

## TST numerical Open Boundary Condition (OBC):

In limited-area ocean models, existing open boundary conditions (OBCs) often create dynamic inconsistencies and perform poorly in resolving tidal or subtidal flow when both forces exist. We have developed a novel tidal-subtidal (TST) OBC to accommodate the concurrent TST forcing, and the respective tidal or subtidal forcing, at the open boundary (Liu and Gan, 2016, JGR).

**Total** barotropic, depth-averaged velocities perpendicular to the OB, by adding the tidal and subtidal velocities:

$$\bar{U}_b^{n+1} = \bar{U}_{Tb}^{n+1} + \bar{U}_{Rb}^{n+1},$$

where

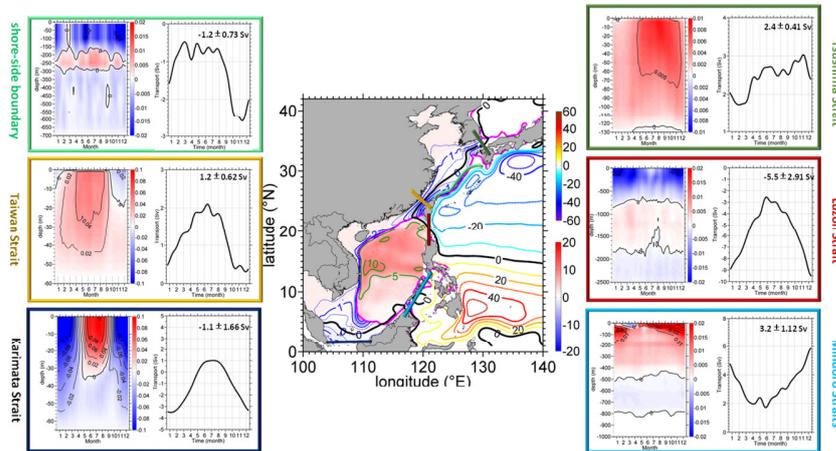
$$\bar{U}_{Rb}^{n+1} = \bar{U}_{Rlb}^{n+1} + \bar{U}_{Rgb}^{n+1},$$

$$\bar{U}_{Rgb}^{n+1} = \frac{1}{1 + C_g} (\bar{U}_{Rgb}^n + C_g \bar{U}_{Rg(b\pm 1)}^{n+1}),$$

$$\bar{U}_{Tb}^{n+1} = \bar{U}_{Tlb}^{n+1} \pm \sqrt{\frac{g}{H}} (\eta_b^{n+1} - \eta_{Tlb}^{n+1} - \eta_{Rlb}^{n+1}).$$

## China Sea Modeling System:

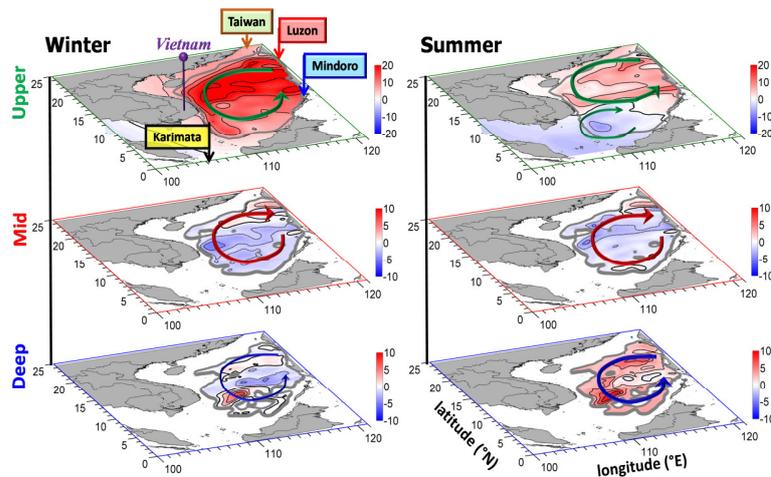
We developed a new three-dimensional, high-resolution ocean circulation model for the entire China Seas (CS) region. The model considered the linked physics associated with the western boundary current, monsoonal wind, tidal forcings, and topography in both the CS and the adjacent oceans. We revealed rotating layered circulation in the CS (Gan et al., 2016 JGR).



Time series of depth-integrated transport (Sv) and depth-dependent mass flux ( $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) through the straits around the CS and across the shore-side boundary (SSB, light green line) of the Kuroshio in the ECS. Each strait/SSB is indicated by a specific color bar and the result for each strait is shown in a box of the corresponding color. The background contours in the CS domain represent the annual mean transport stream function in the upper 750 m. The positive value refers to northward flows in the Taiwan, Karimata, and Tsushima straits, outflows in the Luzon and Mindoro Straits, and seaward flow along the SSB of the Kuroshio. The pink line represents the 200 m isobath.

### Spinning South China Sea (SCS):

We reveal the existence of a unique, three-layer, cyclonic-anticyclonic-cyclonic (CAC) circulation in the upper (<750 m), middle (750-1500 m), and deep (>1500 m) layers in the SCS with differing seasonality. The CAC is extrinsically forced by lateral planetary vorticity flux in each of the respective layers and intrinsically governed by joint effects of baroclinicity and relief (JEBAR) arising from the CAC flow–topography interaction in the SCS (Gan et al., 2016 JPO).



*Simulated transport stream functions ( $S_v$ ) in the upper layer (<750 m), middle (“Mid”) layer (750-1500 m), and deep layer (>1500 m) in winter (left column) and summer (right column) in the South China Sea. The circles represent the mean circulation in each layer. The thick contour line in the upper layer refers to the edge of the basin along the 100 m isobath. A thinner circular line in the schematic circulation represents a relatively weak circulation.*

## 研究亮点：解密珠江口水体缺氧

### 研究亮点：

1. 季节性的富营养化和缺氧问题在珠江口海陆过渡带区域反复出现；
2. 环流形成的涡使营养盐和有机物在海陆过渡带区汇聚，增加了滞留时间和水体层化，有利于缺氧区的发展。
3. 生化过程和珠江口独特的物理动力过程共同作用为珠江口近岸水体缺氧提供了充要条件。

### 导语：

溶解在水中的分子态氧称为溶解氧，绝大多数的海洋生物均需依赖溶解氧来维持生命，因此缺氧（小于 2 毫克/升）或者氧气耗尽的危害巨大。由于人类活动和气候变化，全球大洋以及近岸水体的溶解氧均呈现不同程度的降低，截至 2009 年，在全球 400 多处沿岸河口-海洋系统中发现了水体缺氧问题（图 1）。

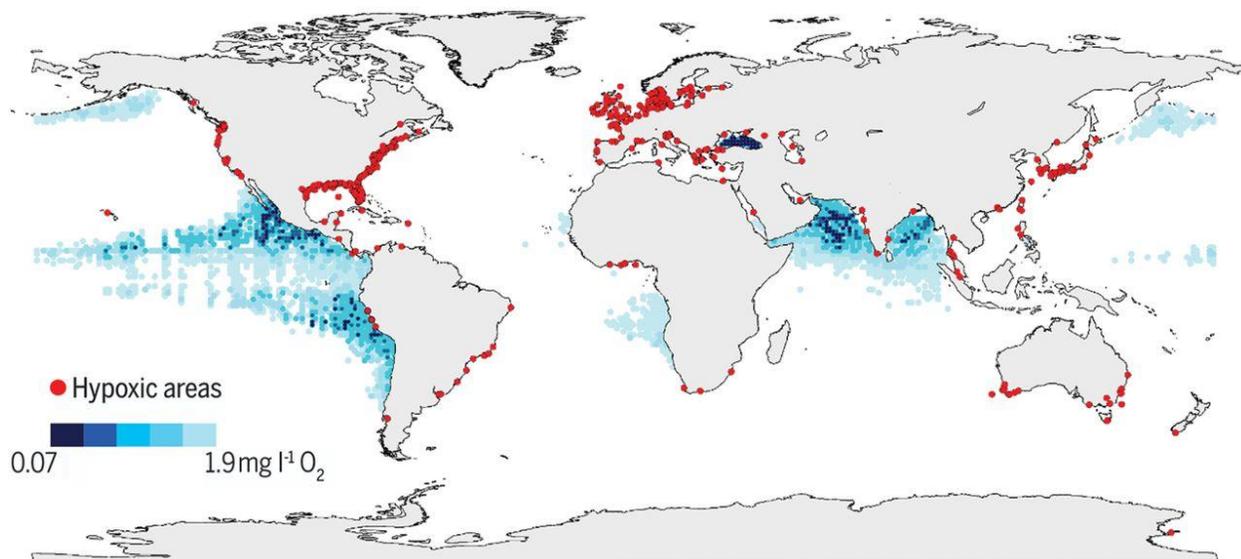


图 1. 全球缺氧水体分布 (图片来源: [Breitburg et al., 2018])

珠江（图 2）是全球第 17 大河流，年径流量达 285 亿立方米，全年 78% 的径流量集中在夏季。珠江三角洲地区是粤港澳大湾区的摇篮，是全国人均 GDP 最高，经济实力最强的地区之一。高强度的人类活动带来了大量的营养盐

排放，是珠江河口夏季富营养化的主要原因。早期，学者们发现在河道以及河口上游河水中有有机物质降解以及硝化作用是水体缺氧主要原因，但局限于观测数据和认知的匮乏，对珠江口海岸过渡带区域的缺氧现象及其形成机理鲜有研究。

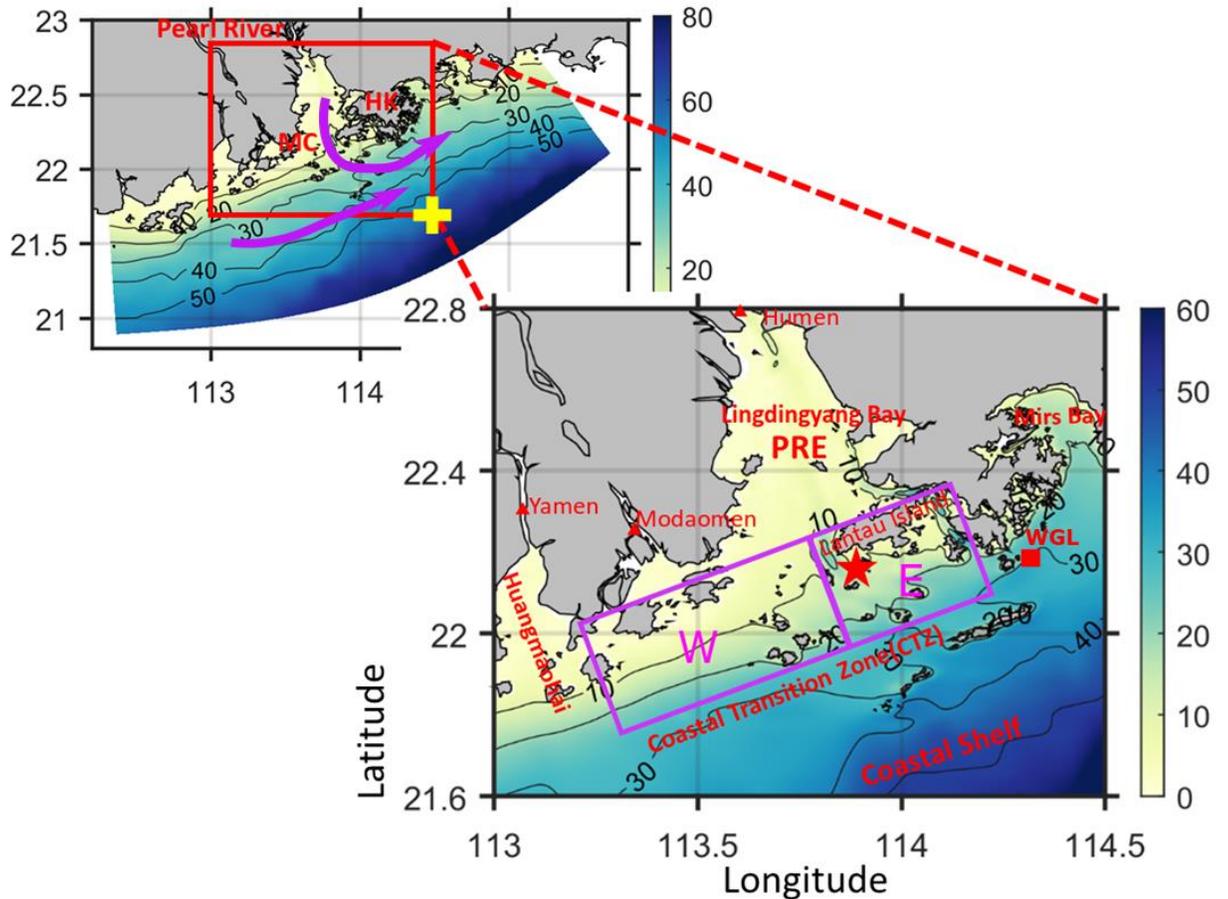


图 2: 珠江口地形概况[Li et al., 2020]

近年来，随着卫星遥感资料日益增多，观测范围逐渐扩展，珠江口海岸过渡带区的富营养化和缺氧问题吸引众多学者关注。以香港水域海洋环流、生态环境以及缺氧为主题的课题研究为背景，香港科技大学甘剑平教授团队(<https://ocean.ust.hk/>)对珠江口以及临近陆架海域的水质进行了全方位、多角度的观测和研究，同时利用三维生化-物理耦合模式对其进行数值模拟 (ROMS)。数据包括十次走航观测、浮标时间序列观测以及长时间水色卫星

遥感观测。研究表明夏季珠江口表层叶绿素浓度的高值主要分布在河口-海岸过渡带区域，同时在该区域东西两侧反复出现明显的缺氧中心（图 3）。

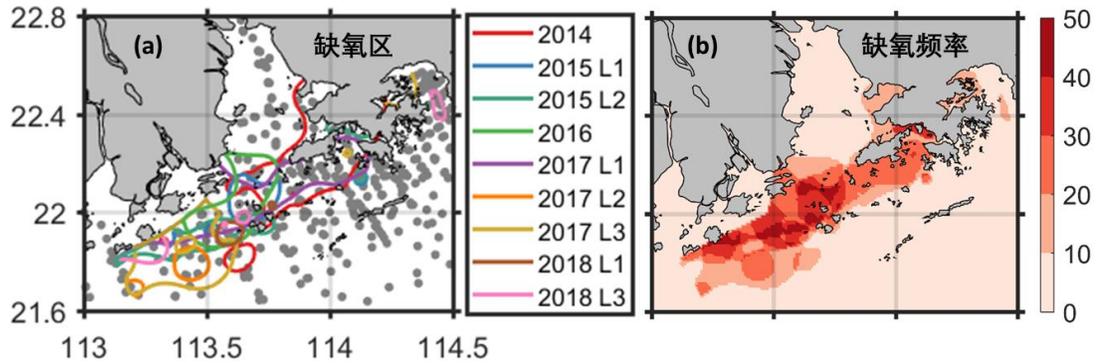


图 3: 珠江口缺氧 2014-2018 年夏季缺氧区和缺氧频率 (%) 分布

## 缺氧形成机制

### 1. 必要条件: 富营养化

污水排放，水产养殖等人类活动以及地表径流为珠江口带来丰富的营养盐和有机物，是珠江口富营养化的主要成因。但因河水浊度带来的光限制以及河流冲刷时间短，这些营养盐和有机物并不会提高珠江口上游的浮游植物的生物量；反而会在河口-海岸过渡带区域富集，形成浮游植物高值区（图 4）。这些浮游植物的光合作用虽然提高了表层溶解氧，但其死亡后产生的生物碎屑，或在水体中，或沉降在底层，矿化分解消耗水体中溶解氧，在长期溶解氧消耗大于输入时，就会造成水体缺氧。

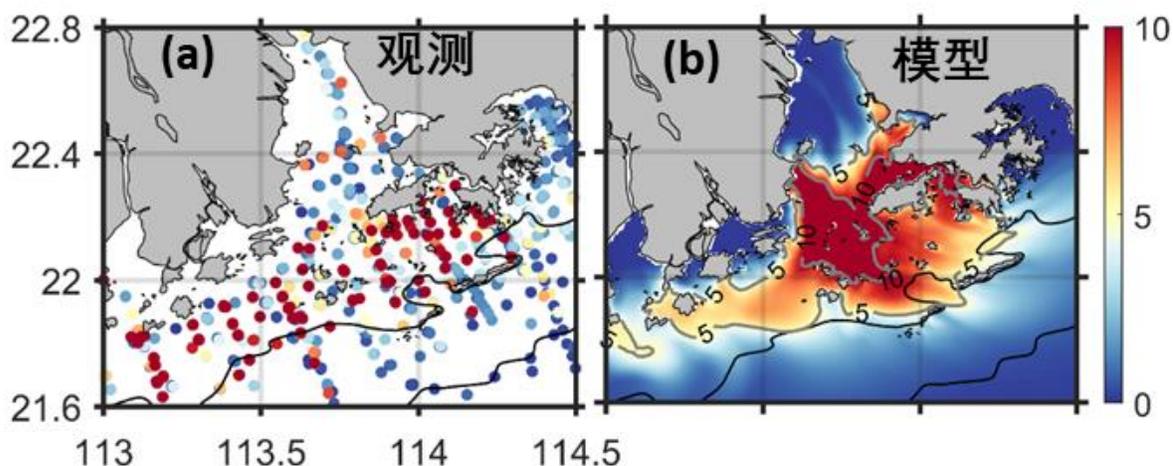


图 4: 珠江口表层叶绿素分布 (微克/升) (a) 航次观测结果; (b) 数值模拟结果

## 2. 充分条件: 物理环流动力过程

过去, 人们对缺氧形成的认知主要集中在生物化学过程, 认为大量营养盐和有机物导致的富营养化以及后续的耗氧过程是缺氧的成因, 但随着跨学科研究的逐渐深入, 学者渐渐认识到物理过程在缺氧形成和发展起着重要作用。

夏季, 如图 5 所示, 江河径流量剧增, 在夏季西南季风的作用下, 冲淡水偏离海岸向东南方向扩展, 与来自西南方向的陆架上升流汇聚并形成很强的流速剪切, 加上地形的作用, 在河口-海岸过渡带的东西两侧形成气旋式涡。这种气旋式涡具有辐聚效应, 在一定程度上增加了水体在过渡带区域的滞留时间, 同时辐聚效应导致沉降在底层的有机物质在过渡带区域大量累积, 其矿化过程会消耗大量氧气。

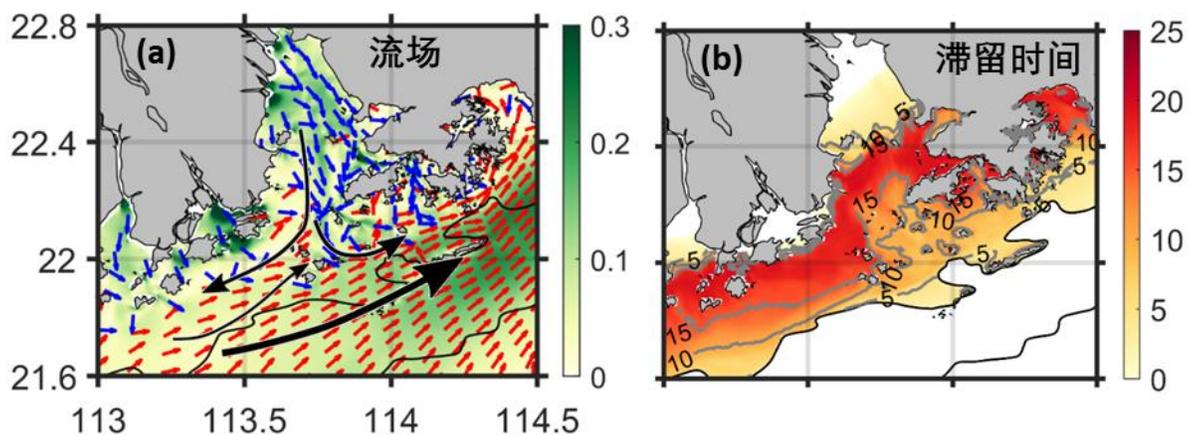


图 5: 珠江口 (a) 水柱平均流速分布 (米/秒) 和 (b) 滞留时间分布 (天)

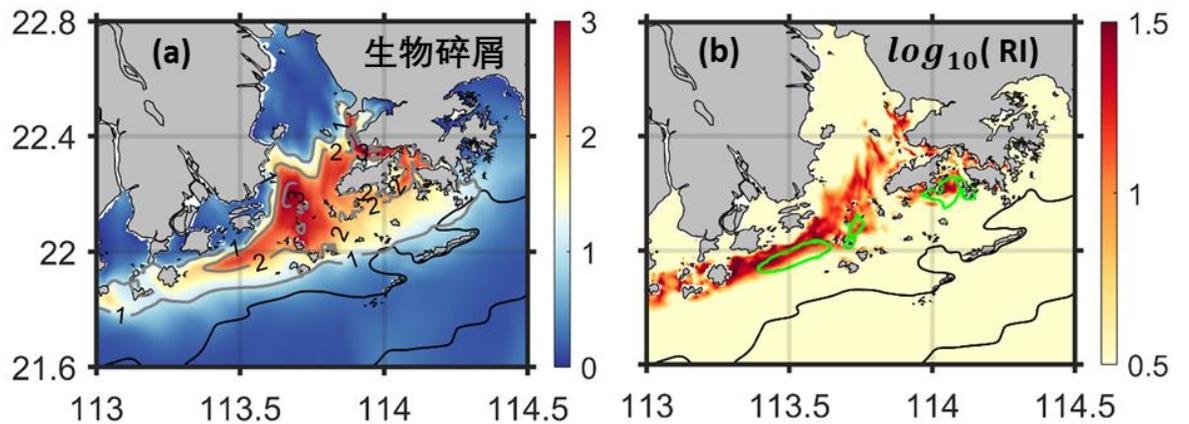


图 6: 珠江口底层 (a) 有机碎屑 (毫摩尔/立方米) 和 (b) 水体层化系数 (理查森数,  $\log_{10}(RI)$ ) 分布

另一方面, 如图 6 所示, 表层密度小的冲淡水与底层密度高的来自深海的上升流使水体层化, 抑制了溶解氧的垂向运输, 上层水体因为光合作用和海气相互作用而富含溶解氧, 但不能及时对下层水体中被各种生化过程不断消耗的氧气进行补充, 从而在海岸过渡带区域产生缺氧区 (图 7)。

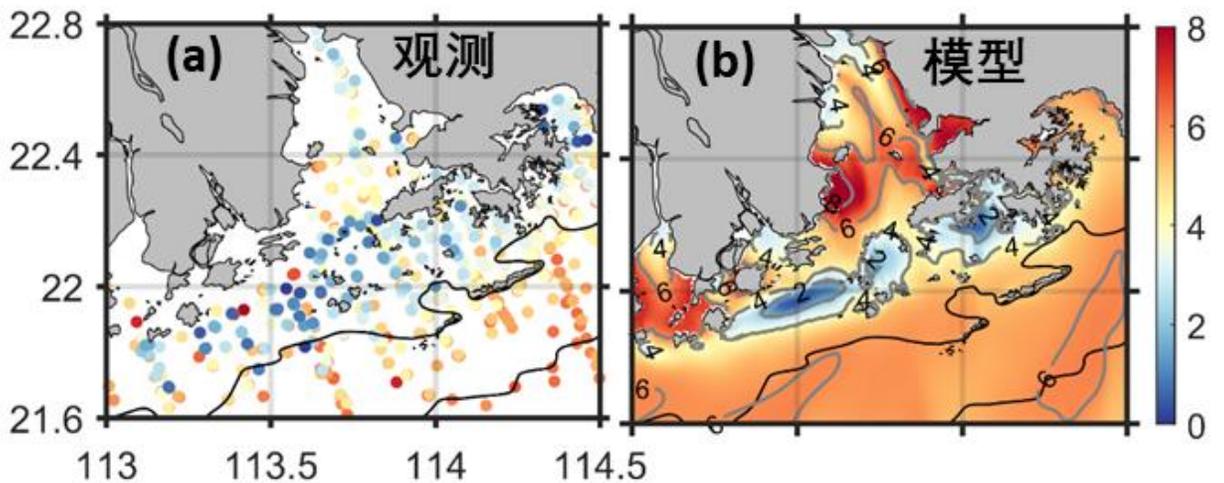


图 7: 珠江口底层溶解氧分布 (毫克/升) (a) 航次观测结果; (b) 数值模拟结果

结语:

通过上面的介绍，我们认识到缺氧的形成充要条件：富营养化以及相关的生物化学过程是缺氧形成的必要条件，气旋涡的辐聚效应，较长的滞留时间，很强的水体层化等物理过程共同作用是其充分条件，两者共同作用是缺氧形成和发展的充要条件。以上研究结果最近发表于 JGR\_Oceans by Li et al. (2020)

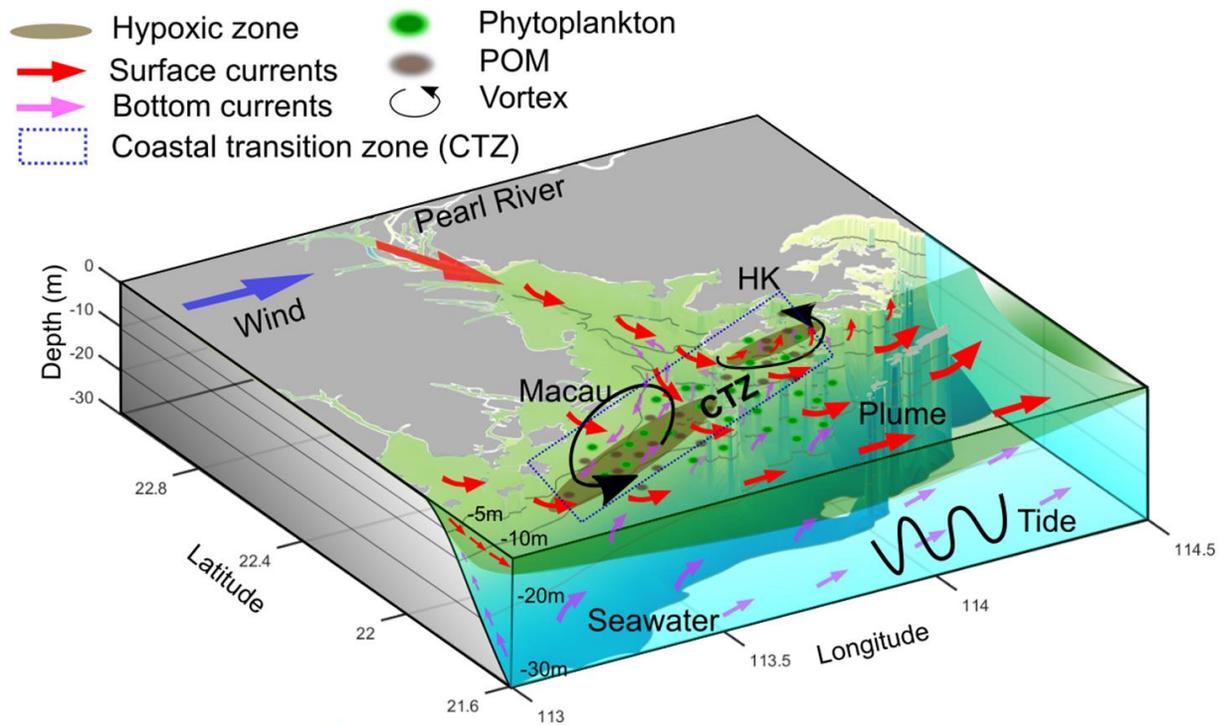


图 8：珠江口缺氧机制概念图

参考文献：

Breitburg, D., et al. (2018), Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science*, 359(6371), doi:10.1126/science.aam7240.

Li, D., J. Gan, R. Hui, Z. Liu, L. Yu, Z. Lu, and M. Dai (2020), Vortex and biogeochemical dynamics for the hypoxia formation within the coastal transition zone off the Pearl River Estuary, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, e2020JC016178, doi:10.1029/2020JC016178.