



博士学位论文答辩

黑潮-亲潮延伸体涡旋垂直结构研究与溯源分析

姚恒恺

指导教师：兰健，*Ping Chang*，马超

目录

1. 研究背景及科学问题
2. 数据和方法介绍
3. 黑潮-亲潮延伸体区域涡旋的统计分析
4. 黑潮-亲潮延伸体区域涡旋的垂直结构
5. 总结与展望

1.研究背景及科学问题

1. 研究背景

中尺度涡

- 时空尺度
- 输运性
- 巨大能量
- 能量级串
- 多尺度相互作用
- 海气相互作用
- 其他交叉学科

黑潮亲潮延伸体

- 涡旋活动最活跃
- 最大涡动能带
- 中纬度海气相互作用

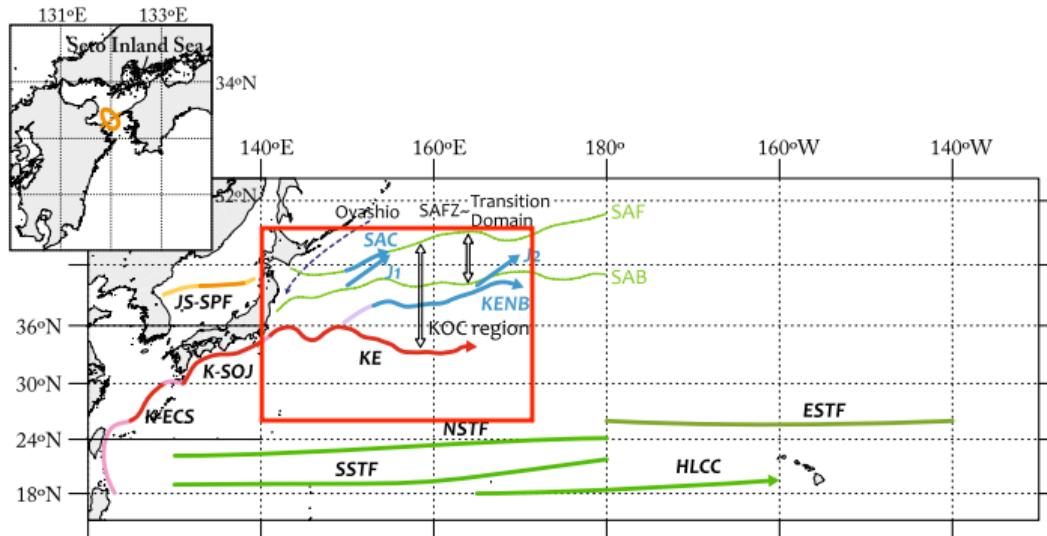


图 1: 西北太平洋主要流系和锋面

2. 研究进展 1. 涡旋表面特征

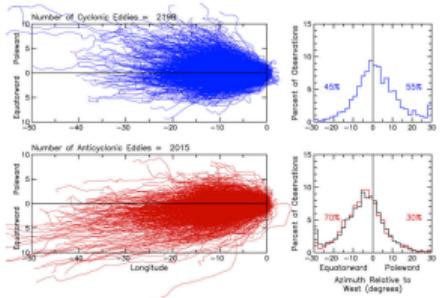


图 2: [Chelton et al., 2011]

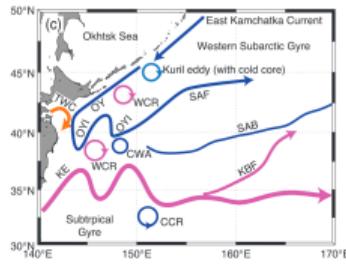


图 3: [Itoh and Yasuda, 2010]

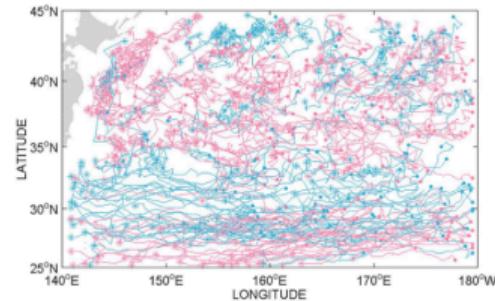


图 5: [Ji et al., 2018]

已有研究的不足

- 数据陈旧，分辨率低
- 仅关注子区域
- 无法识别涡旋事件
- 无法涡旋溯源
- 统计特征量不足

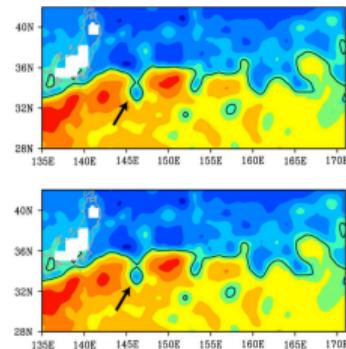


图 4: [Sasaki and Minobe, 2015]

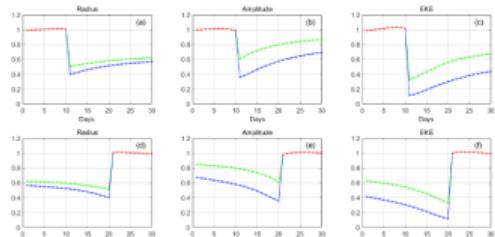


图 6: [Cui et al., 2019]

2. 研究进展 2. 涡旋垂直结构

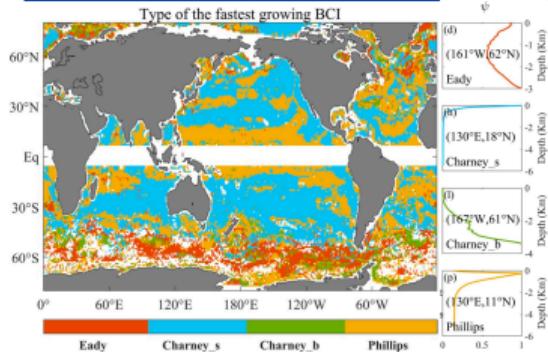


图 7: [Feng et al., 2021]

已有研究的不足

- 合成涡旋数据杂糅
- 未考虑空间变异
- 未考虑涡旋事件
- 无法涡旋溯源
- 缺少拉氏不稳定

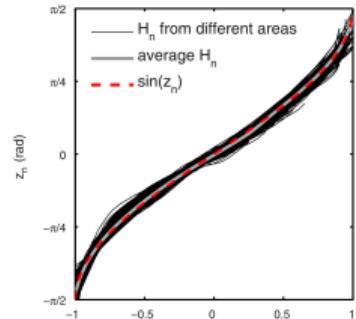


图 8: [Zhang et al., 2013]

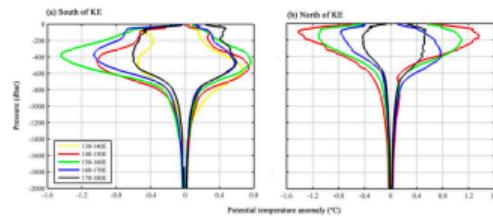


图 10: [Dong et al., 2017]

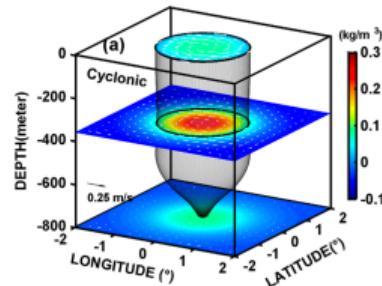


图 9: [Sun et al., 2017]

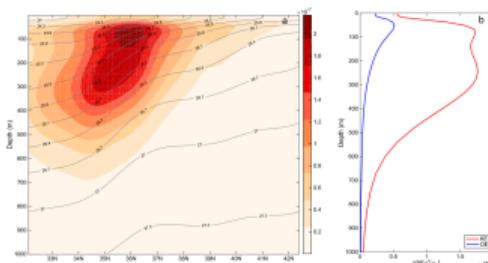


图 11: [Jing et al., 2019]

3. 科学问题

1. 黑潮-亲潮延伸体区域中尺度涡不同子区域的涡旋表面特征是怎样的？
2. 涡旋的垂直温盐结构是怎样的？该区域涡旋垂直结构的主要类型有哪些？不同类型涡旋的真实源地在哪里？它们在全生命周期中垂直结构存在怎样的变化？
3. 影响涡旋垂直结构的主要因素有哪些？造成该区域涡旋垂直结构的空间变异性与时间变异性的原因是什么？
4. 涡旋事件（拆分和合并）主要发生在哪些区域？涡旋事件的发生对涡旋垂直结构有怎样的影响？

4. 研究思路

1. 使用 TOEddies 识别算法对海表面高度进行涡旋识别，构建涡旋拆分和合并及父子代关系数据库；
2. 对形态特征、传播特征和其他运动特征进行统计；对比不同分辨率下各种涡旋特征量的异同；
3. 利用聚类分析根据涡旋垂直结构相似性对涡分组，结合水团分析和父子代关系对各组涡旋溯源；利用斜压不稳定分析讨论各组涡旋生成机制，以及其他影响涡旋垂直结构的因素；
4. 利用涡旋数据库统计涡旋拆分和合并事件发生的主要区域，以及事件发生对涡旋垂直结构的影响；

2.数据和方法介绍

1. 数据介绍

1. 观测数据

CMEMS

- 延迟时间模式
- 多卫星任务融合
- 时间分辨率：1天
- 版本：DT-2021
- 空间分辨率：0.25°
- 时间：2000-2020
- 变量：ADT, U, V

表面识别

Argo

- 经质量控制
- 10万条剖面
- 时间：2000-2020
- 变量：T, S, PRES

原始剖面

WOA18

- 空间分辨率：0.25°
- 时间：2007-2015
- 月平均
- 变量：T,S,RHO

背景场

同化参数

- 方法: 四维变分同化
- 同化周期: 每月 3 次
- 原位温盐剖面: WOD13 & GTSPP
- SST: 融合卫星 & 原位观测 (MGDSST)
- SLA: T/P, Jason-1/2 等
- 海冰: SSM/I
- 大气强迫: JRA-55 日均
- 空间范围: 西北太平洋

FORA-WNP30

- 空间分辨率: $1/10^\circ$ (外层 $1/6^\circ$)
- 时间分辨率: 1 天
- 层深: 0-6300m (54 层)
- 时间: 1982 年 1 月-2014 年 12 月
- 变量: SSH, U, V, T, S

数据来源: JAMSTEC & JMA/MRI

1. 数据介绍

3. 数据对比

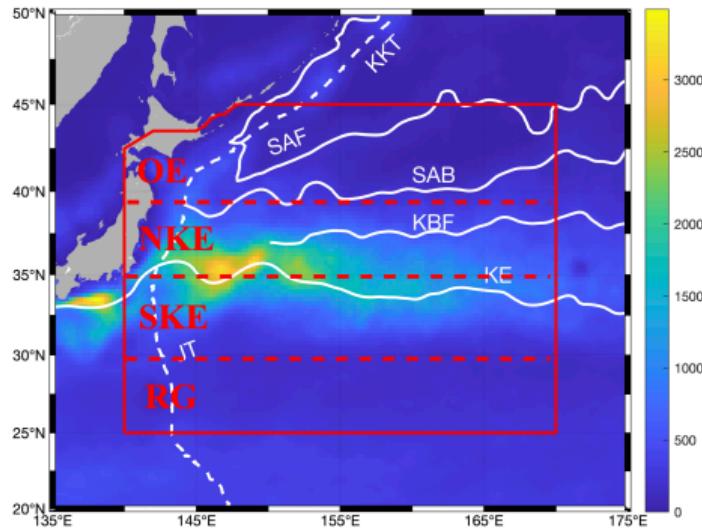


图 12: KOE 区域划分

观测数据

- CMEMS+ARGO+WOA18
- 空间分辨率: $1/4^\circ$
- 时间分辨率: 1 天
- 垂向层深: 0-1000m
- 时间范围: 1993 年 1 月-2020 年 12 月

再分析数据

- FORA-WNP30
- 空间分辨率: $1/10^\circ$ (外层 $1/6^\circ$)
- 时间分辨率: 1 天
- 垂向层深: 0-1000m
- 时间范围: 1982 年 1 月-2014 年 12 月

2. 方法介绍 1.TOEddies 涡旋识别追踪算法

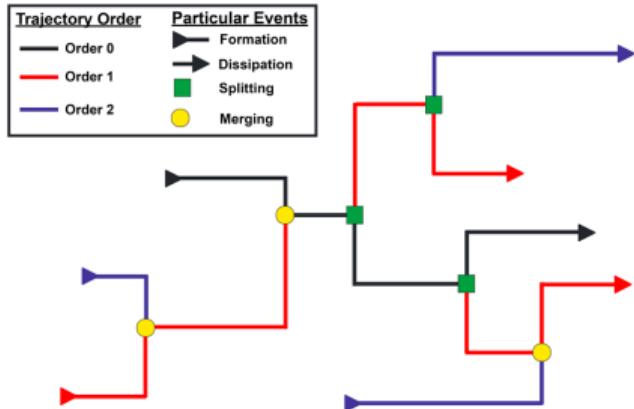


图 13: TOEddies 算法

算法流程

1. 识别包含单一极值的 SSH 最外等值线
2. 空间重叠 50% 连接成为涡旋片段
3. 补全临时消失 5 天内的涡旋片段
4. 以成本函数 (CF) 极小值判断主轨迹，其余作为涡旋事件（拆分、合并）轨迹
5. 仅保留 30 天以上长涡旋

$$CF = \sqrt{\left(\frac{\Delta \text{Center} - \overline{\Delta \text{Center}}}{\sigma_{\Delta \text{Center}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Ro - \overline{\Delta Ro}}{\sigma_{\Delta Ro}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{Vmax} - \overline{\Delta R_{Vmax}}}{\sigma_{\Delta R_{Vmax}}}\right)^2}$$

算法来源: [Laxenaire et al., 2018]

2. 方法介绍 2.升序层级聚类技术 HAC

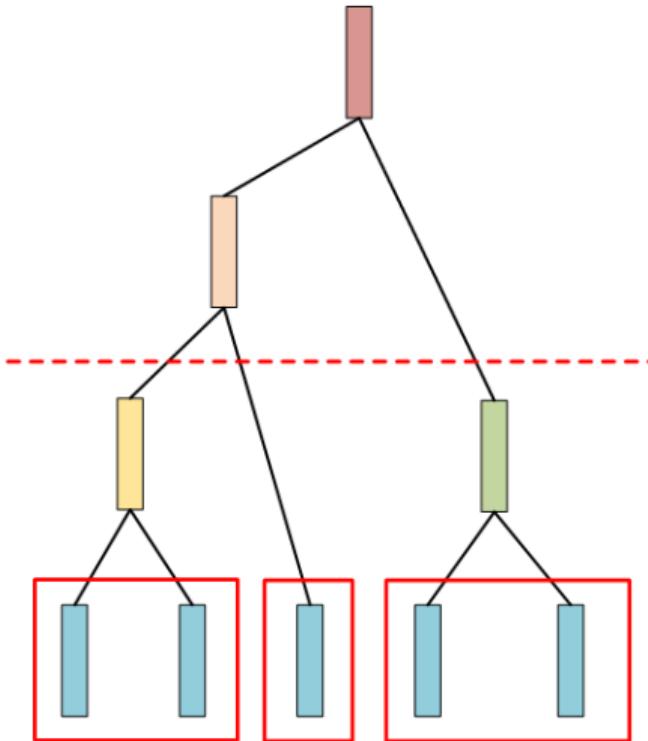


图 14: 层次聚类

聚类流程

1. 计算代表涡旋垂直结构的平均剖面 ($\bar{\theta}'/\bar{S}'/\bar{\sigma}'$)
2. 将平均剖面标准化，仅保留剖面形状
3. 计算剖面间的欧拉距离
4. 使用 Ward 算法聚合剖面 [Ward, 1963]
5. 在合适的位置切割聚类树，获得所需聚类

$$Ward\ Distance : d(r,s) = \sqrt{\frac{2n_r n_s}{(n_r + n_s)} \|\bar{x}_r - \bar{x}_s\|_2}$$

方法参考: [Pegliasco et al., 2015]

3. 黑潮-亲潮延伸体区域涡旋的统计分析

1. 形态特征 1. 基于两种数据源的统计比较

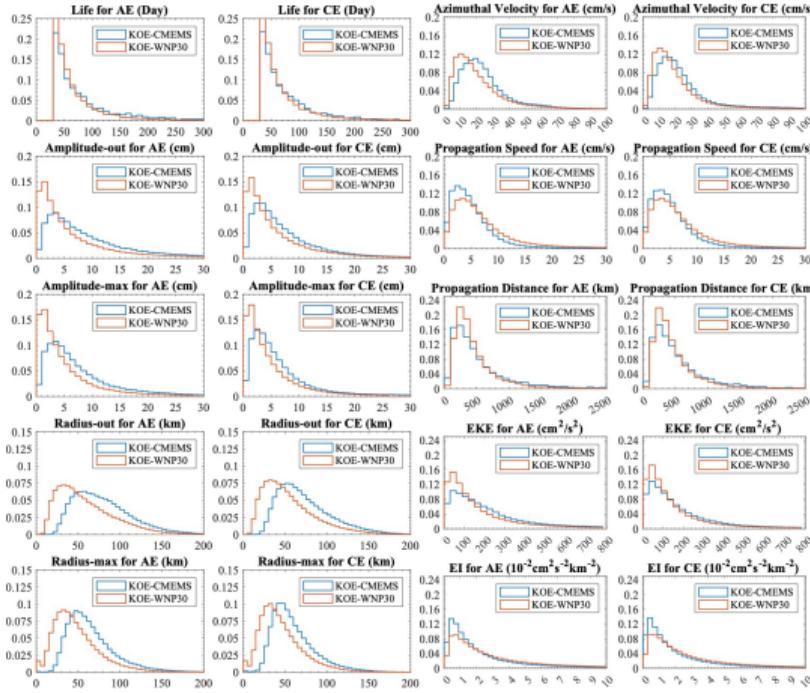


图 15: 涡旋特征量概率密度分布

高低分辨率涡旋主要差异

1. 振幅、半径、切向速度、非线性参数峰值位置差异明显
2. 高分辨更多，更小，更少的空间覆盖
3. 更弱，旋转更慢，传播更快，距离更短
4. 总体能量更小，单位面积能量更大
5. 更弱的非线性
6. 更高的变形率，稳定性更差

详细参数比较见表 3-1 和表 3-2

1. 形态特征 2. 涡旋特征量的演化

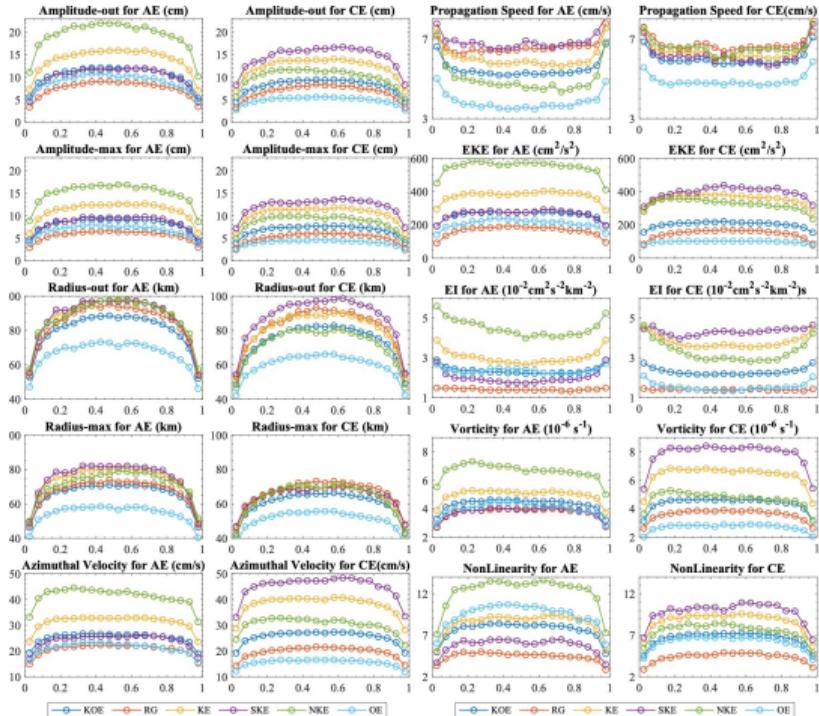


图 16: 涡旋特征量的演化

演化特点

1. 时间反演特性
2. 五分位式变化
3. 传播速度、EI、变形率先小后大
4. 振幅、半径、切向速度、EKE、涡度、非线性参数先大后小
5. 子区域差异显著

2. 传播特征 1. 涡旋的传播过程

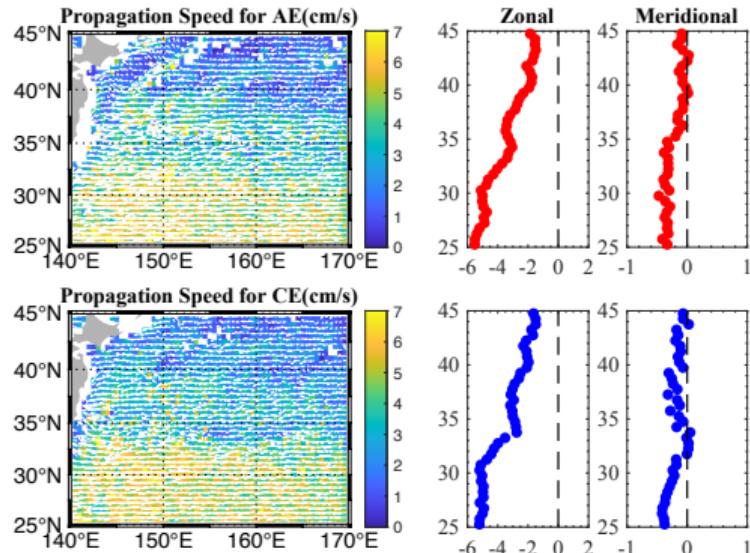


图 17: CMEMS 涡旋传播分布

西行速度和距离随纬度显著减小

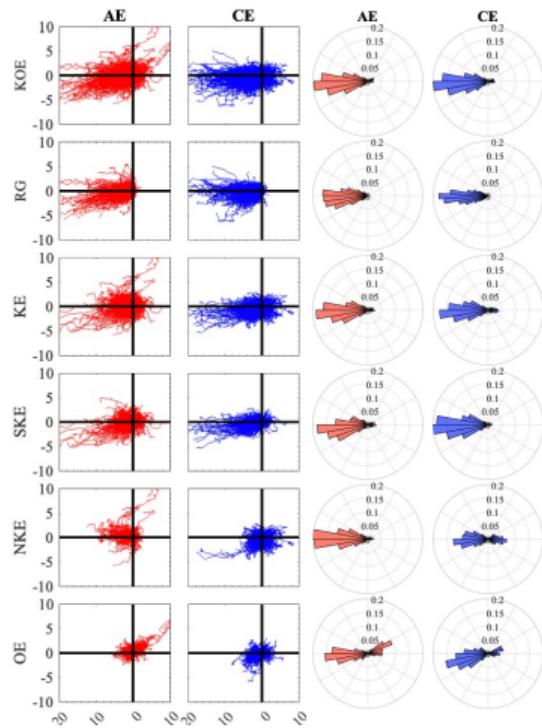


图 18: CMEMS 涡旋轨迹合成 & 位移角

2. 传播特征 2. 涡旋的出生与死亡过程

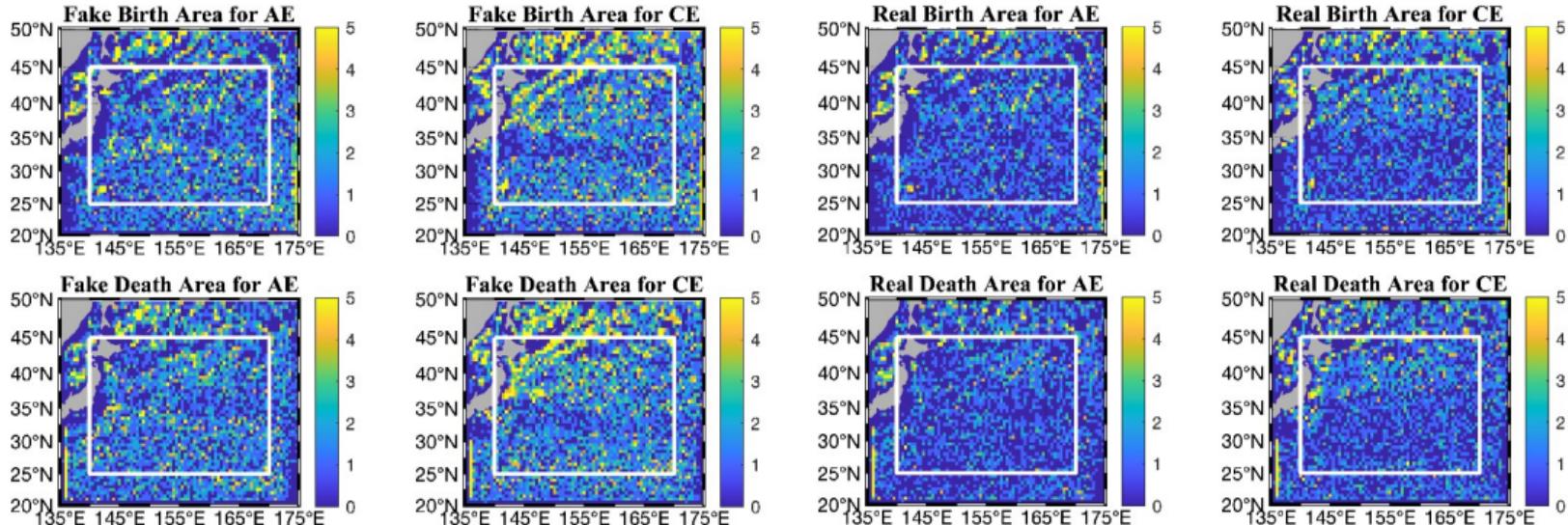


图 19: CMEMS 涡旋出生与死亡事件

传统涡旋统计常误将合并与拆分考虑在内，涡旋真实出生死亡空间倾向性不强

2. 传播特征 3. 涡旋的拆分与合并过程

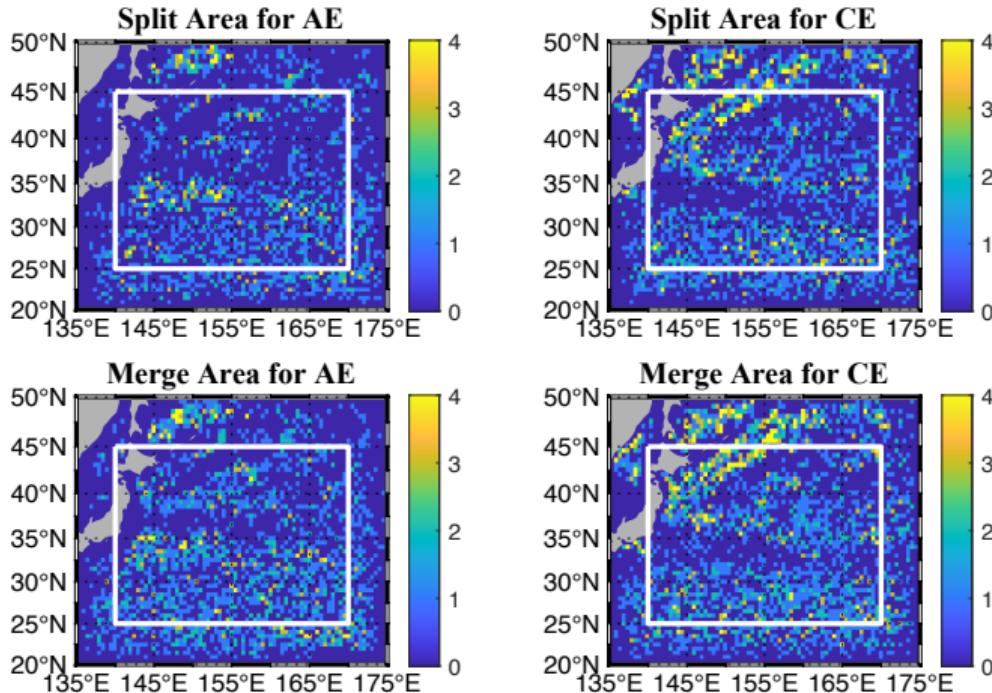


图 20: CMEMS 涡旋拆分与合并事件

AE 与 CE 涡旋事件有显著不同的空间倾向性, AE 倾向于 SKE, 而 CE 倾向于亲潮两侧

3. 小结

1. 全面系统地对 KOE 区域涡旋特征量统计分析;
2. 高低分辨率下涡旋特征量差异显著;
3. 真出生死亡区域 AE 较均匀, CE 偏黑潮以北居多;
4. 涡旋拆分合并区域 AE 偏黑潮南翼, CE 偏亲潮入侵流两侧;

4. 黑潮-亲潮延伸体区域涡旋的垂直结构

1. 水柱中的温盐异常 1. 典型水团和水文特征

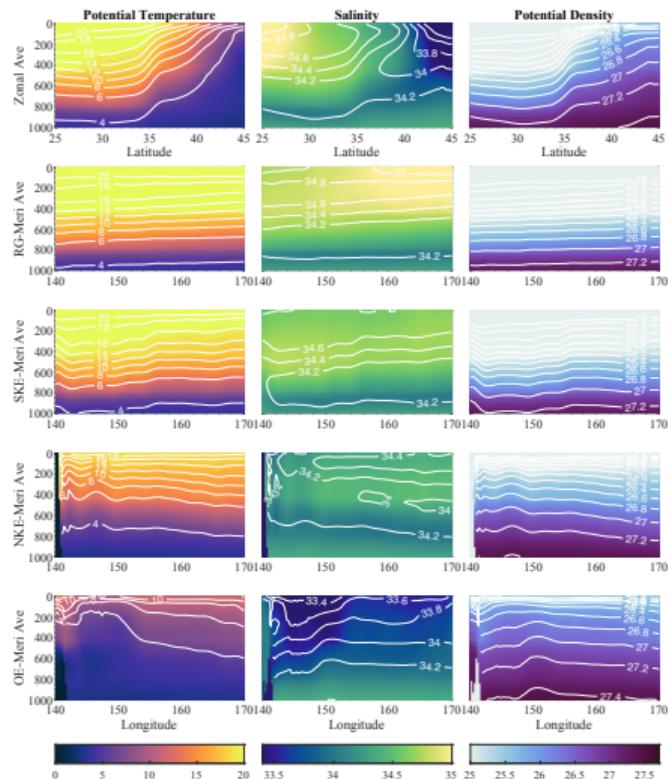


图 21: WOA18 气候态平均断面

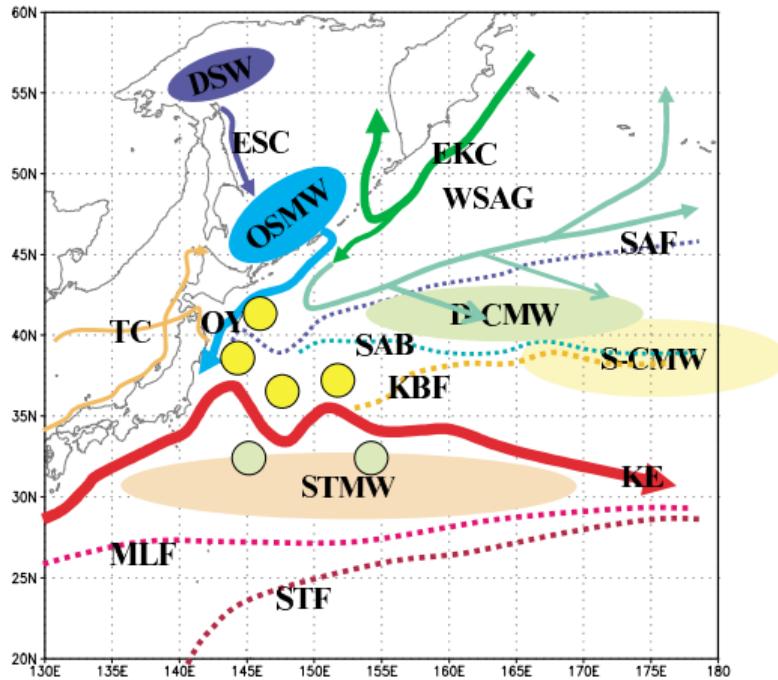


图 22: KOE 主要水团流系分布 [Yasuda, 2003]

1. 水柱中的温盐异常 2. 涡旋引起的异常

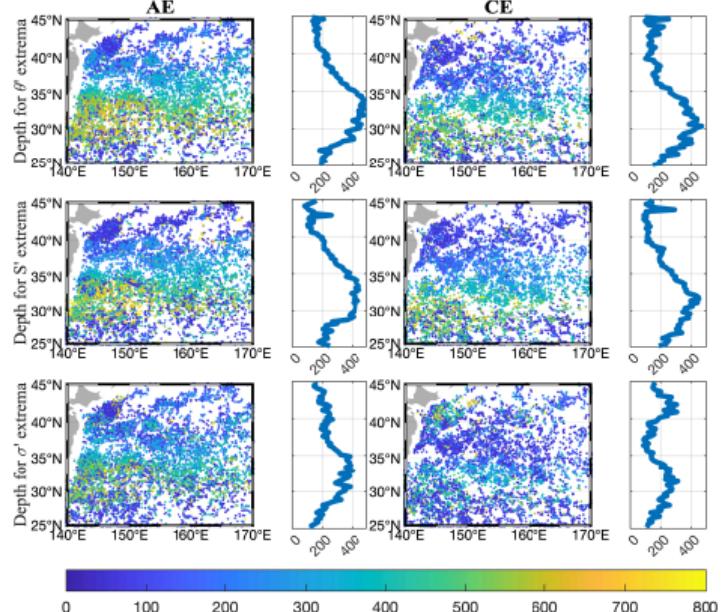


图 23: CMEMS 涡旋异常深度分布

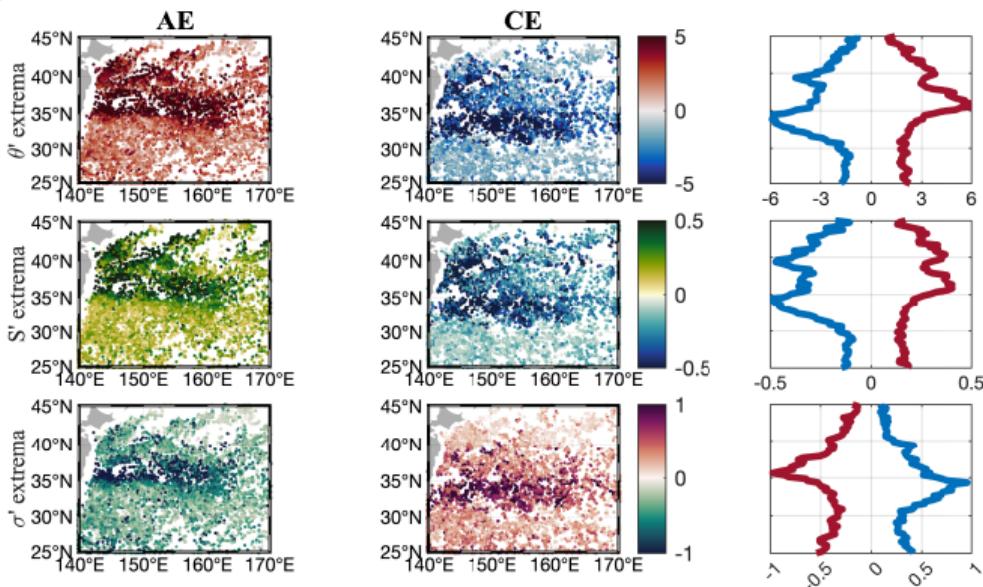


图 24: CMEMS 涡旋异常强度分布

不同深浅和不同强弱的涡旋存在空间上的重合，传统纬向平均易引起歧义

1. 水柱中的温盐异常 3. 子区域间的结构差异

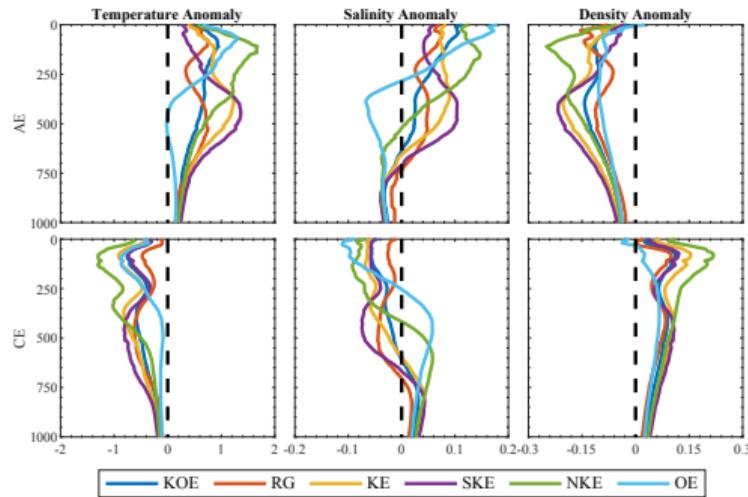


图 25: CMEMS 子区域涡旋垂直结构

合成涡旋剖面和合成涡旋断面易出现不同垂直结构涡旋混淆引起的双核心结构或过厚结构

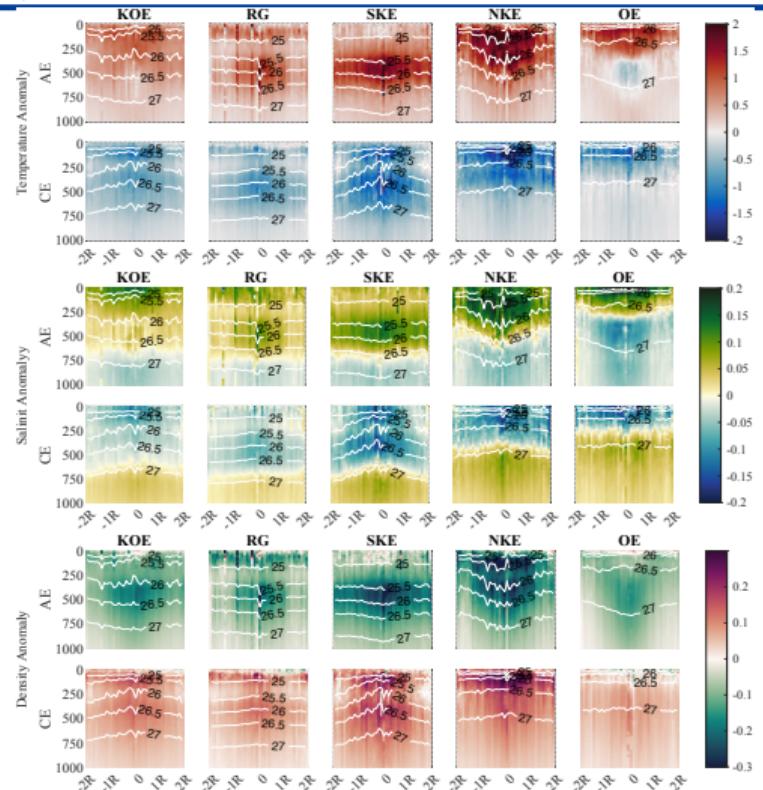


图 26: CMEMS 涡旋异常强度分布

2. 层级聚类法涡旋结构 1. 层级聚类结果

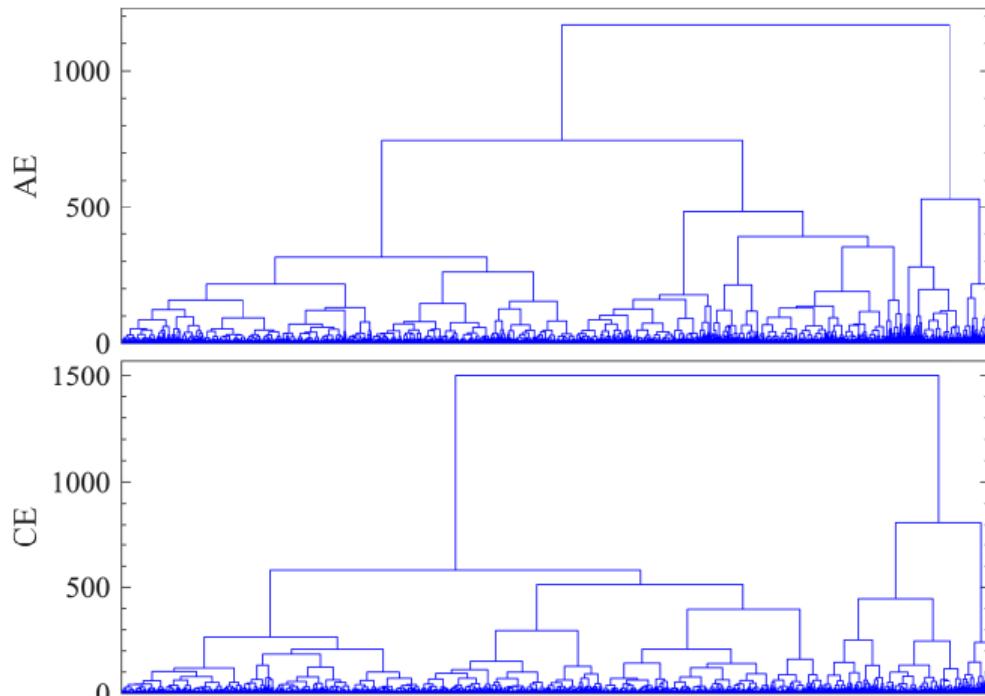


图 27: WNP30-HAC 聚类树状图

1. 高度差代表类间差异性
2. 越低的聚类代表越高的相似性
3. 最易筛选出中层、强涡
4. 其次是表层、次表层、弱涡

2. 层级聚类法涡旋结构 1. 层级聚类结果

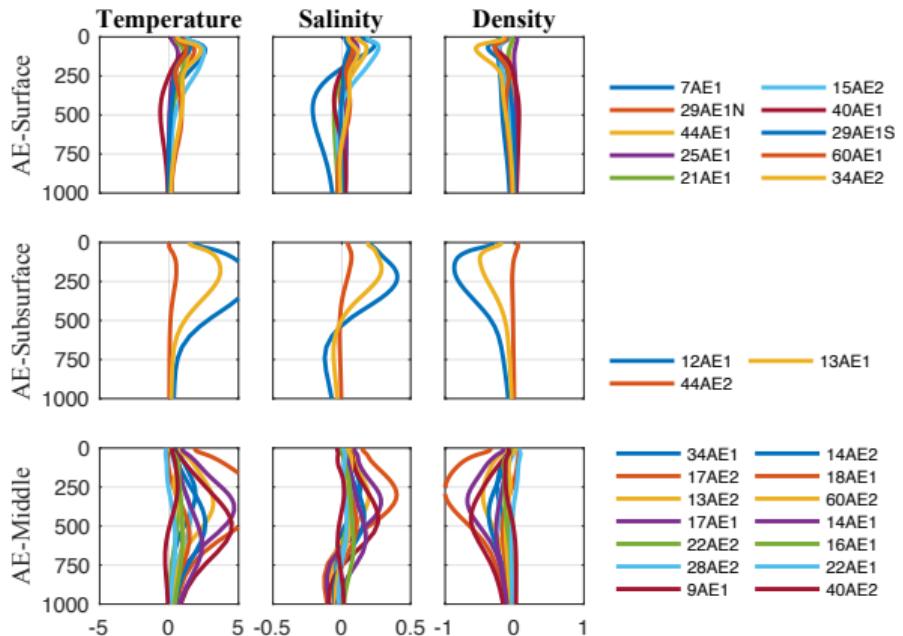


图 28: WNP30 聚类剖面-AE

根据聚类可以分成 3 类: 表层、次表层、中层

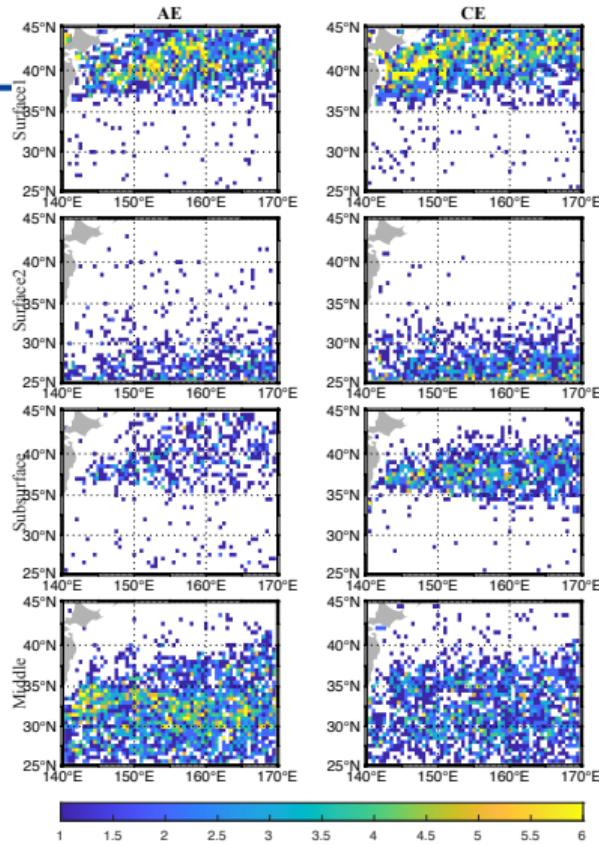


图 29: WNP30 聚类涡旋出生地分布

2. 层级聚类法涡旋结构 2. 涡旋溯源分析

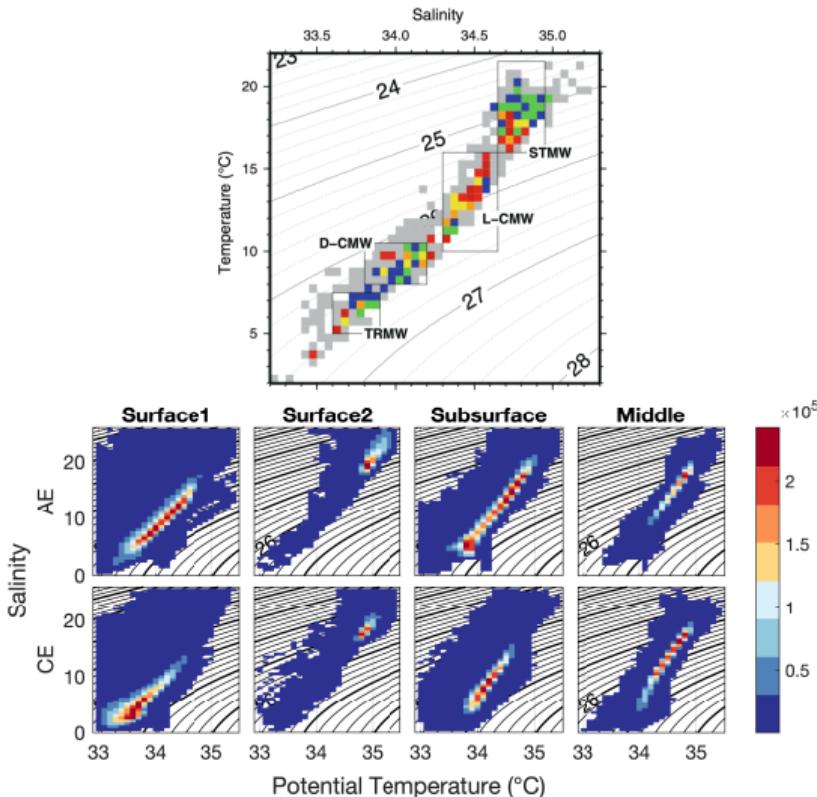


图 30: WNP30 聚类温盐图

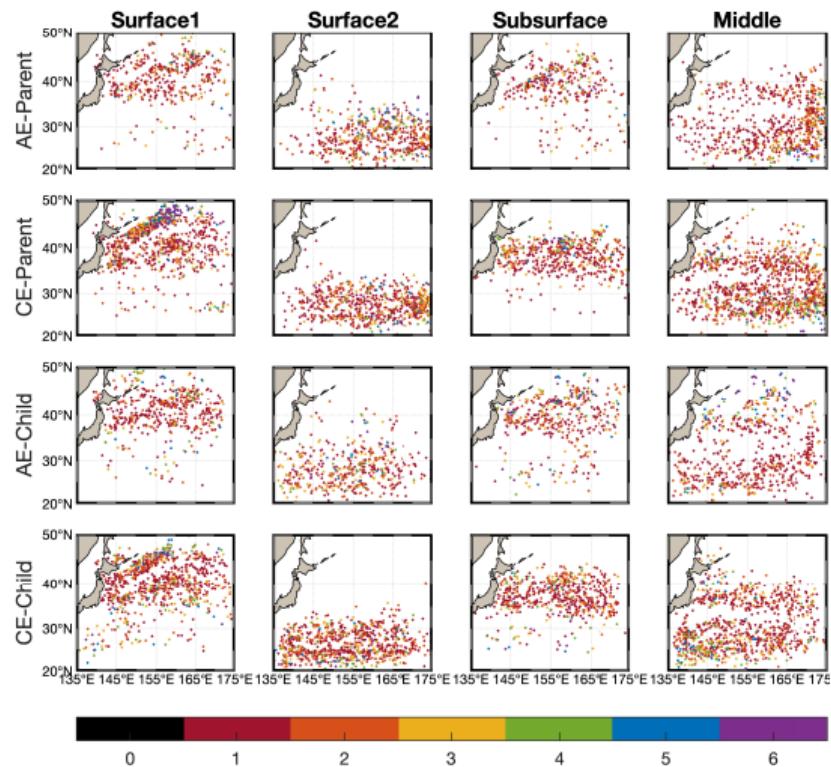


图 31: WNP30 聚类子父代分布

3. 垂直结构影响因素

参考: [Pegliasco et al., 2015; Keppler et al., 2018]

1. 涡旋自身旋转引起的上升/下沉过程引起的位移;
2. 环流系统结构造成的不稳定性;
3. 涡旋生成阶段捕获的水团;
4. 涡旋传播过程中途径的背景场变化;
5. 涡旋表层的海气相互作用;
6. 跨密度面混合;

3. 垂直结构影响因素 1. 涡旋生成阶段

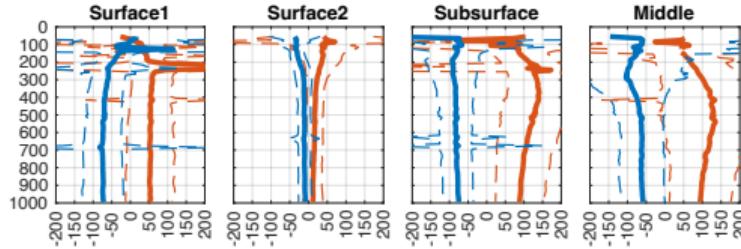


图 32: CMEMS 聚类涡致垂直位移

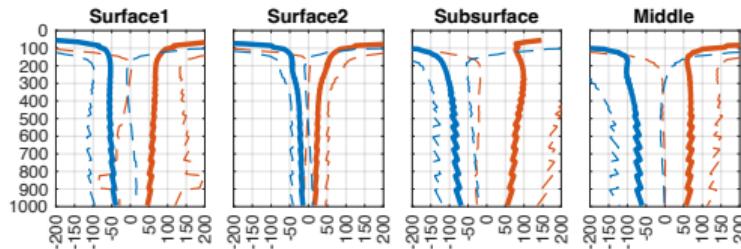


图 33: WNP30 聚类涡致垂直位移

讨论

1. 次表层位移需要考虑涡旋自身和背景层结影响
2. 涡致垂向位移是涡旋垂直结构的最大影响因素
3. Surface2 型涡旋涡致垂直位移最小
4. 其他类型涡旋在对应深度均有体现

等密线的垂直位移:

$$r(z) = -\frac{\rho'(z)}{\partial \rho(z)/\partial z} \quad (1)$$

方法参考: [Keppler et al., 2018]

3. 垂直结构影响因素 1. 涡旋生成阶段

线性不稳定

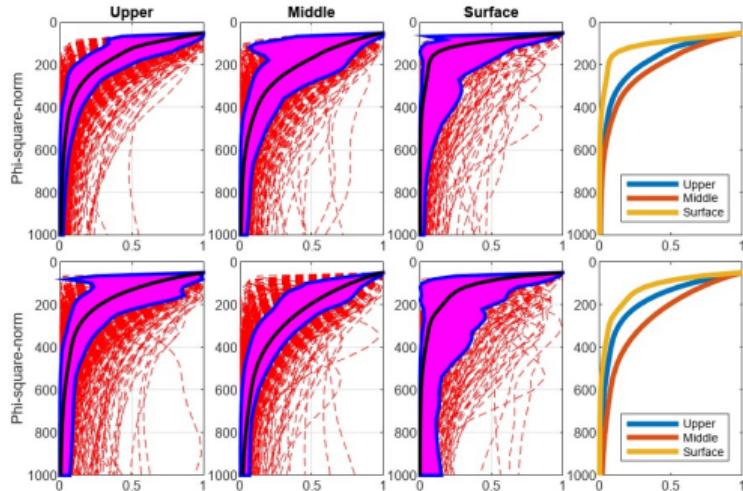


图 34: WNP30 线性不稳定 $|\psi|^2$ 剖面

1. TOEddies 父子代关系找到真实出生点
2. 61×41 格的空间平均和 31 天的后向时间平均
3. 在 $0.1\text{--}4$ 倍 K_{def} 波数空间, 以 $0.1K_{def}$ 分辨率扫描, 找到增长率最大的波数
4. 仅保留表面型 (Charney_s) 不稳定剖面, 否则取增长率次大波数, 循环全部直到舍弃该剖面

无粘准地转位涡方程 (QGPV):

$$q_t + \mathbf{U} \cdot \nabla q + \mathbf{u} \cdot \nabla Q = 0, \quad -H < z < 0 \quad (2)$$

$$\Phi_{zt} + \mathbf{U} \cdot \nabla \Phi_z + \mathbf{u} \cdot \nabla (\Phi_z + f^{-1} N^2 \eta) = 0, \quad z = 0, -H, \quad (3)$$

方法参考: [Jing et al., 2019; Feng et al., 2022]

3. 垂直结构影响因素 2. 涡旋传播阶段

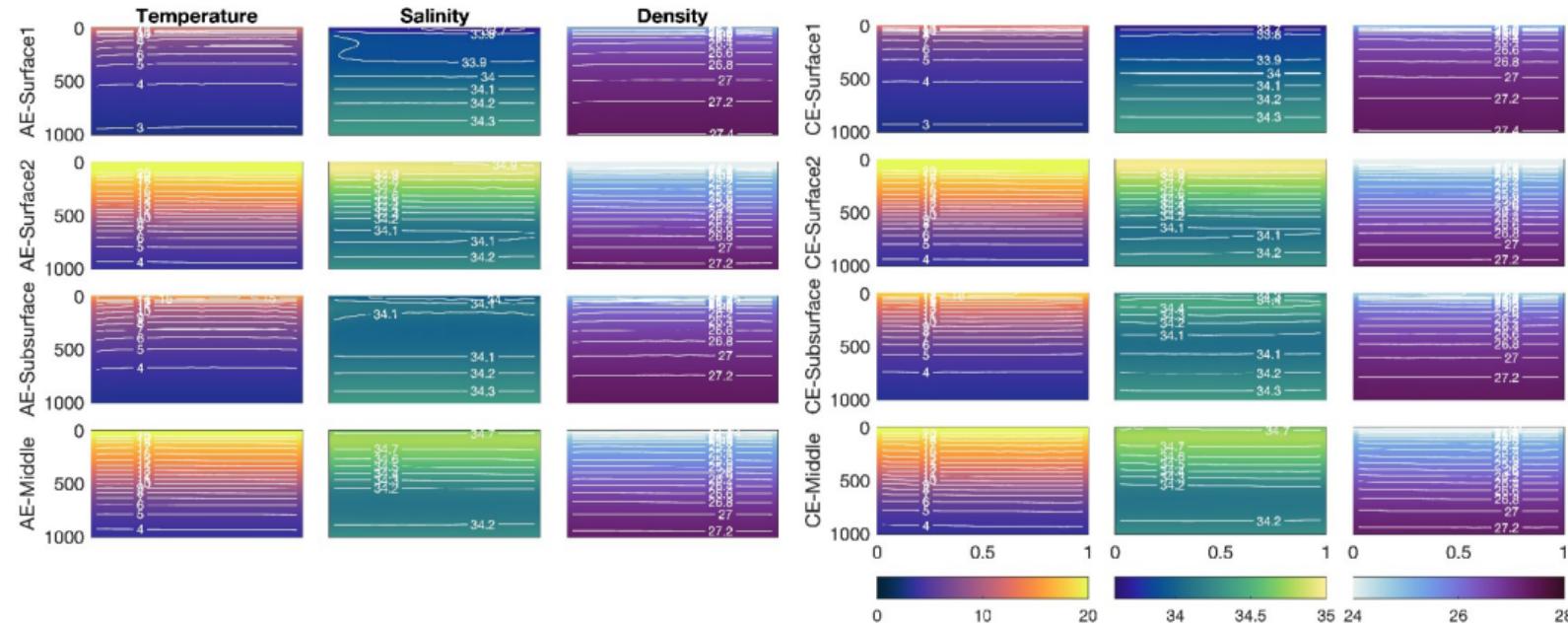


图 35: WNP30 聚类涡旋传播背景场 (标准化生命周期)

各组涡旋传播途径背景场基本保持稳定，KOE 区域涡旋背景场影响不大

4. 生命演化过程中的结构变化 1. 非涡旋事件中涡旋的结构变化

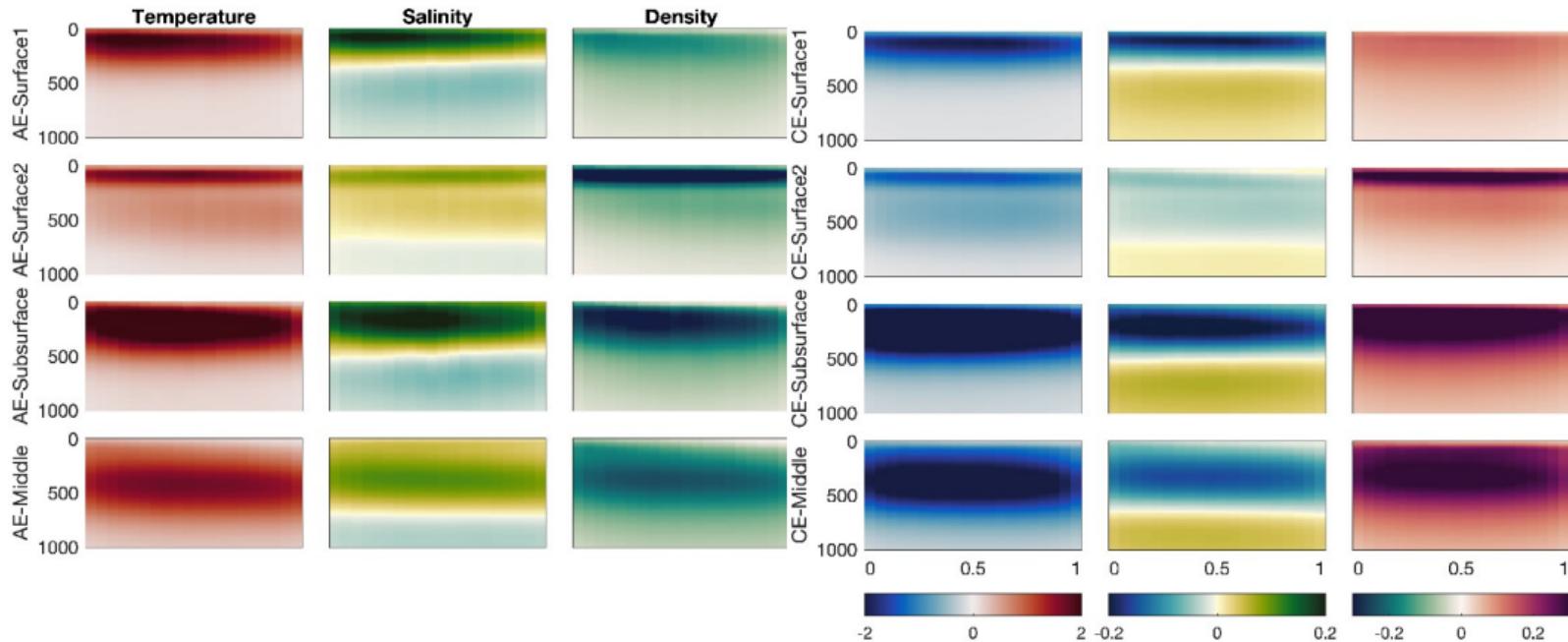


图 36: WNP30 聚类涡旋传播垂直结构 (标准化生命期)

4. 生命演化过程中的结构变化 2. 涡旋事件中涡旋的结构变化

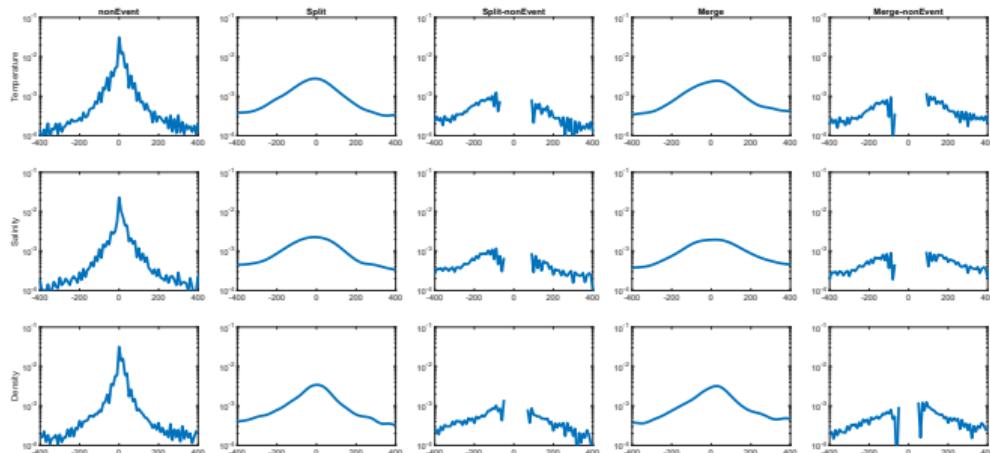


图 37: WNP30 涡旋事件前后垂直结构变化概率密度分布

算法流程

1. 以非涡旋事件涡旋每 15 天异常深度变化作为基准；
2. 计算涡旋事件前后 15 天异常深度变化最大值；
3. 正值为上升，负值为下降；
4. 涡旋事件与非涡旋事件相减为正则显著；

5.总结与展望

1. 主要结论

1. 全面系统地获得了黑潮-亲潮延伸体海域不同子区域涡旋的表面特征量及其演化特征，在标准化生命周期中存在显著的时间反演特性和五分位式的演化过程；
2. 对比了不同分辨率数据下的涡旋统计结果，高分辨率下涡旋总体表现为更小更弱更不稳定，揭示了全球涡旋统计中潜在的涡旋特征高估问题；
3. 在多个子区域内获得了合成涡旋的三维结构，并根据涡旋垂直结构进行聚类分析，理清了该区域内的几种主要涡旋结构，并利用水团分析和涡旋父子代关系发掘各类涡旋的源头；
4. 讨论了几种涡旋垂直结构的影响因素；
5. 阐明了在涡旋事件（拆分和合并）和非涡旋事件生命演化过程中涡旋垂直结构的变化特点。

2. 创新点

1. 使用观测数据和再分析资料获得了研究区域内多个子区域涡旋表面特征在不同分辨率数据下的显著差异，揭示了目前全球涡旋统计中可能存在的涡旋特征量高估问题；
2. 利用层次聚类分析厘清了研究区域内多种典型的涡旋垂直结构及其生成源头，并揭示了各类涡旋的线性不稳定生成机制，阐明了涡旋各生命阶段中不同垂直结构的影响因素；
3. 通过较先进的涡旋识别算法阐明了在涡旋事件（拆分和合并）和非涡旋事件生命演化过程中的涡旋垂直结构变化特点。

3. 不足与展望

1. 中尺度涡在出生时、耗散时和发生涡涡相互作用时，涡旋结构发生怎样的变化，涡旋能量进行了怎样的转移？
2. 本区域海表面高度变异高值区与海表温度变异高值区分布不对称性的原因是什么，不同垂直结构的涡旋在其中发挥了怎样的作用？
3. 涡旋在发生涡旋事件（拆分和合并）过程中的垂直结构变化的动力机制是什么？



博士学位论文答辩

感谢您的批评指正