

珠江口夏季底层缺氧现象的数值模拟

张璇, 江毓武*

(近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361005)

摘要: 底层水体缺氧现象已经引起了人们的广泛关注. 水体底层缺氧易造成水生生物的死亡, 影响了水体的生态环境, 造成水质严重下降, 因此找出造成水体缺氧的原因有着非常重要的意义. 通过一个三维的水动力生态模型模拟并研究了夏季珠江口底层的缺氧现象. 分析结果表明, 盐度锋面对珠江口水体表层氧气交换的抑制作用及底层有机耗氧物质对溶解氧的大量消耗是造成底层缺氧现象的主要原因, 但潮汐所导致的强混合可以破坏这种缺氧机制的形成; 底层缺氧主要与河流输送的耗氧物质有关; 作为主要营养盐参与生态系统循环的磷对底层溶解氧无明显影响.

关键词: 珠江口; 生态模型; 溶解氧

中图分类号: P 731.21

文献标志码: A

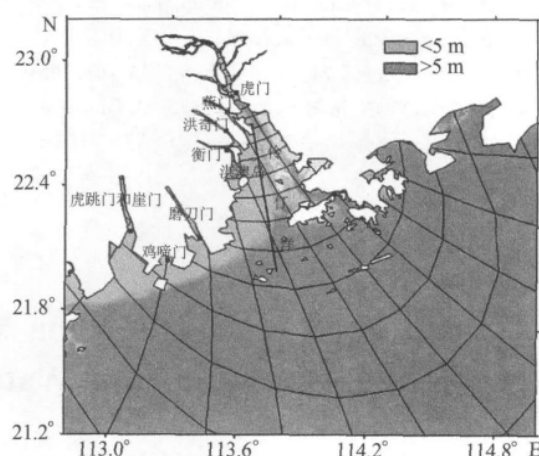
文章编号: 0438-0479(2011)06-1042-05

珠江是中国第二大河, 多年平均径流量为 $10\ 523\ \text{m}^3/\text{s}$, 占全国的 13%, 广州, 澳门, 香港等经济发达城市位于珠江口四周. 珠江水系通过虎门、焦门、洪奇门、衡门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门八大口门注入南海(图 1). 随着经济及城市工业化的发展, 大量的生活工业废水排入珠江口, 致使河口水质下降, 原有的生态环境遭到破坏. 水体底层缺氧现象已经引起了人们的广泛关注. 一般认为, 溶解氧(DO)含量低于 $4\ \text{mg/L}$ 为低氧区, 低于 $3\ \text{mg/L}$ 为缺氧区, 水体缺氧打破了原有生态系统的平衡, 影响了底层生物的生存, 容易造成底层水生生物死亡, 对整个河口生态系统造成了严重的影响. 相对于 1984 年夏季的观测结果, 1999 年夏季的底层 DO 观测值有明显的降低^[1]. 张恒等^[2]利用改进的 RCA 水质模型模拟并分析珠江口 DO 的收支情况, 认为陆源耗氧物质输入量增多对底层缺氧现象有很大影响. 罗琳等^[3]使用一个三维水动力-生态耦合模型对珠江口底层水体缺氧现象的形成进行了分析, 认为河流有机物输入和层化作用是底层缺氧的主要原因, 另外潮汐和锋面提供的混合对缺氧现象的发生起到了抑制作用.

珠江口地形复杂, 水深从几米到几十米不等, 另外有两条深槽从外海通向伶仃洋内. 潮汐属于不正规的半日潮, 平均潮差不超过 $2\ \text{m}$. 在潮汐及径流的共同作用下, 水动力条件十分复杂. 珠江口冬季和夏季分别受东北季风和西南季风影响, 呈现出季节性变化的特征^[3].

为了了解潮汐及河流营养盐输入对缺氧现象的影

响, 本文从数值模拟的角度对珠江口缺氧现象进行了模拟, 并分析了可能造成这种现象的原因.



一个网格包括 10 个计算网格, 水深单位: m.

图 1 珠江口区域水深和断面位置

Fig. 1 The bottom topography of Pearl River Estuary and the profile position

1 模型介绍

本模型是一个生态动力模型, 其中包含的水动力模式及泥沙模式是以区域海洋模式 ROMS(regional ocean modeling system)为基础. ROMS 模型是一个三维非线性的斜压原始方程模式^[4], 采用 S 坐标系, 可以客观地反映出流场受海底地形变化的影响, 并消除 Sigma 坐标带来的计算误差. ROMS 模型可耦合生态, 泥沙, 海冰等多种模式, 应用简便, 已被广泛应用于近

收稿日期: 2010-12-22

* 通信作者: ywjiang@xmu.edu.cn

岸河口及大洋的数值模拟计算^[5]. 生态模式则是建立在 FENNEL^[4] 生态模式基础上. FENNEL 模式由浮游动物、浮游植物、叶绿素、硝酸盐、铵盐及大、小碎屑 7 个生态变量组成, 并加入了磷对浮游植物生长的限制作用及悬浮泥沙造成的光衰减效应, 可以较真实地反映珠江口的生态情况.

2 模型设置与边界

模型的计算范围为珠江口及其邻近海域. 模型采用曲线正交网格, 水平方向为 220×220 个网格, 网格分辨率从珠江口内的 500 m 到外海的 10 km, 垂向分 16 层. 内模态时间步长为 180 s, 外模态时间步长为 36 s; 垂向混合采用 Mellor-Yamada 2.5 阶混合方式^[6]; 水深数据由 ETOP2 数据与实测数据差值得到; 海表气象边界和外海开边界数据分别从全球海洋大气综合数据集(CODAS)、海洋数据集(WOA2001)获得; 河流流量分枯水期(10 月至来年 3 月)和丰水期(4—9 月)两季进行设定^[5].

3 夏季底层缺氧现象

底层 DO 的观测分布趋势是湾口到湾内逐渐减小, 到湾外又逐渐增大, 呈现出湾口湾外高, 湾内低的分布格局. 缺氧区出现在淇澳岛南边局部区域^[2,7]. 图 2 为 8 月份的底层 DO 模拟图. 模拟结果表明, 珠江口底层 DO 在 1~6 mg/L 之间, 分布趋势为河口和湾口处较高, 湾内水域较低, 特别是湾内西部水域, 淇澳岛东部和南部出现 $DO < 4$ mg/L 的低氧区域, 其中淇澳岛东部等值线密集, 表明该区域耗氧强烈, 模拟结果与观测结果趋势一致^[7]. 另外, 在河段下游局部与湾顶东侧也出现了 DO 低值区.

4 机理分析

4.1 盐度锋对底层 DO 分布的影响

珠江口的缺氧现象是一个瞬时现象, 持续时间不长, 并且存在年际变化. 缺氧区域主要出现在伶仃洋西侧的浅滩处^[3]. 影响水体中 DO 含量的因素很多, 但普遍认为水体层化和底层耗氧物质耗氧是造成伶仃洋水体缺氧的主要原因. 水体获得氧气的主要来源是大气复氧和光合作用产氧. 但是由于夏季水体层化作用强, 阻挡了表层氧气的向下运输, 加上夏季悬浮泥沙较大, 有效光照达不到底层, 使下层水体无法通过光合作用

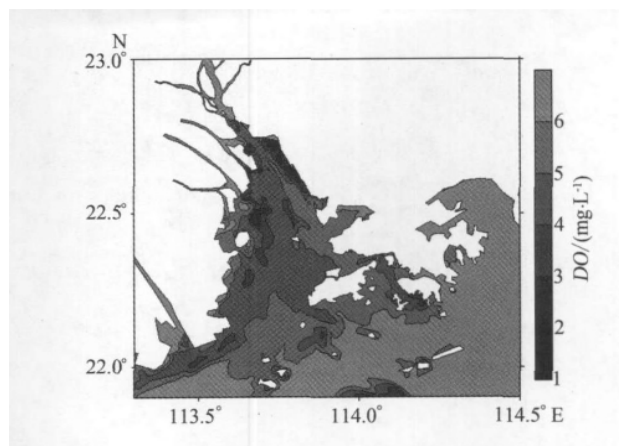


图 2 伶仃洋夏季底层 DO 浓度的模拟分布

Fig. 2 Distribution of dissolved oxygen at the bottom in the Pearl River Estuary during summer

获得氧气, 造成水体底部得不到氧气补充. 另外, 夏季河流流量增大, 河流流出的淡水可以在表层扩展到更远的地方. 在淡水和高盐的海水交汇处容易产生盐度锋面, 阻挡水体中的耗氧物质(大小碎屑)穿过锋面向外海输送. 当耗氧物质遇到锋面, 会在锋面处聚集沉降到海底, 使该地区底层成为一个高耗氧区. 这与张恒等^[2]得到的结论一致. 图 3 是伶仃洋夏季底层盐度分布图, 外海水通过东西两条深槽侵入伶仃洋, 深槽几乎被高盐水所占据, 在淇澳岛附近盐度达到 10. 河口处的盐度模拟值比平均的观测值偏高, 造成河口附近出现海水入侵现象^[8], 形成盐度锋面, 这可能是造成湾顶东侧和河段下游出现缺氧现象的原因.

4.2 潮汐对底层 DO 分布的影响

一般认为, 潮汐通过对水体的垂向混合会进一步地影响表底层 DO 的分布^[1,10-11]. 图 4 和 5 分别给出了大、小潮涨平时的盐度和 DO 断面分布图. 小潮时, 水体层化显著, 垂向混合被抑制, 底层缺氧现象明显; 而大潮时潮汐加快了水体的垂向混合, 使得底层 DO 能维持在相对较高的水平. 可见, 潮汐的大小与水体中 DO 的浓度分布有很大的关系, 大潮时底层 DO 浓度较高, 反之, DO 浓度较低. 该模拟结果同林卫强等^[10]的模拟结果一致, 明显地反映出潮汐大小对水体 DO 的影响.

4.3 河流营养盐输入对底层 DO 的影响

珠江口夏季氮含量十分丰富, 而磷含量相对贫乏, 大部分区域氮/磷摩尔比大于 16, 属于磷限制潜在性富营养区^[12]. Yin 等^[1]曾指出磷是限制珠江口发生大面积缺氧的原因之一, 但并未做深入研究. Diaz 和 Rosenberg^[13]也指出在浅海和河口区, 缺氧现象的

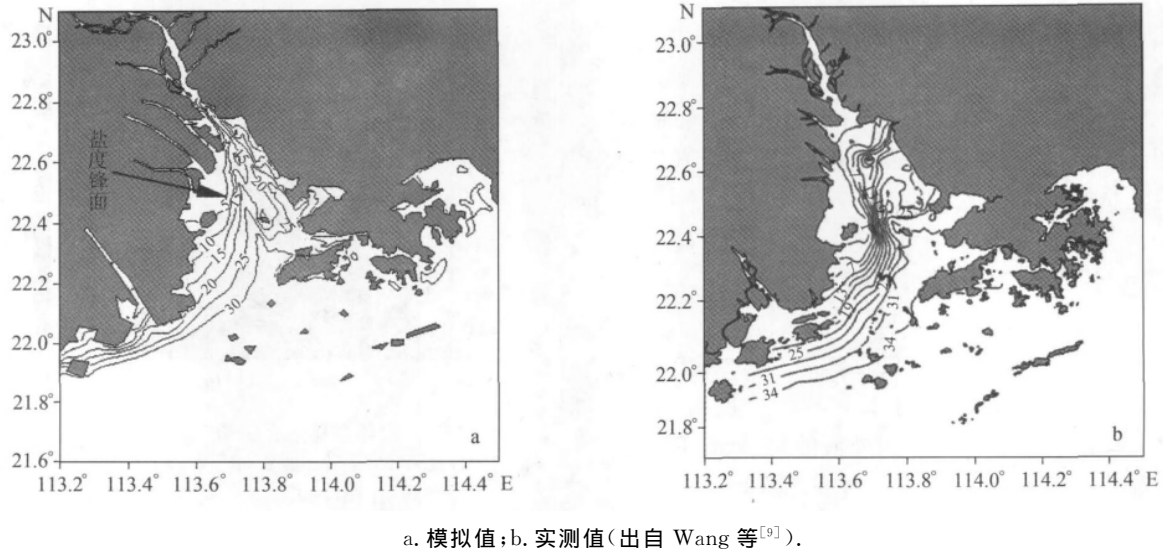


图 3 伶仃洋夏季底层盐度等值线图

Fig. 3 Salinity contours at the bottom of Pearl River Estuary in summer

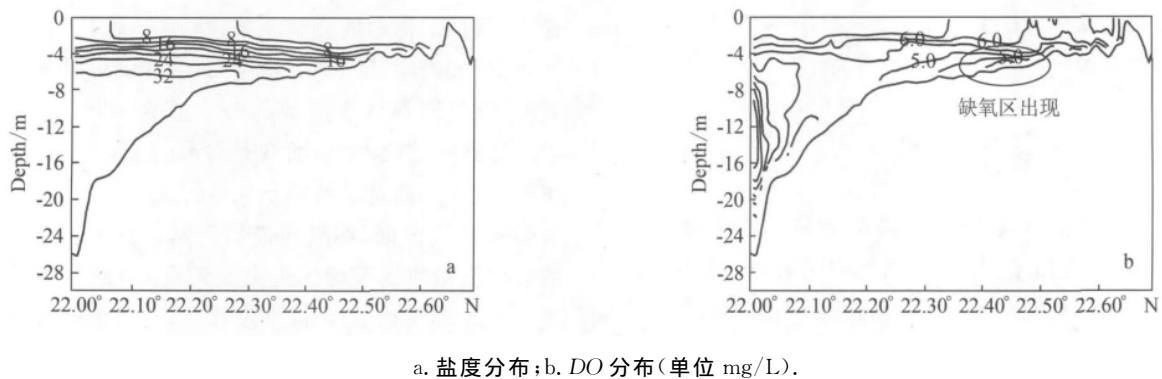


图 4 小潮涨平时伶仃洋断面盐度和 DO 分布图

Fig. 4 Salinity and dissolved oxygen along longitudinal profile at neap high tide

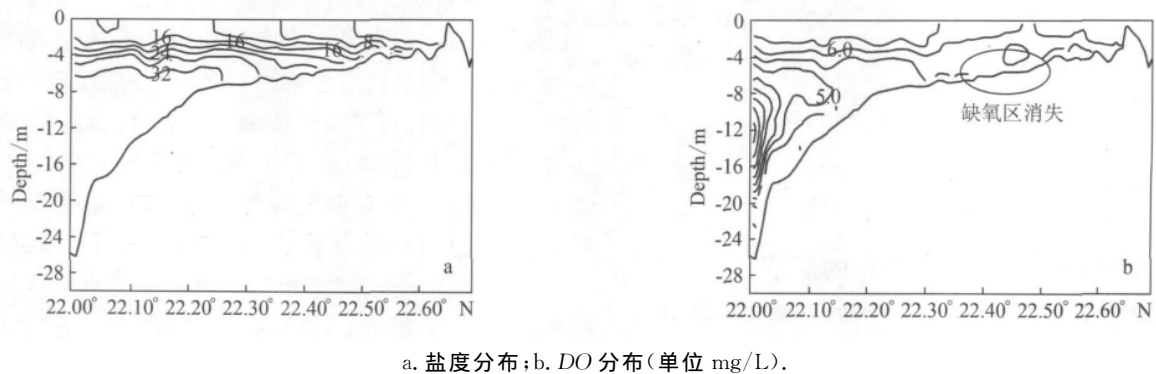


图 5 大潮涨平时伶仃洋断面盐度和 DO 分布图

Fig. 5 Saltinity and dissolved oxygen along longitudinal profile at flood high tide

频繁发生与人为向河流中排放过量营养物质有关. 图 6 为河流磷含量增加时的底层 DO 分布图, 河流输入的磷含量增多后, DO 的分布趋势并没有很大改变. 为

了排除河流耗氧物质的影响, 我们将河流的耗氧物质减小到 1/10, 再增加河流磷含量到实测值的 10 倍, 但除了表层叶绿素含量明显增加外, 即使在小潮时底层

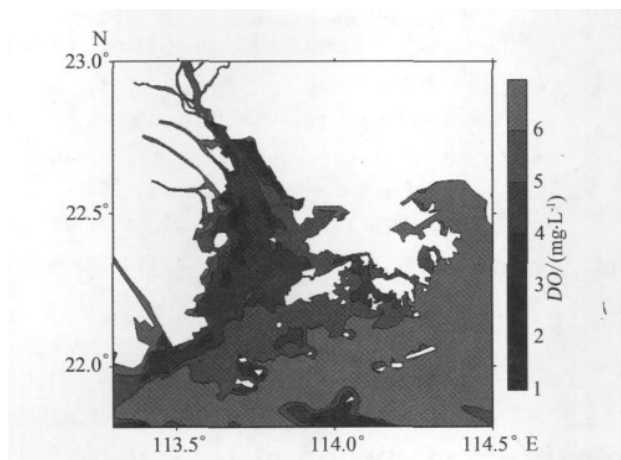


图6 河流磷含量增加后伶仃洋夏季底层DO浓度的模拟分布
Fig. 6 Distribution of dissolved oxygen at the bottom in the Pearl River Estuary during summer when the river phosphate load increased

也没有出现缺氧. 虽然河流带来了高磷高氮水, 形成了富营养化所需要的营养盐条件, 但并没有产生富营养化所引起的缺氧现象. 磷的加入促进了表层浮游植物的快速生长, 浮游植物死后沉降到底部形成的耗氧物质却没有明显增多. 可能的原因: 在营养盐充足的情况下, 缺氧现象的产生还受一定的潮汐、风等因素的影响. 另外, 表层叶绿素增加产生更多的氧气, 使得DO从表层向底层的输送量加大. 可见, 磷含量的增加并未使缺氧现象加剧. 从结果分析认为: 1) 与河流输入的耗氧物质相比, 河流输入的营养元素磷对水体缺氧的贡献是次要的; 2) 河流输入的磷含量增加, 会使浮游植物快速繁殖生长, 具备富营养化造成缺氧发生的潜在条件, 但由于模型自身的局限性及模型参数的不确定性, 磷对缺氧现象的贡献在模型中没有明显的反映出来.

5 总 结

本文应用三维水动力生态模型进行珠江口底层缺氧现象的模拟. 夏季珠江口底部观测DO的分布格局是湾口湾外大, 湾内小. 夏季珠江口径流冲淡水与外海高盐水交汇, 形成的稳定的层化结构是造成珠江口底部缺氧的主要原因. 强潮过程加大垂向混合, 减弱水体的层化, 进而增加了垂向的DO通量, 避免缺氧现象的产生; 同时也发现底层缺氧主要跟河流中的耗氧物质有关. 增加河流径流中磷的含量并未对底层DO产生明显的影响, 这需要进行进一步的观测及实验进行辅证.

参考文献:

- [1] Yin Kedong, Lin Zhifeng, Ke Zhiyuan. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(16): 1935-1948.
- [2] Zhang Heng, Li Shiyu. Effects of physical and biochemical processes on the dissolved oxygen budget for the Pearl River Estuary during summer[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 79(1/2): 65-88.
- [3] 罗琳, 李适宇, 王东晓. 珠江河口夏季缺氧现象的模拟[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 729-735.
- [4] Fennel K, Wilkin J, Levin J, et al. Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20: GB3007.
- [5] 旷芳芳. 珠江口生态动力学模型[D]. 厦门: 厦门大学, 2010.
- [6] Warner J C, Sherwood C R, Arango H G, et al. Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method[J]. Ocean Modelling, 2005, 8(1/2): 81-113.
- [7] 香港科技大学. 珠江河口污染研究计划课题研究报告, 珠江河口水质研究[R]. 香港: 香港科技大学, 2002.
- [8] Dai Minhan, Guo Xianghui, Zhai Weidong, et al. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River Estuary during a winter drought[J]. Marine Chemistry, 2006, 102(1/2): 159-169.
- [9] Wong L A, Chen J C, Xue H, et al. A model study of the circulation in the Pearl River Estuary (PRE) and its adjacent coastal waters; 1. Simulations and comparison with observations[J]. Journal of Geophysical Researches, 2003, 108(C5): 3156.
- [10] 林卫强, 李适宇. 珠江口水域化学耗氧量、溶解氧、无机磷与有机磷的三维水质数学模拟[J]. 海洋学报: 中文版, 2003, 25(3): 129-137.
- [11] 罗琳, 李适宇, 厉红梅. 夏季珠江口水域溶解氧的特征及影响因素[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(6): 118-122.
- [12] 张景平, 黄小平, 江志坚, 等. 2006—2007年珠江口富营养化水平的季节性变化及其与环境因子的关系[J]. 海洋学报: 中文版, 2009, 31(3): 113-120.
- [13] Diaz R J, Rosenberg R. Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna [J]. Oceanography and Marine Biology, 1995, 33: 245-303.
- [14] 江志华. 珠江口海域丰水期的表观耗氧量[J]. 广州环境科学, 2007, 22(1): 40-43.

- [15] Rabouille C, Conley D J, Dai M H. et al. Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins; the Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhône rivers[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1527-1537.
- [16] 林以安, 苏纪兰, 扈传昱, 等. 珠江口夏季水体中的氮和磷[J]. *海洋学报: 中文版*, 2004, 26(5): 63-73.
- [17] Yin Kedong, Song Xiuxian, Sun Jun, et al. Potential P limitation leads to excess N in the pearl river estuarine coastal plume[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1895-1907.
- [18] Yin Kedong, Zhang Jianlin, Qian Peiyuan, et al. Effect of wind events on phytoplankton blooms in the Pearl River Estuary during summer[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1909-1923.
- [19] 林卫强, 李适宇, 厉红梅. 夏季珠江口 COD 的浓度分布及影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(1): 67-73.

Numerical Simulation on Hypoxia Phenomenon at the Bottom of Pearl River Estuary During Summertime

ZHANG Xuan, JIANG Yu-wu*

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Hypoxia phenomenon at the bottom of waters has aroused wide attention since early times. It can severely affect the ecosystem balance of the water, resulting in the declination of water quality by easily leading to the death of aquatic life. Therefore, finding out the reasons of water hypoxia has important significance. In this study, a three-dimensional ecological model was used to study the hypoxia phenomenon in the Pearl River Estuary during summer. Its hydrodynamic model was based on ROMS (regional ocean modeling system) and ecological model was based on the FENNEL ecological module. The results show that the dominating reasons leading to this phenomenon are the salt-front and the oxygen-consumption materials at the bottom of the water. The former restrains the exchange of oxygen that being rich in the surface water and poor in the bottom water in the Pearl River Estuary. However, strong tidal processes can weaken and ruin the hypoxia formation by enhancing the vertical mixing. Hypoxia has a close relationship with oxygen-consumption organic materials from the rivers. Being shown from the simulation result, as one of the main nutrients that engages in the circulation of the ecosystem, phosphate doesn't have obvious impact on bottom oxygen concentration.

Key words: Pearl River Estuary; ecological model; dissolved oxygen