北部湾北部海域潜在低氧分布及影响研究

马浩阳[1], 王丽莎[1], 吴敏兰[2], 郑爱榕[2]

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361101)

摘要: 通过对 2011 年北部湾北部海域春季和夏季溶解氧(DO)及其他环境要素进行分析讨论, 发现 DO 的季节性差异较大, 春季 DO 含量(平均 8.11 mg/L)明显高于夏季(平均 6.05 mg/L)。夏季北部湾底层部分区域存在 DO 低值, 该低值区常年存在, 并且 DO 最低值逐渐降低、低值区范围逐渐扩大。利用相关性分析和灰色关联度分析的方法, 对夏季底层 DO 低值的成因进行分析发现: 夏季底层水体浮游植物产氧作用较弱, 海水层化作用强, 阻碍了表底层 DO 的交换; 另外底层有机质分解的耗氧作用明显, 出现了氧气的净消耗, 由此导致夏季底层水体出现 DO 的低值。同时, 由于 2011 年之后北部湾北部海域陆源污染排放和赤潮的频发使得该海域低氧状况加剧, 潜在低氧区逐渐发展为低氧区。

关键词: 北部湾; 溶解氧; 相关性; 潜在低氧

中图分类号: P734 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3096(2020)09-0029-09

DOI: 10.11759/hykx20200117002

水体中的溶解氧(DO)可以直接反映水体污染程度并评判海水水质的优劣[1]。DO 的垂直和水平分布反映了海气界面的交换平衡、其参与的生物化学过程及物理运输过程[2]。DO 的来源主要是大气交换和浮游植物的光合作用; 消耗则主要是呼吸作用和有机质降解。另外, DO 含量还取决于海洋水动力交换, 海水稳定程度越高, 水体层化作用越强, 阻止 DO 的垂直交换越明显, 底层水体就更容易缺氧[3]。Schuble 等[4]把低氧的标准定义为 DO 含量低于 3 mg/L。但是, 一般, 当水体中 DO 的含量低于 4~6 mg/L 时, 便会对水生生物的生存产生不良影响[5-7], 本文重点关注 DO 含量低于 5 mg/L 的情况。低氧的形成一般需要具备两个条件: 水体层化阻止表底层水体交换; 底层有机质分解消耗氧气[8]。国内对长江口[9-10]、珠江口[11-12]、大辽河[6, 13]等河口的低氧现象关注研究较多, 但是对于北部湾这样的半封闭性海湾的低氧现象研究较少。本文通过分析北部湾 DO 的分布特征, 讨论了其与环境因子的关系, 利用相关性分析及灰色关联度分析等方法, 找出影响该半封闭海湾 DO 的主要因子, 同时针对北部湾北部海域长期存在的潜在低氧区(或低氧区)成因进行了分析, 从而为治理半封闭海湾水环境提供一定的科学依据。

1 研究区域和方法

北部湾位于我国南海西北部, 是一个典型的半封闭式亚热带海湾, 东临雷州半岛和海南岛, 北临广西, 西临越南, 与琼州海峡和南海相连; 北部湾北部海域沿岸港湾众多, 包括廉州湾、钦州湾、防城港和珍珠港等, 主要入海河流有南流江、大风江、钦江和防城江, 受陆地径流影响较大[14]。

本研究的数据为北部湾北部海域 2011 年春夏两个季节的数据。研究区域如图 1 所示, 研究区域共布设 21 个站位, 每个站位采集 3~4 层水样(表层、10 m、30 m 及底层), 为对比表底层水体的差异, 文中重点展示表底层水体的数据。调查指标包括温度(*T*)、盐度(*S*)、pH、溶解氧(DO)、溶解无机氮(DIN)、活性磷酸盐(SRP)、叶绿素 *a*(Chl-*a*)、浮游植物总丰度等, DO 样品现场采集固定后用碘量法进行测定, 其他各参数样品的采集及测定均按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)进行。

2 结果

2.1 温度及叶绿素 *a* 的平面分布特征

2011 年北部湾北部海域温度及 Chl-*a* 平面分布图如下图 2 和图 3 所示。从图中可以看出, 春、夏两季表层水体的温度均明显高于底层水体。表层水体温度

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-04-30

基金项目: 国家海洋公益性科研专项(201005012)

[Foundation: The National Marine Special Research Fund for Non-Profit Sector, No. 201005012]

作者简介: 马浩阳(1991-), 女, 河北石家庄人, 硕士, 助理实验师, 主要从事海洋化学方向研究, 电话: 0532-66782236, E-mail: mahaoyang@ouc.edu.cn; 郑爱榕(1957-), 通信作者, 博士, 教授, E-mail: arzheng@xmu.edu.cn

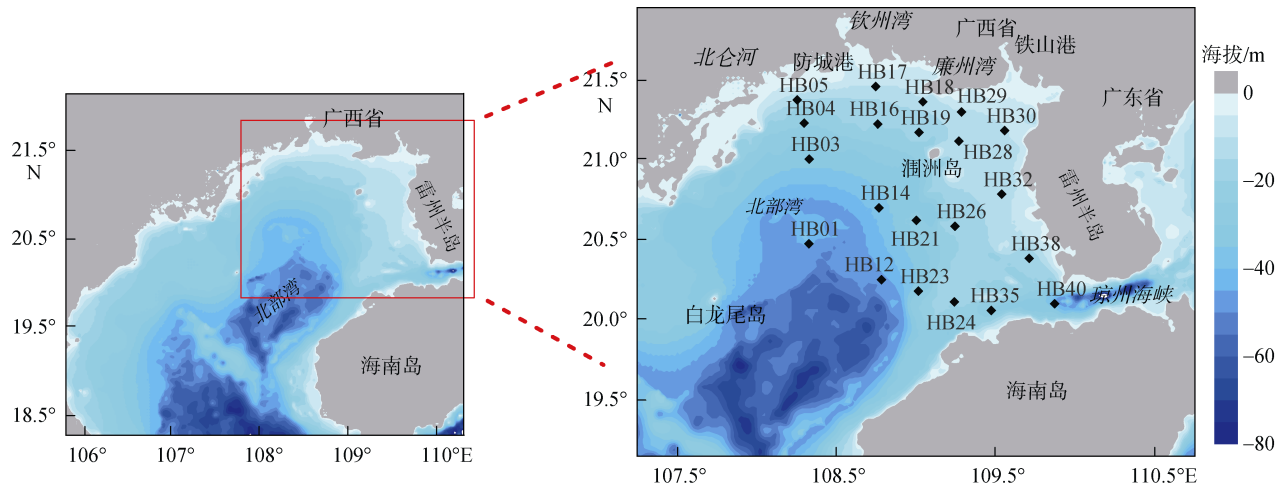


图 1　采样站位图

Fig. 1　Sampling stations

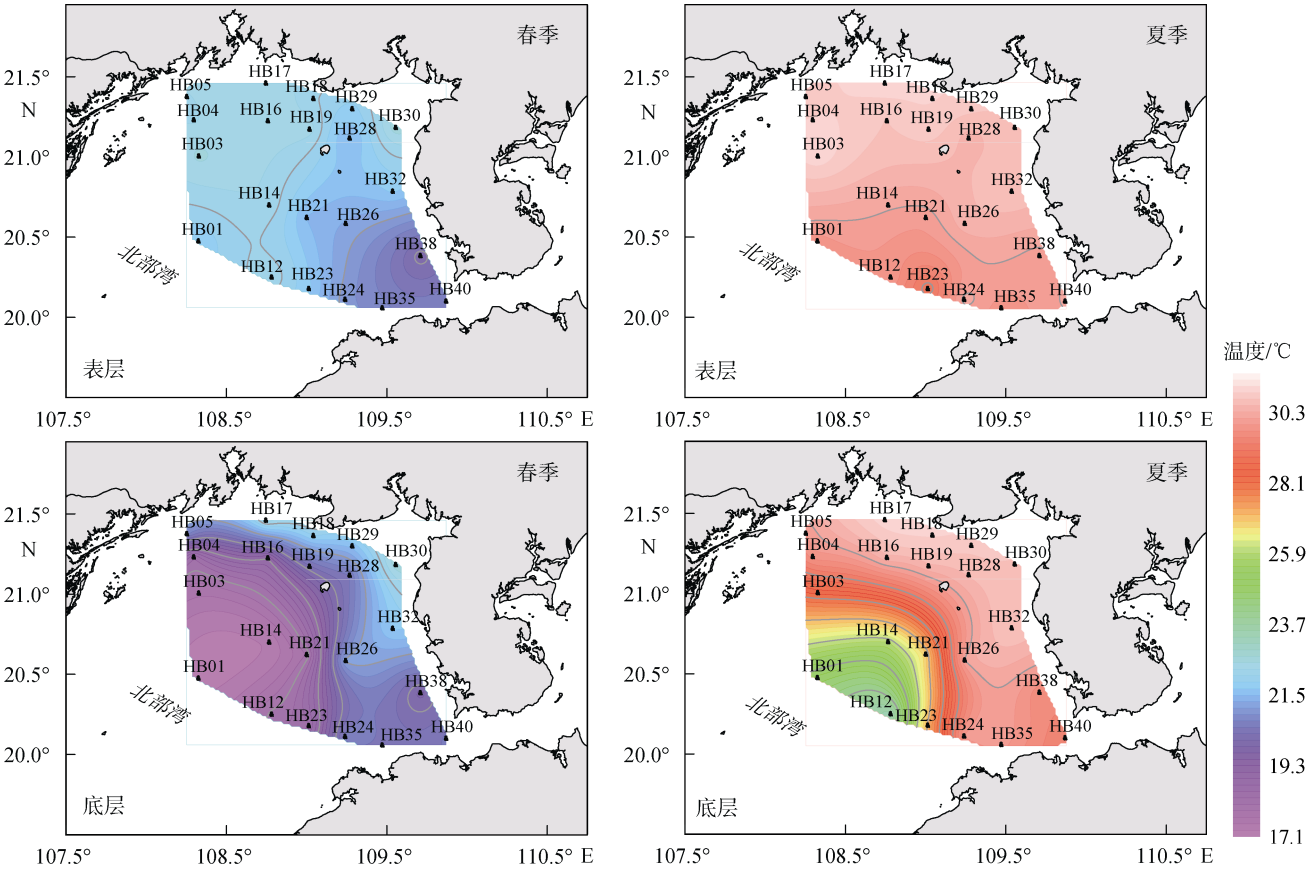


图 2　北部湾北部海域温度平面分布图

Fig. 2　Spatial distributions of temperature in the northern Beibu Gulf

分布相对均匀，而底层水体温度呈现随离岸距离增加而降低的趋势，主要是由于随着离岸距离的增加，水深增加，光照强度降低，导致水温降低。整体来看，春季水温(平均 20.77 ℃)明显低于夏季(平均 29.60 ℃)。

对于 Chl-*a* 的平面分布，春季表层 Chl-*a* 含量平均 1.90 mg/m^3，湾西部出现高值，底层 Chl-*a* 含量平均 2.33 mg/m^3，含量由湾东北向西南随着离岸距离的增加而递减，湾中部最低。春季时，底层(20~40 m 层)Chl-*a* 含量高于表层，与北部湾 Chl-*a* 的历史垂直分布特征相同[15-16]，除光照等因素影响外，由于底

层水体中营养盐含量高于表层(底层水体 DIN 含量平均 0.12 mg/L, 表层 DIN 含量平均 0.10 mg/L), 浮游植物在底层生长更加旺盛。夏季 Chl-*a* 的平面分布趋势与春季基本相同, 整体来说, 春季 Chl-*a* 含量(平均 1.99 mg/m^3)高于夏季(平均 1.22 mg/m^3), 反映了春季浮游植物快速生长的特征。

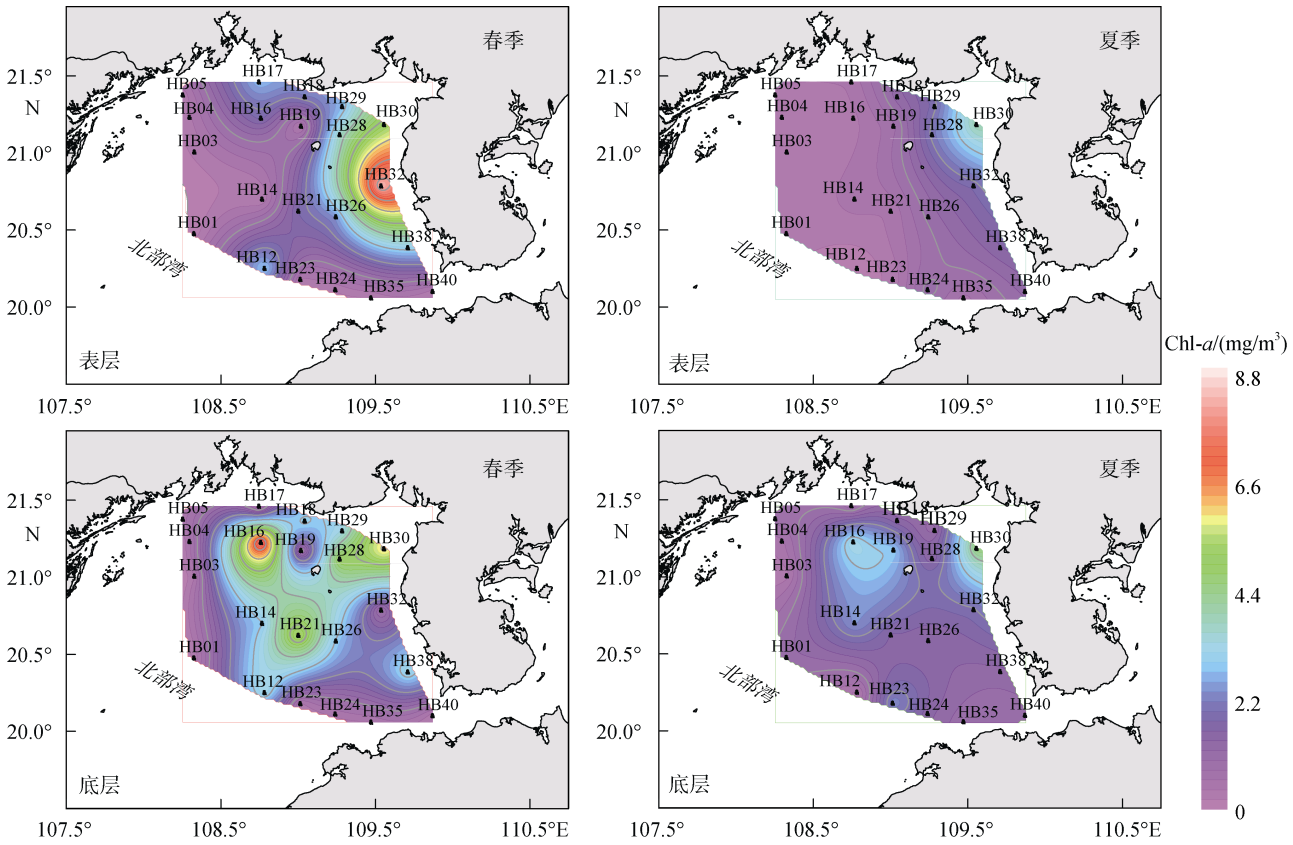


图 3　北部湾北部海域 Chl-*a* 平面分布图

Fig. 3　Spatial distributions of Chl-*a* in the northern Beibu Gulf

2.2　海水稳定度分布特征

海水稳定程度用稳定度 $E=-\dfrac{\Delta\rho/\Delta z}{\rho}$ 来表示[17], 其中 $\Delta\rho$指密度差值, 通过海水状态方程[18]得到, Δz 是温跃层的厚度, ρ指温跃层的平均密度。

从图 4 中可以看出, 春季海水的稳定度(平均 11.94×10^{-5} m^{-1})稍高于夏季(平均 10.43×10^{-5} m^{-1}), 整体差异不大, 两个季节海水的稳定度均表现出随离岸距离的增加而增加的趋势, 表明河流和沿岸流对海水稳定度的影响较大, 离岸较远的海域水体层化作用较强, 不利于表底层水体的垂直交换。

2.3　DO 的平面分布特征

北部湾北部海域 2011 年春季 DO 的平均值为 8.11 mg/L(范围为 7.10~8.96 mg/L), 其中表层 DO 平均值为 7.65 mg/L, 饱和度平均为 1.15; 底层 DO 平均值为 7.99 mg/L, 饱和度平均为 1.09, 春季表层及底层 DO 均处于过饱和状态(饱和度>1)。夏季 DO 平均值为 6.05 mg/L (范围为 3.68~6.90 mg/L), 其中表层水体 DO 平均值为 5.92 mg/L, 饱和度平均为 1.04; 底层 DO 平均值为 5.67 mg/L, 饱和度平均 0.90, 为不饱和状态。从图 5 可以看出, 整体上春季水体的 DO 明显高于夏季, 一方面是由于春季温度低于夏季(图 2), 氧气在春季时的溶解度相对更高; 另一方面, 春季 Chl-*a* 含量明显高于夏季(图 3), 浮游植物光合作用产氧较强。从 DO 的垂直分布来看(图 5), 春季表底层差异较小; 而夏季表底层差异较大, 其中表层 DO 含量较高, 且分布均匀, 而底层 DO 含量较低, 并且在中西部海域出现了 DO 的低值区(DO<5.0 mg/L)。

3　讨论

3.1　DO 及 AOU 与环境因子的相关性分析

3.1.1　DO 与环境因子的相关性分析

为分析北部湾北部海域影响 DO 含量的主要环

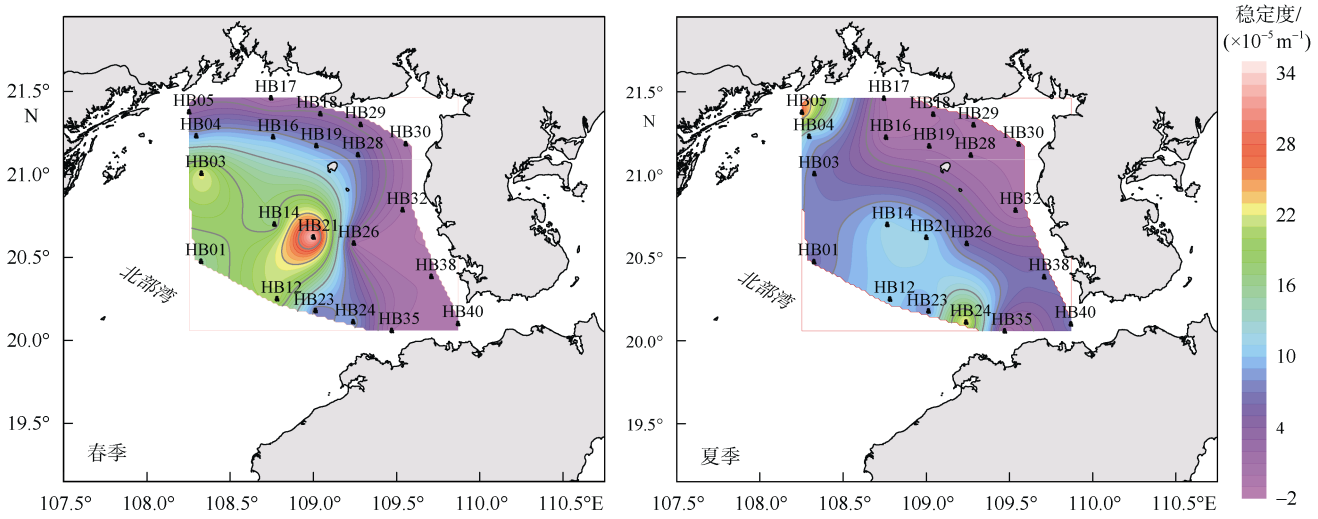


图 4　北部湾北部海域春夏两季稳定度分布图

Fig. 4　Spatial distributions of stability in the northern Beibu Gulf

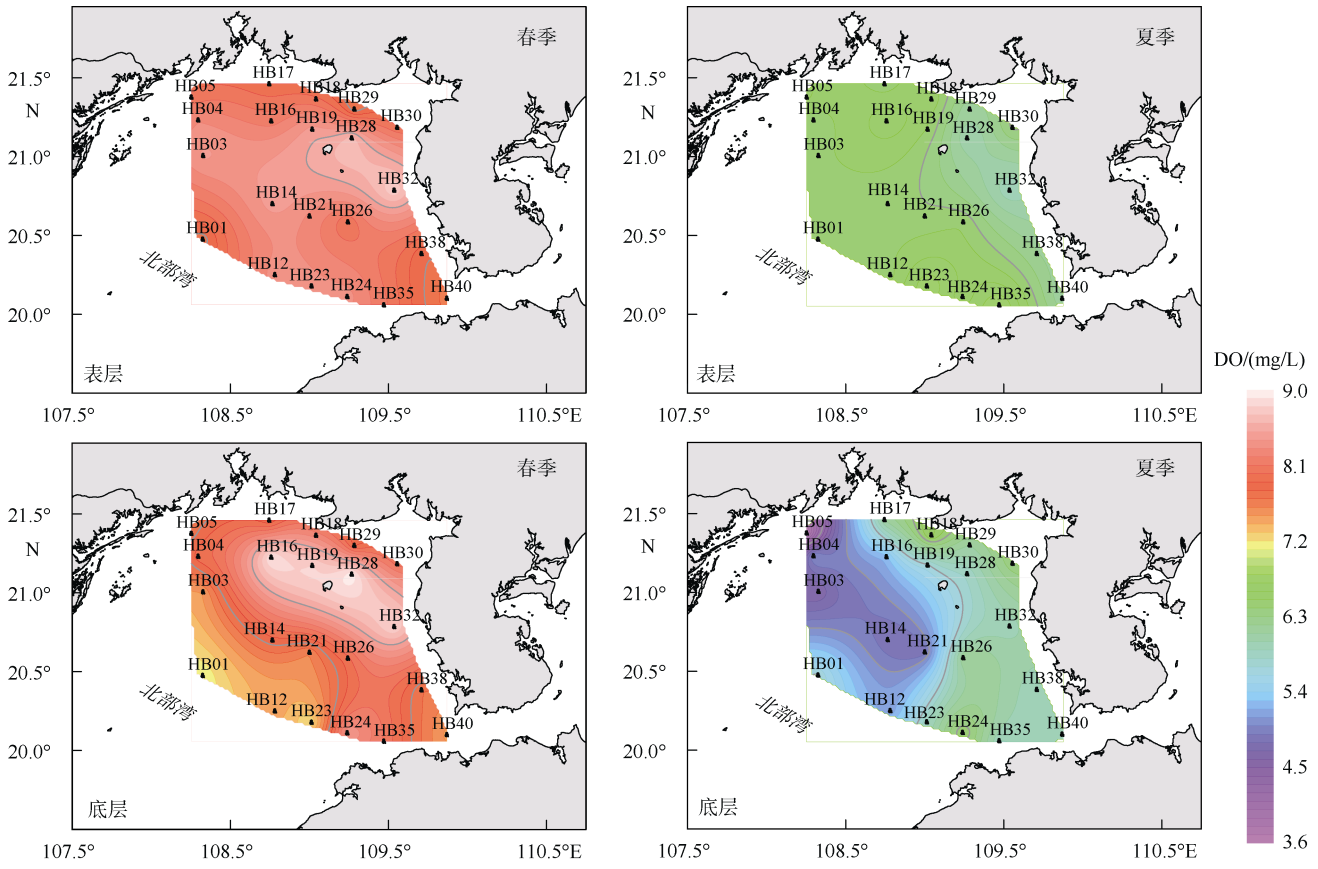


图 5　北部湾北部海域 DO 平面分布图

Fig. 5　Spatial distributions of DO in the northern Beibu Gulf

境因素, 将 DO 与其他环境因子(T、S、pH、COD、Chl-a、浮游植物总丰度、营养盐等)做 Pearson 相关性分析(表 1), 可以看出: 春季表层水体 DO 与浮游植物总丰度呈显著正相关, DO 含量随浮游植物总丰度的增加而增加, 表明春季表层浮游植物的光合作用(产氧过程)占主导地位; 而夏季表层水体 DO 与 Chl-a 和 SRP 含量均呈显著负相关, 说明夏季表层海水中营养盐过剩导致浮游植物大量生长, 使得表层海水中浮游植物

的消亡分解作用(耗氧过程)占主导地位[8]。春夏两季表层水体的浮游植物丰度和 Chl-*a* 之间并无显著相关性, 主要是因为受浮游植物细胞大小[19]、优势种[20-21]等因素的影响, 两者并不总是显著相关。春夏两季底层水体 DO 均与 pH 呈显著正相关, 可能是因为浮游植物光合作用吸收CO_2, 导致水体pH升高, 同时产生O_2, 使DO含量升高。从 DO 随 pH 变化的斜率来看, 底层水体的变化斜率(春季斜率为 8.20, 夏季为 10.62)明显高于表层(平均 3.04), 表明底层水体的光合作用明显弱于表层, 并且夏季底层的光合作用相对春季底层更弱一些。

表 1　DO 与环境因子的 Pearson 相关系数
Tab. 1　Pearson's correlation coefficient between DO and other environment parameters

季节	相关系数								
	T	*S*	pH	COD	Chl-*a*	浮游植物总丰度	DIN	SRP	DSi
春季表层	0.264	0.263	0.516*	0.064	0.259	0.487*	0.037	–0.365	–0.398
春季底层	0.437*	–0.313	0.681**	0.609*	0.352	/	–0.244	–0.483*	–0.324
夏季表层	–0.234	–0.138	0.500*	0.338	–0.490*	–0.175	–0.228	–0.779**	0.127
夏季底层	0.374	–0.371	0.763**	–0.164	0.247	/	–0.709**	–0.390	–0.637**

注: **: 相关性在 0.01 水平显著(双侧检验); *: 相关性在 0.05 水平显著(双侧检验); /: 未采集底层水体的浮游植物丰度样品, 因此无相关性数据。下同

通过分析 DO 表底层的变化量(ΔDO)与环境因子变化量之间的关系, 可以更加直观清楚地了解 DO 在垂向水体中消耗的主要影响因素, 将 ΔDO 与环境因子变化量(水体稳定度、营养盐及 Chl-*a* 含量变化)做 Pearson 相关性, 分析结果如表 2 所示。

可以看出, 春夏季水体 ΔDO 均与海水稳定度呈显著正相关, 说明水体稳定度越高, 水体层化作用强, 不利于表底层水体的交换, 导致表底层水体之间 DO 的差值较大, 体现了海水层化作用(物理过程)对 DO 的影响; 与NO_2^-变化量呈显著负相关, 说明从表层到底层随着 DO 的降低, NO_2^-含量增加, 即由于 DO 含量的降低, NO_3^-逐渐被还原为NO_2^-, 反映了 DO 相对较低的情况下细菌反硝化作用的影响。

表 2　ΔDO 与环境因子的 Pearson 相关系数
Tab. 2　Pearson's correlation coefficient between ΔDO and other environment parameters

季节	相关系数						
	稳定度	ΔSRP	ΔDSi	ΔNO_2^-	ΔNO_3^-	ΔNH_4^+	ΔChl-*a*
春季	0.548*	–0.278	–0.027	–0.569**	–0.002	–0.400	0.105
夏季	0.545*	–0.457*	–0.598**	–0.879**	–0.103	–0.258	–0.393

因为上述环境因子与 DO 之间的关系是复杂、模糊、不确定的, 属于灰色系统, 无法用一般的相关性分析和回归分析计算每个环境因子对 DO 的影响程度大小[22], 因此采用灰色关联度分析进行各因子对 DO 影响程度大小的研究。将与 DO 显著相关的环境因子作为关联因子, 做灰色关联度分析, 得到关联系数, 发现春夏两季表底层 DO 与 pH 值均呈显著正相关(表 1), 且 DO 与 pH 的关联系数(0.96 以上)明显高于其他环境因子(0.7~0.8), 关联度系数达到, 说明相比物理过程(稳定度), 生物化学作用(光合作用与生物氧化分解作用)对 DO 含量的影响更大。

3.1.2　表观耗氧量(AOU)与环境因子的相关性分析

一般认为, AOU 是由浮游植物的光合作用和有机物的分解作用影响的, 而浮游植物的生长与营养盐有关, 因此, AOU 与营养盐之间存在一定的关系, 根据 Redfield[23]提出的计算公式, 理论上每生成 1 个磷原子和 1 个氮原子分别需要消耗 276 个和 17.2 个氧原子。

通过分析 AOU 与营养盐之间的线性关系及比值关系(表 3), 可了解该海域是光合作用还是氧化分解作用占主导[24]。

由表 3 结果可知: 春夏两季 $\Delta SRP/\Delta O_2$ 或 $\Delta DIN/\Delta O_2$ 值(营养盐与 AOU 斜率值)均小于理论上的 Redfield 比值($\Delta SRP/\Delta O_2$=1∶138; $\Delta DIN/\Delta O_2$=1∶8.6), 说明春夏两季均出现了有机物降解耗氧多, 而营养盐吸收相对较少的现象: 春、夏季正是生物生长繁殖的旺盛季节, 藻类丰富, 浮游植物吸收海水中的营养盐, 而鱼虾贝类又摄食浮游植物及消耗水体中氧气, 释放的有机物量增大, 导致表观耗氧量大[25], 因而氧气的

表 3　表观耗氧量(AOU)与营养盐的相关性
Tab. 3　Relationship between AOU and nutrients

因子	春季表层		春季底层		夏季表层		夏季底层	
	Pearson 相关系数	斜率	Pearson 相关系数	斜率	Pearson 相关系数	斜率	Pearson 相关系数	斜率
DIN	0.054	-	0.236	-	0.253	-	0.677**	1/1 000
SRP	0.638**	1/500	0.392	-	0.781**	1/1 000	0.507*	1/31.25

注: -表示 AOU 与营养盐间无显著相关性, 比值未列出

消耗量相对大于营养盐的吸收量, 即说明该海域相对于浮游植物的产氧过程, 浮游动物和有机体氧化分解的耗氧过程占主导地位。

3.2　北部湾北部海域夏季潜在低氧区形成机制

由以上分析结果可知, 北部湾北部海域夏季 DO 含量整体平均为 6.05 mg/L(3.68~6.90 mg/L), 其中部分区域的底层水体 DO 含量低于 5 mg/L, 这些站位主要位于研究海域中西部区域(自北部湾中部向东北方向延伸至涠洲岛), 从 DO 含量来看, 该区域水体尚未达到绝对低氧(<3 mg/L)的水平, 但已经达到危害生物的水平(<5 mg/L), 同时相关性分析结果显示该海域 DO 的消耗过程强于产生过程, 有发展成为低氧区的趋势, 因此, 将该区域称为“潜在低氧区”, 同时从地形图(图 1)可以看出北部湾中西部区域海底处于相对封闭的“低洼区”, 底层水与南海水之间交换较弱, 潜在低氧区一旦形成, 状况较难得到缓解。

北部湾潜在低氧区并非是偶然出现的现象, 早在 1983—1984 年就观察到钦州湾外 1 个站位在春夏两季底层出现潜在低氧区[26](春夏季 DO 含量分别为 3.90~4.80 mg/L 和 3.87~4.39 mg/L); 2006 年夏季, 拜子龙群岛东侧海域、防城港与钦州湾附近海域约 4 km^2 的底层水体出现潜在低氧(DO 含量为 2.42~4.84 mg/L); 2011 年夏季底层同样海区水体的潜在低氧范围扩大到了 39 km^2, DO 最低值 3.68 mg/L; 2016 年 9 月[27]在北部湾相同区域出现绝对低氧状况(最低值达到 1.98 mg/L), 且面积达到 119 km^2, 到冬季后绝对低氧现象消失, 2017 年夏季潜在低氧又出现(最低值为 3.00 mg/L 左右, 面积约为 53 km^2)。因此, 北部湾中西部海域季节性潜在低氧现象存在已久, 且呈季节性出现, 从图 6 中可以看出, 随着时间推移 DO 最低值逐渐降低, 且(潜在)低氧区范围(站位数)呈扩大趋势, 到 2016 年夏季时出现大范围绝对低氧区, 因此该海域(潜在)低氧现象整体呈加剧的趋势。

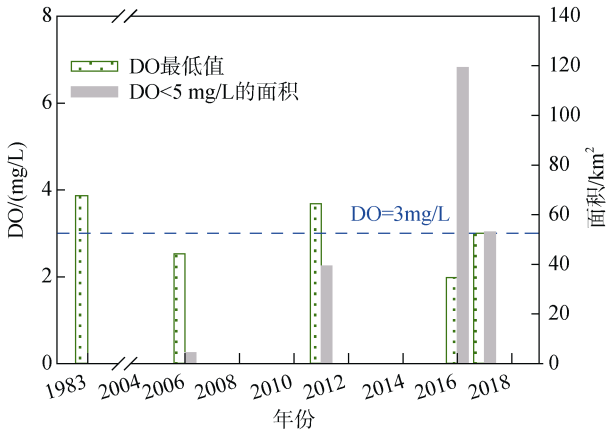


图 6　北部湾北部海域潜在低氧区(DO<5 mg/L)变化趋势图
Fig. 6　The trend of potential hypoxic zone (DO<5 mg/L) in the northern Beibu Gulf

北部湾北部海域季节性潜在低氧状况逐年加剧的原因, 一方面可能是由于防城港及钦州湾存在多个生活及工业排污口, 钦州湾 10 个排污口均位于湾外, 且 10 个排污口均存在不同程度超标状况, 主要超标要素为总磷和 COD_{Cr}, 使钦州湾轻度污染、防城港严重污染[28-29]; 另一方面也有文献[30]指出, 2008 年后钦州湾春夏季赤潮频发, 在 2010 年北部湾发生了 150 km^2 的大范围赤潮[31], 并且 2011—2016 年基本上每年北部湾均会发生赤潮[32], 2017 年钦州湾海域附近球形棕囊藻暴发[33]。

由此发现, 2011 年以前北部湾海域(潜在)低氧范围较小, 且主要为潜在低氧区, 但由于北部湾海域经济结构及生活方式未做出相应的改变和调整, 陆源污染物的排放未得到控制、赤潮频发, 加剧了 DO 净消耗的情况, 使得潜在低氧区范围扩大、低氧程度加大, 演变为低氧区。

4　结论

2011 年北部湾北部海域 DO 状况整体上春季明显好于夏季, 在夏季底层水体中出现了 DO 含量低于 5.0 mg/L 的区域, 该区域 DO 含量主要受控于生物化学作用, 且浮游动物和有机体氧化分解的耗氧过

程强于浮游植物的产氧过程，使得夏季底层水体处于 DO 的净消耗状态，有发展成低氧区的趋势。该潜在低氧区是长期存在的，同时由于陆源排污及夏季季节性赤潮的影响，潜在低氧状况从 2011 年开始呈逐年加剧的状况，到 2016 年夏季时出现了较大范围的绝对低氧区(DO<3 mg/L)。因此，当类似于北部湾的半封闭性海湾发生潜在低氧现象时，应引起充分关注，及时调整经济产业结构，控制陆源污染物的入海排放总量，改善 DO 净消耗增大的情况，扭转低氧区的形成。

参考文献:

[1] 王继龙, 郑丙辉, 秦延文, 等. 辽河口水域溶解氧与营养盐调查与分类[J]. 海洋技术, 2004, 23(3): 92-96.
Wang Jilong, Zheng Binghui, Qin Yanwen, et al. The investigation and classification of dissolved oxygen and nutrients in Liaohe River Estuary waters[J]. Ocean Technology, 2004, 23(3): 92-96.

[2] Balbín R, LópezJurado J L, AparicioGonzález A, et al. Seasonal and interannual variability of dissolved oxygen around the Balearic Islands from hydrographic data[C]//Egu General Assembly Conference. 2014.

[3] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1649-1654.
Zhang Yingying, Zhang Jing, Wu Ying, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze Estuary[J]. Environmental Science, 2007, 28(8): 1649-1654.

[4] Schuble J R. Report of workshop “The second phase of an assessment of alternatives to biological nutrient removal at sewage treatment plants for alleviating hypoxia in western Long Island Sound” [R]. NYSB: Marine Science Research Center, 1991.

[5] Gray J, Wu R, Ying Y. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment[J]. Marine Ecology Progress, 2002, 238(1): 249-279.

[6] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 51-57.
Yang Lina, Li Zhengyan, Zhang Xueqing. Distribution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper estuary zone of the Daliao River[J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 51-57.

[7] 王巧宁. 大规模藻华区低氧对海洋生物的影响研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
Wang Qiaoning. The effects of hypoxia on the marine organisms in large-scale algal bloom area[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012.

[8] 李道季, 张经, 黄大吉, 等. 长江口外氧的亏损[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(8): 686-694.
Li Daoji, Zhang Jing, Huang Daji, et al. The deficit of oxygen adjacent to the Changjiang Estuary[J]. Science in China (Series D), 2002, 32(8): 686-694.

[9] 李照, 宋书群, 李才文. 长江口及其邻近海域叶绿素 *a* 分布特征及其与低氧区形成的关系[J]. 海洋科学, 2016, 40(2): 1-10.
Li Zhao, Song Shuqun, Li Caiwen. Distribution of chlorophyll *a* and its correlation with the formation of hypoxia in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2016, 40(2): 1-10.

[10] 刘贲, 张霄宇, 曾江宁, 等. 长江口低氧区的成因及过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(1): 187-194.
Liu Ben, Zhang Xiaoyu, Zeng Jiangning, et al. The origin and process of hypoxia in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(1): 187-194.

[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.
Luo Lin, Li Shiyu, Li Hongmei. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting fators in the Pearl River Estuary in summer[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(6): 118-122.

[12] 叶丰, 黄小平, 施震, 等. 极端干旱水文年(2011 年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1707-1714.
Ye Feng, Huang Xiaoping, Shi Zhen, et al. Distribution characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Pearl River Estuary during the summer of the extremely drought hydrological year 2011[J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1707-1714.

[13] 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 等. 大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3748-3754.
Yang Fuxia, Jian Huimin, Tian Lin, et al. Distribution characteristics of COD and DO and its influencing factors in the Daliaohe Estuary[J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3748-3754.

[14] 辛明, 王保栋, 孙霞, 等. 广西近海营养盐的时空分布特征[J]. 海洋科学, 2010, 34(9): 5-9.
Xin Ming, Wang Baodong, Sun Xia, et al. The distribution characteristics and seasonal variation of nutrients in Guangxi coastal area[J]. Marine Sciences, 2010, 34(9): 5-9.

[15] 刘子琳, 宁修仁. 北部湾浮游植物粒径分级叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(1): 50-57.
Liu Zilin, Ning Xiuren. Distribution characteristics of size-fractionated chlorophyll *a* and productivity of phy-

toplankton in the Beibu Gulf[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(1): 50-57.

[16] 吴易超, 郭丰, 黄凌风, 等. 北部湾夏季浮游植物叶绿素 *a* 含量的分布特征[J]. 广州化工, 2014, 42(8): 144-146.
Wu Yichao, Guo Feng, Huang Lingfeng, et al. Distribution characteristics of Chlorophyll *a* content in the Beibu Gulf[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(8): 144-146.

[17] 冯士筰, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.

[18] 叶安乐, 李凤岐. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992.
Ye Anle, Li Fengqi. Physical Oceanography[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1992.

[19] 于湖洋. 秦皇岛海域叶绿素*a*浓度与藻类群落的动态变化[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
Yu Huyang. The dynamic variation of chlorophyll *a* concentration and algal community in Qinhuangdao coastal area[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.

[20] 于海燕, 周斌, 胡尊英, 等. 生物监测中叶绿素 *a* 浓度与藻类密度的关联性研究[J]. 中国环境监测, 2009, 25(6): 40-43.
Yu Haiyan, Zhou Bin, Hu Zunying, et al. Study on Correlation between Chlorophyll a and Algal Density of Biological Monitoring[J]. Environmental Monitoring in China, 2009, 25(6): 40-43.

[21] 张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等. 流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1527-1537.
Zhang Caixue, Chen Huiyan, Sun Shengli, et al. Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1527-1537.

[22] Liu Xueqing, Wang Jia, Zhang Dun, et al. Grey relational analysis on the relation between marine environmental factors and oxidation-reduction potential[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(3): 583-586.

[23] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organism on the composition seawater[J]. The Sea, 1963, 2: 26-77.

[24] 谢群, 张瑜斌, 孙省利, 等. 流沙湾海域表观耗氧量和营养盐相关性分析[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(2): 1-6.
Xie Qun, Zhang Yubin, Sun Shengli, et al. The relationship between apparent oxygen utilization and nutrients in Liusha Bay[J]. Environmental Science Survey, 2012, 31(2): 1-6.

[25] 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.
Jiang Zhihua. Study on the apparent oxygen utilization in the Zhujiang River Estuary area during flood season[J]. Guangzhou Environmental Sciences, 2007, 22(1): 40-43.

[26] 马凤兰, 陈文广, 童万平. 广西沿海海水中化学元素之间的关系[J]. 广西科学院学报, 1987, 2: 73-77.
Ma Fenglan, Chen Wenguang, Tong Wanping. The relationship between chemical elements in the seawater of Guangxi coast[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1987, 2: 73-77.

[27] 袁涌铨, 吕旭宁, 吴在兴, 等. 北部湾典型海域关键环境因子的时空分布与影响因素[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(3): 579-589.
Yuan Yongquan, Lü Xuning, Wu Zaixing, et al. Temporal and spatial distribution of main environmental factors in typical sea area of the Beibu Gulf and its influencing factors[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(3): 579-589.

[28] 广西壮族自治区海洋局. 广西壮族自治区 2011 年海洋环境质量公报[Z]. 2012.
Guangxi Zhuang Autonomous Region Ocean Bureau. Marine Environmental Quality Bulletin of Guangxi, 2011[Z]. 2012.

[29] 谢华. 广西省近岸海域海水环境质量与入海陆域污染影响对策研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(3): 30-36.
Xie Hua. Study on effects and countermeasures of marine environmental quality and land area pollution in coastal waters of Guangxi[J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(3): 30-36.

[30] 蓝文陆. 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5970-5976.
Lan Wenlu. Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou Bay and its potential ecological impacts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5970-5976.

[31] 赖俊翔, 陈宪云, 柯珂, 等. 广西防城港市近岸海域营养盐分布及富营养化研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 63-69.
Lai Junxiang, Chen Xianyun, Ke Ke, et al. Sttudy on nutrients distribution and eutrophication in the coastal waters of Fangchenggang, Guangxi[J]. Ocean Technology, 2013, 32(3): 63-69.

[32] 罗金福, 李天深, 蓝文陆. 北部湾海域赤潮演变趋势及防控思路[J]. 环境保护, 2016, 44(20): 40-42.
Luo Jinfu, Li Tianshen, Lan Wenlu. Evolution trend and prevention strategy of algae bloom in the Beibu Gulf[J]. Environment Protection, 2016, 44(20): 40-42.

[33] 钦州市海洋局. 2017 年钦州市海洋环境状况公报[R]. 2018.
Qinzhou Marine Bureau. Marine Environment Report of Qinzhou, 2017[R]. 2018.

Characteristics of potential hypoxic zone and its influencing factors in the northern Beibu Gulf

MA Hao-yang[1], WANG Li-sha[1], WU Min-lan[2], ZHENG Ai-rong[2]
(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Oceanic and Earth, Xiamen University, Xiamen 361101, China)

Received: Jan. 17, 2020
Key words: Beibu Gulf; dissolved oxygen; correlation analysis; potential hypoxic zone

Abstract: In this study, the dissolved oxygen (DO) content and other environmental factors in the northern Beibu Gulf in the spring and summer of 2011 were analyzed. The results showed that the seasonal differences in DO are large, and the DO in spring (ave = 8.11 mg/L) was significantly higher than that in summer (ave = 6.05 mg/L). In summer, there was a low-DO area in the northern Beibu Gulf; the low DO remained all year round and became lower year by year. Correlation analysis and gray correlation analysis were performed to analyze the cause of the low DO in summer. It was found that oxygen production was weak in the bottom water during summer and that the stratification was strong, which prevented the exchange of DO between the surface and bottom. In addition, the oxygen consumption by organic matter was greater than the oxygen amount produced by phytoplankton, which led to a low DO in the bottom water in summer. Moreover, owing to the occurrence of terrestrial pollution and red tide in the Beibu Gulf since 2011, the hypoxic conditions have intensified, and the potential hypoxic zone has become hypoxic.

(本文编辑: 康亦兼)