

刘雪, 梁楚进, 蔺飞龙. 南海北部的春季流场季节内变异个例分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 1–12, doi:10.12284/hyxb2023173
Liu Xue, Liang Chujin, Lin Feilong. Cases study of intraseasonal variability of velocity happened in spring in the northern South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 1–12, doi:10.12284/hyxb2023173

南海北部的春季流场季节内变异个例分析

刘雪¹, 梁楚进^{1,2*}, 蔺飞龙²

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏南京 210044; 2. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江杭州 310012)

摘要: 在南海北部, 与中尺度涡相关的季节内变异特征十分显著, 通过比较不同时期流场的季节内变异特征, 有助于揭示不同动力不稳定中尺度涡对季节内活动的影响。本文以南海北部 2009 年春季和 2020 年春季为例, 分析了两个时期中尺度涡的动力不稳定性, 从而探究季节内变异特征。基于潜标实测流速数据, 本文进行了动能谱分析, 结果显示这两个时期的流场季节内变异具有相似特征, 显著周期分别为 10~60 d 和 30~90 d。季节内信号主要出现在 200 m 以上的上表层水域, 其中 30~90 d 的季节内流是对应观测期间的主要季节内成分。滞后回归分析和动力不稳定性的计算表明, 2009 年春季的季节内变异受移动快但强度弱的表层中尺度涡影响, 动力不稳定性由斜压不稳定和正压不稳定共同调制; 而 2020 年春季的季节内变异是受强斜压性的中尺度涡影响, 通过流速垂向切变增强, 从而较快地触发流场季节内变异的发生。本文研究结果有助于深入了解中尺度涡对南海北部季节内活动的影响机制, 为海洋动力学和气候研究提供了重要的参考和理论基础。

关键词: 南海北部; 流场季节内变异; 中尺度涡; 海洋动力不稳定

中图分类号: P731.21 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2023)12-0001-12

1 引言

海洋流场季节内变异 (Intraseasonal Variability, ISV) 的显著周期为 10~90 d, 对海洋的输运和物质交换具有重要作用, 以吕宋海峡为例, 季节内尺度的输运量与季节性变化相当^[1]。南海北部的环流特征除了显著的季节变化和年际变化外^[2-5], 季节内变异活动也十分活跃。早期的研究是基于卫星高度计数据分析海表面观测到的季节内变异活动^[6-10], 近年来得益于潜标观测布放增多, 研究者们能够利用潜标的长期观测数据, 对深度剖面的流场季节内变异开展研究, 针对其空间分布和垂向结构特征进行探究^[1, 11-13]。Wang 等^[12] 对东沙区域 800 m 以上的跨斜坡流季节内变异特征展开研究, 并论证了跨斜坡流的重要性,

Xu 等^[13] 增加在南海北部陆坡区域的潜标观测数量, 给出了上表层的流场季节内变异自东向西的变化特征并分析其成因。

南海北部的季节内变异信号自东向西逐渐减弱以及冬季显著增强的特征, 与中尺度涡西传表现一致, 涡动能的变化体现为冬强夏弱^[12-14], 另一方面, 经吕宋海峡完成的涡致输运对于南海北部的水交换具有重要作用^[15], 因此研究者们普遍认可中尺度涡与南海北部的流场季节内变异密切相关^[1, 13, 16-18]。Zhang 等^[1] 利用滞后回归分析方法, 论证了中尺度涡能够激发流场季节内变异这一观点, 并指出中尺度涡以近似第一斜压罗斯贝波的速度向西南方向传播^[10]。另外, 流场季节内变异强度还与中尺度涡半径存在相关关系, 长周期的季节内变异活动强度与中尺度涡的半径成正

收稿日期: 2023-09-28; 修订日期: 2023-11-14。

作者简介: 刘雪 (1997—), 女, 广东省佛山市人, 研究方向为流场季节内变化。E-mail: kudosl_ocean@163.com

* 通信作者: 梁楚进 (1966—), 男, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: cjliang@sio.org.cn

比^[13]。受季风^[19-21]与黑潮扰动^[18, 22-23]的影响,大量中尺度涡在吕宋海峡西侧局地生成,或从黑潮入侵路径中脱落,随后传入南海北部^[10, 24-26],而背景流不稳定是促进中尺度涡生成的主要成因^[27-28]。斜压不稳定通过垂向流速切变将涡动能从平均动能中转移并增强,从而激发出强烈的季节内变异^[12],对季节内动能进行动力模态分解进一步发现,当中尺度涡存在时,大量季节内能量聚集在第一斜压模态中^[16]。尽管斜压不稳定主导了大部分中尺度涡的生成,但受黑潮流套路径影响并在吕宋海峡西侧局地生成的中尺度涡体现出强正压不稳定性^[24],因此研究者们利用再分析数据揭示出海洋内部的能量平衡关系^[1, 9-10, 12, 29]。

目前,研究者们结合卫星高度计数据、潜标观测数据与模式再分析数据,对季节内变异的空分布特

征及其生成机制有了较深入的认识,但缺少不同大尺度背景下的流场季节内变异进行对比分析。本文中分析的两个潜标观测时间分别为 2008–2010 年和 2019–2020 年,根据 Niño3.4 指数对厄尔尼诺–拉尼娜进行判断,图 1 的 Niño3.4 指数表明,2008–2010 年处于拉尼娜年向厄尔尼诺年的转变,2019–2020 年则处于厄尔尼诺年向拉尼娜年的转变,其中 2008/2009 年为拉尼娜年,2019/2020 年为厄尔尼诺年。南海北部的环流受 ENSO 的年代际调制影响,因此本文希望基于不同的气候态条件,探究不同时期的季节内变异分布特征,其次是旨在利用动力不稳定的计算,分析出中尺度涡的影响作用,从动力变化角度更全面地认识流场季节内变异活动的复杂性,揭示不同动力不稳定的中尺度涡对季节内变异的影响。

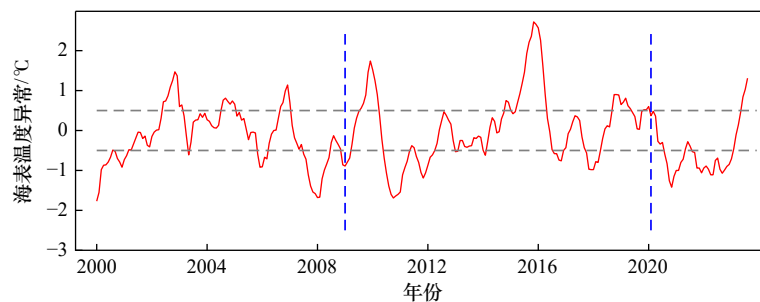


图 1 Niño3.4 指数
Fig. 1 Niño3.4 index

统计数据来自 NOAA, 时间为 2000–2023 年, 两条蓝色虚线分别表示 2008/2009 年和 2019/2020 年, 两条灰色虚线分别为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 海表温度异常
Statistical data from NOAA, 2000–2023, the two dashed blue lines represent the years 2008/2009 and 2019/2020 respectively, the two gray dashed lines are $\pm 0.5^\circ\text{C}$ sea surface temperature anomalies respectively

2 数据和方法

2.1 数据

本文是基于布放在南海北部陆坡区域的两个相近站点潜标数据来展开的,其中 D1 布放位置为 $19^\circ 54' \text{N}$, $115^\circ 31' \text{E}$, D2 布放位置为 $19^\circ 53' \text{N}$, $115^\circ 11' \text{E}$,在图 2 中分别以青色和品红色三角形标记。D1 的观测时间为 2008 年 4 月至 2010 年 5 月,共开展了 4 次布放与回收,仪器配置有上探 300k ADCP、下探 75k ADCP 和 SBE37; D2 的观测时间为 2019 年 5 月至 2020 年 11 月,仪器配置有下探 75k ADCP 和 SBE37。两个潜标的实际记录时间与具体观测深度见表 1 和表 2。对于两个潜标观测中部分缺测的数据,均采用插值的方法进行补足, D1 点流速数据插值为 90~600 m,温盐数据插值则至 100~300 m, D2 点流速数据插值为 100~450 m,温盐数据插值则至 170~450 m,插值间隔均为 5 m。

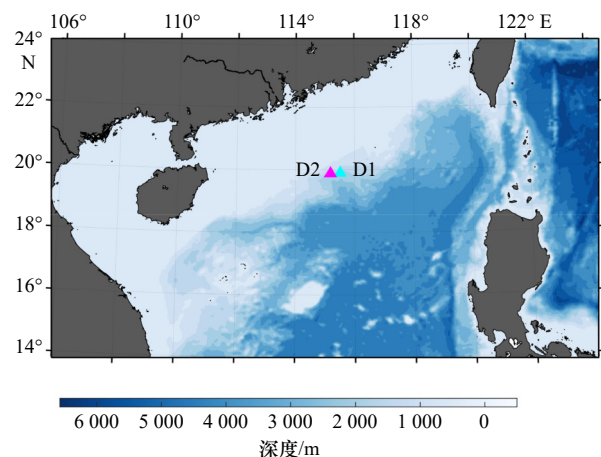


图 2 站位分布情况
Fig. 2 Station distribution

青色三角形为 D1 站点, 品红色三角形为 D2 站点
Cyan triangle is Station D1, magenta triangle is Station D2

本文还运用了来自哥白尼海洋环境监测局(The

表 1 D1 潜标的配置与记录情况
Table 1 Details of D1 instruments and record

观测时间	观测仪器	观测范围/m	采样时长/min
2008年4-10月	300k ADCP(向上)	8~104	10
	75k ADCP(向下)	104~586	10
	SBE37	76、106、136、166、226、256、316	10
2008年10月至2009年4月	300k ADCP(向上)	8~104	10
	75k ADCP(向下)	104~584	10
	SBE37	76、106、166、256、316	10
2009年4-11月	300k ADCP(向上)	8~88	1
	75k ADCP(向下)	88~600	1
	SBE37	78、198、348	2
2009年11月至2010年5月	300k ADCP(向上)	8~128	1
	75k ADCP(向下)	128~600	1
	SBE37	107、225、371	2

表 2 D2 潜标的配置与记录情况
Table 2 Details of D2 instruments and record

观测时间	观测仪器	观测范围 /m	采样时长 /min
2019年5月至 2020年11月	75k ADCP(向下)	10~450	60
	SBE37	166、471、779、988	2

Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS) 的全球物理再分析数据 (https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description) 以及基于卫星高度计同化的海表面高度异常 SLA 数据 (https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/description)。再分析数据时间间隔为 1 d, 空间水平分辨率为 0.083° , 垂向选取上层 21 个层次 (25~763 m), 包含温盐与流场变量, SLA 的时间间隔为 1 d, 空间水平分辨率为 0.25° 。

2.2 研究方法

本文采用了三阶巴特沃夫滤波器对时间序列进行滤波处理, 对原始流速作 3 d 低通滤波处理, 去除掉潮汐等高频信号的影响, 并在后续的计算中定义为初始流速。进而利用功率谱估计进行频域场的分析, 根据谱估计的峰值确定出季节内变异的不同显著周期范围, 再次利用滤波器进行带通滤波处理, 得出对应周期长度的季节内流信号。

其次, 本文运用滞后回归方法讨论中尺度涡与季节内流的超前-滞后相关关系, 将得到的相关系数用

作回归系数, 重构出对应超前-滞后天数的 SLA 空间分布, 进而诊断表层中尺度涡对季节内变异活动的激发作用。

此外, 本文还计算了海洋动力不稳定, 用于揭示季节内变异期间中尺度涡的能量平衡关系。计算参考 Brum 等^[30] 研究中尺度涡-平均流相互作用时使用的公式, 具体如下:

$$\text{BTC} = -\rho_0 \left(\overline{u'u'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \overline{u'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \overline{v'v'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$\text{BCC} = -\frac{g^2}{\rho_0 N^2} \left(\overline{u'\rho'_*} \frac{\partial \bar{\rho}_*}{\partial x} + \overline{v'\rho'_*} \frac{\partial \bar{\rho}_*}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$v = \bar{v} + v'; u = \bar{u} + u', \quad (3)$$

$$\rho = \rho_r + \rho_*; \rho_* = \bar{\rho}_* + \rho'_*, \quad (4)$$

式中, $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; u 、 v 为 CMEMS 流速; \bar{u} 、 \bar{v} 为 CMEMS 低通流速 (D1 点、D2 点滤波周期分别为 10 d 和 30 d); ρ_r 为随深度变化的参考密度; $\bar{\rho}_*$ 为低通密度; N^2 为浮性频率; BTC 表示为正压转换项, BCC 表示为斜压转换项。当 BTC 为正时, 表示正压不稳定, 平均动能向涡动能转移; BCC 为正时, 表示斜压不稳定, 平均位能向涡位能转移。

3 结果

3.1 季节内变异活动特征

对两站点点的初始动能进行功率谱分析 (图 3) 发现, 在 10~90 d 的季节内变异尺度中, 两站点点都存在两种周期长度的季节内信号, 并且呈现出相似变

化,即短周期部分表现为近表层动能谱强度更强,中层的动能谱强度则在长周期部分显著。但两站点点的季节内变异显著周期并不相同,D1点的动能谱主要以60 d为周期分界线,呈现的是上表层以10~60 d周期为主,中层以60~90 d周期逐渐显著;D2点则以30 d为周期分界线,表现为频谱中整体一致的特征,上表层的动能谱强度比中层的强,且在30~90 d周期中更突出。两站点点的动能谱相比,D1点上短周期的季节内动能强于D2点的,而长周期的季节内动能则是D2点更强。

根据动能谱分析得到的显著周期范围,分别对两站点点的初始流进行相应频段的带通滤波。统计了不同周期长度的季节内流对初始流速的标准差贡献(表3),以150 m和250 m为例,D1点上以60~90 d为周期的季节内流与D2点上以30~90 d为周期的季节内流对各自站点上的初始流速有更好地解释,两

个站点都以长周期的季节内流为低频流的主要成分,且经向流的比值大于纬向流。

尽管D1点上以10~60 d为周期的流并不是主要的季节内流分量,但从带通滤波后的动能垂向分布可以发现有趣的现象(图4),即D1点上以10~60 d为周期的季节内动能与D2点上以30~90 d为周期的季节内动能具有相似分布特征,两站点点动能都在冬末/春初显著增强,在垂向分布上都无法向海洋深处延伸,强的季节内动能在200 m深度以上突出。

D1点对应的10~60 d季节内信号与D2点对应的30~90 d季节内信号分别出现在2009年春初与2020年春季,从时间变化上来说,两种季节内变异活动间隔10 a,却表现出相似的垂向分布特征。因此,本文后续的内容将围绕以上呈现出相似特征的季节内流进行分析,探究激发季节内流的中尺度涡是否同样具有相似特征。

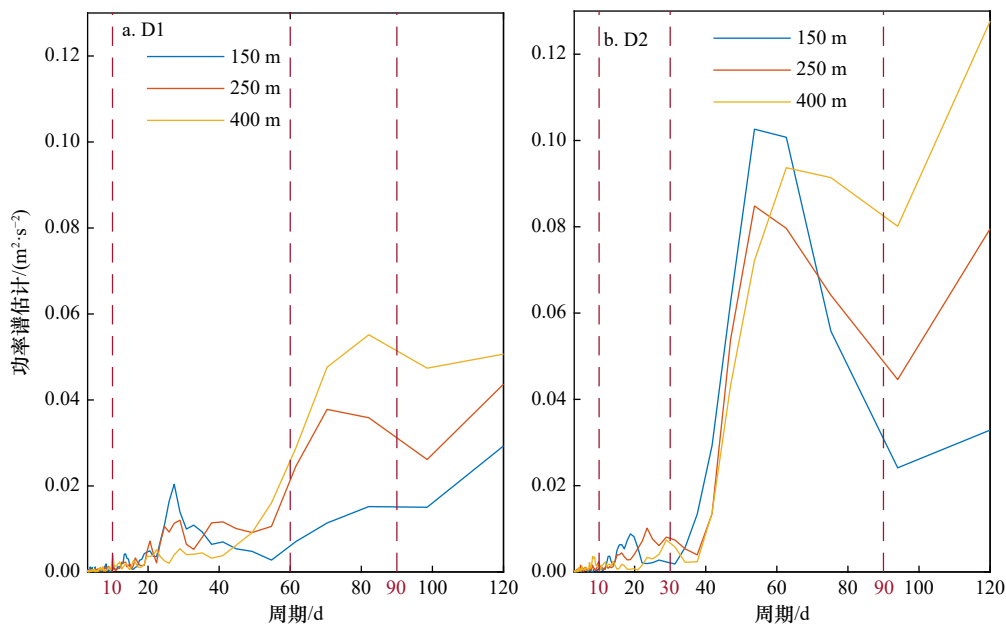


图3 站点D1(a)和站点D2(b)不同深度的动能功率谱分析

Fig. 3 Kinetic energy power spectrum analysis at different depths at Station D1 (a) and Station D2 (b)

蓝色、红色和黄色线分别代表150 m、250 m和400 m深度

Blue, red and yellow lines represent depths of 150 m, 250 m and 400 m respectively

表3 季节内流速与初始流速标准差之比

Table 3 The standard deviation of ratio of intraseasonal flow to initial flow

	10~60 d	60~90 d	10~30 d	30~90 d
D1-150 m	0.414 4 / 0.556 7	0.510 3 / 0.600 9	/	/
D1-250 m	0.334 4 / 0.541 5	0.848 8 / 0.902 1	/	/
D2-150 m	/	/	0.306 2 / 0.306 2	0.649 1 / 0.851 5
D2-250 m	/	/	0.265 8 / 0.322 5	0.632 4 / 0.702 4

注:行名为带通滤波的周期范围,表中左侧为纬向流的比值,右侧为经向流的比值,“/”表示没有进行相应周期带通滤波计算。

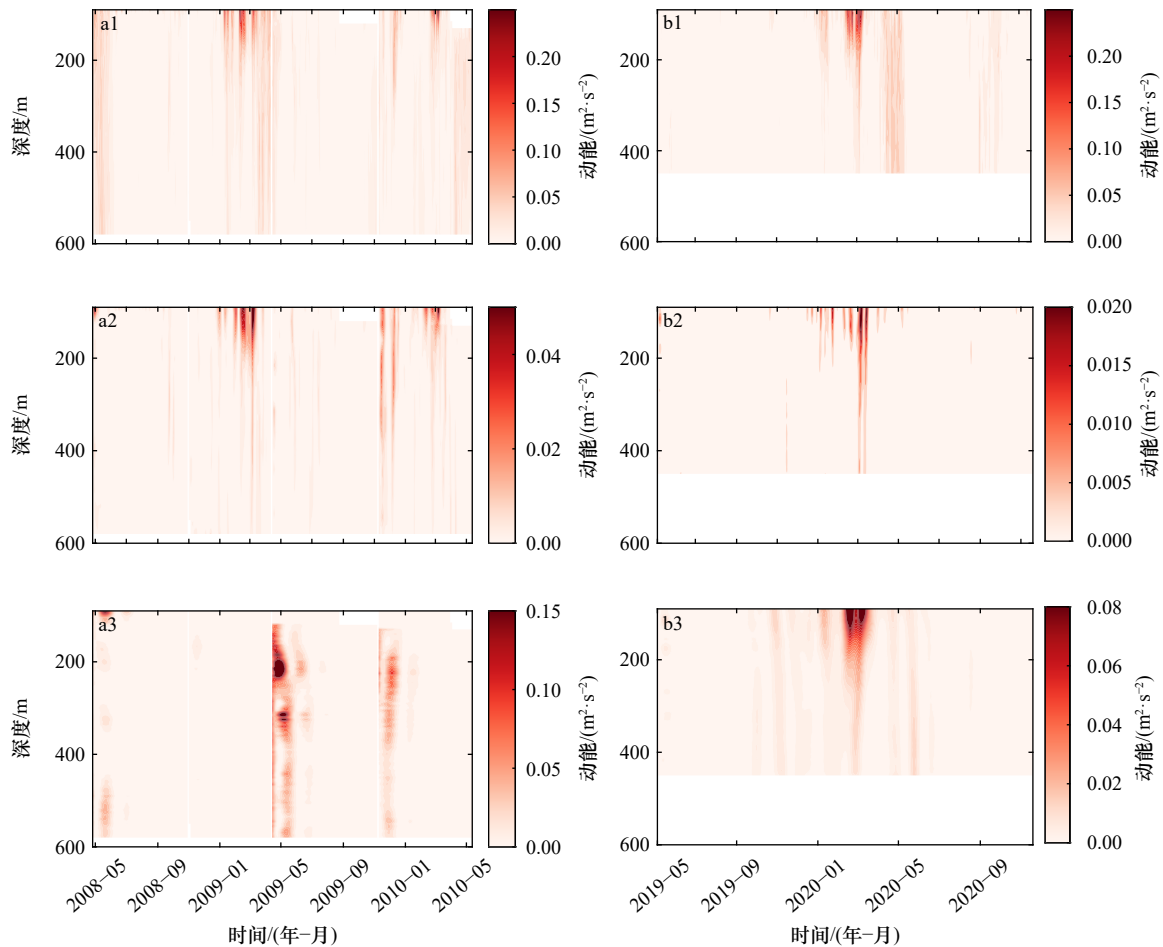


图4 站点D1(a)和站点D2(b)各个主要周期动能的垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of major periodic kinetic energy at Station D1 (a) and Station D2 (b)

上层图(a1, b1)为原始动能, 中层图(a2, b2)为短周期的季节内动能, 下层图(a3, b3)为长周期的季节内动能。a2. 10~60 d, b2. 10~30 d, a3. 60~90 d, b3. 30~90 d

The upper figures (a1, b1) are the original kinetic energy, the middle figures (a2, b2) are the short-period intraseasonal kinetic energy, and the lower figures (a3, b3) are the long-period intraseasonal kinetic energy. a2. 10~60 d, b2. 10~30 d, a3. 60~90 d, b3. 30~90 d

3.2 中尺度涡的影响作用

基于前人对不同水深的季节内变化开展的生成机制的研究, 主要将上层海洋流的季节内变异归因为中尺度涡的扰动^[16-17]。在此之前需要对涡旋进行识别诊断, 本文利用基于物理参数并得到广泛应用的 Okubo-Weiss 算法^[31-32], 从季节内海平面高度异常场 (SLA) 中识别并追踪中尺度涡。识别的结果表明季节内 SLA 包含了表层中尺度涡的信号, 而且表层中尺度涡在南海北部活跃存在 (图 5), 2009 年春初的涡旋强度较小且生命周期较短, 2020 年春季的涡旋则与之相反。

将两个站点点的季节内 SLA 时间序列与对应的季节内动能对比 (图 6) 发现, 表层中尺度涡与季节内动能存在超前-滞后关系, D1 站点点上, 表层中尺度涡超前于季节内动能约 60 d, D2 站点点则超前于季

节内动能约 30 d。由此可见, 两个时期站点点上的中尺度涡除了具有不同特征外, 与季节内动能的超前关系也暗示了中尺度涡对流场季节内变异的影响可能存在差异, 表层中尺度涡超前于季节内动能的步长可能与涡的强度相关。

为了验证这一猜想, 用季节内 SLA 表示表层中尺度, 并与季节内的经向流进行滞后分析, 利用计算得到的相关系数回归重构出 SLA 的空间分布 (图 7)。D1 站点以出现的最强季节内动能的时间 (2009 年 3 月 5 日) 为滞后 0 d, 当表层中尺度涡超前于季节内流时 (滞后步长为负数, 图 7a 至图 7d), 涡旋场中清晰地重现出气旋涡逐渐增强并向西南方向传播的空间结构; 当表层中尺度涡滞后于流速时 (图 7f 至图 7i), 气旋涡的结构显著减弱, 且位于东北侧的反气旋涡也迅速西移减弱, 气旋涡的移动速度为 0.090 m/s。

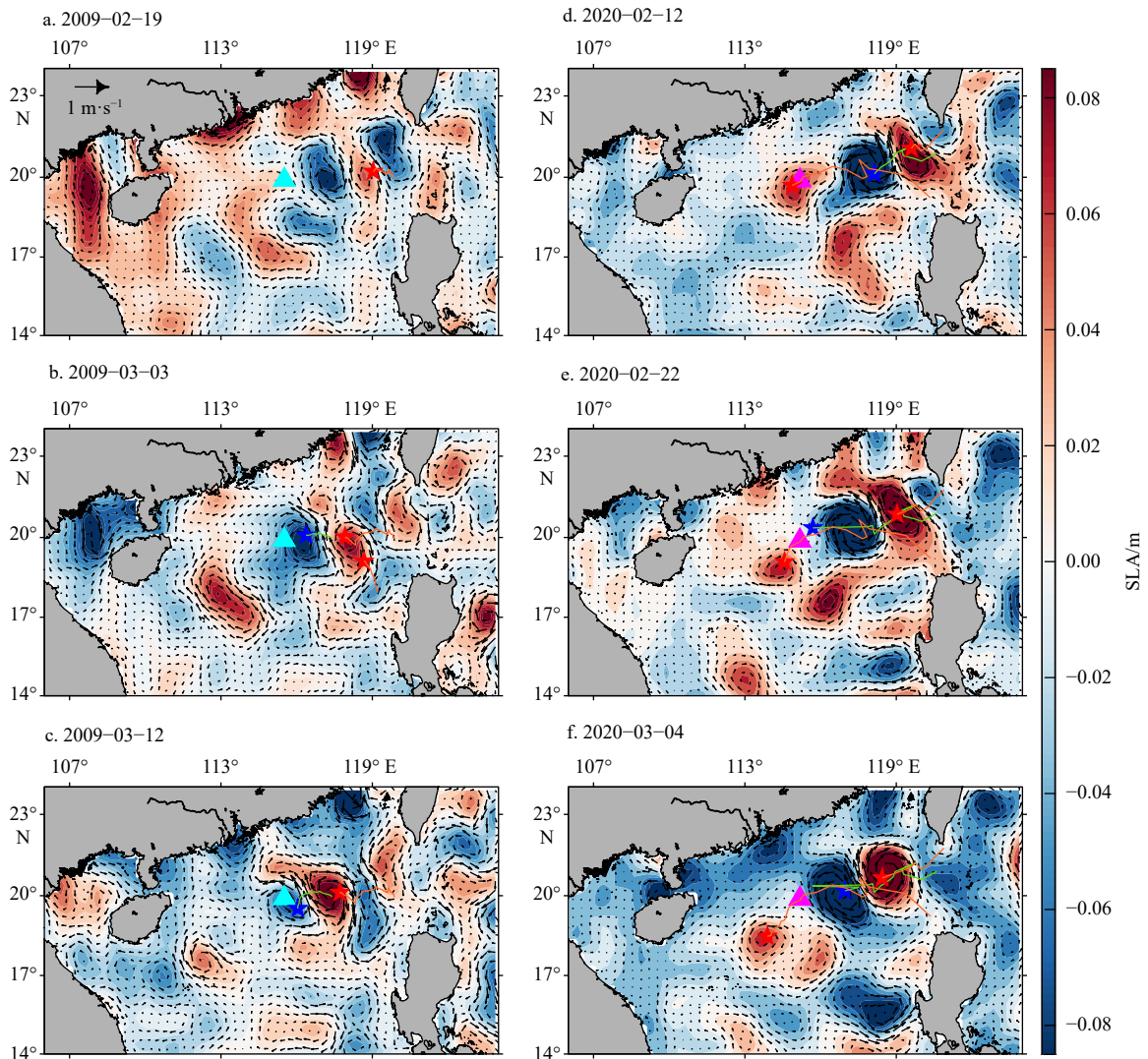


图 5 2009 年春季(a-c)和 2020 年春季(d-f), 基于 OW 方法识别的表层中尺度涡及地转流

Fig. 5 Surface mesoscale eddies and geostrophic current identified by OW method in spring 2009 (a-c) and spring 2020 (d-f)

青色三角形为 D1 站点点, 品红色三角形为 D2 站点点; 红星表示为当日反气旋涡中心, 橙线为反气旋涡移动路径; 蓝星表示为当日气旋涡中心, 绿线为气旋涡移动路径

Cyan triangle is Station D1, magenta triangle is Station D2; the red star represents the center of the anticyclone eddy, and the orange line is the corresponding moving path, while the blue star represents the center of the cyclone eddy, and the green line is the corresponding moving path

D2 站点则选取 2020 年 3 月 2 日作为滞后 0 d 进行滞后回归(图 8), 涡旋同样呈现出气旋涡-反气旋涡沿着东北-西南向传播, 超前 28 d 的涡旋结构(图 8a)与 2020 年 2 月 21 日的涡旋空间分布(图 5d)十分相似。随着滞后步长的变化, 气旋涡呈现先增强后减弱的变化, 东北侧的反气旋涡则逐渐增强, 气旋涡移动速度为 0.085 m/s, 相较于 2009 年春季的涡旋移动慢一些。

总的来说, 涡旋的分析结果肯定了表层中尺度涡对季节内变异活动的触发作用, 其次是进一步论证了两个时期的表层中尺度涡旋具有不同的动力特征。无论是从季节内 SLA 识别的结果还是滞后回归的涡旋空间分布, 2009 年春季的涡旋强度较弱, 对季节内

流的激发可能需要更漫长的时间来进行, 2020 年春季的涡旋则相反, 由于其强大的涡旋结构, 迅速地激发季节内流的变化, 因此下一节将针对涡旋的能量来源进行探讨。

3.3 海洋不稳定的影响

海洋的动力不稳定能够很好地解释中尺度涡的动能和位能的源汇方向, Zhao 等^[25]分析了南海的中尺度涡发现, 南海北部的中尺度涡主要由斜压不稳定与风做功共同驱动生成, 南海南部则在正压不稳定的作用下激发中尺度涡, 部分中尺度涡受黑潮环流影响于吕宋海峡西侧局地生成, 正压不稳定在其中起到驱动的作用^[23], 这说明动力不稳定仍是影响中尺度涡生

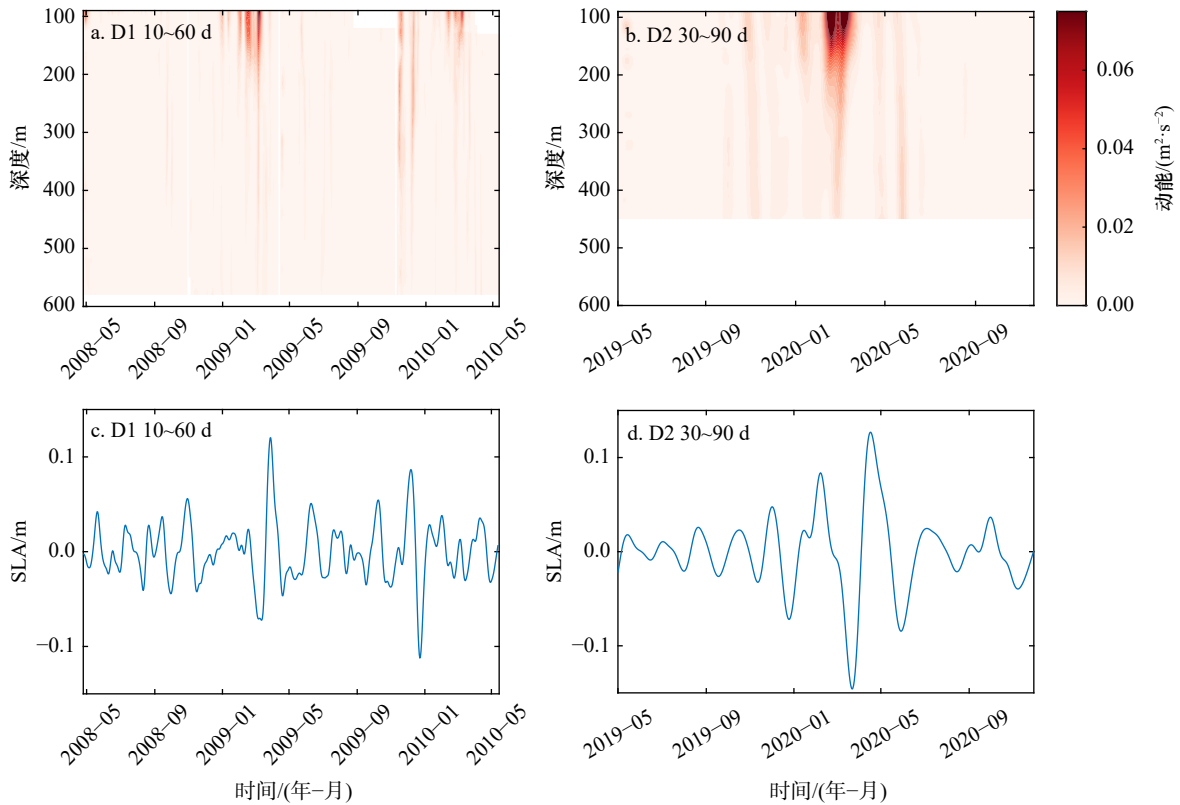


图6 D1 站点(a, c)和D2 站点(b, d)的季节内动能(a, b)与对应季节内SLA的时间序列(c, d)
 Fig. 6 Time series of intraseason kinetic energy (a, b) and corresponding intra-season SLA (c, d) and Station D2 (b, d), respectively

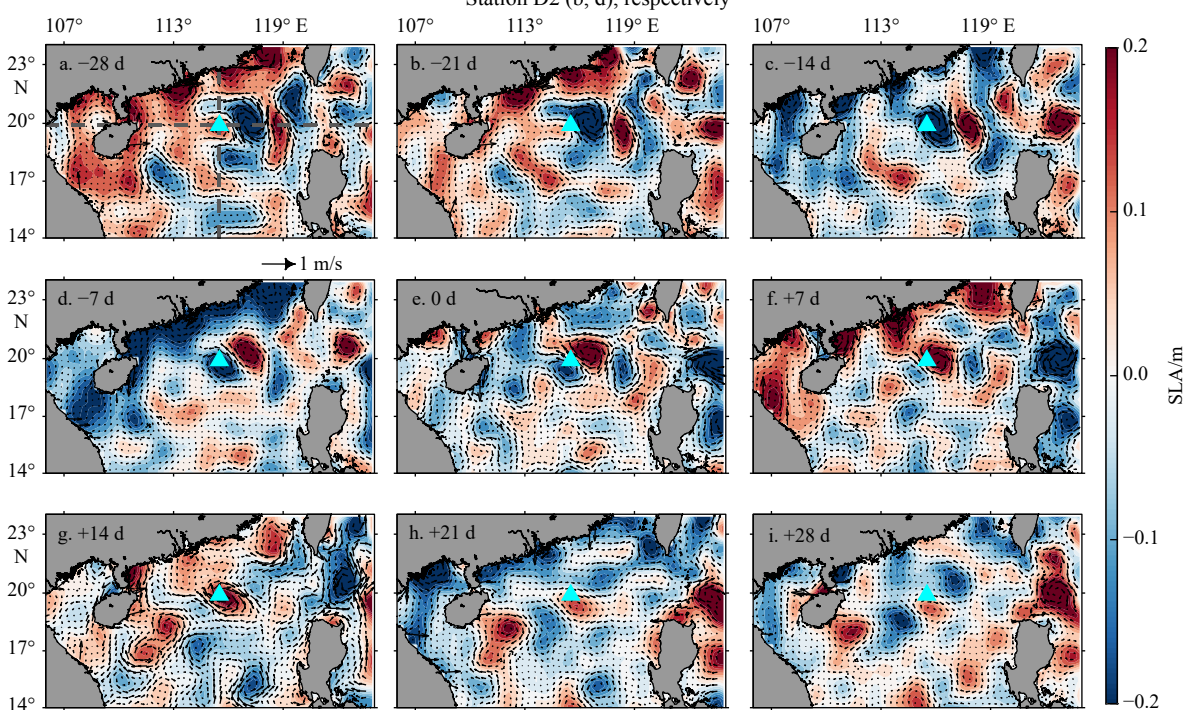


图7 D1 站点点表层中尺度与季节内经向流滞后-回归得到的海表面高度异常

Fig. 7 Sea level anomalies from surface mesoscale eddies and intraseasonal meridional flow lag-regression at Station D1

a-d. “-”表示为表层中尺度涡超前季节内流 28 d、21 d、14 d、7 d; f-i. “+”表示表层中尺度涡滞后季节内流 7 d、14 d、21 d、28 d。青色三角形表示 D1 站点
 a-d. “-” represents the intraseasonal meridional flow lead the surface mesoscale eddy 28 d, 21 d, 14 d, 7 d; f-i. “+” represents the intraseasonal meridional flow lag the surface mesoscale eddy 7 d, 14 d, 21 d, 28 d. Cyan triangle represents Station D1

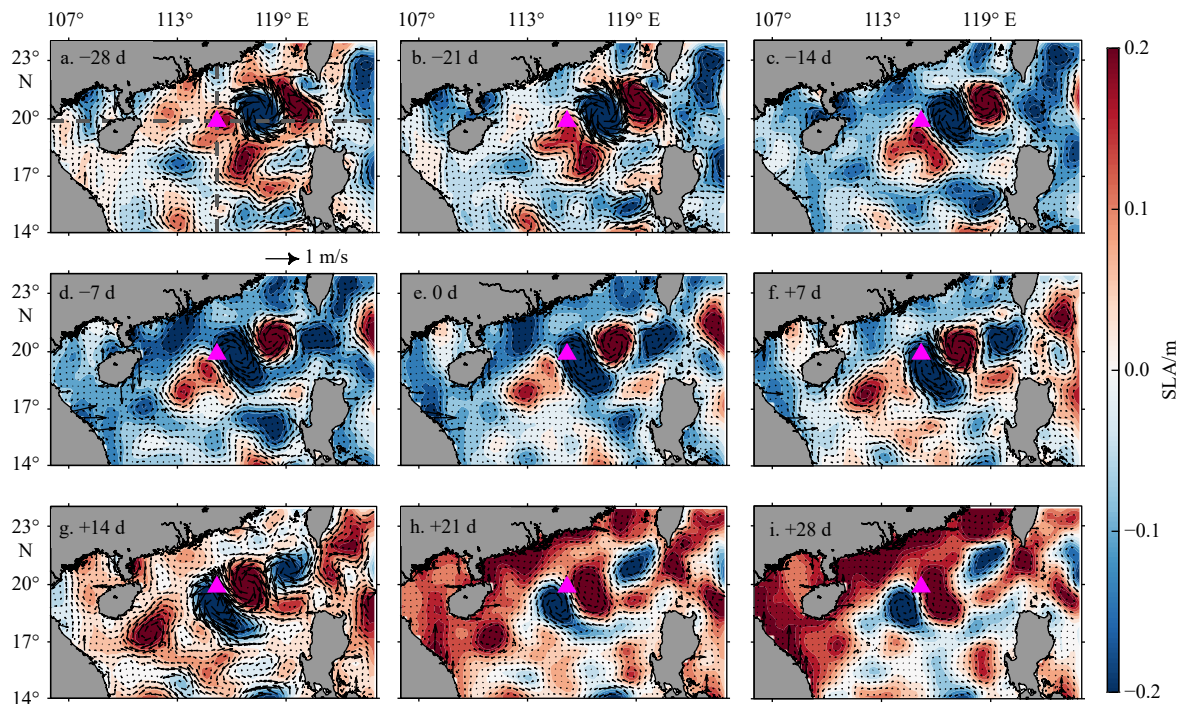


图 8 D2 站点点表层中尺度与季节内的经向流滞后-回归得到的海表面高度异常

Fig. 8 Sea level anomalies from surface mesoscale eddies and intraseasonal meridional flow lag-regression at Station D2

a-d. “-”表示为表层中尺度涡超前季节内流 28 d、21 d、14 d、7 d; f-i. “+”表示为表层中尺度涡滞后季节内流 7 d、14 d、21 d、28 d。品红色三角形表示 D2 站点

a-d. “-” represents the intraseasonal meridional flow lead the surface mesoscale eddy 28 d, 21 d, 14 d, 7 d; f-i. “+” represents the intraseasonal meridional flow lag the surface mesoscale eddy 7 d, 14 d, 21 d, 28 d. Magenta triangle represents Station D2

成的关键因素。为了进一步揭示表层中尺度涡的差异,本部分内容将通过计算海洋的动力不稳定,探究以上两个时期的表层中尺度涡能量来源。

由于潜标数据无法满足偏微分计算,因此利用 CMEMS 全球物理再分析数据应用于计算中。首先将潜标的初始数据与 CMEMS 全球物理再分析数据进行对比(图 9)。尽管再分析数据中的季节内流比潜标观测的季节内流延迟出现,但仍能呈现明显的季节内异常活动,两站点点的温度与再分析数据的变化有较好的匹配,这说明利用 CMEMS 再分析数据的流以及温盐数据计算正压转换项(BTC)与斜压转换项(BCC)在一定程度上是可靠的。

对于 D1 站点点的再分析数据计算情况(图 10),截取了 2008 年 11 月至 2009 年 4 月这一时段的时序变化(图 10a)与实测的季节内动能(图 6a)相比,再分析数据体现的季节内变异活动更频繁,首次出现强度较强是在 2009 年 1 月。在 2009 年 3 月,当季节内动能开始增强之前,各深度的正压变换项与斜压变换项都在逐渐增强,说明海洋的动力不稳定同时由正压不稳定与斜压不稳定参与,但两者中斜压不稳定的增强更显著,而在 318 m 附近的深度上,则表现为正压不

稳定强于斜压不稳定。动力不稳定的增强在时间上超前于季节内动能增强的出现,从能量流动的角度来看,促使 D1 站点点上发生的季节内变异的表层中尺度,其能量主要是在斜压不稳定的作用下,由平均位能向涡位能转移,其次受正压不稳定的部分调控,使平均动能向涡动能转移。

对 D2 站点点分析的是 2019 年 11 月至 2020 年 4 月的时序变化(图 11),相较于实测中的季节内变异活动(图 6b),再分析数据的季节内信号延迟出现,最大季节内动能出现在 2020 年 4 月。对应于季节内信号出现的 2020 年 3-4 月,110 m 的斜压变换项迅速降低再增加,155 m 深度斜压变换项则猛烈增长,强的斜压不稳定表明涡旋场与平均场中出现了显著的密度差异,但正压变换项变化不明显,几乎为 0,这表明激发 D2 站点点上发生季节内变异活动的表层中尺度是受斜压不稳定主导,其涡动能经平均场转移后通过垂向涡度通量变换转换为涡动能,中尺度涡的强斜压性特征同时对应了涡旋从吕宋海峡西侧传入的现象^[18]。

以上的对比分析,进一步揭示了两个时期的表层中尺度涡能量来源及其动力不稳定情况。激发 2009 年春季 D1 站点点上季节内变异活动的表层中

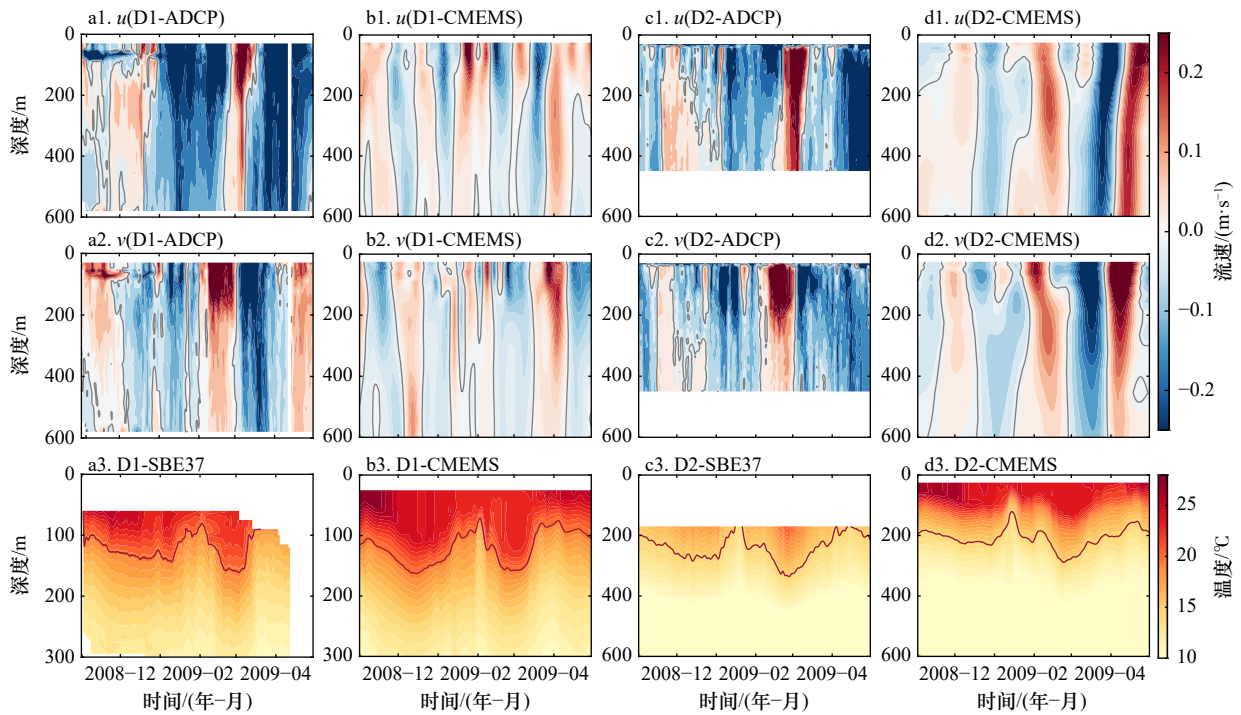


图9 两个站位的潜标实测数据(a, c)与CMEMS再分析数据(b, d)对比

Fig. 9 Comparison between the observed data of the two mooring stations (a, c) and CMEMS reanalysis data (b, d)

上层图(a1-d1)为流速u的对比, 中层图(a2-d2)为流速v的对比, 下层图(a3-d3)为温度的对比; 其中, a3与b3的等值线为20°C等值线, c3与d3的等值线为17°C等值线

The upper figure (a1-d1) are the comparison of u , the middle figure (a2-d2) is the comparison of v , and the lower figure (a3-d3) is the comparison of temperature. Among them, the contours of a3 and b3 are 20°C contours, and the contours of c3 and d3 are 17°C contours

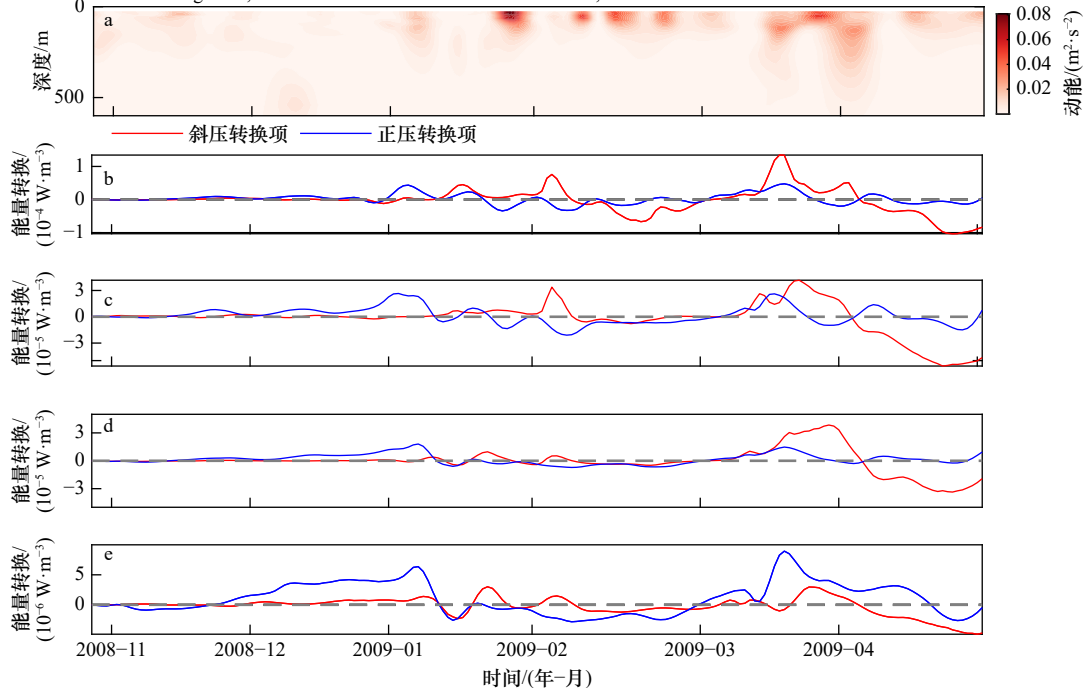


图10 D1 站点点 CMEMS 再分析数据的季节内动能和不同水深的斜压变换项与正压变换项时间序列, 对应季节内变异周期为10~60 d

Fig. 10 The time series of intraseasonal kinetic energy and baroclinic transformation terms and barotropic transformation terms of different depths in CMEMS reanalysis data of Stations D1, corresponding to the intraseasonal period of 10-60 days

a. 季节内动能; b-e. 不同水深的斜压变换项与正压变换项, 分别为110 m、155 m、222 m、318 m

a. Intraseasonal kinetic energy; b-e. baroclinic transformation terms and barotropic transformation terms at respectively 110 m, 155 m, 222 m, 318 m

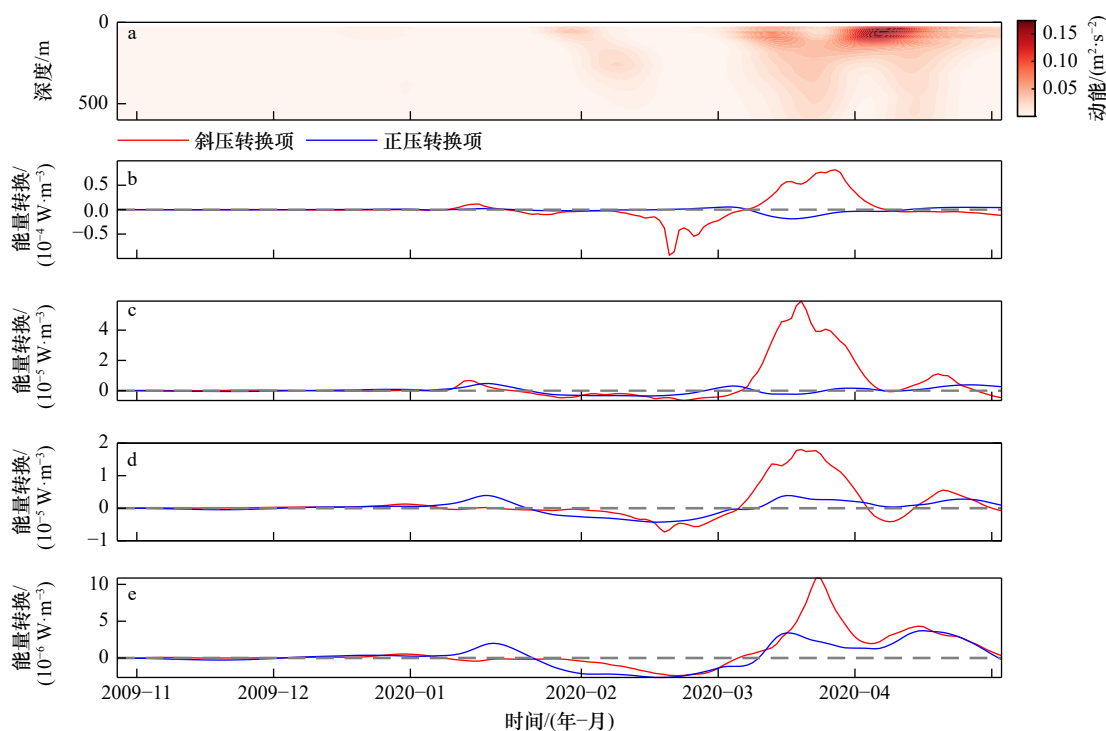


图 11 D2 站点点 CMEMS 再分析数据的季节内动能和不同水深的斜压变换项与正压变换项时间序列, 对应季节内变异周期为 30~90 d

Fig. 11 The time series of intraseasonal kinetic energy and baroclinic transformation terms and barotropic transformation terms of different depths in CMEMS reanalysis data of Stations D2, corresponding to the intraseasonal period of 30–90 days

a. 季节内动能; b–e. 不同水深的斜压变换项与正压变换项, 分别为 110 m、155 m、222 m、318 m

a. Intraseasonal kinetic energy; b–e. baroclinic transformation terms and barotropic transformation terms at respectively 110 m, 155 m, 222 m, 318 m

尺度涡, 受斜压不稳定与正压不稳定的共同调制, 移速较快但涡旋结构较小; 而 2020 年春季的表层中尺度涡具有强斜压性, 涡旋大且移速快。另外, 两个时期的斜压不稳定强度相差了一个数量级, 说明 2020 年春季的强斜压性中尺度涡与平均流的相互作用更强^[3], 有利于强烈且迅速地刺激 2020 年春季 D2 站点点的季节内变异活动发生。

4 结论

本文基于南海北部两个相邻站点点不同时期的潜标观测数据, 均发现显著的季节内变异个例, 其中, 2009 年的 D1 点中以 10~60 d 为周期的季节内信号与 2020 年的 D2 点中以 30~90 d 为周期的季节内信号具有相似的特征, 均表现为季节内动能在冬末/春初的季风转换期增强, 垂向上仅在 200 m 深度显著。表层中尺度涡作为流场季节内变异的触发因子, 自身具有不同的动力特征以及能量来源。尽管两个时期的季节内变异具有相似特征, 但表层中尺度涡对春季流场季节内变异的影响却存在差异, 因此进一步利用滞后回归方法并分析海洋动力不稳定性, 探究表层

中尺度涡对春季流场季节内变异的影响, 得出以下结论。

(1) 2009 年春季影响 D1 站点点的表层中尺度涡移动速度快, 涡旋结构弱, 受斜压不稳定与正压不稳定共同的调控作用, 主要受斜压不稳定的作用, 正压扰动可能是由黑潮流套路径带来的。

(2) 2020 年春季影响 D2 站点点的表层中尺度涡体现出强斜压性, 移动速度慢, 涡旋结构强, 正压不稳定几乎不起作用, 涡旋可能是吕宋海峡东北侧生成后向南海北部传播而来。

(3) 对比两个时期, 表层中尺度涡与季节内动能的超前关系以及表层中尺度涡的动力差异表明, 强斜压性的中尺度涡能够引起更强的流速垂向切变, 与平均流相互作用更深, 因此可能会有利于促进流场季节内变异的发生。

季节内的海表面高度异常表明, 南海北部的季节内变异活动有显著的西传以及向西减弱的特征, 两个站点点的垂向特征与冬季增强的季节内变异特征^[12]相似, 因此推测这两个站点点上春季出现的季节内信号, 可能是在站点点的东北侧于冬季生成, 随后沿南海北部地形向西南方向传递, 并在冬末/春初传至站

位点的区域。

本文所分析的潜标位于 Zhuang 等^[10]总结的中尺度涡频发带上,因此本文主要是从海洋动力的角度,探讨具有相似特征的流场季节内变异的成因,分析具有不同特征的中尺度涡对季节内变异的激发作用,对于其他的生成机制如风应力的影响暂未展开分析。

值得一提的是,风应力对中尺度涡具有一定的驱动作用^[21],在未来的研究中,探究风应力对流场季节内变异的影响作用时,还需要将风应力对流场季节内变异的直接作用与间接作用(即风应力通过作用与中尺度涡从而驱动出流场季节内变异)作更详细的量化对比,未来有望借助数值模式开展相关的对比研究。

参考文献:

- [1] Zhang Zhiwei, Zhao Wei, Tian Jiwei, et al. Spatial structure and temporal variability of the zonal flow in the Luzon Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(2): 759–776.
- [2] Hu Jianyu, Kawamura H, Hong Huasheng, et al. A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56(6): 607–624.
- [3] Shu Yeqiang, Wang Qiang, Zu Tingting. Progress on shelf and slope circulation in the northern South China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 560–571.
- [4] Wang Guihua, Wang Chunzai, Huang Ruixin. Interdecadal variability of the eastward current in the South China Sea associated with the summer Asian monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(22): 6115–6123.
- [5] Wyrtki K. Physical oceanography of the Southeast Asian waters[R]. Naga Report Scientific Results of Marine Investigations of the South China Sea & the Gulf of Thailand, California: ICAc Press, 1961.
- [6] Chen Xiao, Qiu Bo, Cheng Xuhua, et al. Intra-seasonal variability of Pacific-origin sea level anomalies around the Philippine Archipelago[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(3): 239–249.
- [7] FARRAR J T, WELLER R A. Intraseasonal variability near 10°N in the eastern tropical Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(C5): C05015.
- [8] Roxy M, Tanimoto Y. Influence of sea surface temperature on the intraseasonal variability of the South China Sea summer monsoon[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5): 1209–1218.
- [9] Yu Zhiyu, Potemra J T. Generation mechanism for the intraseasonal variability in the Indo-Australian basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(C1): C01013.
- [10] Zhuang Wei, Xie Shangping, Wang Dongxiao, et al. Intraseasonal variability in sea surface height over the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(C4): C04010.
- [11] Liang Zhanlin, Xie Qiang, Zeng Lili, et al. Role of wind forcing and eddy activity in the intraseasonal variability of the barrier layer in the South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2018, 68(3): 363–375.
- [12] Wang Qiang, Zhou Weidong, Zeng Lili, et al. Intraseasonal variability of cross-slope flow in the northern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2020, 50(7): 2071–2084.
- [13] Xu Wen, Shu Yeqiang, Wang Dongxiao, et al. Features of intraseasonal variability observed in the upper-layer current in the northern South China Sea[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 777262.
- [14] 王霞, 方文东, 陈荣裕. 南海北部海面高度的季节内变异及其传播特征 [J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(3): 1–12.
Wang Xia, Fang Wendong, Chen Rongyu. Intra-seasonal variability of sea level anomalies and their propagation features in the northern South China Sea from 25 years of satellite altimetry data[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(3): 1–12.
- [15] Yang Yikai, Zeng Lili, Wang Qiang. How much heat and salt are transported into the South China Sea by mesoscale eddies?[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(7): e2020EF001857.
- [16] Cheng Li, Zhang Zhiwei, Zhao Wei, et al. Temporal variability of the current in the northeastern South China Sea revealed by 2.5-year-long moored observations[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(4): 361–372.
- [17] Wang Fang, Li Yuanlong, Wang Jianing. Intraseasonal variability of the surface zonal currents in the western Tropical Pacific Ocean: characteristics and mechanisms[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(12): 3639–3660.
- [18] Wang Qiang, Zeng Lili, Chen Ju, et al. The linkage of Kuroshio intrusion and mesoscale eddy variability in the northern South China Sea: Subsurface speed maximum[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): e2020GL087034.
- [19] Chen Gengxin, Hou Yijun, Chu Xiaoqing. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C6): C06018.
- [20] Hsin Y C, Qu Tangdong, Wu C R. Intra-seasonal variation of the Kuroshio southeast of Taiwan and its possible forcing mechanism[J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(5): 1293–1306.
- [21] Xiu Peng, Chai Fei, Shi Lei, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993–2007[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C3): C03012.
- [22] Yan Xiaomei, Kang Dujuan, Pang Chongguang, et al. Energetics analysis of the Eddy–Kuroshio interaction east of Taiwan[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022, 52(4): 647–664.
- [23] Zhang Zhiwei, Zhao Wei, Qiu Bo, et al. Anticyclonic eddy Sheddings from Kuroshio loop and the accompanying cyclonic eddy in the northeastern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(6): 1243–1259.

- [24] Wu C R, Chiang T L. Mesoscale eddies in the northern South China Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(14/15): 1575–1588.
- [25] Zhao Yuhui, Yang Yang, Mao Longjiang, et al. On the genesis of the South China Sea mesoscale eddies[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 188.
- [26] 杨一凯, 曾丽丽. 挟带黑潮高盐水的中尺度涡在南海北部的时空特征 [J]. *热带海洋学报*, 2023, 42(3): 75–85.
Yang Yikai, Zeng Lili. Spatiotemporal characteristics of mesoscale eddies with transport capability of saline Kuroshio water in the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023, 42(3): 75–85.
- [27] 尚晓东, 徐驰, 陈桂英, 等. 海洋中尺度涡的机械能及其源汇研究 [J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(2): 24–36.
Shang Xiaodong, Xu Chi, Chen Guiying, et al. Review on mechanical energy of ocean mesoscale eddies and associated energy sources and sinks[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(2): 24–36.
- [28] 王东晓, 邱春华, 舒业强, 等. 南海环流多尺度动力过程演变特征与机制研究进展 [J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(4): 605–623.
Wang Dongxiao, Qiu Chunhua, Shu Yejiang, et al. Progress in the dynamic process and mechanisms of multi-scale currents in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(4): 605–623.
- [29] Zhong Qingwen, Chen Gengxin, Li Yuanlong, et al. Intraseasonal variability of the surface zonal current in the equatorial Indian Ocean: Seasonal differences and causes[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 41(5): 12–26.
- [30] Brum A L, De Azevedo J L L, Dengler M. Energetics of eddy–mean flow interactions in the deep western boundary current off the northeastern coast of Brazil[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2023, 193: 103965.
- [31] Lian Zhan, Sun Baonan, Wei Zexun, et al. Comparison of eight detection algorithms for the quantification and characterization of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(7): 1361–1380.
- [32] Zhang Zhiwei, Zhao Wei, Tian Jiwei, et al. A mesoscale eddy pair southwest of Taiwan and its influence on deep circulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 6479–6494.
- [33] Geng Wu, Xie Qiang, Chen Gengxin, et al. Numerical study on the eddy–mean flow interaction between a cyclonic eddy and Kuroshio[J]. *Journal of Oceanography*, 2016, 72(5): 727–745.

Cases study of intraseasonal variability of velocity happened in spring in the northern South China Sea

Liu Xue¹, Liang Chujin^{1,2}, Lin Feilong²

(1. School of Ocean Science, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The intraseasonal variability (ISV) associated with mesoscale eddies in the northern South China Sea has been significant. Comparing the intraseasonal variability of flow at different times helps to elucidate the influence of mesoscale eddies with various dynamic instability, therefore, this study analyzed the dynamic instability of mesoscale eddies in the spring of 2009 and 2020 in the northern South China Sea, to figure out the characteristics of intraseasonal variability. Based on mooring velocity data, it conducted kinetic spectral analysis, and the results demonstrated that the ISV with period of 10–60 days in 2009 and the ISV with period of 30–90 days in 2020 displayed a similar vertical feature, with strong intraseasonal signals primarily occurring in the upper layer above 200 m. Moreover, the ISV with period of 30–90 days was the main intraseasonal component during the corresponding observation period. Lag-regression analysis and calculation of dynamic instability showed that the intraseasonal variation of spring 2009 was affected by fast-moving but weak surface mesoscale eddies, and the dynamic instability was modulated by baroclinic instability and barotropic instability. On the other hand, the intraseasonal variability in the spring of 2020 was influenced by strong baroclinic mesoscale eddies, which might trigger the occurrence of intraseasonal variability in the flow fields more rapidly through enhanced vertical shear of velocity. The findings of this study contribute to a deeper understanding of the impact mechanisms of mesoscale eddies on intraseasonal activities in the northern South China Sea, providing important references and a theoretical basis for ocean dynamics and climate research.

Key words: the northern South China Sea; intraseasonal variability (ISV); mesoscale eddy; dynamic instability