

珠江口海域低氧现象探讨

——PREPP 项目 1999 年夏季航次调查结果分析

潘建明^{1,2} 李炎^{1,2} 林以安^{1,2} 董礼先^{1,2} 管卫兵^{1,2} 刘小涯¹

1. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州, 310012

2. 香港科技大学海岸与大气中心, 香港,

摘要 通过对珠江口海域 1999 年夏季水体溶解氧分析和沉积物耗氧研究, 了解夏季珠江口海域水体的溶解氧消耗情况。研究表明夏季的珠江口海域存在着低氧区, 主要发生在西侧浅滩附近。而耗氧现象主要发生在底部水体, 底部水体的耗氧主要是沉积物有机物降解造成, 而水柱中也会出现明显的耗氧过程, 这主要是大量生源性物质积聚在稳定的跃层中降解形成。底部沉积物耗氧速率与低氧区相对应, 而耗氧归因于藻类等易降解有机物质降解所需。底部沉积物的再悬浮对底部耗氧也是很重要的, 再悬浮会加速耗氧。

一、前言

虽然河口和近岸海域能接纳和同化陆源性的大量有机物, 但其容量是极其有限的。在过去的近百年中, 在近岸和河口, 不断出现暂性的底部水体氧大量消耗而导致鱼类和底栖动物死亡或减少的现象报道 (Rumohr, 1986)。然而随着人类对海洋环境的污染日趋严重, 这种底体水体低氧化现象呈不断增加趋势, 并日益成为全球性的环境问题现象。在日本半封闭海湾^[1]、北海、美国的长岛湾等世界范围内出现了水体溶解氧低氧 (Hypoxia, $DO < 3\text{mg/L}$) 的现象, 严重的可低至无氧状态 (Anoxia, $DO \approx 0\text{mg/L}$), 即处于厌氧状态^[2]。

必须注意的是近年来我国的大型河口均已出现了贫氧区, 在长江口 $122^\circ 30'$ 附近海域存在着大面积的贫氧区^[3], 而珠江口海域更为严重, 近几年的调查均发现贫氧区的存在^[4-7]。海域水体缺氧可直接导致大量海洋生物逃避或死亡, 特别是对底栖动物生态的破坏, 同时使沉积在海底的物质不断释放出被蓄集的有毒有害微量金属和高分子难降解有机物, 以及大量有机质降解所产生的营养盐, 使生态物种分布发生剧烈变化^[2, 8]。许多研究表明^[1]水体富营养化和底层低氧化可促使赤潮生物的异常繁殖而诱发赤潮, 而死亡大量旺发浮游生物残体又将消耗大量的溶解氧。虽不能说低氧层存在, 与赤潮发生直接相关, 但与海域的富营养化是密切相关的^[1], 因此海域中低氧层存在, 对于赤潮发生来说是必要的条件之一。1998 年珠江口发生的大规模赤潮已清楚地表明这种危险趋向, 而长时间的水体缺氧必将对珠江口海域的生态造成灾难性变化, 其损失远非已用直接的经济损失所能衡量。。本文通过分析 1998 年夏季航次所发现的珠江口海域水体贫氧现象, 探讨有关环境参数与水体贫氧的关系以增加对珠江口海域水质环境的了解。

二、材料与方方法

本次调查时间为 1999 年 7 月 15 日至 28 日。调查区域和站位见示意图 1。温、盐、深、溶解氧、pH 和叶绿素测定应用 YSI6600 水质测定仪。调查期间气象状况比较稳定, 处于大小潮间隙期。

底质沉积物样采集应用四管无扰动浅海多管采集器。采样管直径 10cm, 高 60cm, 采集沉积物后留表层部分 20cm, 下层沉积物丢弃, 然后直接对管子密封进行培养。如果上伏水较少及溶解氧较低, 加入一些充氧底层水, 保持水体充满培养管。溶解氧测定采用 Winkle 法。培养管用黑色塑料袋包围以避光抑制光合作用, 管中培养水体通过循环泵加以流动, 并浸入流动海水中恒温培养。

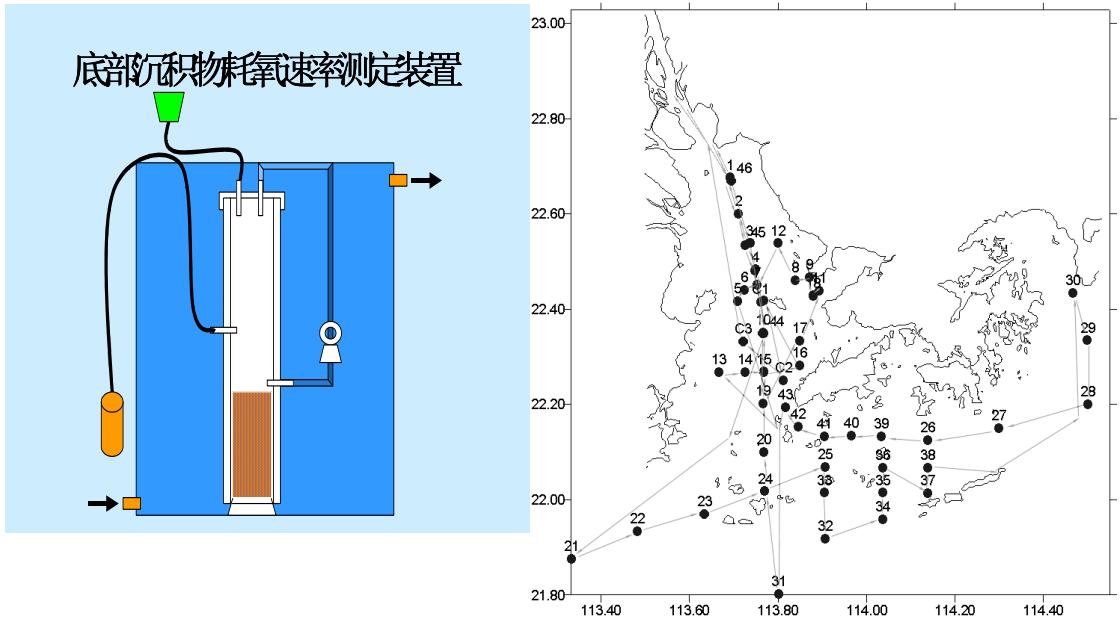


图 1 PREPP 项目 1999 年 7 月航次作业站位图

三、结果

1. 溶解氧的平面和垂直分布

图 2 为调查区表层水体和底层水体溶解氧含量分布图。表层水体溶解氧含量较高，表明表层水体与大气充分混合；沿冲淡水流向，水体中溶解氧含量基本上大于 6 mg/L，氧饱和度可达 90%以上，在靠河口东侧外海水域即香港南侧海域由于该区浮游植物的光合作用强烈，表层水体溶解氧饱和度超过 100%。与表层水体相比，底层水体中溶解氧含量分布存在明显的差异，底层水体溶解氧含量较低，总体上靠外海水域较高些，河口内局部区域出现低于 3 mg/L 的低氧区，主要在伶仃洋西南部，即 13、14、15、19 站附近。

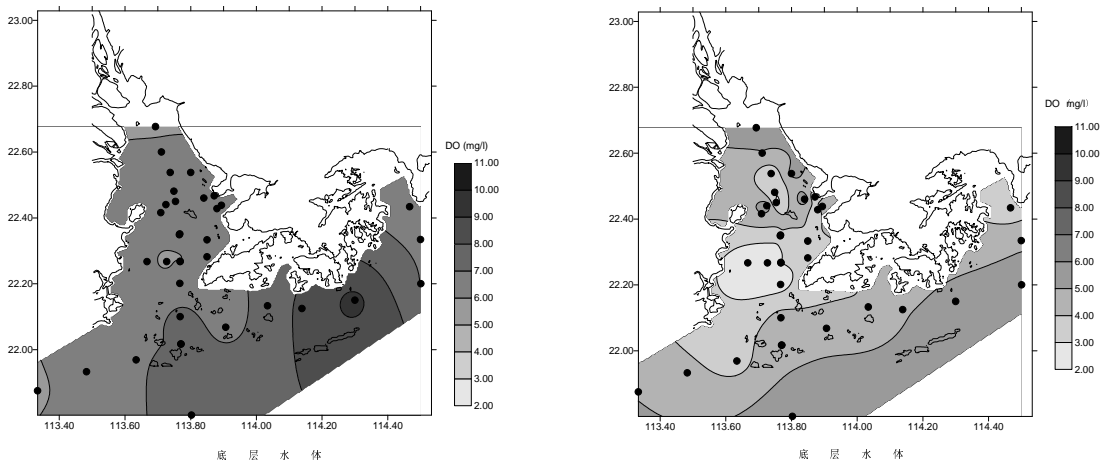


图 2 表层和底层水体中溶解氧含量分布

图 3 为沿河口顶端至外海的纵向剖面溶解氧含量分布图。结合图 2 和 3 可以看出从河口最里端的 1#站至最外端的 31#站，不自河流的淡水和外海高盐度海水均保持稳定和较高的溶解氧含量，而且外海的底层海水同样含有较高的溶解氧。从地形上分析，从 20 号站起向

内的珠江河口海域即伶仃洋底部水体明显降低，很明显低氧区出现在水深较浅的区域。

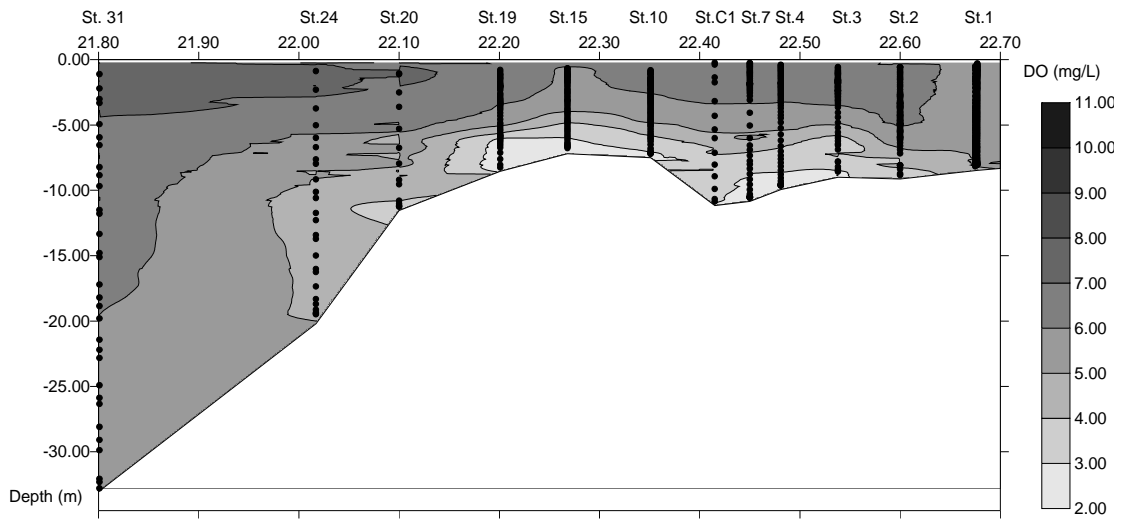


图 3 沿河口顶端至外海的纵向溶解氧含量剖面分布

2. 底部沉积物的耗氧速率分布

造成水柱耗氧的原因主要是水柱和底部沉积物中有机物降解造成。而其有机物不管是陆源的还是由于水体富营养化产生的浮游生物又主要以颗粒物存在，这些颗粒物易在河口地区沉积，因此底部沉积物有机物的降解所消耗的大量溶解氧是河口氧消耗的主要场所。图 4 为珠江口现场底部沉积物有机物降解耗氧培养试验结果。底部耗氧速率为 $22.5\sim 121.5\text{mmol O}_2/\text{m}^2\text{h}$ ，最大为 C2 站，最小为 24 站。耗氧速率的大小分布总的趋势与低氧区的区域相一致，即主要在河口的最大混浊带附近，这种现象与世界其他河口出现的低氧现象相似^[9]。

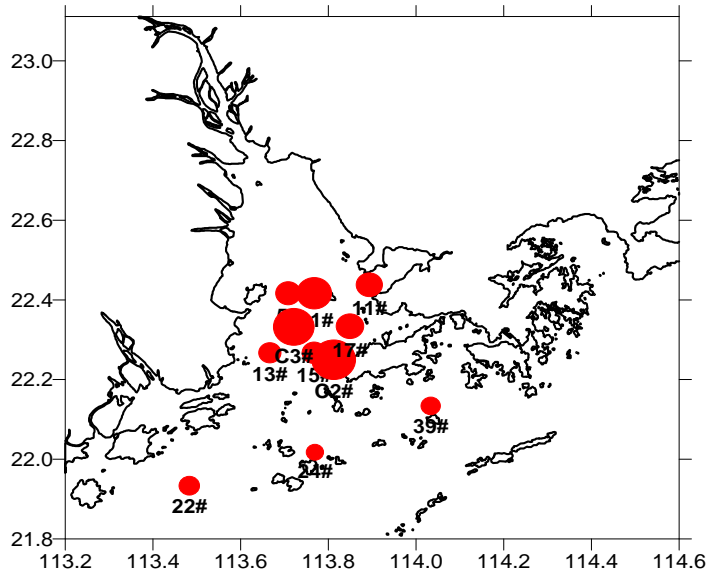


图 4 珠江口海域沉积物有机物降解耗氧速率分布

底部沉积物耗氧培养试验表明其耗氧速率与初始含氧量无关。但是与水体特性有关，如盐度等会影响沉积物中生物的活性。温度可能会对耗氧速率也会很大影响，但是基于在同一季节中底部水体温度变化不大考虑（见图 6B），因此本次实验暂时不考虑其影响。

在同样条件下对底部沉积物进行搅动和不搅动培养试验，所谓不搅动试验为循环泵将

培养水体循环流动, 保证底部絮状物能有一定的晃动, 而搅动试验即培养前将表层 2cm 的沉积物搅动起来, 然后再按不搅动培养试验方式进行培养。通过搅动培养试验来模拟底泥掀起对底部耗氧的影响。结果表明对于高耗氧速率的沉积物两种方式差别不大, 而对低耗氧速率的沉积物则有相当大的差别, 而且搅动试验的耗氧速率与一般试验的高耗氧速率相接近 (见表 1)。这说明搅动使颗粒物与水体有更大的接触面积, 加速了沉积物中有机物的降解速度, 也表明沉积物的掀起对水体耗氧的影响将是很大的。

表 1. 珠江口海域底部耗氧速率 (SOD, mmol O₂/m²h)

站位	底部耗氧速率 (SOD, mmol O ₂ /m ² h)		
	不搅动	搅动	不搅动 (上覆水不充氧)
5#	64.05		
22#	39.15		
13#	48	144	
24#	22.5		
C1#	113.7	134.1	
39#	34.35		
11#	69.3		
15#	57.15		
C2#	96.15	163.65	160.05
17#	74.55		
C3#	121.5	144.75	135.9

而对浮游植物即纯生物颗粒有机物耗氧培养试验表明其耗氧速率是相当快的 (0.442gO₂/gChl-a.h), 而图 A, B 表明由于外海水底部的入侵, 香港南部海域许多浮游植物随海水带进伶仃洋内, 这也表明沉积物的耗氧主要是由于生源性有机物的降解。

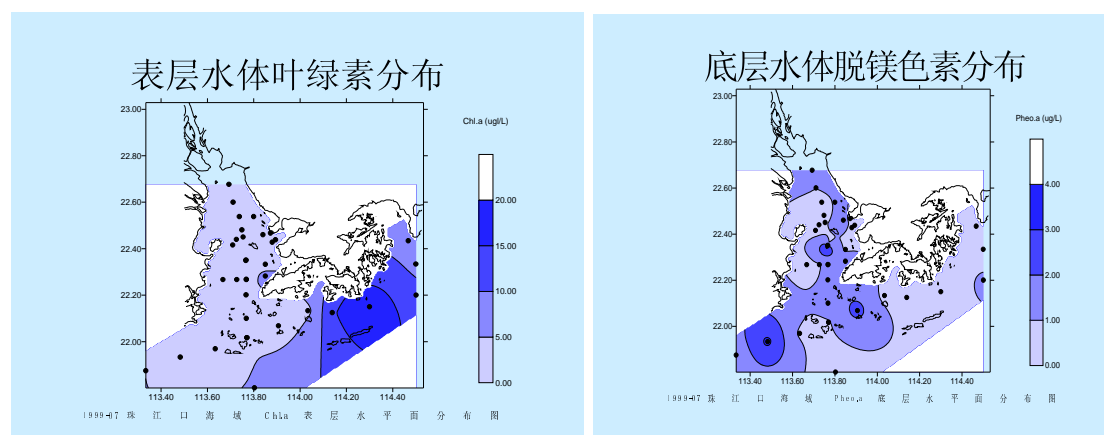


图 5A, B 珠江口表层水体叶绿素含量和底层水体脱镁色素分布

四、讨论

1. 稳定的水动力层化对水体贫氧的影响

底层水体中低氧现象一般主要受二个方面的因素控制, 一是底层水体和沉积物的需氧量和速率, 二是外部供氧量和速率。在河口相对来说由于存在着淡水、海水的混合和潮汐现象, 大气输入和水体交换供氧应足以保证河口生物和化学所消耗需氧, 因此, 在 80 年代前的调查表明珠江口海域不存在低氧现象的认识^[11]。然而近二十年珠江三角洲工农业快速发展, 大量的工农业和生活废弃物排入珠江口海域, 调查资料表明在最近的二十年间珠江口海

域总无机氮含量大大增加了[?],使珠江口伶仃洋的顶部和西部达到富营养化水平[12],富营养造成浮游生物大量繁殖,而浮游生物的排泄或残骸分解以及有机体的降解需消耗水体中大量的溶解氧。另一方面,由于珠江口特殊的地理地貌和夏季的水动力环境形成夏季特有的水体层化现象导致向底部水体的供氧减少。图 6A, B 是为沿河口顶端至外海的盐度和温度纵向剖面分布图,很明显在表层水和底层水体间有稳定的盐度和温度层化现象。由于夏季珠江处于丰水期,进入珠江口的淡水径流量大,造成低密度高温淡水与低部高盐低温海水层化,而稳定的水体层化导致上下水体交换能力减弱,表层水体向底层水体的供氧速率减少;另一方面稳定的层化现象是由于外海水进入河口的水动力强度不足以促使外海水进入河口,以补充底层水体的溶解氧。从河口的地形分析,以 20 站为界将河口分为两个区,浅水深地形阻碍了外海水的输入。今年夏季珠江口径流量大于常年(?),河口冲淡水羽流锋比平常年份远,与 1997 年夏季同一期间调查结果相比^[10],今年底部水体的氧含量更低,低氧量区域更大,表明珠江口高径流量年份更易发生贫氧现象。

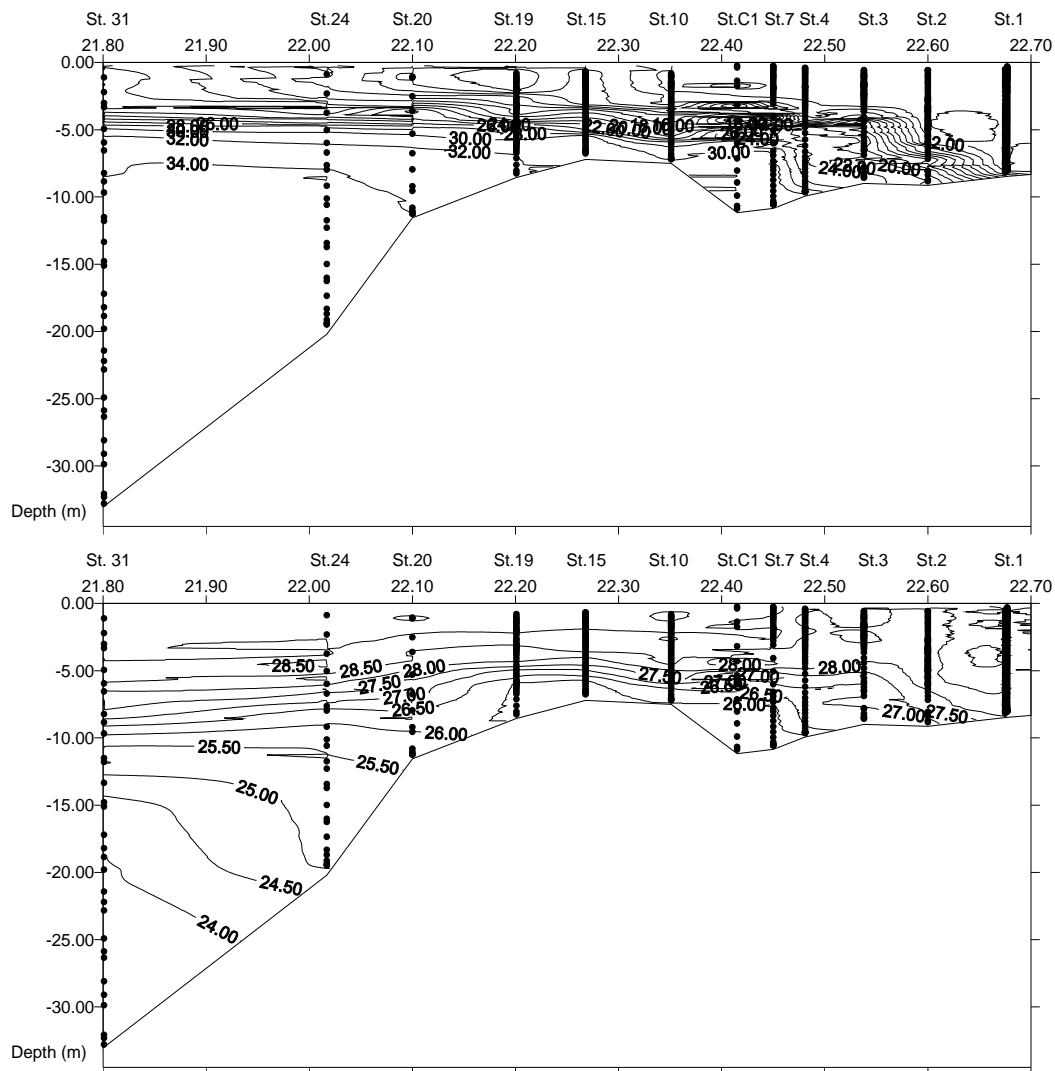


图 6A, B 沿河口顶端至外海的盐度和温度纵向剖面分布图。

2. 水柱和沉积物有机物降解与耗氧关系

底层水体贫氧除底泥中有机物降解耗氧外,水柱中颗粒有机物和溶解有机物的降解同样也消耗大量的溶解氧。如许多颗粒物是富营养化水体浮游植物旺发后死亡的生物残体和潮汐引起底泥的再悬浮,耗氧的速率和大小取决于有机物的特性和在水体中的停留时间。底泥

搅动耗氧实验和浮游植物降解耗氧实验表明底泥的再悬浮和生源颗粒物具有较高的耗氧速率，而稳定的水体层化将导致延长颗粒物在水体的停留时间，加剧水体的贫氧现象。

图 7 为沿河口顶端至外海 1#、15#、19#和 31#站的溶解氧、叶绿素、盐度与水深剖面图及相对应的溶解氧与盐度关系图。1#淡水充分混合，而 31#水深较深，外海水水动力较强，因此水体中不存在贫氧现象；15#和 19#在伶仃洋中部，也即底部贫氧最严重区，外海水由于地形的限制不能向内补充含有较高溶解氧的新鲜海水，而跃层的存在阻碍了表层水体溶解氧向下输送。假设水柱本身不发生生物化学耗氧过程，那么溶解氧在水柱垂向混合上也符合河口保守元素咸淡水混合的保守性。因此水柱混合区溶解氧与盐度成线性并具有相同的斜率，而图 7 很明显表示了各站位水柱中溶解氧与盐度的关系有差别。15#和 19#水柱溶解氧与盐度的斜率明显高于外海的 31#，说明 15#和 19#水柱中存在着强烈的生物和化学耗氧过程，而且 15#和 19#水柱混合层溶解氧与盐度的关系出现了几个波段，这些溶解氧的变化与跃层的强度有关，即稳定的跃层为颗粒物特别是生源颗粒物提供了较长的停留时间和生物降解过程，从而形成一个明显耗氧区。

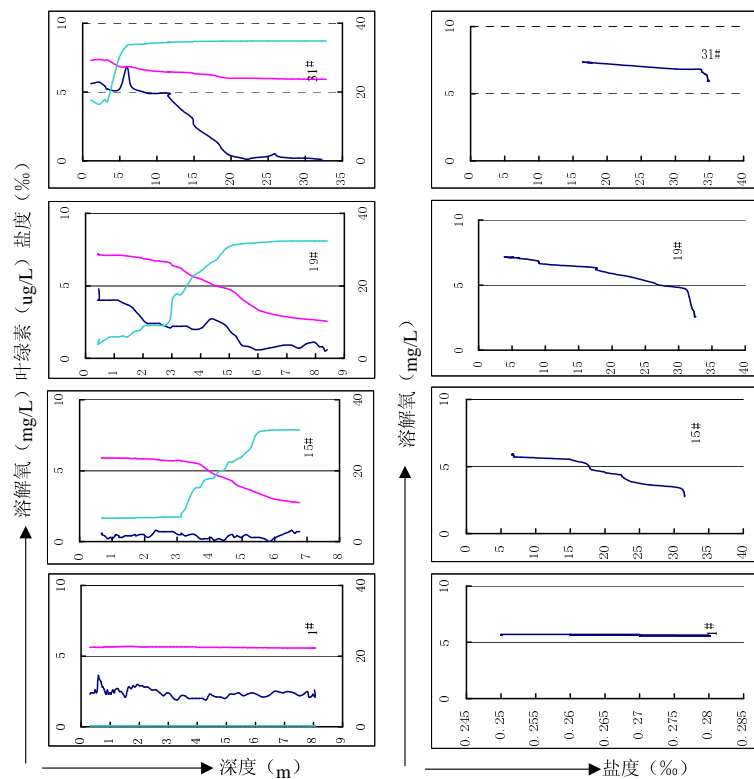


图 7 沿河口顶端至外海 1#、15#、19#和 31#站的溶解氧、叶绿素、盐度与水深剖面图及相对应水柱中溶解氧与盐度关系图。

3. 底部水体低氧区的形成及其影响

综上所述，在目前的珠江口海域营养水平下，珠江口海域底层水体不断出现低氧或无氧现象，与其存在的稳定的水体层化状态密切相关，水柱中大部分的耗氧均发生在盐度较高的底部水体，说明由于较稳定的跃层存在，使得水体交换能力减弱，从而底部水体供氧不足以底部有机物降解所需溶解氧量，导致底部水体局部缺氧。因此低氧层的形成发展可经过如下过程，进入夏季丰水期，大量高温淡水排入珠江口海域，河口水体中由于密度差异造成水体层化，同时进入河口的淡水携带大量的有机物和营养盐，引起浮游植物旺发，动物和沉降物质消耗底层水中的溶解氧。与此同时，虽然底层中再生产出营养盐类，但由于跃层的存在，就阻碍了这些营养盐向表层的输送，而表层水的营养盐丰富和浮游生物不断生产。其结果因

为向底层输送的有机物并无减少,从而,溶解氧的供应不足以满足其消耗,促使了底层水体形成的低氧化发展。但一旦因某种原因,使得跃层消失,那么贮存在底层的营养盐就可以毫无阻挡地源源不断地向表层输送,且可使浮游生物突发性的繁殖起来。这也就是出现赤潮暴发往往会出现在一次风暴潮后,因为风暴潮破坏了存在的稳定水体中跃层,并使底泥再悬浮,将积累在底部的营养盐释放到上层水体,当风暴潮结束后,水体层重新形成,而上层水体由于有丰富的营养物质而引发浮游植物旺发。而底层水体低氧现象可能周而复始。因此可以推断只要珠江口海域水体中富营养化状况存在,一旦夏季珠江口水体层化形成稳定的跃层,必然会引起底部水体的贫氧现象,而其发展的区域规模和延续时间会与径流量和外海水水动力条件有关,夏季水体层化程度越高、时间越长,则引起的低氧现象会越严重,持续时间也会更长。

五、结论:

通过对珠江口海域 1999 年夏季剖面的溶解氧分析和沉积物耗氧研究,我们对其耗氧过程有以下几点认识。

1. 在夏季,珠江口海域存在着底部低氧区,低氧区主要发生在伶仃洋西南侧浅滩附近。而底部低氧区的形成除受大量有机污染物输入影响外,主要由珠江口的高径流淡水、特殊地形和外海水动力等条件综合影响形成稳定水体层化,从而减弱了向底部水体的溶解氧供应。
2. 底部沉积物耗氧速率与低氧区相对应,而底部沉积物有机物降解是溶解氧的主要消耗者,而藻类等易降解有机物质降解加快底部沉积物的耗氧速率。
3. 底部沉积物的再悬浮对底部耗氧也是很重要的,再悬浮增加颗粒物与水体的接触面积加速有机物耗氧降解。
4. 虽然大量的耗氧主要发生在底部沉积物有机物降解造成,但在高度层化的水柱中也会出现明显的耗氧过程,它归因于大量生源性物质积聚在稳定的跃层中降解形成。

致谢

本文为国家 863 计划 818-09-01 专题和香港政府及赛马会资助珠江河口污染研究计划 (PREPP) 的研究成果。

参考文献

- [1] 张美蓉, 郁志荣 编译 赤潮研究 日本环境厅水质保护局濑户内海环境保护室科学出版社 1988
- [2] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1998, "Oxygen Depletion in Coastal Waters" by Nancy N. Rabalais, NOAA's State of the Coast Report,
- [3] 《中国海湾志》中国海湾志编写组, 海洋出版社, 1997
- [4] 韩舞鹰等, 大亚湾和珠江口的碳循环, 科学出版社, 1991
- [5] 王伟强等, 大亚湾海水总产氧率与生物及环境因素的相关分析研究, 海洋学报, 1996, 18, 57-65
- [6] 王伟强等, 大亚湾海水贫氧现象的探讨 大亚湾海洋生态文集, 海洋出版社, 1990,
- [7] 李绪录等, 夏季珠江口海区贫氧现象的初步分析, 广东海岛调查研究文集, 广东科技出版社, 1992, 10-16。
- [8] Justic, D., Seasonal coupling between riverborn nutrients, net productivity and hypoxia, Marine Pollut. Bull. 1993, 26:184-189

- [9] Balls, P. W., 1992, Nutrient behavior in two contrasting Scottish estuaries, the Forth and Tay, *Oceanologica Acta* 15, 261-277
- [10] 李炎, 陈介中等, 1998, 珠江河口及毗邻海域环境遥感监测技术研究, 香港科技大学研究报告
- [12] 王肇鼎, 彭云辉, 1996, 珠江口水域的营养元素, 《中国主要河口的生物地球化学研究——化学物质的迁移与环境》 张经主编, 北京海洋出版社, 1996