数的经向变率, c 是大气长重力波的相速度, $c = 45 \text{ m/s}$; Q 是海洋加热引起的对流潜热释放, 其参数化形式为^[5]

$$Q = \frac{K_q}{(\beta c^3)^{1/2}} (T - T_c) H(T - T_c), \quad (5)$$

其中 $H(x)$ 是 Heaviside 函数, K_q 是小的热力耦合系数, $K_q = 2.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ K}^{-1}$, $T_c = 27.5^\circ\text{C}$ 。

在对太平洋东边界关于赤道不对称的海气耦合模态向西传播的研究中, Xie^[5]曾在 Matsuno-Gill 模式的基础上导出了关于小扰动量的低阶模式。推导的基本假设是方程 (2)、(3)、(4) 有一个关于赤道对称的解, 根据印度尼西亚群岛邻近海域 SST 的季节变化和年平均状况, 也可取一关于赤道的对称基本态, 基本态的 SST 分布如图 (1) 虚线所示, 与 SST 基本态相应的纬向风为 $\bar{U}$, 经向风为 $\bar{V} = 0$ 。与 Xie^[4]类似, 在大的纬向尺度分布条件下 $\varepsilon^2 \ll 1$, 可导出

$$\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial X} - Y^2 \right) V = -\frac{\partial Q}{\partial Y} + \frac{Y}{\varepsilon} \frac{\partial Q}{\partial X}, \quad (6)$$

$$\varepsilon \frac{\partial U}{\partial Y} - Y \frac{\partial U}{\partial X} = V + Y \frac{\partial V}{\partial Y}, \quad (7)$$

(6)、(7) 式则为长波近似条件下, 相对基本态的扰动量 U 、 V 应满足的低阶模式。

4 SST 的季节变化对越赤道气流的影响

为了定量地估计 SST 的季节变化对越赤道气流的影响, 将方程 (6) 在 y 方向的微分用差分表示, y 方向网格的选取和变量的取法如图 4 所示, 在本文中取 $Y_p = 2\,200$

km. 根据气候状况, 在热带太平洋 20°S 与 20°N 处海面风经向分量分别比 10°S 、 10°N 处小得多, 如果忽略海-陆差异引起的季风经向环流 (本文只研究近赤道海域 SST 的季节变化对越赤道气流的影响), 可假定

$$V_{-1} = V_1 = 0. \quad (8)$$

图 4 变量在网格点上的对应分布

应用中央差分 and 边界条件 (8) 式, 则可推

出赤道上越赤道气流 V_0 应满足的方程^[4]

$$V_0 - X_0 \frac{\partial V_0}{\partial X} = Y_p \hat{Q}, \quad (9)$$

其中 V_0 为赤道上的经向风速值, $V_0 = V_0(x, t)$, $X_0 = Y_p^2 / 2\varepsilon$, Y_p 为 y 方向网格距, $\hat{Q}(x, t) = (Q_1 - Q_{-1}) / 2$ 是南北半球近赤道海域海洋加热函数的差, 它是 x 的函数, (9) 式左边第二项也反映 V_0 沿纬向的非均匀性。必须注意到, 应用中央差分 and 边界条件从 (6) 式到 (9) 式的推导过程中, 只保留了加热函数 Q 是 x 的函数这一特征, 但舍弃了 Q 沿 x 方向的一阶导数项。也就是舍弃了一部分 SST 纬向非均匀性对越赤道气流的影响。

根据气候平均资料 (COADS) 170°E 附近越赤道气流全年几乎都接近于零, 故可假定

$$V_0(0, t) = 0, \quad (x \text{ 坐标原点取在 } 170^\circ\text{E}, \text{ 研究的范围为 } -8800 \text{ km} \leq x \leq 0) \quad (10)$$

则满足方程 (9) 与边界条件 (10) 的解为

$$V_0(x, t) = \frac{Y_p}{X_0} \hat{Q} \left[1 - e^{(1/X_0)x} \right], \quad (-8800 \text{ km} \leq x \leq 0) \quad (11)$$

其中, $X_0 = Y_p^2 / 2\varepsilon$ 是大气对关于赤道反对称加热的 e 折尺度。根据多年月平均 SST 资料利用 (11) 式可求得 $V_0(x, t)$ (图 5)。

图 5 表明, 根据 Xie^[4] 推导的扰动量低阶模式所估算的越赤道气流 (图 5) 与气候资料所表示的越赤道气流 (图 1) 相比, 在 107°E 以东海域, 转向时间基本一致, 在 105°E 以西海域, 所估算的越赤道气流北半球春季转向时间略早, 北半球秋季较晚。这

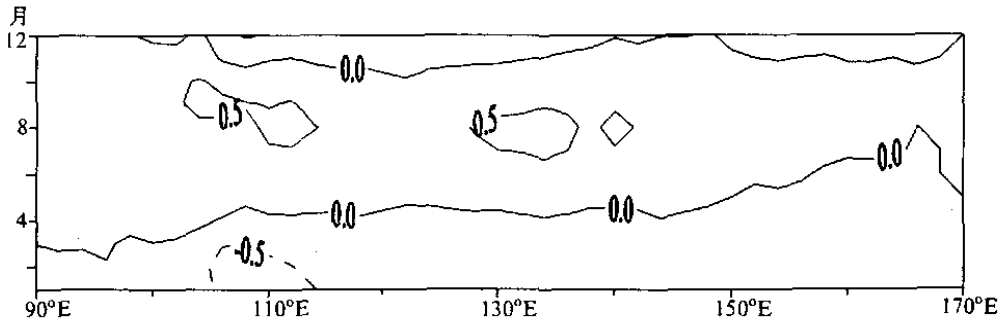


图 5 根据月平均 SST 计算的越赤道气流 (单位: m/s)

意味着 SST 的季节变化有利于该海域越赤道气流北半球春季的转向, 不利于该海域越赤道气流北半球秋季的转向。SST 季节变化对 105°E 越赤道气流的影响最大, 这是由于: 冬季, 南海 SST 明显比同纬度其他海域低, 即南北半球近赤道海域在 110°E 附近温差较大; 夏季, 东印度洋最东边的 SST 要比同纬度其他海域低, 也造成南北温差较大。大约估计 110°E 附近南海的 SST 的季节变化对 105°E 越赤道气流全年的影响都可达到 25% 左右, 它有利于 105°E 越赤道气流的形成和维持。图 5 与图 1 相比也说明 SST 季节变化对 125°E 越赤道气流的影响不大。北半球夏季 $130\sim 145^{\circ}\text{E}$ 附近 SST 的经向差异也会在 $130\sim 140^{\circ}\text{E}$ 形成向北的越赤道气流, 但冬季该影响不明显。

5 结论

本文利用 COADS 资料研究了印度尼西亚群岛邻近海域 SST 的季节变化特征, 并根据 Xie^[4]提出的热带大气扰动量的低阶模式, 分析了印度尼西亚群岛邻近 SST 的季节变化对越赤道气流季节变化的影响, 研究结果表明:

(1) 印度尼西亚群岛邻近海域年平均 SST 基本上关于赤道对称分布, 最高温度出现在赤道附近。

(2) 印度尼西亚群岛邻近海域 SST 的季节变化基本上关于赤道反对称分布。冬季 (北半球) 两半球 SST 的经向差最大值 (大于 2°C) 出现在 110°E 附近, 这是由于南海 SST 冬季较低。夏季 (北半球), 最大经向温差出现在 $130\sim 145^{\circ}\text{E}$ 和 110°E 附近, 这是由于赤道以南海域受到澳大利亚及印度尼西亚群岛的影响夏季 SST 较低。

(3) 印度尼西亚群岛邻近海域 SST 的季节变化对越赤道气流有一定的影响, 影响较大的区域是 110°E 附近和 $130\sim 140^{\circ}\text{E}$ 附近, 110°E 附近南海和东印度洋的 SST 的季节变化有利于 105°E 向北越赤道气流的形成和维持。SST 季节变化对 125°E 越赤道气流的影响不大。

以上的研究结果仅是针对气候意义下 SST 的季节变化对越赤道气流影响的粗略估计。但该估计说明南海的 SST 变化在 105°E 越赤道气流的形成和维持中的地位, 有利于进一步理解和认识季风环流与 ENSO 的相互作用。

参 考 文 献

- 1 刘秦玉、徐启春、许乃猷等, 初夏东亚季风环流系统的两类异常过程, “八五”长期天气预报理论和方法的研究, 北京: 气象出版社, 1996, 138~142.
- 2 王韶霞、刘秦玉、徐启春, 夏季影响105°E越赤道气流变化的环流系统, 青岛海洋大学学报, 2000, 30(1), 22~28.
- 3 Xie Shangping, Oceanic response to the wind forcing associated with the Intertropical Convergence Zone in the northern hemisphere, *J. Geophys. Res.*, 1994, 99, 20393~20402.
- 4 Xie Shangping, Westward propagation of latitudinal asymmetry in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1996, 53(22), 3326~3244.
- 5 Xie Shangping, Stability of equatorially symmetric and asymmetric climates under annual solar, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1997, 123, 1359~1375.
- 6 Matsuno, T., Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, 44, 25~43.
- 7 Yang Haijun, Liu Qinyu and Jia Xujing, On the upper oceanic heat budget in the South China Sea: annual cycle, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1999, 16(4), 619~629.
- 8 Gill, A. E., Some simple solutions for heat-induced tropical circulation., *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1980, 106, 447~462.

Influence of the Sea Surface Temperature in the Vicinity of the Indonesia Archipelago on the Cross Equator Flow

Liu Qinyu and Wang Shaoxia

(Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

Abstract Based on the SST data from COADS, the seasonal variation characteristics of the SST in the adjacent sea region of the Indonesia archipelago is investigated, and its effect on cross-equatorial flow is qualitatively estimated by the low-order model. The results show the annual average SST in the adjacent sea region of the Indonesia archipelago is almost symmetric around the equator and the highest SST appears around equator. Because of the lower SST in the South China Sea, the maximum longitudinal difference (larger than 2 °C) appears around 110°E during boreal winter. During boreal summer, the maximum longitudinal difference of the SST appears around 130~145°E and 110°E, which is useful to the formation and maintenance of the cross-equatorial flow about 105°E.

Key words: cross-equatorial flow; seasonal variation; sea surface temperature