

夏季珠江口水域溶解氧的特征及影响因素^{*}

罗琳, 李适宇, 厉红梅

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 对 1996 年和 1999 年夏季珠江口的盐度、温度、溶解氧、营养盐等水质调查结果进行了统计分析, 结果表明: 夏季伶仃洋水体溶解氧的表底层浓度存在显著差异。表层的溶解氧浓度与表层的盐度和无机氮浓度都显著相关, 而表层营养盐的浓度为表层溶解氧浓度水平的主要影响因素。通过一个简单的二元线性回归模型分析, 径流冲淡水与外海水之间的盐度层化作用比温度层化作用对底层溶解氧的浓度水平影响更为明显。相关性分析显示, 水体的层化作用与底层水体溶解氧的浓度呈极显著的负相关关系; 同时层化作用与表底层的溶解氧浓度差极显著正相关。潮汐周期循环对层化作用产生一定的影响。因此, 在珠江口水域, 夏季表层水体溶解氧的含量水平主要取决于营养盐 N 的浓度; 底层水体溶解氧含量的主要影响因素是咸淡水交汇形成的盐度差的层化作用, 潮汐混合通过影响层化作用从而影响溶解氧的浓度。

关键词: 珠江口; 溶解氧; 层化作用; 营养盐; 潮汐混合

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 06-0118-05

溶解氧 (DO) 代表溶解于海水内氧气的含量, 绝大部份的海洋生物均需依赖溶解在水中的氧气来维持生命, 适量的氧是鱼类和好氧菌生存和繁殖的基本条件。影响海水中溶解氧含量的主要因素有: 海气交换过程; 有机物质的合成和分解; 海水动力过程如潮汐、海流和上升流等^[1]。

珠江年均径流量占全国的 13%, 是全国第二大径流量的河流系统。但全年的径流量分配不均匀, 主要集中在夏季丰水期, 5—8 月平均径流达到 $10\ 856\ \text{m}^3/\text{s}$ 。伶仃洋是珠江入海最大一个河口湾, 夏季表层大部水域为径流暖水所占据, 底层外海的低温盐水沿东西两条深槽上溯, 水体在垂向上形成稳定的层结^[2], 影响了溶解氧的向下传递; 由于承接经济发达的珠江三角洲地区排放的大量的污染物, 致使湾内水质恶化。在两者共同作用下底层水体的溶解氧浓度急剧降低, 在某些水域甚至出现浓度低于 $3\ \text{mg/L}$ 的缺氧现象^[3]。但是, 水体的动力作用和富营养化作用对溶解氧分布水平的影响有多大, 二者谁为主导因素并不清楚。本文尝试通过对珠江口的大规模监测资料进行统计分析, 从而对该问题进行探讨。

1 资料和分析方法

1999 年 7 月香港科技大学和中山大学等单位

联合对珠江口进行了大规模的巡测, 巡测时段是小潮退潮时, 采集每个站点的表、中、底层水样, 分析项目包括温度、盐度、营养盐、DO 等 20 余项。本文采用具有代表性的纵横 2 个剖面的表、底层检测结果进行统计分析。站点布见如图 1。

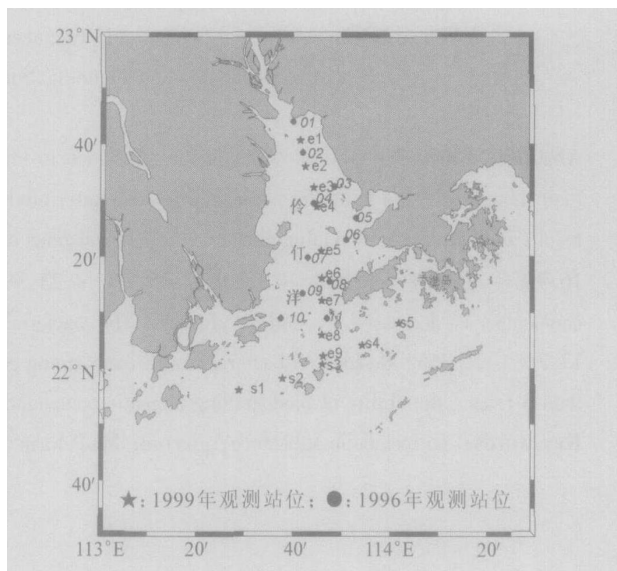


图 1 伶仃洋观测站位分布图

Fig. 1 Sampling stations in the Pearl River Estuary

DO、盐度和温度用 YSI-6600 水质检测仪测定; 营养盐要素的采集用 Go-flo 采水器, 经 $0.45\ \mu\text{m}$

* 收稿日期: 2004-10-26

基金项目: 中国科学院南海海洋研究所 LED 实验室开放课题基金资助项目

作者简介: 罗琳 (1978 年生), 女, 博士研究生; 通讯联系人: 李适宇; E-mail: eeslsy@zsu.edu.cn

滤膜过滤分离后现场测试。亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮和活性磷酸盐含量按 GB12764. 4—91 的方法测定。

1996 年广州港黄埔出海航道疏浚工程环境影响评价调查中对航道上 11 个点进行了水质监测调查(站点布设见图 1), 调查时在 7 月 15 日(大潮期)的高高潮和低低潮各采样一次。盐度以电导法分析, DO 以氧量法测量。

对资料的统计分析采用的是软件 SPSS 10. 0 for Windows。分析的内容包括: 表、底层的 DO、盐度和温度、溶解态无机 N (IN)、无机 P (IP) 的浓度; DO、营养盐和温、盐的表底层间浓度差以 Δ 表示, 如 $\Delta\text{DO}=\text{DO}_{\text{surf}}-\text{DO}_{\text{bott}}$, ΔS 、 Δt 、 ΔIN 、 ΔIP 以此类推。无机 N 的总含量由亚硝酸盐(NO_2^-)、硝酸盐(NO_3^-)、氨氮(NH_4^+) 的含量加和表示, 即 $\text{IN}=\text{NO}_3^-+\text{NO}_2^-+\text{NH}_4^+$ 。1999 年的巡测结果将用于分析 DO 与温、盐、营养盐的关系; 1996 年的监测数据将用于分析高低潮周期循环对 DO 的影响。

2 结果与讨论

2. 1 表层溶解氧与温、盐、营养盐的关系

夏季表层 DO 的分布趋势呈现自北向南, 即从

口门向口外逐渐递增, 自西向东逐渐递增的趋势(图 2)。1999 年监测的 14 个站位 DO 的范围在 5. 65~7. 52 mg/L, 平均值为 6. 67 mg/L, 总体含量水平较高。

表层的 DO 与盐度、无机 N 浓度都达到显著相关的水平, 其中与盐度呈正相关, 与无机 N 呈负相关(表 1), 与无机 P 相关关系未达到显著水平。为了考察三者对表层溶解氧浓度的影响度, 使用多元回归模型进行分析, 以 stepwise 作为回归方式, 则只有无机 N 进入回归模型, 回归方程 $y_{\text{DO}}=7. 728-0. 0137x_{\text{IN}}$ 。若将无机 N 分为亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮对 DO 进行多元回归, 进入回归模型的只有 NO_3^- , 回归方程 $y_{\text{DO}}=7. 698-0. 014x_{\text{NO}_3^-}$, 硝酸盐浓度对 DO 的影响率为 32. 3%(表 2)。

表 1 DO 与盐度、无机氮、磷的相关系数

Tah 1 The correlation coefficient between DO, S, IN, and IP

项目	DO	S	IN	IP
DO	1. 000	0. 554 *	-0. 561 *	-0. 441
S	0. 554 *	1. 000	-0. 603 *	-0. 774 **
IN	-0. 561 *	-0. 603 *	1. 000	0. 738 **
IP	-0. 441	-0. 774 **	0. 738 **	1. 000

α 显著性水平值; *, 0. 01< α <0. 05; **, α <0. 01

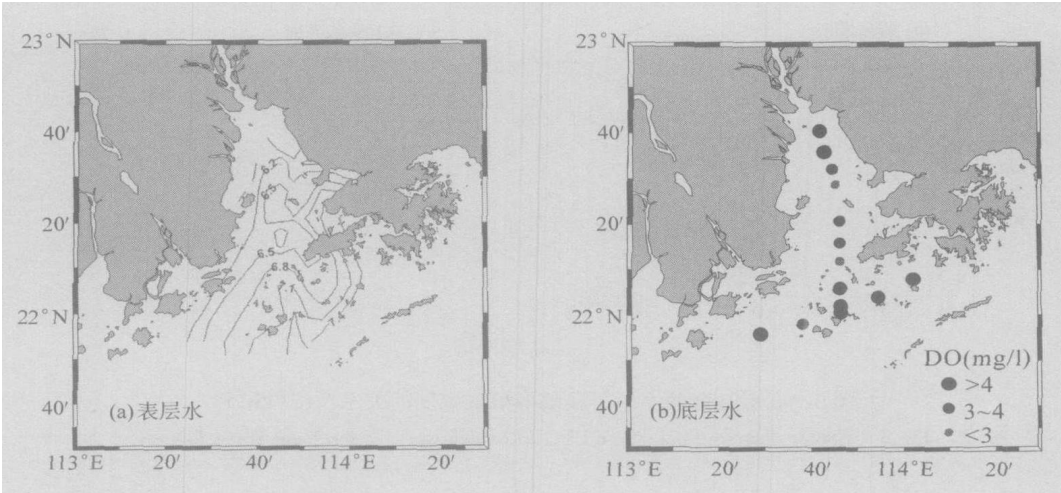


图 2 伶仃洋表层水和底层水溶解氧分布等值线

Fig. 2 Contours of Do in surface and bottom water of the Pearl River Estuary

2. 2 表底层溶解氧浓度差与盐度差、温度差的关系

DO 在表层和底层之间的浓度差 ΔDO , 除了在靠近河口水深较浅、主要为冲淡水所占据的 e1 站只有 0. 08 mg/L 外, 其余各站均存在显著差异, 最大的差异达到 4. 07 mg/L, 平均浓度差为 2. 63 mg/L。 ΔDO 与层化作用的强度有很大的关系, 而夏季

珠江口的层化作用十分明显: 表底层的平均盐度差为 21. 12 PSU, 呈湾顶、湾外小, 湾内大的分布格局, 最大盐度差 ΔS 29. 0 PSU, 出现在大濠岛以西; Δt 均呈现自北向南增加的分布趋势, 平均温度差为 2. 79 $^{\circ}\text{C}$, 最大值 4. 76 $^{\circ}\text{C}$ 出现在大濠岛以南。相关性分析显示, ΔDO 与 ΔS 呈极显著负相关 ($R=$

0.844^{**}, $n=14$, $\alpha=0.000$), 即表底层的盐度差越大, DO 的浓度差越明显。DO 浓度差与 Δt 也呈显著正相关 ($R=0.552^*$, $n=14$, $\alpha=0.041$)。对于无机氮和无机磷, 无论其表、底层的浓度差或是水体平均浓度, 均与 ΔDO 没有形成显著的相关关系。使用多元回归分析评价 Δt 和 ΔS 对 DO 表底层浓度差的影响, 只有 ΔS 进入回归模型, 回归方程为 $y_{\Delta DO}=0.269-0.112x_{\Delta S}$, 标准化回归系数 -0.844 ($\alpha=0.000$) (表 2)。

2.3 底层 DO 浓度与温、盐、营养盐的关系

底层的 DO 含量普遍较低, 平均值为 4 mg/L, 分布趋势与 ΔS 相对应, 呈现湾顶与湾口、湾外较高、湾内较低的格局, 在 e4 和 e7 站甚至出现浓度低于 3 mg/L 的缺氧现象 (图 2)。底层水的 DO 与底层无机 N、无机 P 的浓度无显著水平的相关关系;

与底层水的温度和盐度也没有相关趋势。底层 DO 与表层 DO 的分布没有显著水平的相关关系, 但与 ΔDO 达到极显著的相关水平 ($R=-0.859^{**}$, $\alpha=0.000$); ΔS 与底层水体溶解氧的浓度也呈极显著的正相关关系 ($R=0.705^{**}$, $n=14$), 即表底层的盐度差绝对值越大, 底层的溶解氧水平越低。 ΔS 的变化对 DO 的影响率为 49.7% (表 2)。

2.4 高、低潮时 DO 与盐度差的影响

由 1996 年高高潮与低低潮时的观测结果得知, 高高潮时各监测点平均盐度差为 7.85 PSU, 低低潮时为 10.90 PSU, 显示低潮时表、底层盐度差 ΔS 大于高潮时; 相应的, 低低潮时平均 DO 浓度差比高高潮时高约 55%。回归分析显示, 低潮时 ΔS 对底层 DO 的影响率 ($R^2=0.409$) 也大于高潮时 ($R^2=0.375$) (图 3)。

表 2 表层、底层以及表底层间的溶解氧浓度差与其影响因素的统计回归模型

Tah 2 Linear regression models for DO and its affecting factors

项目	<i>n</i>	<i>R</i> ²	Adjusted <i>R</i> ²	SEE	α
表层 $y_{DO}=7.728-0.981x_{IN}$	13	0.314	0.252	0.432	0.046
$y_{DO}=7.698-0.978x_{NO3}$	13	0.323	0.262	0.429	0.043
表层-底层(Δ) $y_{\Delta DO}=0.269-0.112x_{\Delta S}$	14	0.712	0.688	0.559	0.000
底层 $y_{DO}=5.768+0.082x_{\Delta S}$	14	0.497	0.456	0.649	0.005

n, 样本数; *R*², 复相关系数平方; Adjusted *R*², 调整的复相关系数平方; SEE 为预测值的标准差; α , 显著性水平值

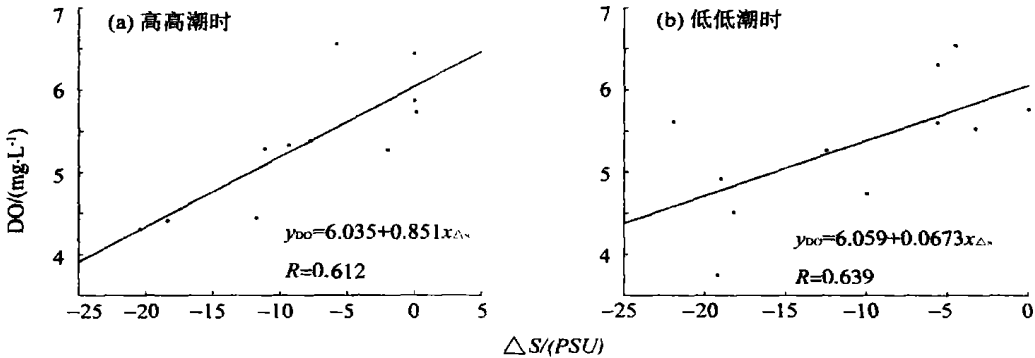


图 3 底层盐度差 ΔS 与底层溶解氧浓度的关系及线性拟和

Fig 3 Scatter diagram for ΔS and DO in bottom water of the Pearl River Estuary

2.5 讨论

表层 DO 的产生与消耗源自大气的复氧过程和浮游植物的生化过程。大气复氧过程受大气和海水中的 DO 浓度差及水温等因素的影响, 有机物质的合成和分解取决于浮游植物的光合作用、呼吸作用、溶解营养盐的硝化作用以及有机颗粒物的再矿化作用等。伶仃洋的无机氮、无机磷都与保守态盐度呈负相关关系, 显示了营养盐的分布明显受径流和陆源排放的影响; 表层 DO 的含量与营养盐 N 和盐度都存在相关趋势, 反映了物理过程和生化过程

对 DO 的作用。由回归分析可知, 二者当中, 对表层 DO 的浓度起主导作用的是营养盐的含量。

由于地形的约束和沿岸流的作用以及高冲淡水径流等条件, 河流与河口地区或多或少都存在季节性的层化现象。在秋季和冬季, 强烈的风应力搅拌作用和表层水的冷却下沉使水体混合均匀, 底层的氧消耗得到缓解。而在春、夏两季, 风力混合作用减弱, 表层水迅速增温形成稳定的层化结构, 较冷的底层水和较暖的表层水之间很难形成交换。同时, 河流径流一般在春夏季达到最大值, 密度较小

的冲淡水加剧了水体的层化分布。在混合不充分的条件下, 底层 DO 无法得到及时的补充^[5]。夏季珠江口海域表、底层间的 DO 存在显著的浓度差, 底层 DO 含量明显降低, 并与表、底层间的温度差和盐度差都有显著到极显著的相关性, 显示了层化作用的力量。由回归分析得知, 占主导地位的分化作用是盐度层化作用, 且对 DO 的影响率较大。同时, 潮汐混合对层化作用也有重要影响。潮汐混合起着减弱密度梯度的作用, 当潮汐力量增强时潮汐诱导的混合作用也随之增强, 上层的低盐水体向下混合, 深层的高盐水体向上混合, 使得底层的盐度减低而表层的盐度增加, 层化作用削弱^[6]。

除了表层的营养盐 N 对 DO 含量水平有重要影响外, 底层及平均的营养盐浓度与 DO 的浓度分布和变化等都没有相关性规律。这是因为溶解态营养盐进入河口之后参与的一系列的动态生化过程, 特

别是在真光层之下, 光合作用使 IN、IP 转化为有机颗粒物沉降迁出、有机碎屑物质的降解成为再生内源, 以及外海水的混合稀释作用等, 使得 DO 与溶解态营养盐之间不构成线性关系。值得注意的是在珠江口作为限制性营养盐的 P 在各层的浓度及浓度差、平均浓度等都不与溶解氧的浓度构成显著水平的相关关系, 可能是由于 P 的缓冲作用。珠江口 P 的主要赋存形态为悬浮颗粒 P (46 %), 可溶无机磷仅占 26 %^[4], 在大部分监测站点溶解态无机磷的浓度都较低, 变化也不大 (图 4)。黄河口和九龙江口等地的调查显示, 悬浮物和沉积物的吸附—解吸作用对磷有缓冲作用^[7,8]。殷克东等的研究也认为在珠江河口 PO_4^{3-} 从颗粒物的解吸以及从表层水沉降的悬浮颗粒物的细菌分解都对 PO_4^{3-} 浓度的变化起重要贡献^[9]。

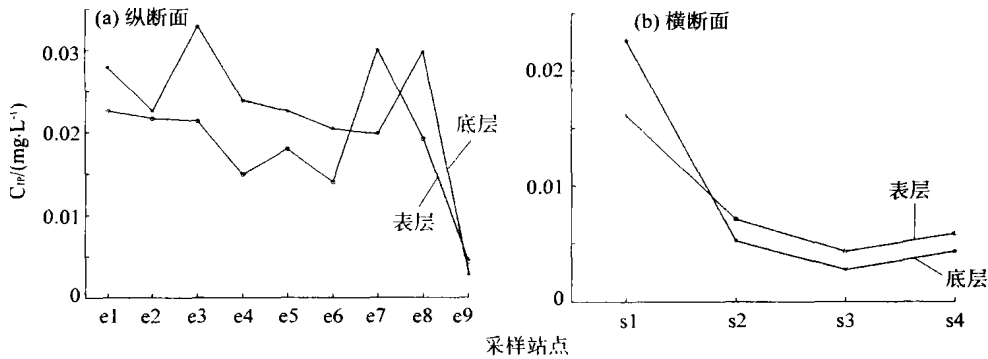


图 4 纵向、横向断面溶解态无机 P 浓度值

Fig 4 IP in longitudinal and cross profile

3 结 论

夏季伶仃洋表、底层的 DO 呈现不同的分布格局, 表层溶解氧有自北向南、自西向东递增的趋势, 底层 DO 呈现湾顶与湾湾外较高、湾内较低的格局。底层 DO 的含量随层化作用力量的大小而变化。表层水体 DO 的含量水平主要取决于营养盐 N 的浓度; 夏季珠江径流冲淡水与外海水交汇形成的盐度层化作用是珠江口底层水体 DO 降低的重要原因, 潮汐的周期循环产生的混合作用通过影响水体的层化作用进而影响 DO 的含量。

致谢: 本研究部分监测数据由香港科技大学海岸与大气研究中心及中山大学环境科学研究所提供, 特此致谢。

参考文献:

[1] 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队, 广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 广州: 海洋出版社,

1987.
[2] 林卫强, 李适宇. 夏季伶仃洋 COD、DO 的垂向分布及其影响因素[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41, 82—86.
[3] 林洪瑛, 刘胜, 韩舞鹰. 珠江口底层海水季节性缺氧现象及其引发 CTB 的潜在威胁[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21(增刊): 25—29.
[4] 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]. 2002.
[5] RABALAIS N N. (online), Oxygen Depletion in Coastal Waters[EB/OL]. In NOAA's State of the Coast Report. National Oceanic and Atmospheric Administration, 1998. http://state_of_coast.noaa.gov/bulletins/html/hyp_09/hyp.html.
[6] 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]. JGR, 2003, 108; 25.
[7] 石晓勇, 史致丽. 黄河口磷酸盐缓冲机制的研究 II. 黄河口磷—钙矿物的离子平衡[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 737—743.

[8] 杨逸萍, 胡明辉, 陈海龙, 等. 九龙江口生物可利用磷的行为与入海通量[J]. 台湾海峡, 1998 17(3): 269—274.

limitation of phytoplankton growth across the Pearl River estuarine plume during summer[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2001, 221: 17—28.

[9] YIN K, QIAN P Y, WU M C S, et al. Shift from P to N

Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary in Summer

LUO Lin, LI Shi-yu, LI Hong mei

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This paper analyses the temperature, salinity, DO and the concentrations of nutrients N and P in Lingdingyang in summer of 1999 and 1996. The results indicate there is distinct difference between the concentrations of DO in surface and bottom waters. The concentrations of DO show great correlation with S and the concentrations of N in surface water but the latter is the most affecting factor for DO. The halocline in the Lingdingyang is more important for the concentrations of DO in bottom water than the thermocline. The greater the differences of S between surface and bottom waters are, the greater the variations of DO's concentrations are, and the lower the concentrations of DO the bottom water are. The tidal cycle has effect on the stratification. So, the concentration of DO in surface water is primarily affected by the content of DIN in the Lingdingyang in summer. And the mainly controlling factor for the concentrations of DO in bottom water is stratification caused by the convergence of the discharges and outer water masses. The tidal mixing affects the DO through its effect on stratification.

Key words: the Pearl River Estuary; dissolved oxygen (DO); stratification; nutrient; tidal mixing

(上接第 113 页)

A Comparison Analysis of the Large Scale Circulations of the Two Typhoons Invaded the Western Part of South China

YAO Cai¹, HE Hai-yan², HUANG Ming-ce¹

(1. Guangxi Institute of Meteorological Disaster Reduction, Nanning 530022, China;

2. Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Using the Ncep Ncar reanalysis data of 4 map times per day, a comparison study of the two typical cases of typhoon, i. e. Ty 0103 and Ty 9615, is preformed to investigate the characteristics of the large scale environmental circulations. The results show that the large scale environmental circulations played an important role in the maintenance of the circulation and the enhancement of the associated heavy rains of a typhoon after its landfall. The interaction of a middle-high latitude trough with the low latitude vortex is favorable for the maintenance in intensity of the invaded TC (0103). The southwesterly low-level jets from the southern South-China Sea and the Bay of Bengal are main systems responsible for the maintenance in intensity of the typhoon and causing the enhancement of the accompanied heavy rainfall. More detailed analysis shows that the discrepancy of the interacting synoptic systems in Ty 0103 and Ty 9615 led to quite different vertical distributions of the wind speed and vorticity. Weaker vertical wind shear and the stronger vortex structure are observed in the case of Ty 0103 which lasted much longer than Ty 9615 after landfall.

Key words: TC landfall; Guangxi Province; characteristics of large scale circulations