

# 南海 Sverdrup 环流的季节变化特征\*

刘秦玉<sup>①</sup> 杨海军<sup>①</sup> 刘征宇<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>青岛海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266003; <sup>②</sup>Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, USA)

**摘要** 利用气候平均的风应力资料, 计算了平底南海内区海盆尺度的 Sverdrup 输送, 得到南海海盆尺度 Sverdrup 环流的季节变化基本特征. 将这些基本特征与历史观测资料相比, 证实了在冬、夏、秋季风生环流在南海表层环流中的重要地位. 明确指出风的非均匀性是南海海盆尺度环流呈现多中心的重要原因之一, 秋、冬季南海北部 18°N 纬带处的西向强流可仅由局地风生成, 南海南部环流比北部环流具有更明显的季节变化, 春季风场有利于在海盆的中部发生环流的季节转换, 秋季气旋式环流的向北输送最大.

**关键词** Sverdrup 输送 南海环流 季节变化

Sverdrup 平衡是大洋环流中最基本的平衡<sup>[1]</sup>. 根据 Sverdrup 关系, 利用实际风应力, 很多人计算了太平洋和大西洋的 Sverdrup 输送<sup>[2~4]</sup>. 并依据 Sverdrup 输送对太平洋和大西洋的海洋环流及季节变化进行了讨论, 这些计算结果与后来的实际观测及高分辨率数值模式结果在很多方面较为一致. 但到目前为止, 还没有人用该关系式来估算南海环流. 本文分析了南海海盆尺度上气候平均意义下 Sverdrup 关系式的适用性, 并依据此关系对南海平底海盆质量输送的季节变化作了一诊断计算. 根据计算结果可以证实风应力旋度引起的环流在南海内区环流中的地位, 同时发现由风场旋度季节变化可能引起的南海环流季节化的某些特征. 并利用准地转两层模式从理论上解释季节平均南海 Sverdrup 环流与观测的南海环流在流型上相同或不同的原因.

## 1 Sverdrup 关系及其在南海的适用性

根据观测资料的分析<sup>[5]</sup>, 在南海常有 1~2 个海盆尺度的大涡旋运动, 其水平特征尺度  $L = 1\ 000\ \text{km}$ , 速度尺度  $U = 10^{-1}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 若取  $\beta = 2 \times 10^{-11}\ \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 水平湍流摩擦系数  $A_t = 1\ 000\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 则 Rossby 数及水平 Ekman 数均远小于 1, 这正是 Sverdrup 平衡得以成立的必要条件<sup>[6]</sup>. 另外, 对南海而言, 相对涡度平流远小于行星涡度平流(其比值约为 0.005), 故对海盆尺度风生环流, Sverdrup 关系是成立的.

同时, 多涡性也是南海环流的特点. 由于风、地形及非线性效应等诸多因素, 在南海海盆

1999-09-21 收稿, 2000-03-01 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 49636230)和高等学校重点实验室访问学者基金资助项目

尺度的大涡旋运动之中,会出现强度较大(水平速度的量级为  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),尺度较小(约为 100 km)的天气尺度涡旋运动. 对此类涡旋,尽管 Rossby 数及水平 Ekman 数仍小于 1,但相对涡度平流与行星涡度平流几乎相当. 因此,对海洋中单个天气尺度的涡旋, Sverdrup 关系不适用. 但是,与气候平均意义下的大尺度质量输运相比,天气尺度涡旋是“瞬时”的,移动的,它们对海盆尺度的质量输运的贡献应是它们总体的平均效应. 天气尺度涡旋运动的月平均速度  $U_{\text{eddy}} \approx 10^{-1} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 涡旋在海盆尺度上平流的季节平均作用与行星涡度在海盆尺度上的平流的季节平均作用之比为  $U_{\text{eddy}}/(\beta L L_{\text{eddy}}) \sim 0.05$ . 因此,即使在南海海盆尺度的大涡旋运动之中,出现强度较大、范围较小的天气尺度的涡旋运动,在讨论季节平均意义下的海盆尺度质量输运时 Sverdrup 关系仍然是成立的. 正如北太平洋副热带环流中有强度很大的天气尺度涡旋运动,我们仍然能用 Sverdrup 关系来讨论北太平洋副热带环流的季节平均质量输送.

根据 Pedlosky<sup>[6]</sup>假定海底为平底,直接写出 Sverdrup 平衡式

$$\beta V_s \equiv \beta \int_{-H}^0 v dz = \text{curl} \left( \frac{\tau^w}{\rho_0} \right), \quad (1)$$

其中,  $V_s$  为流体柱的垂直平均流速,  $(-H, 0)$  指整个水柱,  $\tau$  为风应力矢量,  $\rho_0$  为海水平均密度,  $\text{curl}$  为旋度算子.

Sverdrup 关系对应海洋风生环流平衡态,南海海盆尺度 1 000 km,比太平洋海盆尺度小一个量级,因此正压 Rossby 波跨越南海时间要远比在同纬度太平洋短( $\sim 1/15$ ). 这意味着与同纬度的太平洋相比,南海对外强迫的响应会较快地达到平衡.

不考虑自由面起伏,根据不可压连续方程,可引入流函数  $\psi$ ,这样(1)式可改写为

$$\beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = \text{curl} \left( \frac{\tau^w}{\rho_0} \right). \quad (2)$$

对上式自东向西沿纬度积分,可得到南海内区 Sverdrup 输送流函数  $\psi$ . 风应力资料取自 UWM/COADS 气候季平均场<sup>[7]</sup>,水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ . 考虑真实的南海侧边界,对固体边界,取  $\psi = 0$ ;积分的东界取为  $121^\circ\text{E}$ ,给定东边界吕宋海峡的流量<sup>[8]</sup>;台湾海峡和卡里马塔海峡的经向输送对纬向积分没有影响,可取为固体边界.

## 2 计算结果及讨论

徐锡祯等<sup>[5]</sup>根据 1921~1970 年间 6 000 个站次的南海历史调查温度,盐度资料,计算出了南海四季表层地转流. 图 1 给出了南海内区风应力旋度和 Sverdrup 输送季平均的基本形态(不含西边界与浅水陆架区). 冬季(12 月~次年 2 月)南海被东北季风控制,除南海西北角和东南角风应力旋度为负以外,其余海区风应力旋度为正. 南海内区 Sverdrup 输送,除  $20^\circ\text{N}$  以北有一部分输送向南(流线为实线)以外,几乎一致向北(流线为虚线),而在南海北部  $18^\circ\text{N}$  纬带处出现较强的向西流(流线较密). 与该输送对应的环流总体形式是:  $20^\circ\text{N}$  以南是一个大的气旋式环流占据整个海盆,其中吕宋岛以西海域和南沙群岛西南部分别存在两个向北输运的高值区,这意味着冬季风应力旋度会有利于这两处成为气旋式环流的中心,这种海盆尺度气旋式环流中有两个中心的现象与风应力旋度的非均匀性有关. 冬季 Sverdrup 流型与徐锡祯等<sup>[5]</sup>观测研究的冬季表层地转流的流型基本一致.

春季(3~5 月),风应力及其旋度都较弱,在南海中部  $10^\circ \sim 15^\circ\text{N}$  之间出现负的风应力旋

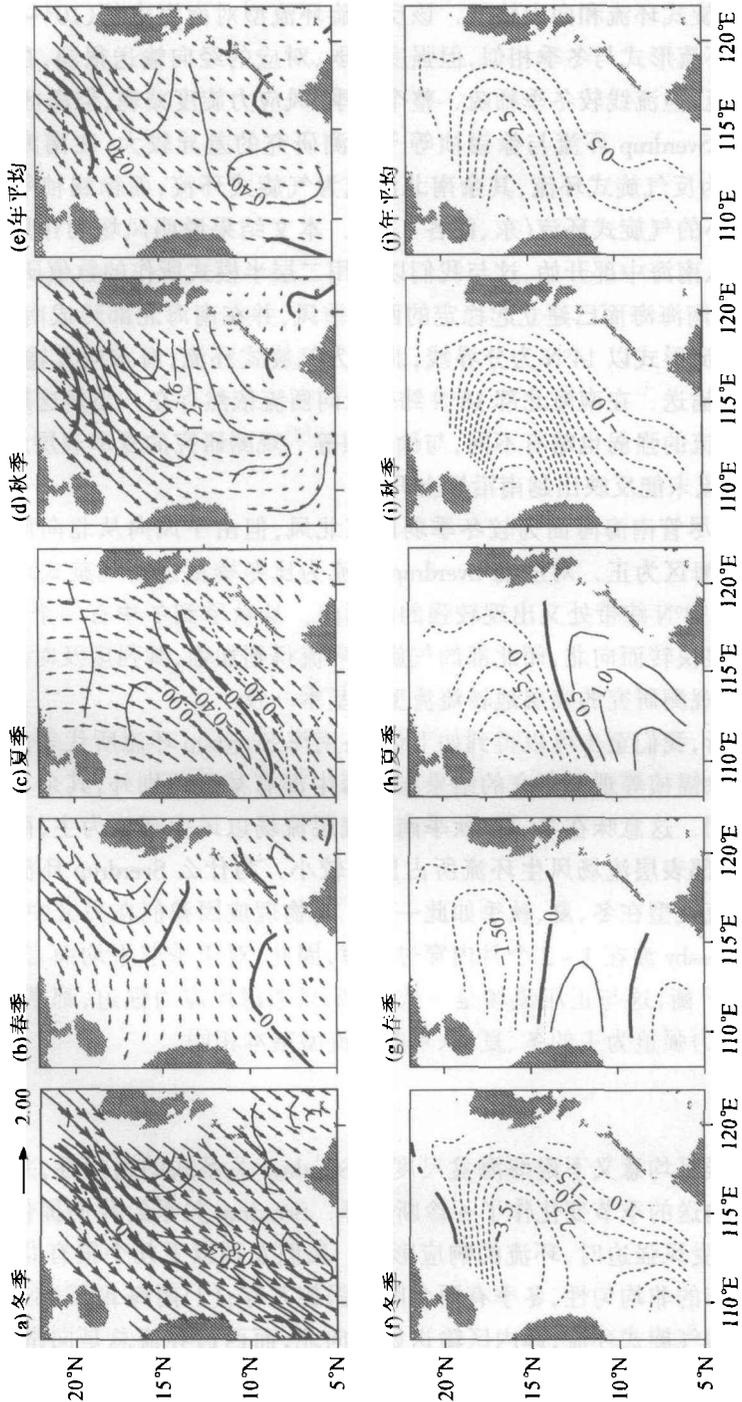


图 1 南海内区气候平均海面风场和对应的 Sverdrup 环流

在海面风的示意图(a~e)中,虚线为负的风应力旋度等值线,实线为正的风应力旋度等值线,无零线,等值线间隔为  $0.2 \times 10^{-10} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ . 在 Sverdrup 环流图(f~j)中虚线为气旋式环流的流线,实线为反气旋环流的流线. 无零线,等值线间隔为  $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

度,对应一弱的反气旋式环流和向南输送. 该反气旋环流型对南海中部( $10^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{N}$ )海温上升有利<sup>[9]</sup>. 其余海域环流形式与冬季相似,但强度减弱,对应的经向输送很弱,在南海北部  $18^{\circ}\text{N}$  纬带处也出现向西流,但流线较冬季稀疏. 整个春季,风应力旋度减弱,但海区热通量,尤其是辐射通量较大<sup>1)</sup>,故 Sverdrup 环流与徐锡祯等<sup>[5]</sup>观测研究的差异较大,在南海中部( $10^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{N}$ ),Sverdrup 环流型为反气旋式环流,其余南北海域为气旋式环流,而徐锡祯等的结果是春季在南海中部为两个小的气旋式环流(东、西各 1 个). 本文结果说明风场的作用有助于冬季环流向夏季环流转换从南海中部开始,这与我们以前用二层半模式所作的数值研究结果一致<sup>[9]</sup>.

夏季(6~8月),南海海面已建立起稳定的西南季风,并在南海北部转成南风,风应力旋度南、北相反. 南海环流形式以  $14^{\circ}\text{N}$  为分界线,北部为气旋式环流,海水向北输送,南部为反气旋式环流,海水向南输送. 在南海北部  $18^{\circ}\text{N}$  纬带处向西流依然存在. 当然这期间由于风旋度大小的原因,南北环流的强弱也略有不同,与徐锡祯等<sup>[5]</sup>观测研究的夏季表层地转流型基本一致,但是 Sverdrup 流未能反映出越南沿岸上升流.

秋季(9~11月)尽管南海海面为较冬季弱的东北风,但由于风向从北向南出现逆时针的旋转,风应力旋度全海区为正. 对应的 Sverdrup 环流为比冬季更强的气旋式环流及整体的向北输送,在南海北部  $18^{\circ}\text{N}$  纬带处又出现较强的向西流. 从秋季到冬季有一个突变的过程:南海南部的向南输送很快转而向北,而北部的气旋式环流得到加强,其强度及对应向北的输运达到全年的最大值;与观测研究的表层地转流型也基本一致.

根据前面的分析,我们至少可以得到如下认识:南海 Sverdrup 环流所代表的季节平均风生环流除春季流型与徐锡祯等观测研究的结果在南海中部有某些差别外,其余 3 个季节的流型与观测结果基本相同. 这意味在冬、夏、秋季南海表层流场以风生环流为主,而春季南海表层流场,特别是南海中部表层流场风生环流所占比重较小. 为什么 Sverdrup 环流型与根据温盐计算的表层地转流型在冬、夏、秋季如此一致? 其物理成因我们在另文中给以解释<sup>2)</sup>. 简单来说,第一斜压 Rossby 波在 1~2 个月内穿过南海,因此,对于季节平均而言,两层斜压动力场处于准定常涡度平衡,这与正压流场是一致,如果只考虑风应力强迫,都基本满足 Sverdrup 关系. 因此,在风应力强迫为主的冬、夏、秋季两种流型基本相同.

### 3 结论

本文分析了气候平均意义下南海海盆尺度上 Sverdrup 关系式的适用性,并依据此关系对南海海底海盆质量输送的季节变化作了一诊断计算. Sverdrup 关系给我们提供了南海环流最基本的背景场,即仅受风强迫时,环流的响应形式. 我们发现以下几个很有意义的现象:(1) 仅因风应力旋度分布的非均匀性,冬季有两个闭合涡旋并存;(2)南海北部  $15^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}$  之间,全年均为一海盆尺度的气旋式环流,即内区输送始终向北,而西边界流总是向南;(3)在  $18^{\circ}\text{N}$  纬带上,常年均有一支西向强流,即使封闭吕宋海峡亦是如此(图略). 这支西向流在冬、

1) Yang Haijun, Qinyu Lin, Xujing Jia. On the upper oceanic heat budget in the South China Sea: Annual cycle. *Advance in Atmospheric Sciences*, 1999

2) Liu Zhengyu, Haijun Yang, Qinyu Liu. Regional dynamics of seasonal variability of sea surface height in the South China sea. *J Phys Oceanogr*, 1999

秋季很强;春、夏季较弱。它仅由局地风引起,既无地形捕捉,亦无黑潮入侵,与吕宋海峡的流型无关,主要来自吕宋岛西部或西南部海域。这说明黑潮并非这支西向流出现的必要条件;(4)春季风场有助于在南海中部首先出现夏季型的反旋式环流。南部环流流型有很明显的季节变化,而北部流型相对稳定;(5)秋季海盆尺度的气旋式环流强度,达到全年的最大值。

尽管计算结果表明了风应力旋度对南海内区环流的重要贡献,但应认识到,Sverdrup 关系只给出了风应力旋度造成的净的垂直平均输送,而假设任何其他因素造成的垂直平均运动必须为零。事实上,即使不考虑斜压效应,地形与流的相互作用会对垂直平均输送产生显著影响,甚至会改变流的输送方向,特别是对具有复杂地形的南海来说更是如此。另外,浮力通量的作用也不能完全忽略。

**致谢** 感谢国家海洋局第二研究所苏纪兰院士,中国科学院南海海洋研究所甘子钧研究员,王东晓研究员对作者的建议及帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Sverdrup H U. Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the Eastern Pacific. *Proc Natl Acad Sci*, 1947, 33: 318
- 2 Reid R O. The equatorial currents of the Eastern Pacific as maintained by the stress of the wind. *J Mar Res*, 1948, 7(2): 13
- 3 Mellor G L, Mechoso, C R, Keto E. A diagnostic calculation of the general circulation of the Atlantic Ocean. *Deep Sea Research*, 1982, 29(10A): 1 171
- 4 Schmitz W J, Thompson J D, Luyten J R. The Sverdrup circulation for the Atlantic along 24°N. *J Geophys Res*, 1992, 97: 7 251
- 5 徐锡桢,邱 章,陈惠昌. 南海水平环流概述. 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议论文集,北京: 科学出版社, 1980. 137
- 6 Pedlosky J. *Ocean circulation theory*. New York: Springer, 1996, 8~15
- 7 da Silva A, Young C, Levitus S. Atlas of surface marine data 1994, Volume 1: algorithms and procedures. NOAA Atlas NESDIS 6. 1994a, US Dept of Commerce, NOAA, NESDIS
- 8 Wyrki K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters. NAGA report Vol. 2. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the gulf of Thailand, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California, 1961, 195
- 9 刘秦玉,李 薇,徐启春. 东北季风与南海海洋环流的相互作用. *海洋与湖沼*, 1997, 28(5): 493