

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

叶丰^{1,2}, 黄小平^{1*}, 施震^{1,3}, 刘庆霞^{1,3}

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301; 2. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 气候变化背景下, 极端气候事件对河口生态环境的影响已引起许多研究者的关注. 基于 2011 年夏季的调查资料, 分析了珠江口在极端干旱情况下溶解氧的分布特征及其与海水稳定性、营养盐和浮游植物分解之间的关系, 并对河口底层低氧区的成因进行初步探讨. 调查结果发现, 在珠江特低径流量的情况下, 珠江口邻近海域底层明显出现低氧状态, DO 的最低值仅为 $1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 相关性分析显示, 表层水和底层水之间的 ΔDO 与 ΔT 、 ΔS 、 ΔDIN 、 ΔSS 和 ΔPOC 都达到显著相关的水平, 其中 ΔDO 与 ΔT 和 ΔPOC 呈极显著的正相关, 而与 ΔS 呈极显著的负相关关系. 研究表明, 与 1999 年和 2009 年夏季不同, 2011 年夏季珠江口底层低氧环境的形成主要与极端干旱气候下低径流导致河口水体滞留时间延长及颗粒态有机物质在沉降过程中的分解耗氧有关. 另外, 从最低 DO 值的角度分析, 珠江口季节性缺氧程度在过去 20 a 间并未呈现显著的变化趋势.

关键词: 珠江口; 极端干旱事件; 溶解氧; 缺氧; 滞留时间

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1707-08

Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011

YE Feng^{1,2}, HUANG Xiao-ping¹, SHI Zhen^{1,3}, LIU Qing-xia^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: More and more attention has focused on assessing impacts of extreme hydrologic events on estuarine ecosystem under the background of climate change. Based on a summer cruise conducted in the Pearl River Estuary in 2011 (extreme drought event), we have investigated the spatial distribution of dissolved oxygen (DO) and its relationships to water column stability, nutrient concentrations, and organic matter; besides, the major reason which caused the oxygen depletion was discussed. Under the influence of the extreme drought event, low bottom water dissolved oxygen was apparent in regions characterized by great depths, with an oxygen minimum value of $1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Statistical analysis shows significant correlations among ΔDO , ΔT , ΔS and ΔPOC . A comparison was conducted to show the mechanisms of oxygen depletion during the summers of 1999, 2009 and 2011, respectively. The result indicates that prolonged residence time of water due to the extremely low discharge and the subsequently decomposition of organic substance are major factors causing the formation of hypoxia during the summer drought in 2011. Despite the changing nutrient and organic matter regime in the Pearl River Estuary, there was no apparent trend in the minimum values of DO over the past 2 decades.

Key words: Pearl River Estuary; extremely drought event; dissolved oxygen; hypoxia; residence time

海水中的溶解氧(DO)是海洋生物维持生命的基础,同时也是衡量海气相互作用、净初级生产力和碳再矿化等过程的重要标志.但是,在过去 50 多年间,近海陆架和河口区域底层水体缺氧现象(DO 浓度低于 $2\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时有发生,并已成为近年来河口海岸带主要的生态环境异常现象之一^[1].大量研究表明,河口底层缺氧现象发生频率的升高与人为排污活动加剧造成水体中营养物质含量的增加密切相关^[2,3].譬如,诸多证据显示来自密西西比河流域的 N 通量是控制墨西哥湾北部缺氧区范围和程

度的关键因素^[2,4].在我国,长江口外和珠江口及其邻近海域也存在底层缺氧现象^[5-7].

珠江口位于珠江与南海的交汇处,是我国重要的河口生态系统之一.由于珠江流域农业和工业发达,珠江每年携带丰富的 N、P 营养盐输入南海,导

收稿日期: 2012-07-26; 修订日期: 2012-10-25
基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCXZ-YW-Q07); 国家自然科学基金项目(41076069, 40776086); 广东省 908 专项(GD908-JC-06)
作者简介: 叶丰(1984~),男,博士,主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: yefeng@scsio.ac.cn
* 通讯联系人, E-mail: xphuang@scsio.ac.cn

致珠江口及邻近海域其浓度逐年升高,水体富营养化迅速发展,尤其在夏季珠江径流量最大,输入的淡水携带了大量的营养盐,在适宜的环境条件下促使浮游植物暴发,造成珠江河口赤潮频发以及由此引发的缺氧事件加重^[8,9]. 在1980~1981年进行的广东省海岸带(珠江口岸段)资源调查中最早记录了夏季珠江口底层水体缺氧现象的存在,位于上川岛东北部海域,最低DO值低于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10]. 在随后的观测中,陆续有多人在调查发现了珠江口的季节性缺氧现象^[6,11,12].

气候变化是影响河口及近海海域底层缺氧形成和发展的重要因素^[1,3]. 已有的研究表明,气候变化能够通过河流径流量、水体温度和风应力等多种响应机制影响河口缺氧事件的发生^[13]. 另一方面,在全球持续变暖的背景下,极端干旱事件呈现趋多、趋强的趋势^[14]. 然而,目前关于极端干旱事件对河口水质特别是DO分布和缺氧现象影响的研究极为有限^[15,16]. 2011年夏季,珠江流域发生严重的干旱,导致珠江径流量大幅下降^[17]. 以西江下游的主要控制站马口水文站(约占西江和北江径流量的75%)为例,6~8月近45年(1959~2003年)月平均径流量分别为 $14\,357$ 、 $14\,445$ 和 $12\,599\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,在2011年6~8月马口站月平均径流量分别为 $7\,398$ 、 $7\,560$ 和 $<4\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,各月平均径流量比多年月平均径流量分别减少了48.5%、47.7%和68.3%以上. 夏季珠江流域极端干旱事件的发生会对珠江口DO特别是底层低氧现象和营养盐分布产生怎样的影响? 针对这个问题,本课题组进行了一次大面调查,本研究将基于调查资料,分析极端干旱事件下珠江口底层低氧区形成的机制及其对生物地球化学循环的影响,这不仅有助于揭示河口溶解氧与极端气候事件之间的联系,进而为解明珠江口底层低氧的形成机制以及寻求防治对策提供重要的依据,以期开展我国河口生态环境对气候变化响应等科学问题的研究奠定基础.

1 材料与方法

1.1 样品采集及现场观测

2011年8月2~9日在珠江口伶仃洋海域进行了夏季航次的海洋科学调查,主要研究河口生源要素循环及其有关过程. 整个航次共布设30个采样点(图1). 采集每个站点不同层次的水样,分析项目包括水温、盐度、溶解氧,可溶性无机氮(DIN)、可溶性无机磷(正磷酸盐,DIP)等20余项,其中14个

站点(图1)的分析项目还包括总悬浮颗粒物(SS)、颗粒态有机碳(POC)、颗粒态氮(PN)等.

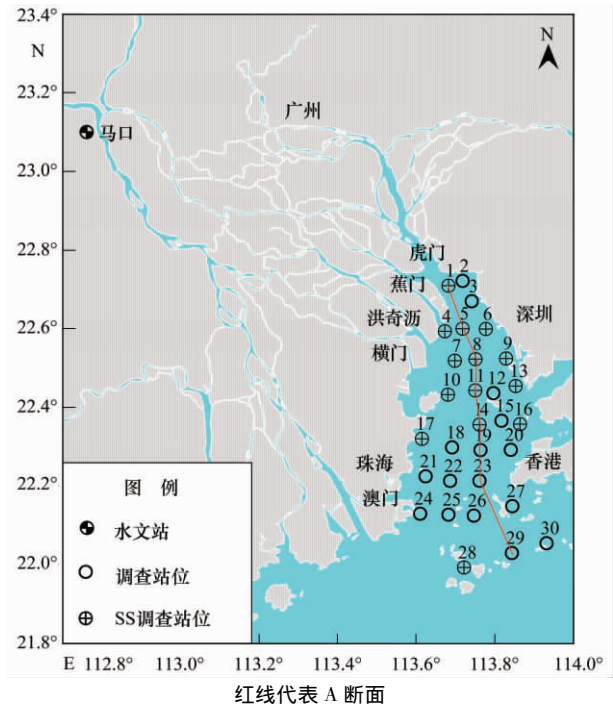


图1 珠江口调查站点分布示意

Fig. 1 Study area and sampling stations in the Pearl River Estuary

在所有站点,均使用YSI 6600多参数水质仪对海水的温度、盐度和DO进行现场测量. 观测前YSI 6600严格按照规定用标准液对每个探头进行校正,观测后对YSI 6600记录的值用各个测站水样通过碘量滴定法(Winkler法)现场分析得到的DO值再作校正. 同时,使用有机玻璃采水器采集不同深度的海水样品用来进行SS、浮游植物色素[叶绿素a(Chl-a)和脱镁叶绿酸(Pha)],营养盐(DIN和DIP)、POC、PN等的分析. 用于测定浮游植物色素含量的水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 的醋酸纤维素滤膜过滤,过滤以手泵来进行以控制抽滤压力,滤膜(铝箔包裹)置于冰箱冷冻保存.

1.2 室内分析

在低温避光条件下,浮游植物色素用90%的丙酮萃取24h,萃取液在唐纳荧光仪(Turner Designs Fluorometer, Model 10)上测定,依照经典公式计算出Chl-a和Pha的浓度^[18]. SS的测量采用重量法. 对于硝态氮、亚硝态氮、氨态氮和DIP,分别采用铈还原法、盐酸萘乙二胺分光光度法、次溴酸盐氧化法和磷钼蓝分光光度法进行检测,其中DIN为硝态氮、亚硝态氮和氨态氮之和. 盐酸去除无机碳后,用元素分析仪(Vario EL III型)上测定POC和PN含量.

1.3 数据处理

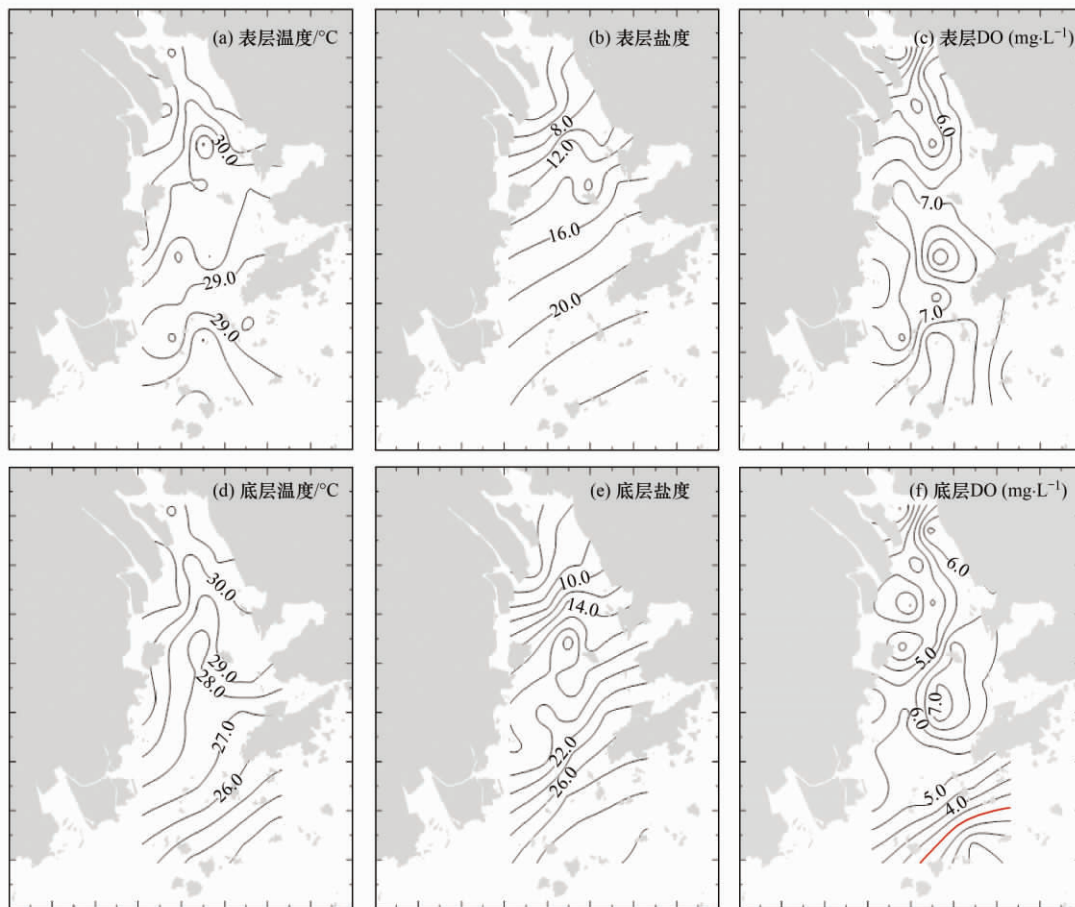
数据处理主要采用数理统计学和地统计学方法. 利用数理统计软件 SPSS for Windows 16.0(Lead 公司)进行相关性分析; 并利用 Surfer 8.0 软件(美国 Golden 软件公司)的克里格插值法绘制等值线图.

2 结果与分析

2.1 表层和底层温度、盐度和溶解氧的水平分布特征

调查期间,珠江口海域各调查站位表层和底层温度的变化范围分别为 28.39 ~ 31.65°C 和 22.21 ~ 31.86°C, 平均值为 29.83°C 和 28.32°C. 水体盐度在表层和底层的变化范围为 2.7 ~ 24.1 和 3.9 ~

32.2, 平均值分别为 16.40 和 17.55. 从分布趋势来看, 高温低盐的冲淡水主要分布在河口上游, 而低温高盐水体分布在河口下游东南部海域(图 2). 表层和底层 DO 含量范围在 3.12 ~ 9.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.38 ~ 7.29 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值分别为 6.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 5.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 整体而言, DO 值随着离岸(虎门)距离的增加基本呈先逐渐增加、随后逐渐降低的趋势(图 2). 底层低氧区主要出现于河口湾外东侧水深大于 20 m 的海域, 在靠近虎门口附近海域也有小范围的低氧区出现. 河口湾外海域溶解氧亏损最为严重, 最低 DO 值位于 29 号站, 仅为 1.38 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 如果不考虑观测站位的限制, 实际发生缺氧的范围可能会向东南覆盖更广的海域.



红线代表 DO 为 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图 2 珠江口海域表层和底层温度、盐度和 DO 分布等值线

Fig. 2 Temperature, salinity, and DO distributions of surface and bottom waters in August, 2011

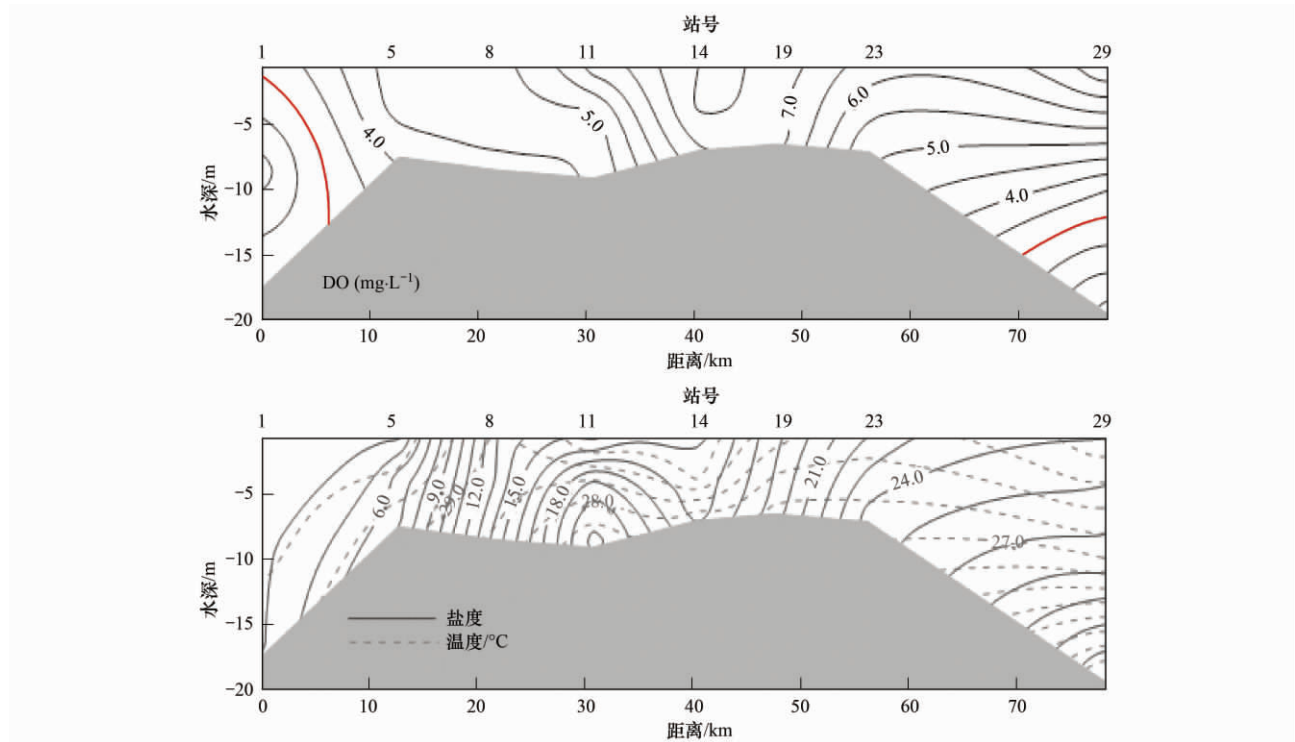
相关性分析结果表明, 底层 DO 与水深和温度都达到显著相关的水平, 其中与水深呈负相关($P = -0.711, r = 0.000$), 与温度呈正相关($P = 0.550, r = 0.002$), 而与盐度的相关关系未达到显著水平, 说明与水温有关的生物地球化学过程对底层 DO 的

分布有显著影响. 表层水和底层水之间的 ΔDO 与 ΔT 和 ΔS 都呈现极显著的相关关系($P = 0.946, r = 0.000$; $P = -0.901, r = 0.000$), 即海水的稳定程度越大, 表底层的 DO 差越大, 显示了水体层化作用的力量.

2.2 温度、盐度和溶解氧的断面特征

为了进一步了解珠江口 DO 的分布特征,本研究选取比较具有代表性的 A 断面进行分析。根据图 3 可知,DO 浓度在整个断面上具有较强的层化(表层 > 底层),其中湾外 29 号站表层水和底层水的 DO 差甚至达到 $6.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。另一方面,珠江口低氧区明显出现在河口上游和湾外附近海域,这与 2009 年夏季底层 DO 的分布相一致^[12]。

从温度和盐度的变化来看,整个断面表底层的温度差和盐度差呈现湾顶和浅滩小,湾外和深槽大的分布格局,最大温度差 (6.41°C) 和盐度差 (6.95) 出现在湾外。需要特别注意的是,调查期间盐度小于 10 的冲淡水海域仅在上游少数站位出现。在整个断面上,由于密度急剧变化(温度差和盐度差共同作用)造成的水体层化现象主要出现在湾外和深槽水域,这与河口低氧区的分布基本一致。



红线代表 DO 为 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图 3 本航次 A 断面上 DO、温度和盐度的垂直分布

Fig. 3 DO, temperature and salinity distributions along the section A in August, 2011

2.3 悬浮物和相关生物化学要素的水平分布

浮游植物的生长和死亡降解过程是引起水体 DO 含量变化的重要部分。脱镁叶绿素是 Chl-a 的早期降解产物,水体中 Pha 与 Chl-a + Pha 的比值常被用来作为判别指示浮游植物降解程度的重要参数,比值越大说明浮游植物降解越快,反之亦然^[19]。夏季珠江河口底层水体叶绿素 a、脱镁叶绿素和 Pha/(Chl-a + Pha) 之比的分布如图 4(a) ~ 4(c) 所示。从整个珠江口海域来看,叶绿素 a 和脱镁叶绿素含量的高值区出现在河口上游偏东和河口中游,低值区则出现在内伶仃岛以北海域,这与底层悬浮物的高浓度区相吻合。对于 Pha/(Chl-a + Pha) 之间的比值,其分布特征恰好与叶绿素和脱镁叶绿素相反。

N、P 是海洋生物生长繁殖所必需的营养元素,

是控制海洋初级生产力的重要因子。浮游植物的繁殖生长消耗水体中的营养盐;而浮游植物的消亡和有机质的分解使其获得再生。在这个生物地球化学循环过程中,水体中的 DO 也发生了变化,它与营养元素有非常密切的关系。图 4(d) ~ 4(f) 是河口底层水体 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、DIP 和 N/P 比值的分布。总体上, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 DIP 的分布呈现自口门向外逐渐降低的变化趋势,但二者的生物地球化学行为性质不同,形成各自的局部特征变化。浮游植物光合作用将产生大量颗粒态有机碳,在向底层输送过程中将进行生物化学氧化,从而消耗大量的底层 DO,造成底层氧的亏损。图 4(g) ~ 4(i) 显示了河口底层悬浮物、POC 和 PN 的分布特征。从中可以看到,POC 和 PN 在空间上的变化趋势相一致,相关分析的结果也显示,珠

江口 POC 和 PN 含量之间存在较为明显的相关性.

对 DO 与悬浮物和其他生物化学要素的相关性分析发现,底层 DO 与叶绿素 a 之间呈现显著正相关($P=0.565, r=0.001$),与 $Pha/(Chl-a + Pha)$ 的比值呈负相关($P=-0.470, r=0.010$),而与 SS、DIN、 PO_4^{3-} 、POC 和 PN 的相关关系未达到显著水平. 表底层的 ΔDO 与 ΔPO_4^{3-} 、 ΔPN 和 ΔPP 没有显著水平的相关关系,但与 ΔDIN 、 ΔSS 和 ΔPOC 达到显著的相关水平($P=0.625, r=0.030; P=0.637,$

$r=0.026; P=-0.876, r=0.000$) 其中与 ΔDO 与 ΔPOC 呈极显著的正相关,这在一定程度上说明悬浮颗粒态有机碎屑的降解过程是控制底层水体 DO 分布的主要因素.

3 讨论

3.1 极端干旱年份珠江河口低氧的形成机制

3.1.1 河口上游与河口下游低氧区的形成机制差异
夏季底层水体低氧($DO < 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 是珠江口

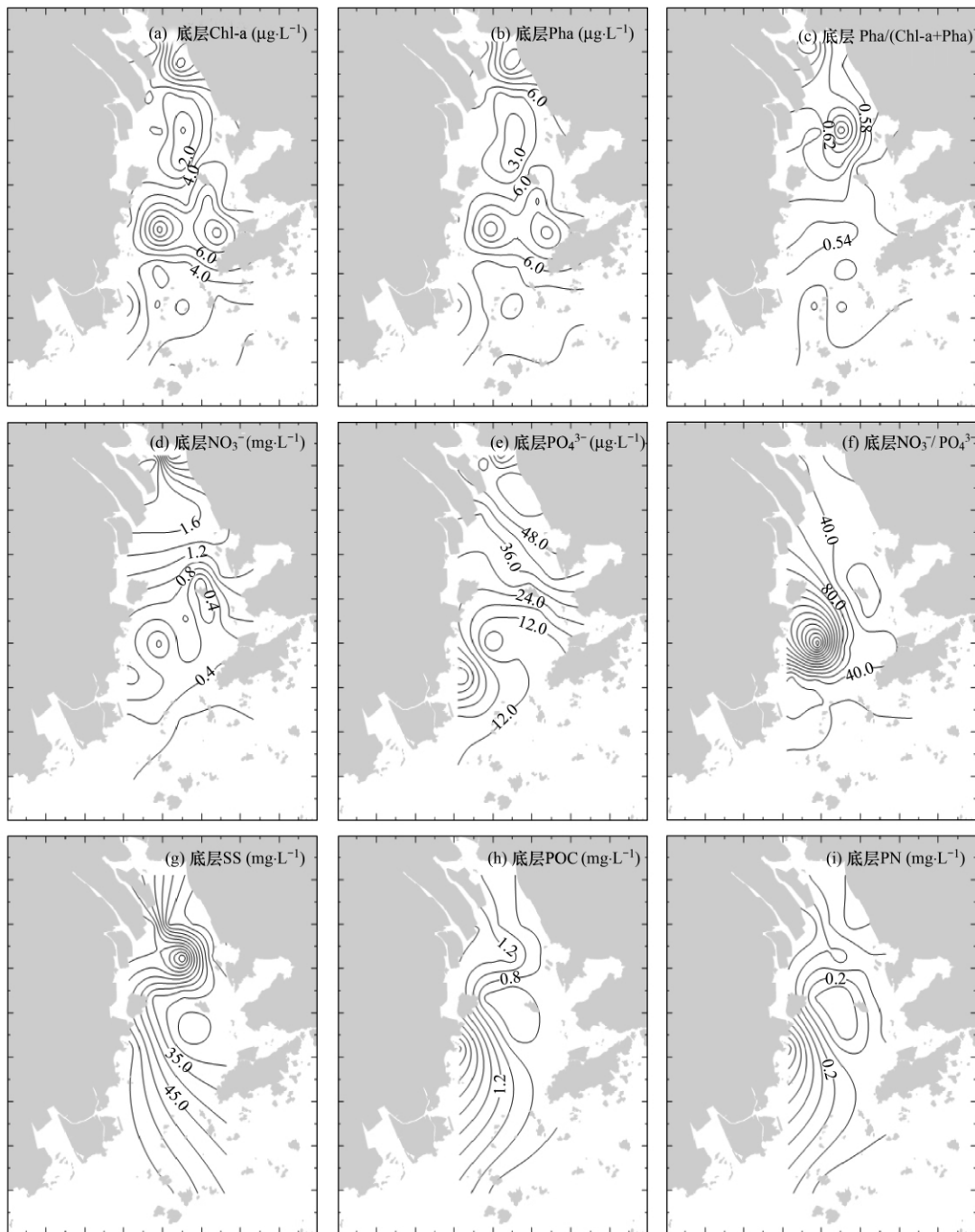


图4 珠江口海域底层水体有关生物地球化学要素分布等值线

Fig. 4 Distributions of several biogeochemical parameters of near-bottom waters in the Pearl River Estuary

及邻近海域的普遍现象^[10 20]。然而,目前关于珠江口低氧形成机制等方面的研究还相对有限,且其中多数是利用 1999 年夏季及以前资料进行探讨。虎门上游河段(特指虎门至黄埔河段)低氧现象四季均有发生。研究表明,沿岸城市大量排放的有机物质的强烈耗氧分解和氨氮氧化过程(硝化作用)是形成上游河段缺氧的主要原因^[20 21]。本调查中,虎门附近海域有机碳和氨氮含量同样维持在较高的水平,笔者推断口门局部低氧水体的出现可能与上游低氧径流(有机质的耗氧分解和氨氮氧化引起)的输入和藻类新陈代谢以呼吸作用占优势有关(图 4)。

3.1.2 与正常径流年份缺氧机制的差异

干旱事件是区域气候的自然特征之一。在珠江流域,存在持续时间和重现期不一的干旱事件,其中珠江三角洲地区的干旱风险更为严重^[22 23]。相比于径流量正常或偏高的 1999 年夏季,2011 年夏季航次珠江口底层低氧区的位置存在明显差异。其中 1999 年夏季低氧区主要分布在西部浅滩(水深 < 5 m)和中滩附近水域,而 2011 年同期低氧区则主要位于万山群岛东部海域,水深大于 20 m。在底层 DO 分布格局上,1999 年呈现近口门处和外海较高(DO: 4 ~ 6 mg·L⁻¹),湾内水域较低(DO: 2 ~ 4 mg·L⁻¹)。这与 2011 年夏季底层 DO 的分布正好相反,说明两个年份 DO 的主要控制因素可能存在较大差异。研究表明,1999 年夏季底层水体低氧现象的形成主要与强烈的水体(盐度)层化作用和沉积物耗氧过程(有机物的成岩分解和矿化)有关^[10 24]。

在珠江河口,珠江径流量、风场和深层陆架水等都是影响本海域的动力因素^[25~27]。根据马口站径流资料,1999 年航次前 1 个月内日均径流量相对较高,其中在最后 10 d 的流量均在 25 000 m³·s⁻¹ 以上;相比于历史资料,2011 年同期为极端枯水月份,马口站 7 月日均径流量为 7 560 m³·s⁻¹,仅占多年月平均径流量的 60%。由于珠江径流量较小,使得 2011 年夏季珠江口表层盐度明显大于 1999 年,冲淡水的扩展范围则显著缩小。以 10 盐度等值线为例,1999 年夏季最远可至万山群岛附近海域,而 2011 年夏季则位于淇澳岛以北海域(图 2)。对于径流量较大的年份,河口内部容易出现较强的盐度层结^[12 27];而在径流较低或者极端干旱年份,盐度层化作用的强度会明显减弱,且主要出现在河口湾外,这与 2009 年同期(径流较低)的观测大体相似^[12]。然而,有别于 2009 年夏季的是,2011 年航次期间

(或前期)并没有热带风暴或台风在珠江口及其附近海域登陆或过境,根据香港天文台横澜岛自动气象站(114°18'12" 22°10'56")资料显示,调查航次期间及前 1 周内平均风速为 4.7 m·s⁻¹,分别低于 1999 年和 2009 年同期的 5.3 m·s⁻¹和 7.0 m·s⁻¹。对比 1999 年和 2011 年夏季的底层盐度,30 等盐线的分布基本一致,大体位于河口下游的东南部海域,因此两个观测年份底层 DO 的差异不大可能是由于深层陆架水强度变化引起的。

根据前人的研究成果,入海径流量的大小是河口水体(淡水)滞留时间的决定性因素,上游径流量减少通常导致水体滞留时间增加^[27~29]。诸多研究表明,珠江河口水体滞留时间在低径流量(< 4 000 m³·s⁻¹)的枯季约为 1 个月,而在高径流量(> 10 000 m³·s⁻¹)的洪季大概在 10 d 左右,二者之间相差数倍^[27 28]。由于调查期间珠江流域出现极端干旱气候,河口水体滞留时间相对于正常径流年份将显著增长。水体层化作用强度尽管在极端干旱年份明显降低,并且盐度差和温度差引起的垂向分层主要出现在河口湾外,使得物理分层对整个河口生源要素(营养盐和有机物)和 DO 垂向输送和补充的阻碍作用相对有限。然而,由于极端干旱年份河口水体滞留时间显著延长,造成河流携带的 SS 和河口内部浮游植物较长时间停留在河口范围内。因此,与 1999 年和 2009 年相比^[12 24],2011 年夏季珠江口 SS 和 Chl-a 的平均含量和最大值更高,同月中下旬珠海附近海域甚至出现了双胞旋沟藻(*Cochlodinium geminatum*)赤潮事件^[30]。这些生源和部分非生源有机碎屑在沉降到底层水体和沉积物的过程中逐渐发生降解,并消耗大量的 DO。在与水体分层的共同作用下,继而引起缺氧现象的发生。极端干旱事件引起水体 DO 浓度降低在国外若干河口也得到证实,如在美国的 Neuse 河口^[15](Neuse River Estuary)和纳拉甘西特湾(Narragansett Bay)^[16]。

综上所述,2011 年夏季珠江口底层缺氧现象的发生主要与极端干旱情况下上游径流锐减导致河口水体滞留时间延长,而水体分层和颗粒态有机质的有效沉降与降解使得底层水体氧的消耗得不到及时补充密切相关。另外,附近海域底部地形可能也在河口湾外底层缺氧的形成过程中起了重要的作用,其原因在于深槽限制了槽内部水体与周围富氧水体的交换,使得深槽内部水体相对稳定,从而促进了底层缺氧现象的发生和维持。由于未来的气候变化可

能会加剧珠江流域极端气候事件发生的频率和强度^[31] 因此, 珠江河口生态系统对极端气候事件的响应是亟待进一步深入研究的重要课题。

3.2 珠江河口底层缺氧现象的年际变化

表1 是以往研究提供的数据, 尽管不同研究采用的测定方法可能不尽相同。从中可知, 珠江口底层水体缺氧现象呈现以下特征: ①主要发生在夏季(6~8月) 这与该季节水体层化作用较强有密切关系; ②并非在所有年份出现, 总体发生频率约为26%, 其中20世纪90年代较高(40%) 这可能与当

时开始重视海洋环境污染调查和大量生活污水未经处理就直接排放入河流有关; ③最低 DO 值的地理位置是变动的, 大致呈现由河口湾外向湾内逐年迁移的态势, 表明河口缺氧现象受到复杂因素的共同控制, 而这些因素由于径流和其他因素(如风和河口环流等)的影响呈现逐年变化; ④从历年最低 DO 值的角度来看, 近30年来, 珠江口底层水体缺氧程度没有表现出明显的增强或减弱趋势, 这与 Yin 等^[10]对1999年和1981年珠江口 DO 调查资料进行对比分析的结论基本一致。

表1 历年珠江河口底层水体季节性缺氧现象

Table 1 Historical record of locations with the minimum values of DO concentrations in the Pearl River Estuary

调查时间(年-月)	最小 DO 值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	最低测值位置(海区)	文献
1981-07	<2.00	112°56', 21°50'(珠江口西部海域)	[10]
1985-07	1.76	113°18', 21°50'(珠江口西部海域)	[32]
1990-07	0.93	113°18', 21°55'(高栏岛附近海区)	[11]
1992-06	1.77	113°47', 22°22'(万山群岛东部海区)	[33]
1996-08	1.17	114°05', 22°22'(担杆岛以北海区)	[33]
1999-07	2.07	113°44', 22°17'(伶仃洋西岸浅滩区)	[10]
2009-06	1.24	113°43', 21°59'(万山群岛东北海区)	[12]
2011-08	1.38	113°51', 22°02'(万山群岛东部海区)	本研究

4 结论

(1) 在珠江流域发生极端干旱事件的情况下, 2011年夏季珠江口湾外发现 DO 低于 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的底层低氧区域, 最低 DO 值为 $1.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2) 上游径流量剧减导致河口水体滞留时间延长, 密度跃层的形成和有机碎屑的有效沉降将大量消耗底层的氧, 并且补充缓慢, 使得底层水体溶解氧严重亏损。

(3) 珠江河口低氧区的最低 DO 值在过去30年间并未呈现出明显的变化趋势, 具体的原因值得进一步研究。

参考文献:

- [1] Daiz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems [J]. *Science*, 2008, **321**(5891): 926-929.
- [2] Rabalais N N, Wiseman W J, Turner R E, et al. Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf [J]. *Estuaries*, 1996, **19**(2): 386-407.
- [3] Hagy J D, Boynton W R, Keefe C W, et al. Hypoxia in Chesapeake Bay, 1950-2001: Long-term change in relation to nutrient loading and river flow [J]. *Estuaries*, 2004, **27**(4): 634-658.
- [4] Rabalais N N, Turner R E, Wiseman W J Jr. Gulf of Mexico Hypoxia, a. k. a. "The Dead Zone" [J]. *Annual Review of*

Ecology and Systematics, 2002, **33**(1): 235-263.

- [5] 李道季, 张经, 黄大吉, 等. 长江口外氧的亏损 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, **32**(8): 686-694.
- [6] 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): 910-914.
- [7] 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.
- [8] 颜天, 周名江, 邹景忠, 等. 香港及珠江口海域有害赤潮发生机制初步探讨 [J]. *生态学报*, 2001, **21**(10): 1634-1641.
- [9] 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.
- [10] Yin K D, Lin Z F, Ke Z Y. 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.
- [11] 李绪录, 吴英霞. 夏季珠江口海区贫氧现象的初步分析 [A]. 见: *广东海岛调查研究文集* [C]. 广州: 广东科技出版社, 1992. 10-16.
- [12] 杨威, 罗琳, 高永利, 等. 1999年和2009年夏季珠江口环境要素的对比与分析 [J]. *热带海洋学报*, 2011, **30**(4): 16-23.
- [13] Rabalais N N, Turner R E, Díaz R J, et al. Global change and eutrophication of coastal waters [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, **66**(7): 1528-1537.
- [14] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations [J]. *Climate Dynamics*, 2008, **31**(1):

- 79-105.
- [15] Wetz M S , Hutchinson E A , Lunetta R S , *et al.* Severe droughts reduce estuarine primary productivity with cascading effects on higher trophic levels [J]. *Limnology and Oceanography* ,2011 ,**56** (2) : 627-638.
- [16] Melrose D C , Oviatt C A , Berman M S. Hypoxic events in Narragansett Bay , Rhode Island , during the summer of 2001 [J]. *Estuaries and Coasts* ,2007 ,**30**(1) : 47-53.
- [17] 吴怡蓉. 7 月以来流域降雨偏少珠江防总开展抗旱保供水相关工作 [J]. *人民珠江* ,2011 , (4) : 35.
- [18] Parsons T R , Maita Y , Lalli C M. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis* [M]. New York: Pergamon ,1984.
- [19] Garibotti I A , Vernet M , Smith R C , *et al.* Interannual variability in the distribution of the phytoplankton standing stock across the seasonal sea-ice zone west of the Antarctic Peninsula [J]. *Journal of Plankton Research* ,2005 ,**27**(8) : 825-843.
- [20] Dai M H , Guo X H , Zhai W D , *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.
- [21] Dai M , Wang L , Guo X , *et al.* Nitrification and inorganic nitrogen distribution in a large perturbed river/estuarine system: the Pearl River Estuary , China [J]. *Biogeosciences* ,2008 ,**5** (5) : 1227-1244.
- [22] 肖名忠,张强,陈晓宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究 [J]. *地理学报* ,2012 ,**67**(1) : 83-92.
- [23] Zhang Q , Xiao M Z , Chen X H. Regional evaluations of the meteorological drought characteristics across the Pearl River Basin , China [J]. *American Journal of Climate Change* ,2012 ,**1** (1) : 48-55.
- [24] Zhang H , Li S Y. 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.
- [25] Dong L X , Su J , Wong L A , *et al.* Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume [J]. *Continental Shelf Research* ,2004 ,**24**(16) : 1761-1777.
- [26] Harrison P J , Yin K D , Lee J H W , *et al.* Physical-biological coupling in the Pearl River Estuary [J]. *Continental Shelf Research* ,2008 ,**28**(12) : 1405-1415.
- [27] Wong L A , Guan W , Chen J C , *et al.* A model study of influence of circulation on the pollutant transport in the Zhujiang River Estuary and adjacent coastal waters [J]. *Acta Oceanologica Sinica* ,2004 ,**23**(2) : 225-237.
- [28] 裴木凤. 珠江口水体交换及主要污染物环境容量的研究 [D]. 广州: 中山大学 ,2010. 52-68.
- [29] 周峰,黄大吉,倪晓波,等. 影响长江口毗邻海域低氧区多种时间尺度变化的水文因素 [J]. *生态学报* ,2010 ,**30**(17) : 4728-4740.
- [30] 广东省海洋与渔业局. 2011 年广东省海洋环境状况公报 [R]. 广州: 广东省海洋与渔业局 ,2012. 46-47.
- [31] Chen Y Q , Zhang Q , Xu C Y , *et al.* Multiscale streamflow variations of the Pearl River basin and possible implications for the water resource management within the Pearl River Delta , China [J]. *Quaternary International* ,2010 ,**226**(1-2) : 44-53.
- [32] 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]. 北京: 海洋出版社 ,1987. 158-184.
- [33] 韩舞鹰,吴林兴,马克美,等. 南海海洋化学 [M]. 北京: 科学出版社 ,1998.