

黄家辉, 谢玲玲, 李强, 等. eSQG 方法在南海垂向流速诊断中的应用研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(12): 55–69, doi:10.12284/hyxb2022153
Huang Jiahui, Xie Lingling, Li Qiang, et al. Application of eSQG method in vertical velocity diagnosis in the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(12): 55–69, doi:10.12284/hyxb2022153

eSQG 方法在南海垂向流速诊断中的应用研究

黄家辉^{1,2}, 谢玲玲^{1,2,3*}, 李强^{1,2,3}, 李敏^{1,2,3}

(1. 广东海洋大学 海洋与气象学院 近海海洋变化与灾害预警实验室, 广东 湛江 524088; 2. 广东省高等学校陆架及深远海气候资源与环境重点实验室, 广东 湛江 524088; 3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081)

摘要: 本文利用 OFES 模式 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 高分辨率温盐、流速和海面高度 (SSH) 数据, 分析 eSQG 方法在南海垂向流速诊断中的适用性和南海垂向流速的时空变化特征。结果表明, 基于 SSH 和 eSQG 的诊断垂向流速 ω_{eSQG} 与 OFES 模拟“真值”垂向流速 ω_{OFES} 整体量级基本相当, 为 $O(10^{-5} \text{ m/s})$, 空间上呈现北强南弱。深海盆 (水深大于 1 000 m) ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 的水平空间分布的相关系数 r 在次表层 150 m 左右达到最大, 高于南海全海域的空间相关系数, 表明 eSQG 在远离边界的深水区更有效。季节上, ω_{eSQG} 总体夏强冬弱, 与 ω_{OFES} 的相关系数 r 冬季大、夏季小, 表明 eSQG 更适用于冬季南海垂向流速的诊断。eSQG 诊断垂向流速在台湾西南部和越南以东适用性更高, 与 ω_{OFES} 的时间相关系数 r 超过 0.6; 海盆南部和西北部陆架区诊断效果较差, 时间相关系数 r 多小于 0.2。同一区域 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 空间相关系数存在 18~55 d 的周期变化。分析显示, 海面高度与海面密度同相位分布时, ω_{eSQG} 与“真值” ω_{OFES} 更接近。时间分辨率对 eSQG 诊断效果几乎无影响, 空间分辨率降低到 0.25° 时 r 整体增大, 说明 eSQG 在中尺度诊断效果更好。

关键词: 垂向流速; eSQG; 时空变化; 南海; OFES

中图分类号: P731.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2022)12-0055-15

1 引言

垂向流速作为海水运动的一个重要分量, 对海洋内部以及海气间的物质和能量交换具有重要作用。垂向运动能将深层富含营养盐的冷水向上层海洋输送^[1-2], 从而提高海区的初级生产力^[3-5]。同时, 垂向运动也能将表层海洋溶解的氧气和二氧化碳带至深层^[6-7], 影响全球的碳氧循环, 加速深层海洋对气候的响应^[8]。因此, 获取垂向流速具有重要的研究意义和应用价值。

海洋垂向流速的量级一般只有 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m/s}$, 在当前技术下难以直接测量。因此, 研究者一般通过间

接估算、动力诊断或者数值模拟等方法来获取垂向流速^[9-12]。其中, 基于海面高度场的有效表面准地转 (effective Surface Quasi-Geostrophy, eSQG) 方法和基于温盐水平流场的 Omega 方程是获取海洋三维垂向流速的有效途径^[13-14]。尤其是 eSQG 方法, 具有计算效率高、对现场观测依赖小等优势^[15], 近年来在大洋海区的中尺度垂向流速诊断方面开展较多应用^[16]。

Lapeyre 和 Klein^[17] 最早提出了 eSQG 方法, 并指出 eSQG 能较好诊断 500 m 深度以浅的垂向流速。后续在黑潮延伸体、北大西洋和北太平洋等大洋海区的研究中, eSQG 方法的有效性在混合层以深的上层海洋得到较好印证^[18-21]。eSQG 在混合层垂向流速诊

收稿日期: 2022-05-03; 修订日期: 2022-07-03。

基金项目: 国家自然科学基金 (42276019, 41776034); 广东省普通高校创新团队项目 (2019KCXTF021); 广东省高冲一流专项 (080503032101, 231420003)。

作者简介: 黄家辉 (1997—), 男, 广东省开平市人, 研究方向为海洋中小尺度过程。E-mail: Iron_man1224@163.com

* 通信作者: 谢玲玲 (1983—), 女, 教授, 山东省莱芜市人, 研究方向为海洋多尺度动力过程。E-mail: xiell@gdou.edu.cn

断的不足,可以通过加入湍流混合引起的垂向流速来解决^[22-23]。eSQG 对于不同尺度垂向流速的诊断效果不一样,其主要适用于 20~400 km 的中尺度垂向流速诊断^[16]。前人研究多集中于大洋海域,关于 eSQG 在边缘海的适用性还有待进一步探索。

南海是西太平洋最大的半封闭海盆,其地形多变、动力过程复杂,中尺度和次中尺度过程强盛^[24-25],海盆和陆架均存在活跃的垂向环流^[26-27]。关于南海的垂向流速,前人多采用简单估算或数值模式给出结果^[28-31]。基于海面观测的 eSQG 方法可否为南海垂向环流三维结构和定量特征探究提供有效方法,该问题有待解答。

因此本文将利用高分辨率的 OFES(ocean general circulation model for the earth simulator)数值模拟数据,分析 eSQG 在南海不同区域垂向流速诊断的适用性,给出南海垂向流速的时空特征,并探究不同时空分辨率对诊断结果的影响。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究所用数据为 OFES 模式提供的高分辨率海洋模式资料,其水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为 3 d。数据来自夏威夷大学亚太数据研究中心(Asia Pacific Data Research Center, APDRC)。该模式是由美国国家海洋和大气管理局地球物理流体动力学实验室开发,通过日本海洋与地球科技研究所地球模拟器计算得到的高分辨率海洋模式。空间覆盖范围为 $75^\circ\text{S} \sim 75^\circ\text{N}$,时间范围为 1950 年 1 月至 2017 年 12 月,垂向上有 54 层,相邻两层之间的垂向间隔随着深度的增加而增加,最小约为 5 m,最大约为 330 m。温盐和水平流速数据表层深度为 2.5 m、底层深度为 5 900 m,垂向流速数据表层深度为 5 m、底层深度为 6 065 m。地形资料来源于南安普顿海洋中心的海洋环流和气候进展模式(Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling, OCCAM)计划测得的 $(1/30)^\circ$ 地形数据,并通过平滑处理至与真实地形非常相近。该模式的水平湍流扩散项采用双调和算子,从而减小动量方程中水平网格尺度的误差。垂直混合采用 KPP(K-profile parameterization)边界层混合方案。该模式为冷启动,用 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)再分析数据作为大气强迫场,温盐资料则采用 WOA(World Ocean Atlas)数据。

本文选取南海($4^\circ \sim 24^\circ\text{N}$, $106^\circ \sim 122^\circ\text{E}$)2012 年

3 月至 2013 年 2 月的 OFES 模式位势温盐、流速、海面高度和混合层厚度进行分析。其中位势温度和盐度用于计算 0~300 m 深度的浮力频率,海面高度用于诊断垂向流速,水平流速用于计算相对涡度,模式垂向流速用于与 eSQG 诊断垂向流速对比。时间选取考虑与 Qiu 等^[18-19]的大洋结果进行对比。

2.2 eSQG 诊断方法

Lapeyre 和 Klein^[17]指出在斜压不稳定的情况下,海洋内部位势涡度异常与表层密度异常存在显著的相关关系。基于这一相关关系和位势涡度的可逆性,可以得到地转流函数 ψ 在某一深度 z 与海面高度 η 的表达式为

$$\widehat{\psi}(k, z) = \frac{g}{f_0} \widehat{\eta}(k) \exp\left(\frac{N_0}{f_0} k_h z\right), \quad (1)$$

继而,可以根据地转方程、静力方程和平流的浮力方程推得浮力 b 和垂向流速 w 的表达式为

$$\widehat{b}(k, z) = \frac{N_0 k_h}{C} \widehat{\psi}(k, z), \quad (2)$$

$$\widehat{w}(k, z) = -\frac{C^2}{N_0^2} \left[-J(\widehat{\psi}_s, \widehat{b}_s) \exp\left(\frac{N_0}{f_0} k_h z\right) + J(\widehat{\psi}, b) \right], \quad (3)$$

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}, \quad (4)$$

$$b = -\frac{\rho}{\rho_0} g, \quad (5)$$

式中, $k = (k_x, k_y)$ 为水平波数矢量; $k_h = |k|$; f_0 为平均纬度 (14°N) 的科氏参数; g 为重力加速度; ρ 为海水密度; N 为浮力频率; b 为浮力; 符号 $\widehat{}$ 表示水平傅里叶变换; $J(a, b) = (\partial a / \partial x)(\partial b / \partial y) - (\partial a / \partial y)(\partial b / \partial x)$ 为雅可比运算符; 下标 s 表示表层值; 本文 $N_0 = 0.01 \text{ Hz}$ 和 $C = 2.1$ 是常数, N_0 为研究区域 0~300 m 深度浮力频率的平均值^[18-19], $C = (g N_0 k_h / f_0) \widehat{\eta}(k) / \widehat{b}(k, 0)$ 可由式(1)、式(2)和式(5)计算^[19]。

利用模式提供的 SSH 数据 $\eta(x, y)$, 由式(3)计算不同深度不同波长的垂向流速,继而通过傅里叶反变换,可得到不同深度的垂向流速分布。eSQG 诊断垂向流速记为 ω_{eSQG} , 模式垂向流速记为 ω_{OFES} 。以 Qiu 等^[18-19]研究的黑潮延伸体 ($31^\circ \sim 39^\circ\text{N}$, $145^\circ \sim 153^\circ\text{E}$) 为例,验证本研究 eSQG 方法。可见,单日(2012 年 3 月 29 日) 400 m 深度 ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 的水平分布特征基本一致,尤其是二者的中尺度特征吻合较好(图 1a, 图 1b)。 ω_{eSQG} 相比 ω_{OFES} 较弱,这可能是因为 ω_{OFES} 包含部分非地转过程。混合层以深两种垂向流速的相关系数 r^s 基本在 0.5 以上(图 1c),表明 eSQG 较好地再现了 ω_{OFES} 。图 1d 进一步给出了年平均 r^s 剖面。年平均 r^s 随深度的增加而增加并在混合层以深达到 0.4 以上(图 1d),说明 eSQG 诊断结果在黑潮延伸体具有较好

的稳定性。以上结果与 Qiu 等^[18-19] 研究结果相似, 证明了本研究 eSQG 方法的可行性。

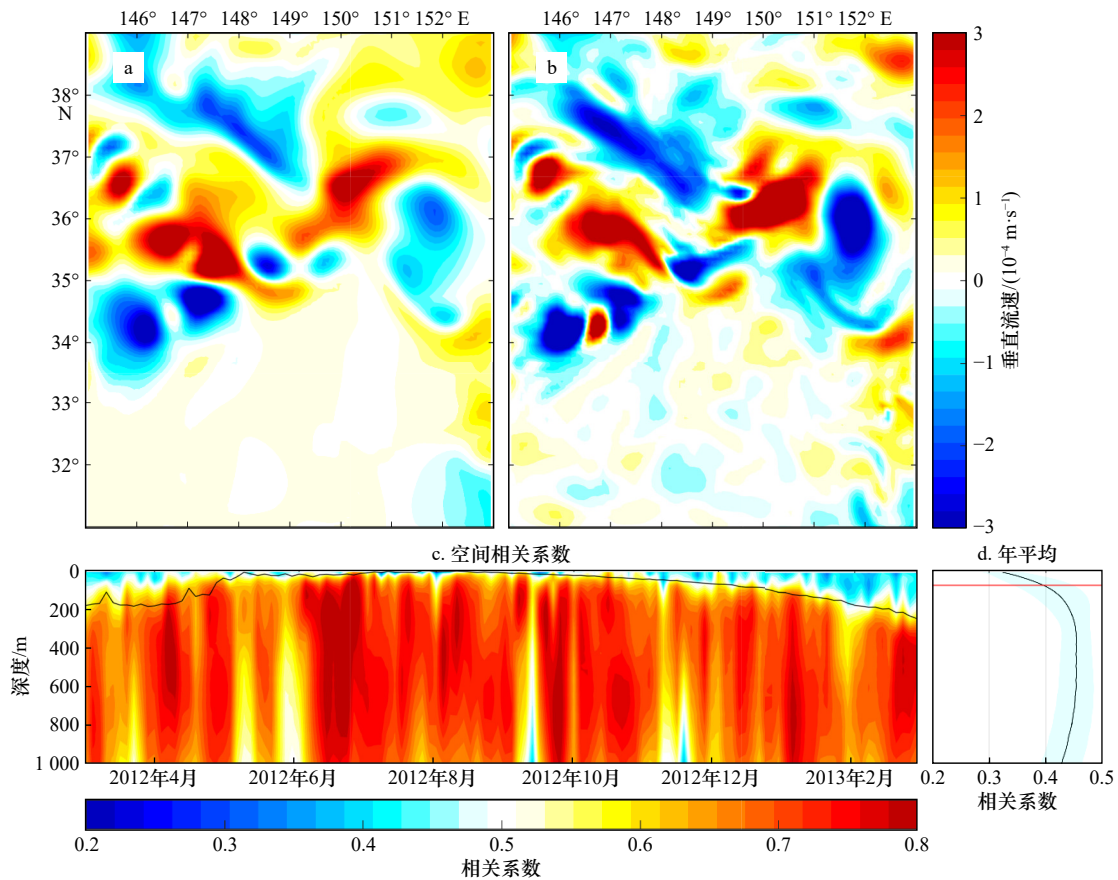


图 1 2012 年 3 月 29 日黑潮延伸体 400 m 深度 ω_{eSQG} (a) 和 ω_{OFES} (b) 的水平分布, ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的空间相关系数 r^s 的垂向时间序列 (c) 以及年平均结果 (d)

Fig. 1 Horizontal distribution of vertical velocity ω_{eSQG} (a) and ω_{OFES} (b) at 400 m in the Kuroshio Extension area on 29 March 2012, time series (c) and yearly average (d) of vertical profiles of spatial correlation coefficient r^s between ω_{eSQG} and ω_{OFES} in the area

图 c 中黑色线表示平均混合层深度, 图 d 中红色线表示年平均混合层深度, 阴影表示标准差

The black line in panel c denotes the area-averaged mixed layer depth, the red line in panel d represents the yearly-mean mixed layer depth, and the cyan shading denotes the standard deviations

在南海垂向流速诊断中, 由于陆地上不存在 SSH, 无法进行傅里叶变换。对靠近陆地边界时这一普遍问题, Isern-Fontanet 等^[32] 曾利用随距离衰减的权重函数对湾流海域的陆地进行赋值, 以解决陆地上不存在 SSH 的问题。本研究采用类似的二维线性插值对陆地区域赋值, 进而傅里叶变换得到垂向流速, 然后将陆地区域结果排除。同时, 为了避免边界效应, 将研究区域四周外扩 2° 后进行变换。

3 南海海盆垂向流速诊断结果

3.1 空间分布和季节变化

图 2 示出 4 种情况下南海 100 m 深度 ω_{eSQG} 、 ω_{OFES} 和二者差值的水平分布。可见, 相比年平均和季节平均, 单日 ω_{eSQG} 最强, 其中台湾附近及其西南部 ω_{eSQG} 的量值基本达到 2×10^{-5} m/s 以上 (图 2a)。年平均 ω_{eSQG}

最弱, 量值基本在 1×10^{-5} m/s 以下, 尤其是东南部海域几乎全部小于 0.5×10^{-5} m/s (图 2d)。夏季 ω_{eSQG} 在台湾西南部较强, 南海平均量值为 1.6×10^{-5} m/s (图 2g)。冬季 ω_{eSQG} 呈陆架边缘强, 海盆内部较弱的特征, 南海平均量值为 9.5×10^{-6} m/s (图 2j)。综上, ω_{eSQG} 呈现北强南弱 (以 14°N 为界)、夏强冬弱的时空特征。

对比“真值” ω_{OFES} (图 2b, 图 2e, 图 2h 和图 2k), ω_{OFES} 北强南弱的空间特征不明显, 季节变化则为冬强夏弱。 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 季节变化差异, 可能与 eSQG 主要适用于中尺度的垂向流速诊断有关^[16, 21]。前人分析显示南海中尺度过程具有 ω_{eSQG} 类似的时空特征^[33-34], 而南海次中尺度过程则冬强夏弱^[26-27]。 ω_{OFES} 包含部分次中尺度过程, 次中尺度过程引起的垂向流速通常高于中尺度过程, 因此呈现次中尺度过程的冬强夏弱特征。

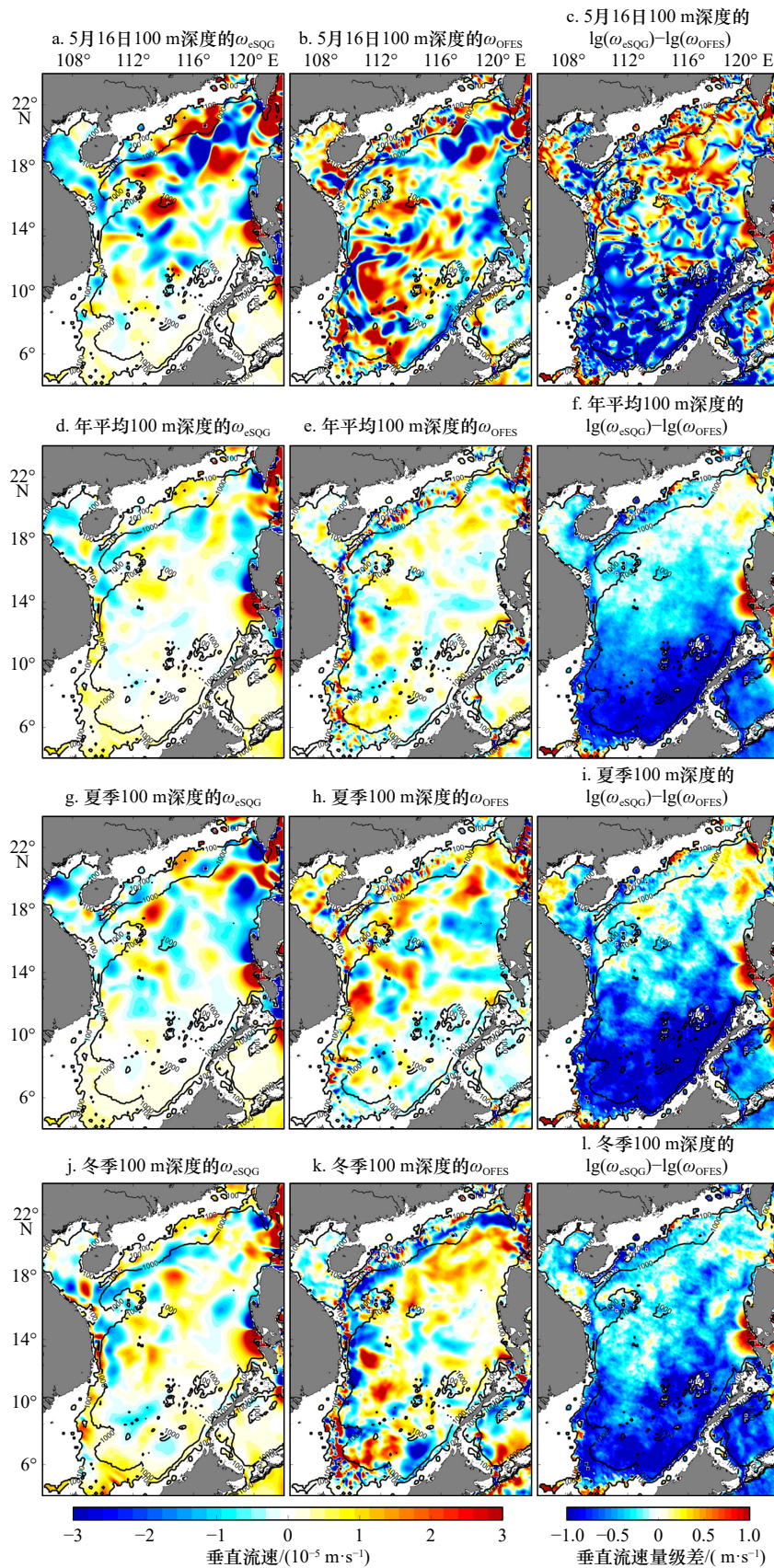


图2 单日(2012年5月16日, a-c)、年平均(d-f)、夏季(g-i)、冬季(j-l)南海100 m深度 ω_{ESQG} 、 ω_{OFES} 和二者差值的水平分布
Fig. 2 Horizontal distribution of ω_{ESQG} , ω_{OFES} and their difference at 100 m in the South China Sea on 16 May 2012 (a-c), in the whole year (d-f), summer (g-i) and winter (j-l)

黑色线表示100 m和1000 m等深线

Black lines denote the 100 m and 1000 m isobath

图 2c, 图 2f, 图 2i 和图 2l 进一步给出了 4 种情况下 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 之差 (记为 ω_{minus}) 的水平分布。可见, 单日 ω_{minus} 的主要特征表现为涡丝结构, 表明两种流速在次中尺度上的差异。南海南部的单日 ω_{minus} 几乎全部为负值, 反映了南海南部 ω_{eSQG} 普遍弱于 ω_{OFES} 的空间特征。年平均、夏季和冬季 ω_{minus} 均以负值为主且在南海南部较大, 反映了 eSQG 在中尺度过程较弱海域诊断结果普遍偏低。值得注意的是, 年平均、夏季和冬季 ω_{minus} 在台湾西南部和越南以东普遍较小, 这可能是因为南海中尺度过程在这两个区域最为强盛^[33-34]。4 种情况下 ω_{minus} 绝对值小于 1 的占比分别为 77% (单日)、95% (年平均)、87% (夏季) 和 94% (冬季), 表明 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的量级基本相当。 ω_{minus} 的高值主要集中在南海南部和陆架附近, 表明 eSQG 在这些区域的适用性较差。

计算南海全范围和深水区 (水深大于 1 000 m) ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 的空间相关系数, 分别记为 r_{total}^s 和 r_{deep}^s 。单日 (2012 年 5 月 16 日) 和年平均的 r_{total}^s 分别为 0.14 ($p < 0.01$) 和 0.01 ($p = 0.18$), r_{deep}^s 则分别达到 0.34 ($p < 0.01$) 和 0.06 ($p < 0.01$)。夏季和冬季 r_{total}^s 分别为 -0.03 ($p < 0.01$) 和 0.02 ($p < 0.01$), 而 r_{deep}^s 则分别为 0.02 ($p < 0.01$) 和 0.17 ($p < 0.01$)。 r^s 表现为单日 r^s 最大, 冬季 r^s 大于年

平均 r^s , 夏季 r^s 最小。 r_{deep}^s 普遍大于 r_{total}^s , 表明 eSQG 在南海深水区诊断效果优于浅水区。该结果低于在黑潮延伸体强涡旋区的单日对比相关系数 (0.6~0.7)^[18], 但与北太平洋区域研究结果相近 (单日对比相关系数为 0.4~0.5)^[20]。这可能是 3 个区域动力过程的差异引起的, 进一步说明 ω_{eSQG} 诊断方法在远离地形的深水区更有效。

3.2 不同深度和时间变化

图 3 示出南海 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 空间相关系数的垂向时间序列。可见, r_{total}^s 在冬季整体相对最大, 春、秋季次之, 夏季最小 (图 3a)。这是因为南海混合层深度在冬季最大、夏季最小, 前人研究表明混合层深度增加能提高 eSQG 诊断效果^[32]。 r_{total}^s 在混合层上下存在明显分层, 混合层以浅 r_{total}^s 相对混合层以深小。这一结果与 Qiu 等^[19] 给出混合层以浅空间相关系数小于 0.6, 混合层以深空间相关系数为 0.6~0.79 的研究结果相似。年平均结果显示 (图 3b), r_{total}^s 随深度的增加先增大后减小, 在 290 m 附近达到最大值 0.11。对比深水区 (图 3c), r_{deep}^s 随时间和深度的变化趋势与 r_{total}^s 相似, 但是量值有所增大。 r_{total}^s 最大值为 0.29, 而 r_{deep}^s 最大达到 0.38。这表明 eSQG 更适用于南海深水区。年平均 r_{deep}^s 显示 (图 3d), 随着深度的增加 r_{deep}^s 先增大后减

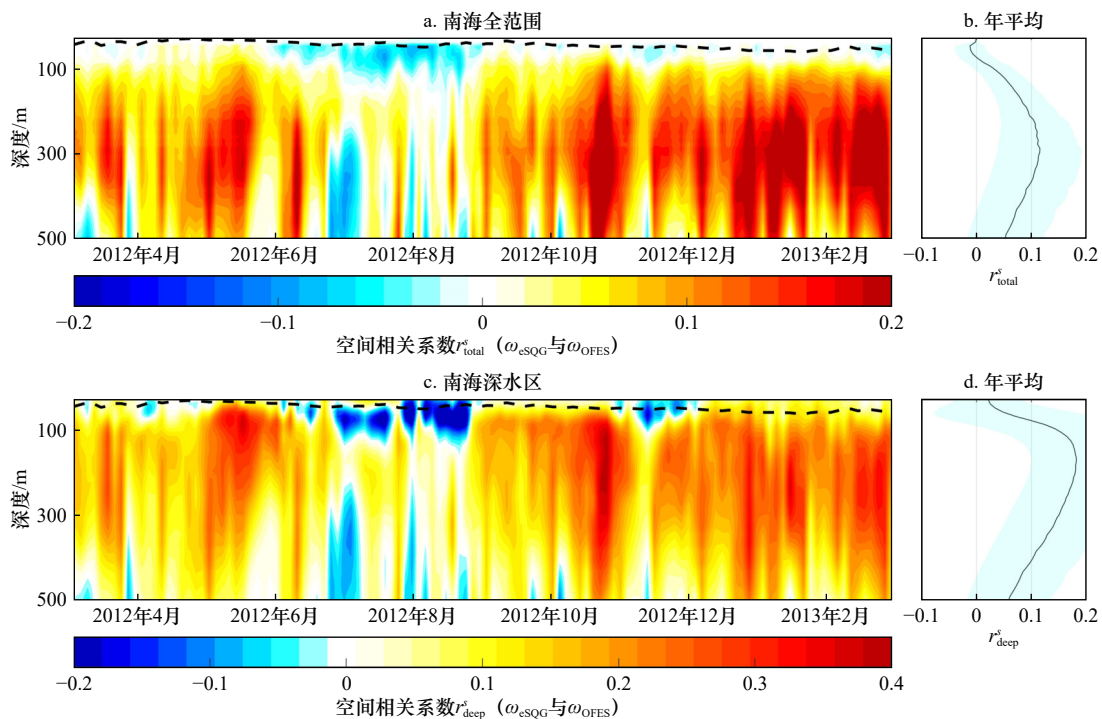


图 3 南海全域和深水区 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的空间相关系数 r_{total}^s (a-b) 和 r_{deep}^s (c-d) 的垂向时间序列及其年平均

Fig. 3 Time series and yearly average of vertical profiles of correlation coefficient r_{total}^s and r_{deep}^s between ω_{eSQG} and ω_{OFES} in the whole South China Sea (a-b) and the deep basin (c-d)

黑色虚线表示平均混合层深度, 阴影表示标准差

Black dashed lines denote the area-averaged mixed layer depth, cyan shadings denote the standard deviations

小,在 120 m 附近达到最大值 0.18。年平均 r_{deep}^s 达到最大值的深度要浅于年平均 r_{total}^s ,这可能是受到样本数量变化的影响。

图 4 进一步给出了 2012 年 3 月至 2013 年 2 月南海 50 m 和 100 m 层各网格点上 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的时间相关系数 r^s 的水平分布。从空间特征来看, r^s 在海盆西北部较高、东南部较低。台湾西南部、海南东南部和越南以东的 r^s 普遍较高,这与南海海盆尺度的气旋式环流有较好的对应。对比图 4a 和图 4b 可知,两层

时间相关系数 r^s 的高值区的水平位置基本不变,100 m 层 r^s 普遍高于 50 m 层。这说明 r^s 在垂向上具有较好的连续性, eSQG 在同一区域不同深度的诊断效果具有一定的稳定性。台湾西南部和越南以东 50 m 层 r^s 普遍在 0.4 以上,100 m 层更高达到 0.5 以上。该结果进一步表明 eSQG 在中尺度过程强盛的区域存在较好的适用性。 r^s 在陆架浅海区普遍低于 0.2,这可能与底边界对垂向流速的影响有关。

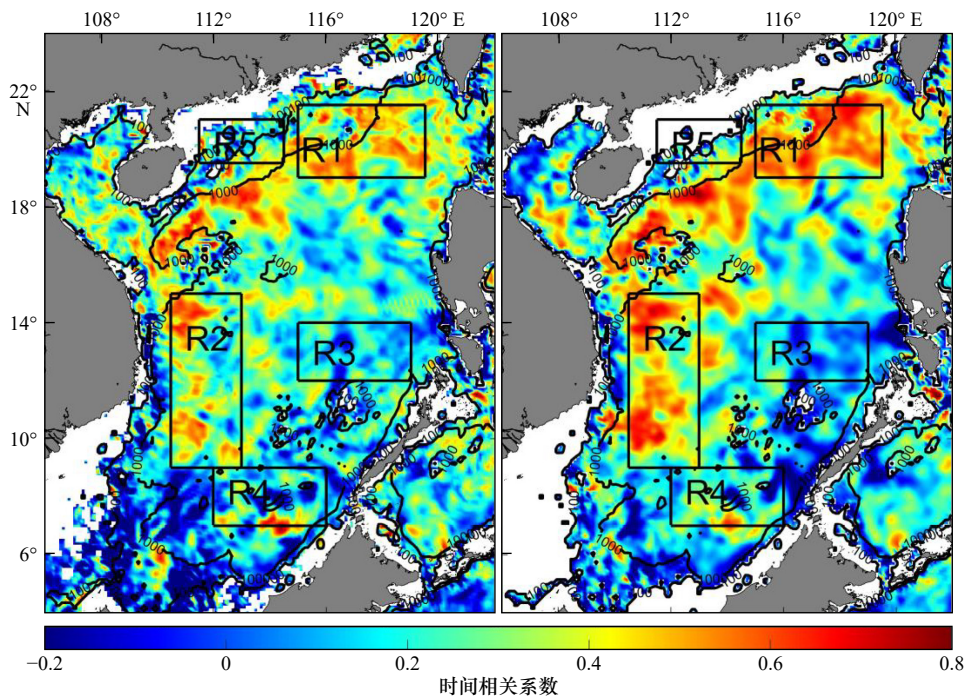


图 4 南海 50 m(a)和 100 m(b)层各网格点上 2012 年 3 月至 2013 年 2 月 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的时间相关系数 r^s 的水平分布
Fig. 4 Horizontal distribution of temporal correlation r^s between ω_{eSQG} and ω_{OFES} at 50 m (a) and 100 m (b) in the South China Sea from March 2012 to February 2013

黑色线表示 100 m 和 1000 m 等深线
Black lines denote the 100 m and 1000 m isobath

3.3 典型区域垂向流速诊断

根据南海中尺度动力过程^[31]和时间相关系数 r^s 的分布特征,选择 R1–R5 5 个典型区域对比分析,5 个区域的范围如图 4 所示。其中, R1 区位于台湾西南部(19°~21.5°N, 115°~119.5°E),该区域的动力过程主要受到黑潮入侵南海的影响。R2 区位于越南以东(9°~15°N, 110.5°~113°E),其中尺度过程主要与越南季风急流有关。R3 区位于菲律宾西部(12°~14°N, 115°~119°E),该区域中尺度过程较弱。R4 区位于南海南部(7°~9°N, 112°~116°E), R5 区位于海南岛东北部(19.5°~21°N, 111.5°~114.5°E),这两个区域的动力过程受岛屿地形影响较大。R1 和 R2 区

r^s 普遍达到 0.5 以上,定义为高值区。R3 区 r^s 整体较小,定义为低值区。R4 和 R5 区属于陆架海域,其垂向流速变化复杂,定义为陆架区。

图 5 给出了 R1–R5 区 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 空间相关系数 r^s 的垂向时间序列及其年平均和季节平均结果。如图 5a 所示, R1 区 r^s 除 8 月 100 m 层以深存在明显负值外,其余时间段均为正值,其中 5 月和冬季量值较大。R1 区的年平均 r^s 为 0.20~0.44,随着深度的增加而先增大后减小(图 5b)。冬季和夏季 r^s 随深度的变化与年平均结果相似,但夏季 r^s 整体量值较小为 0.05~0.45,冬季较大达到 0.21~0.54(图 5c)。值得注意的是,上层 80 m 夏季 r^s 较冬季大,这可能是因为夏

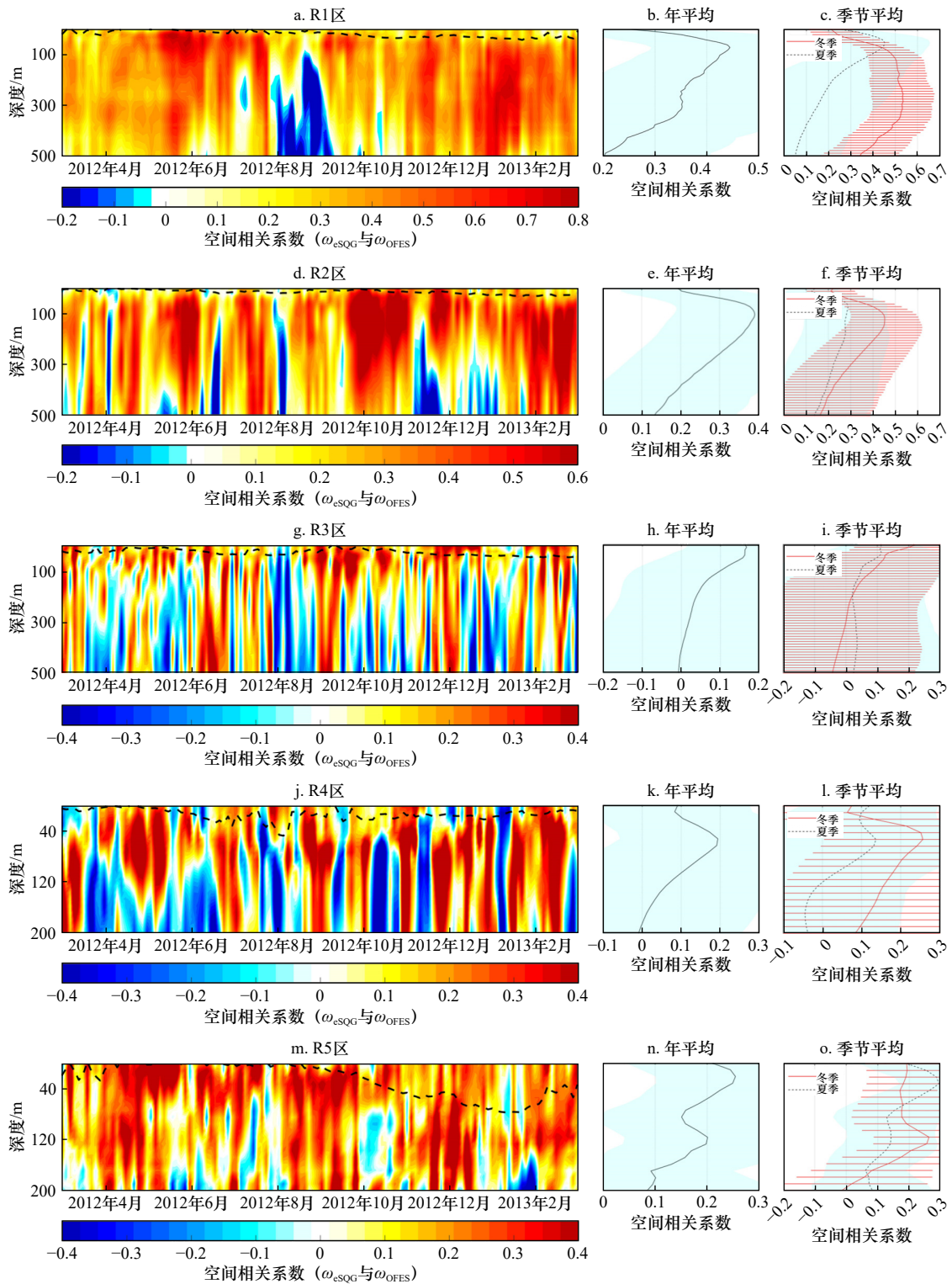


图5 R1–R5区 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 空间相关系数 r^s 的垂向时间序列及其年平均和季节平均结果

Fig. 5 Time series, yearly average and seasonal average of correlation r^s between ω_{eSQG} and ω_{OFES} in regions from R1 to R5

黑色虚线表示平均混合层深度, 横杠和阴影表示标准差

Black lines denote the box-averaged mixed layer depth, horizontal bars and cyan shadings denote the standard deviations

季整体混合层深度较浅。R2区 r^s 在2月、5月和10月量值较大(图5d)。R2区 r^s 负值分布相比于R1区更为分散, 在许多月份上层500m均存在负值。R2

区的年平均 r^s 随深度的变化与R1区相似, 但R2区整体量值较小, 为0.13~0.39(图5e)。R2区的冬季和夏季 r^s 随深度的增加均先增大后减小, 冬季R2区 r^s 在

上层 500 m 均大于夏季, 最大值所在深度比 R1 区较浅(图 5f)。整体来看, 冬季高值区 r^s 及其最大值所在深度均较夏季大, 表明 eSQG 更适用于诊断冬季高值区的垂向流速。年平均和季节平均 r^s 随深度增加都呈现先增大后减小的趋势, 这一结果与前人在大洋区域研究结果相似。某些时间高值区的 r^s 为负值, 这是 eSQG 应用于大洋区域所没有的现象。

由图 5g 可知, R3 区 r^s 随时间变化呈现正负交替的特征, 无明显的季节变化。 r^s 在混合层以浅比混合层以深大, 这与前人在大洋区域的研究结果相反。年平均 r^s 随深度的增大而减小, 最大值为 0.17, 相比高值区的结果小(图 5h)。冬季和夏季 r^s 也随深度的增加而减小, 200 m 层以浅冬季 r^s 大于夏季, 而后相反(图 5i)。对比高、低值区 r^s 结果可知, 低值区 r^s 整体量值比高值区小, 混合层以浅 r^s 垂向变化呈现相反的趋势。

由于陆架区大部分区域水深较浅, 200 m 以深的 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 样本数量较少, 比较二者差异的误差较大, 因此陆架区只考虑 200 m 以浅的结果。R4 区 r^s 类似于 R3 区呈现正负交替态势, 混合层上下差异不明显(图 5j)。R4 区的年平均 r^s 随深度增加先增大至约 60 m 深度达到最大值 0.19, 而后随深度快速减小, 到 200 m 深度接近于 0(图 5k)。冬季 r^s 相比夏季大, 60 m 处高值达到 0.26, 是夏季的两倍左右。由图 5m 可知, 200 m 以浅 R5 区 r^s 基本为正值。R5 区的年平均 r^s 随深度变化以振荡的形式整体减小, 其量值为 0.08~0.25(图 5n)。冬季和夏季在 100 m 上下相对大小相反, 不同于其他区域, R5 区上 100 m 层 r^s 夏季更大(图 5o)。

统计 R1-R5 区 r^s 的概率分布并对其进行功率谱密度分析, 结果如图 6 所示。R1 区 r^s 最大概率区间为 0.3~0.4, 占比达到 26%(图 6a)。R2 区 r^s 的概率分布与 R1 区相似, 最大概率区间略小(0.2~0.3), 占比为 19%(图 6c)。R1 和 R2 区 r^s 均以正值为主且 35% 以上大于 0.4, 表明 eSQG 能较好诊断高值区的垂向流速。功率谱图显示, R1 区各深度 r^s 存在能量密度较强的约 30 d 和 50 d 变化周期, 而高频信号(周期为 20 d 以内)的能量密度普遍较弱(图 6b)。由图 6d 可知, R2 区 r^s 在 30 d 以上周期能量密度普遍较强且随深度的变化不明显。R2 区 r^s 的 20 d 以下的高频信号较 R1 区强, 表明 R2 区可能存在更多高频过程。两个区域均存在 30~50 d 的周期, 表明两个区域 r^s 的变化可能受同一种动力过程影响。

R3 区 r^s 最大概率区间为 0.1~0.2, 占比为 19%。

虽然正相关系数占比为 59%, 但其 0.3 以上高相关系数的负值概率更大(图 6e)。R3 区 r^s 的正负值占比差异不大, 体现了 r^s 随时间变化正负交替的特征。此外, R3 区 r^s 主要为 -0.2~0.2(占比 59%), 表明 R3 区 r^s 主要为低值。R3 区功率谱图显示, r^s 时间变化存在约 45 d 和 75 d 的明显变化周期(图 6f)。30 d 以下的高频信号能量密度相对较小, 这种对比特征与高值区类似, 但 R3 区 r^s 高频能量高于 R1 区和 R2 区。并且 500 m 深度能量密度普遍大于表层能量密度, 这可能是因为导致 r^s 变化的动力过程主要发生在深层。

R4 区最大概率区间为 0~0.1, 占比为 14%(图 6g), R5 区最大概率区间为 0.2~0.3, 占比为 23%(图 6i)。R4 区 r^s 正、负值占比分别为 64% 和 36%, r^s 正、负值占比差异不大, 体现了正负交替的时间变化特征。R5 区 r^s 正、负值占比分别为 84% 和 16%, 占比差较 R4 区大, 主要是因为 R5 区上层 200 m 的 r^s 基本为正值。由图 6h 可知, R4 区 r^s 在 30~50 d 周期的能量密度最强, 能量密度随深度的变化不明显。高频信号的能量密度在底层较强, 主要呈现约 20 d 的周期。R5 区 r^s 主要表现为 20~30 d 的周期, 能量密度在底层较大(图 6j)。陆架区的高频信号能量普遍较强, 这与高、低值区存在较大差异, 可能是受底边界的影响。

4 讨论

4.1 数据时空分辨率对诊断结果的影响

4.1.1 时间分辨率影响

为了探究不同时间分辨率对 eSQG 在南海垂向流速诊断结果的影响, 将原 3 d 时间分辨率 SSH 数据平均为 9 d 时间分辨率, 进而计算 ω_{eSQG} , 并与 9 d 平均的 ω_{OFES} 进行对比分析。图 7 示出 9 d 时间分辨率南海 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的空间相关系数的垂向时间序列。可见, 9 d 分辨率 r_{total}^s 和 r_{deep}^s 的整体趋势和量值都与 3 d 分辨率结果相似。对比年平均和季节平均结果可知, 两种时间分辨率的结果差异很小。年平均和冬季 r_{total}^s 在 150 m 深度以深相对 3 d 分辨率结果稍有增大, 夏季表现为无明显差异。年平均 r_{deep}^s 相对 3 d 分辨率结果在 120 m 以深增大, 夏季基本不变, 冬季表现为 80 m 以深增大。不同时间分辨率 r_{total}^s 和 r_{deep}^s 在量值上的差异可能是时间分辨率降低导致样本数减少引起的。整体来看, r_{total}^s 和 r_{deep}^s 的变化不大, 可以认为改变时间分辨率不会影响 eSQG 在南海的适用性。

4.1.2 空间分辨率影响

为了探究不同空间分辨率对 eSQG 的影响, 将原 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率的 SSH 数据线性插值为 $0.25^\circ \times$

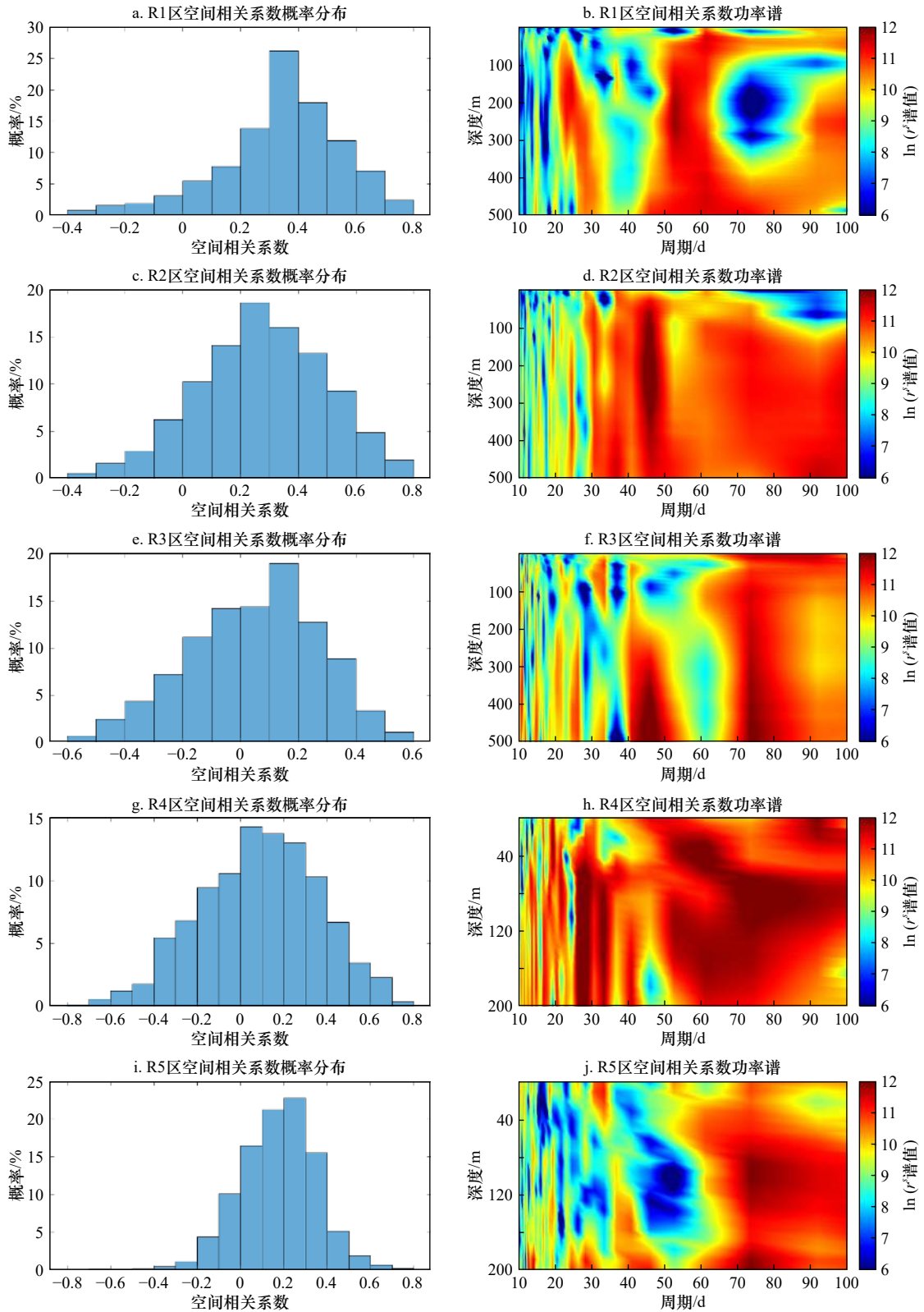


图 6 R1-R5 区 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 空间相关系数 r^s 的概率分布及其功率谱

Fig. 6 Probability distribution and power spectra of correlation r^s between ω_{eSQG} and ω_{OFES} in regions R1 to R5

0.25°分辨率,进而计算 ω_{eSQG} ,并与 0.25°分辨率的 ω_{OFES} 进行对比分析。图 8 示出 0.25°×0.25°空间分辨率南海各深度 ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的空间相关系数的垂向时间序

列。0.25°分辨率的 r_{total}^s 和 r_{deep}^s 表现出与 0.1°分辨率相似的时空变化趋势,但整体量值明显增大。年平均和季节平均结果显示, r_{total}^s 和 r_{deep}^s 在 3 种情况下相对 0.1°

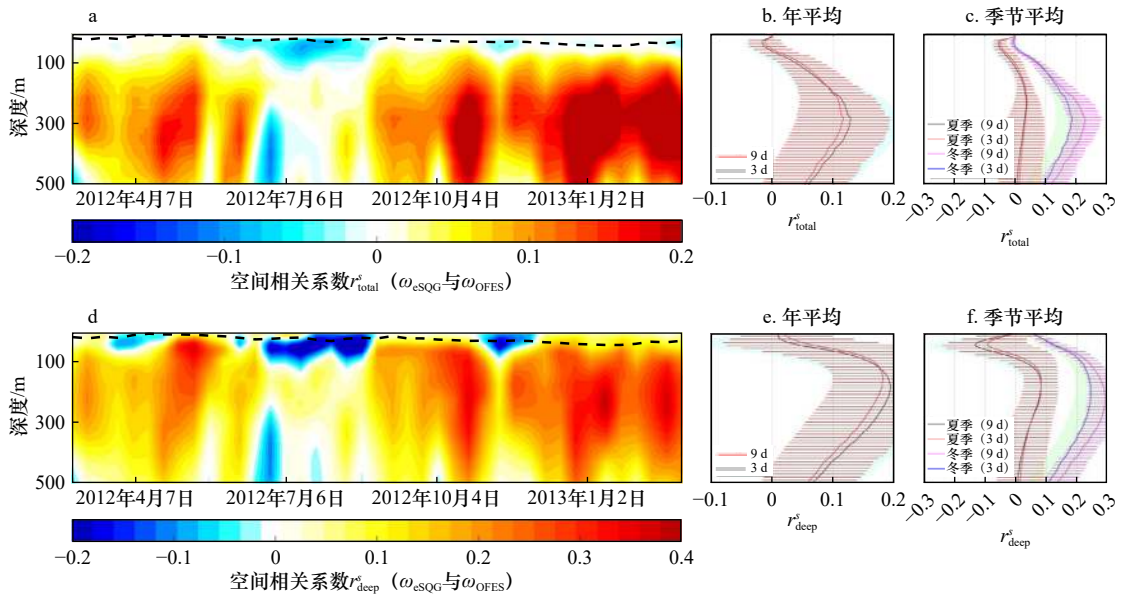


图 7 9 d 时间分辨率南海 ω_{esQG} 和 ω_{ofes} 的空间相关系数 r_{total}^s 和 r_{deep}^s 的垂向时间序列 (a, d) 及其年平均 (b, e) 和季节平均 (c, f)

Fig. 7 Time series (a, d), yearly average (b, e) and seasonal average (c, f) of correlation r_{total}^s and r_{deep}^s between ω_{esQG} and ω_{ofes} in the South China Sea derived from data with temporal resolution of 9 days

黑色虚线表示平均混合层深度 (a, d), 横杠和阴影表示标准差 (b-c, e-f)

Black dashed lines denote the area-averaged mixed layer depth (a, d), horizontal bars and color shadings denote the standard deviations (b-c, e-f)

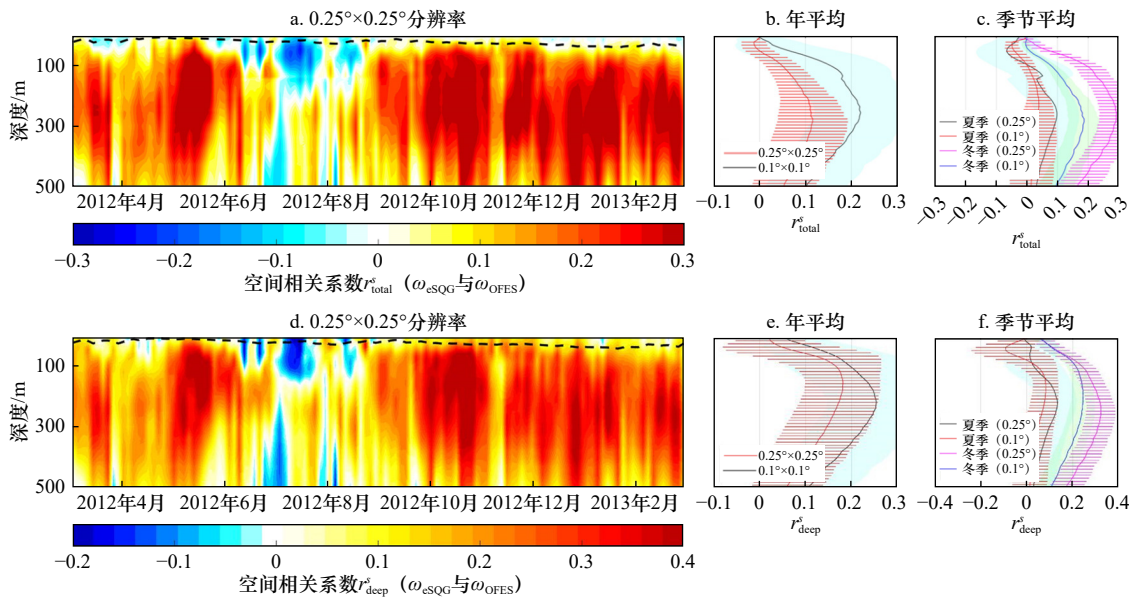


图 8 0.25° 空间分辨率南海 ω_{esQG} 和 ω_{ofes} 的空间相关系数 r_{total}^s 和 r_{deep}^s 的垂向时间序列 (a, d) 及其年平均 (b, e) 和季节平均 (c, f)

Fig. 8 Time series (a, d), yearly average (b, e) and seasonal average (c, f) of correlation r_{total}^s and r_{deep}^s between ω_{esQG} and ω_{ofes} in the South China Sea derived from data with horizontal resolution of 0.25°

黑色虚线表示平均混合层深度 (a, d), 横杠和阴影表示标准差 (b-c, e-f)

Black dashed lines denote the area-averaged mixed layer depth (a, d), horizontal bars and color shadings denote the standard deviations (b-c, e-f)

分辨率结果均增大。其中, r_{total}^s 的增幅基本达到 0.1, r_{deep}^s 的增幅基本达到 0.08, 二者增幅的差异可能是因为 r_{total}^s 计算的范围更大, 受空间分辨率的影响更明

显。另一方面, r_{total}^s 和 r_{deep}^s 的增幅在时间变化上大致表现为冬季最大, 年平均次之, 夏季最小, 这可能是因为 0.25° 分辨率过滤了某些非地转过程。整体来看,

可以认为 0.25° 分辨率有利于 eSQG 诊断南海垂向流速。前人研究显示,当相对涡度较大、非地转增强时, eSQG 诊断效果会有所下降^[32]。因此, 0.25° 分辨率数据时 eSQG 的适用性强于 0.1° 分辨率。

4.2 诊断效果随时间变化的可能原因

前文分析显示 ω_{eSQG} 的时空特征表现为夏强冬弱、北强南弱, r^2 在台湾西南部和越南以东较高。为了探究上述研究结果的成因, 图 9 给出了 3 种情况南海 100 m 深度的相对涡度 ζ/f ($f = 5.6 \times 10^{-6}$ Hz 是

14°N 的科氏参数) 的水平分布。可见南海整体相对涡度在陆架边缘较大, 海盆内部较小。相对涡度基本在 0.1 的量级, 表明南海的运动尺度以中尺度为主, 符合 eSQG 诊断垂向流速的适用尺度。南海相对涡度呈现夏强冬弱、北强南弱的时空特征, 说明 ω_{eSQG} 的时空特征可能受到相对涡度的影响。另一方面, 台湾西南部和越南以东的相对涡度普遍较其余区域大, 这是 eSQG 在这两个区域的诊断效果较好的原因。

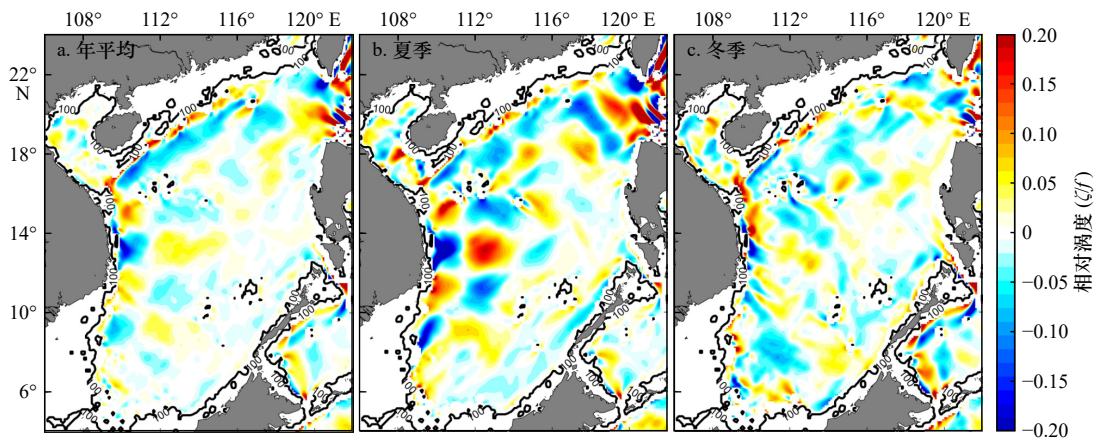


图 9 年平均、夏季和冬季南海 100 m 深度相对涡度的水平分布

Fig. 9 Horizontal distribution of relative vorticity at 100 m in the South China Sea in the whole year, summer and winter

黑色线表示 100 m 等深线

Black line denotes 100 m isobath

除了季节变化, 同一区域 eSQG 诊断流速与 OFES 模拟“真值”的差异, 在时间上存在很大变化。以诊断结果相对较好的 R1 区为例, ω_{eSQG} 和 ω_{OFES} 的相关系数也存在明显周期变化。为探究 eSQG 诊断效果随时间变化的原因, 对比 R1 区海面高度 SSH、诊断流速 ω_{eSQG} 以及 ω_{OFES} 谱分析结果。如图 10a 所示, 研究区 SSH 存在约 18 d、26 d、46 d 和 73 d 的周期变化, 这与研究区中尺度涡旋、地形罗斯贝波和固有模态等因素有关^[24, 35-36]。对应 SSH 变化, R1 区 ω_{eSQG} 的能量密度随深度的增大而增大, 也存在约 18 d、24 d、30~40 d、45~55 d 和 90~100 d 的周期, 表明 ω_{eSQG} 与中尺度过程变化密切相关(图 10b)。对比 r^2 的功率谱图(图 6b), 其变化主周期 20~30 d 和 45~60 d 可与 SSH 和 ω_{eSQG} 变化周期相对应。 ω_{OFES} 谱分析结果显示, 其存在对应 SSH 和 ω_{eSQG} 约 18 d 和 46 d 的周期。 ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 相关性在时间上的变化可能受中尺度过程影响较大。

进一步根据 100~500 m 深度平均的 r^2 将研究时间段分为 3 种情况: $r^2 < 0$, 定义为负相关期; $0 \sim 0.5$ 定义为低相关期; $0.5 \sim 1$ 定义为高相关期。3 种情况下,

R1 区合成平均的 SSH 和海面密度 (Surface Sea Density, SSD) 的水平分布如图 11 所示。可见, 负相关期, SSH 呈现空间对称分布, 东北角存在明显的气旋涡(图 11a)。此时, SSD 在东北角也存在明显的高值区, 南部 SSD 普遍较大(图 11d)。SSH 和 SSD 的相关系数为 -0.27 ($p < 0.01$), 二者呈现反相关关系。低相关期, SSH 整体差异较小(图 11b), 中南部 SSH 较小, 西北部较大。同时期 SSD 在北部较大, 东南部较小。SSD 与 SSH 的相关系数较小, 为 0.15 ($p < 0.01$)。高相关期, SSH 沿纬度方向存在弯曲的特征, 北部较大, 南部较小。SSD 北部整体较大, 东南部较小, 其分布特征与同时期 SSH 相似。SSH 和 SSD 的相关系数高达 0.56 ($p < 0.01$)。可见, eSQG 诊断南海垂向流速与 SSH 和 SSD 的相关性有关。结合前人研究结果^[18-19]: 当 SSH 与 SSD 存在相同的相位时, eSQG 诊断结果更接近真值。eSQG 诊断结果在时间上的差异可能是由 SSH 与 SSD 相位差异造成的。

4.3 与其他模式结果的对比

最近, Zhu 等^[37] 利用分辨率为 $(1/12)^\circ$ 的 HYCOM

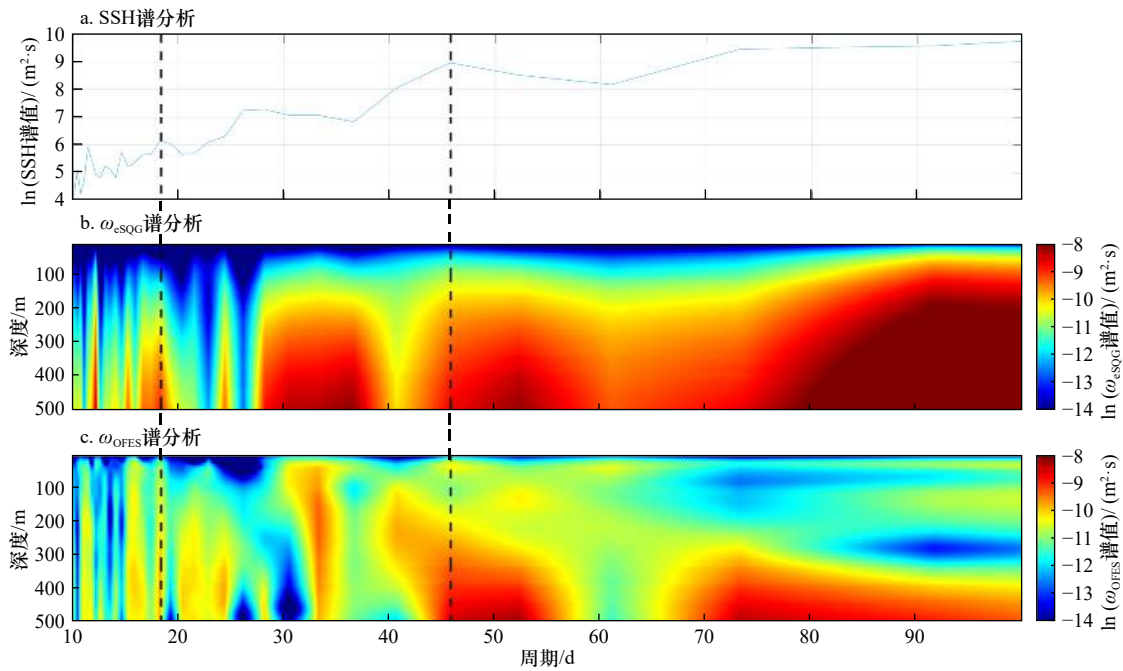


图 10 R1 区海面高度 (SSH)(a)、 ω_{eSQG} (b) 和 ω_{OFES} (c) 谱分析结果

Fig. 10 Power spectra of sea surface height (SSH) (a), ω_{eSQG} (b), and ω_{OFES} (c) in the Region R1

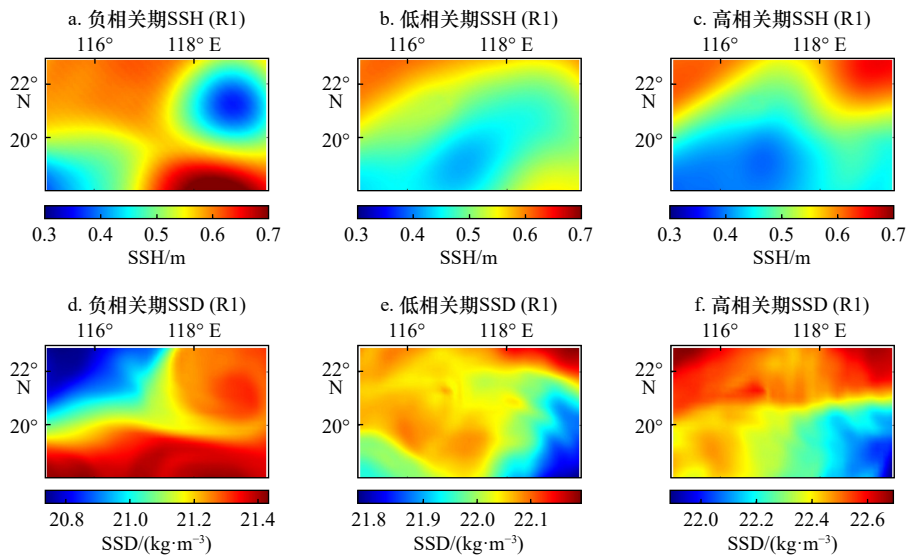


图 11 负相关期、低相关期和高相关期 R1 区海面高度 (SSH) 和海面密度 (SSD) 的水平分布

Fig. 11 Horizontal distribution of sea surface height (SSH) and surface sea density (SSD) in the Region R1 during period of negative correlation, low correlation and high correlation

(Hybrid Coordinate Ocean Model) 水平流速数据, 根据质量守恒估算了 2012 年 8 月至 2013 年 9 月时间平均的南海 50 m 和 250 m 深度的垂向流速。研究结果显示, 南海垂向流速整体北强南弱。在季节变化上, Zhu 等^[37] 结果显示是夏强冬弱, 跨岸线方向呈正负交替的带状分布; 冬季和夏季垂向流速在时间变化上存在季节性的正负颠倒, 这一现象在近岸海域最为明显。与之相比, 本文 eSQG 诊断南海垂向流速 ω_{eSQG} 同样表现为北强南弱, 夏强冬弱, 冬季台湾西南部少数

海域存在跨岸线方向的正负交替带状结构, 季节性颠倒的特征不明显。 ω_{OFES} 则表现为北强南弱, 冬强夏弱的时空特征, 无明显的带状结构和季节性颠倒。Zhu 等^[37] 在计算垂向流速之前对水平流速数据进行了九点平滑处理, 因此其研究结果主要显示南海垂向流速的中尺度时空特征。OFES 模式的数据分辨率为 0.1° , 其模拟结果可能包含部分次中尺度过程, 因此 ω_{OFES} 呈现冬强夏弱的时空特征。另一方面, eSQG 能较好诊断垂向流速的中尺度时空特征, 因而 ω_{eSQG} 呈

现与 Zhu 等^[37] 估算垂向流速相似的时空特征。

5 结论

本文利用 OFES 模式 0.1° 高分辨率的温盐、流速和海面高度数据, 运用 eSQG 方法诊断估算了南海垂向流速的时空分布, 并与 OFES 模式垂向流速对比分析。主要结论如下:

(1) 在南海海域, ω_{eSQG} 空间分布均以 14°N 为界, 呈现北强南弱的特征, ω_{eSQG} 强度从南海东北部 $O(10^{-5} \text{ m/s})$ 减弱到西南部 $O(10^{-6} \text{ m/s})$ 。在时间变化上, ω_{eSQG} 呈现夏强冬弱的时间特征。其时间特征与 ω_{OFES} 相反。 ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 水平空间相关系数 r^s 在冬季最高、夏季最小。二者吻合程度在深水区明显高于全海域, 说明 eSQG 诊断效果在远离地形的深水区更有效。eSQG 方法在混合层以下诊断效果较好,

$r_{\text{deep}}^s (r_{\text{total}}^s)$ 在次表层 150 m (320 m) 上下达到最大, 之后随深度的增加而减小。

(2) eSQG 方法在台湾西南部和越南以东等中尺度涡活跃区的适用性较好, ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 时间变化相关系数 r^s 普遍高于 0.5, 35% 以上空间变化系数高于 0.4; 菲律宾西部深水区以及南海南部和海南岛东北部的陆架区 r^s 小于 0.2, 60% 以上空间相关系数 r^s 小于 0.2。各区域 r^s 存在明显时间变化, 变化周期基本在 18~55 d 之间, 反映了中尺度过程对 eSQG 的影响。对比 SSH 与 SSD 空间分布显示, 当 SSH 与 SSD 的相位相同时, eSQG 诊断结果较好。

(3) 海面高度数据的时间分辨率对 eSQG 诊断结果的影响不明显; 空间分辨率降低为 0.25° 时, ω_{eSQG} 与 ω_{OFES} 空间系数增大, 说明 eSQG 诊断在中尺度上更适用。

参考文献:

- [1] Freilich M A, Mahadevan A. Decomposition of vertical velocity for nutrient transport in the upper ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2019, 49(6): 1561–1575.
- [2] Boyd P W, Claustre H, Levy M, et al. Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 327–335.
- [3] 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 琼东上升流研究概述[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(4): 35–41.
Xie Lingling, Zhang Shuwen, Zhao Hui. Overview of studies on Qiongdong upwelling[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(4): 35–41.
- [4] 计超, 徐利强, 张一辉, 等. 南海琼东上升流区过去 1 900 年海洋生产力记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(5): 97–106.
Ji Chao, Xu Liqiang, Zhang Yihui, et al. A 1 900-year record of marine productivity in the upwelling area of east continental shelf of Hainan Island, South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(5): 97–106.
- [5] Pascual A, Ruiz S, Nardelli B B, et al. Net primary production in the Gulf Stream sustained by quasi-geostrophic vertical exchanges[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(2): 441–449.
- [6] Mahadevan A, Pascual A, Rudnick D L, et al. Coherent pathways for vertical transport from the surface ocean to interior[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(11): E1996–E2004.
- [7] Portela E, Kolodziejczyk N, Vic C, et al. Physical mechanisms driving oxygen subduction in the global ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(17): e2020GL089040.
- [8] Liang Xinfeng, Spall M, Wunsch C. Global ocean vertical velocity from a dynamically consistent ocean state estimate[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(10): 8208–8224.
- [9] Xie Lingling, Pallàs-Sanz E, Zheng Quanan, et al. Diagnosis of 3D vertical circulation in the upwelling and frontal zones east of Hainan Island, China[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(4): 755–774.
- [10] Chen Ke, Gaube P, Pallàs-Sanz E. On the vertical velocity and nutrient delivery in warm core rings[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2020, 50(6): 1557–1582.
- [11] 沈萌, 缪明芳, 王舒瑜, 等. 2018 年夏季舟山海域上升流特征及形成机制分析[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(S1): 18–23.
Shen Meng, Miao Mingfang, Wang Shuyu, et al. Analysis of upwelling characteristics and formation mechanism in the Zhoushan coastal region in the summer of 2018[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2020, 59(S1): 18–23.
- [12] Wang Liju, Xie Lingling, Zheng Quanan, et al. Tropical cyclone enhanced vertical transport in the northwestern South China Sea I: mooring observation analysis for Washi (2005)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106599.
- [13] Legal C, Klein P, Treguier A M, et al. Diagnosis of the vertical motions in a mesoscale stirring region[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(5): 1413–1424.
- [14] Pietri A, Capet X, D'Ovidio F, et al. Skills and limitations of the adiabatic omega equation: how effective is it to retrieve oceanic vertical circulation at mesoscale and submesoscale?[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(3): 931–954.
- [15] 孙春健, 张晓爽, 张寅权, 等. 卫星遥感重构海洋次表层研究进展[J]. *海洋信息*, 2018, 33(4): 21–28.
Sun Chunjian, Zhang Xiaoshuang, Zhang Yinquan, et al. Progress in reconstruction of ocean subsurface by satellite remote sensing data[J]. *Marine Information*, 2018, 33(4): 21–28.

- [16] Klein P, Isern-Fontanet J, Lapeyre G, et al. Diagnosis of vertical velocities in the upper ocean from high resolution sea surface height[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(12): L12603.
- [17] Lapeyre G, Klein P. Dynamics of the upper oceanic layers in terms of surface quasigeostrophy theory[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(2): 165–176.
- [18] Qiu Bo, Chen Shuiming, Klein P, et al. Reconstructability of three-dimensional upper-ocean circulation from SWOT sea surface height measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(3): 947–963.
- [19] Qiu Bo, Chen Shuiming, Klein P, et al. Reconstructing upper-ocean vertical velocity field from sea surface height in the presence of unbalanced motion[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2020, 50(1): 55–79.
- [20] Liu Lei, Xue Huijie, Sasaki H. Diagnosing subsurface vertical velocities from high-resolution sea surface fields[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(5): 1353–1373.
- [21] Isern-Fontanet J, Chapron B, Lapeyre G, et al. Potential use of microwave sea surface temperatures for the estimation of ocean currents[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24): L24608.
- [22] Ponte A L, Klein P, Capet X, et al. Diagnosing surface mixed layer dynamics from high-resolution satellite observations: numerical insights[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(7): 1345–1355.
- [23] Chavanne C P, Klein P. Quasigeostrophic diagnosis of mixed layer dynamics embedded in a mesoscale turbulent field[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(1): 275–287.
- [24] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 131–158.
Zheng Quanan, Xie Lingling, Zheng Zhiwen, et al. Progress in research of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 131–158.
- [25] Zheng Quanan, Xie Lingling, Xiong Xuejun, et al. Progress in research of submesoscale processes in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(1): 1–13.
- [26] 杨潇霄, 曹海锦, 经志友. 南海上层海洋次中尺度过程空间差异和季节变化特征[J]. *热带海洋学报*, 2021, 40(5): 10–24.
Yang Xiaoxiao, Cao Haijin, Jing Zhiyou. Spatial and seasonal differences of the upper-ocean submesoscale processes in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(5): 10–24.
- [27] 张雨辰, 张新城, 张金超, 等. 南海亚中尺度过程的时空特征与垂向热量输运研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(12): 1–11.
Zhang Yuchen, Zhang Xincheng, Zhang Jinchao, et al. Spatiotemporal characteristics and vertical heat transport of submesoscale processes in the South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(12): 1–11.
- [28] Jing Zhiyou, Qi Yiquan, Du Yan, et al. Summer upwelling and thermal fronts in the northwestern South China Sea: observational analysis of two mesoscale mapping surveys[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(3): 1993–2006.
- [29] 黄小龙, 经志友, 郑瑞玺, 等. 南海西部夏季上升流锋面的次中尺度特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2020, 39(3): 1–9.
Huang Xiaolong, Jing Zhiyou, Zheng Ruixi, et al. Analysis of submesoscale characteristics of summer upwelling fronts in the western South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(3): 1–9.
- [30] Hu Jianyu, Gan Jianping, Sun Zhenyu, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C5): C05016.
- [31] Lu Wenfang, Yan Xiaohai, Han Lu, et al. One-dimensional ocean model with three types of vertical velocities: a case study in the South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2017, 67(2): 253–262.
- [32] Isern-Fontanet J, Lapeyre G, Klein P, et al. Three-dimensional reconstruction of oceanic mesoscale currents from surface information[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C9): C09005.
- [33] He Zhigang, Wang Dongxiao, Hu Jianyu. Features of eddy kinetic energy and variations of upper circulation in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 21(2): 305–314.
- [34] Cheng Xuhua, Qi Yiquan. Variations of eddy kinetic energy in the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2010, 66(1): 85–94.
- [35] Xie Lingling, Zheng Quanan. New insight into the South China Sea: Rossby normal modes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(7): 1–3.
- [36] Shu Yejiang, Xue Huijie, Wang Dongxiao, et al. Persistent and energetic bottom-trapped topographic Rossby waves observed in the southern South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 24338.
- [37] Zhu Yaohua, Wang Dingqi, Wang Yonggang, et al. Vertical velocity and transport in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(7): 13–25.

Application of eSQG method in vertical velocity diagnosis in the South China Sea

Huang Jiahui^{1,2}, Xie Lingling^{1,2,3}, Li Qiang^{1,2,3}, Li Min^{1,2,3}

(1. Laboratory of Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Oceanology and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhangjiang 524088, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Climate, Resource and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Ocean, Zhanjiang 524088, China; 3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Using $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ high-resolution temperature, salinity, velocity and sea surface height (SSH) data from the ocean general circulation model for the earth simulator (OFES) model, this study analyzes the capability and applicability of the eSQG (effective Surface Quasi-Geostrophy) method in vertical velocity diagnosis in the South China Sea (SCS), as well as the spatiotemporal variation of vertical velocities. The diagnosed vertical velocities ω_{eSQG} from SSH with the eSQG method are of the same order of 10^{-5} m/s as the “true” vertical velocities ω_{OFES} from the OFES model. ω_{eSQG} shows spatial variations with higher values in northern basin. The correlation coefficients of the horizontal distribution of ω_{eSQG} and ω_{OFES} (r^s) are greater in deep basin than that in the whole SCS, suggesting that the eSQG method is more efficient in vertical velocity diagnosis in deep water far from boundaries. Vertically, the correlation coefficient has maximum values occurring in the subsurface layer at about 150 m. ω_{eSQG} is stronger in summer and r^s show seasonal variation with higher values in winter, indicating more efficient in eSQG diagnosis in winter. ω_{eSQG} is reliable in the regions southwest of Taiwan and east of Vietnam, where the temporal correlation coefficients of ω_{eSQG} and ω_{OFES} (r^t) exceed 0.6, while ω_{eSQG} is poorly correlated to ω_{OFES} in the shelf regions in the southern and northwestern SCS with r^t mostly under 0.2. r^s in the same region is varying at periods of about 18–55 d. ω_{eSQG} performs better as the distributions of the SSH and the sea surface density are in same phase. ω_{eSQG} varies little as the temporal resolution of SSH varies, while r^s increases as spatial resolution reduced to 0.25° in mesoscales.

Key words: vertical velocity; eSQG; spatio-temporal variation; South China Sea; OFES