

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 04. 010

中国部分河口及其近海水域缺氧现象研究

龚松柏,高爱国,倪冠韬,朱旭旭,张延颇,侯昱廷

(厦门大学海洋与地球学院,福建 厦门 361102)

摘要:对长江、珠江等河口及其近海水域缺氧现象与影响因素进行研究,结果表明,主要分布于长江与珠江河口及其邻近海域的缺氧现象,夏季(6—8月)达到最盛,秋冬季消失;长江口的缺氧区域主要位于30.75°N~32°N,122.5°E~123.25°E附近海域,具有南北2个缺氧中心;珠江口缺氧程度相对较轻,缺氧区域主要在广州黄埔区河段至虎门水域和伶仃洋;辽河、钱塘江、海河等河口区域也时而出现零星的缺氧现象;水体缺氧受控于多项环境要素,物理层化作用是缺氧产生的最初诱因之一,陆源污染物的分解则是重要的耗氧负荷;各河口区特征各异,潮汐、洋流、营养盐、叶绿素a等要素对缺氧区的范围、程度和持续时间影响程度不一。

关键词:河口;近海;水域缺氧;溶解氧

中图分类号:P734 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)04-0062-08

Progress in research of hypoxia in estuaries and coastal areas in China

GONG Songbai, GAO Aiguo, NI Guantao, ZHU Xuxu, ZHANG Yanpo, HOU Yuting
(College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: In order to study hypoxia in the main estuaries and adjacent coastal areas in China, we compared the hypoxia in the estuaries of the Yangtze River, the Pearl River, and other rivers, and analyzed the factors. We found that hypoxia mainly occurred in the estuaries of the Yangtze River, the Pearl River, and the adjacent coastal areas; it had the most significant increase in the summer (from June to August) and disappeared in the autumn and winter. The hypoxia zone in the Yangtze River Estuary was mainly located in the area with latitudes from 30.75°N to 32°N and longitudes from 122.5°E to 123.25°E, and there were two hypoxia centers in the south and north, respectively. The degree of hypoxia in the Pearl River Estuary was relatively moderate, and hypoxia mainly occurred from the Huangpu section to Humen waters in Guangzhou and in the Lingdingyang Channel. In addition, hypoxia occasionally occurred in the estuaries of the Liaohe River, Qiantang River, and Haihe River. We also found that hypoxia was subjected to many environmental factors, of which the stratification of water was one of the initial factors and the decomposition of terrigenous pollutants was a major factor of oxygen consumption. Tides, upwellings, nutrients, and chlorophyll-a had different influences on the scale, degree, and duration of hypoxia, due to the various characteristics of the estuaries.

Key words: estuary; coastal area; hypoxia in water body; dissolved oxygen

DO 是水体生物地球化学循环的重要参与者,是维持生物生存繁殖和生态系统平衡发展的关键因素,是水环境质量的评价指标之一,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^[1-4]。一般认为水体 DO 质量浓度低于 2~3 mg/L 即为缺氧(或低氧)^[5-7]。水体缺氧常常导致海区生物量减少,鱼类患病率增加,生物多样性降低,生态系统结构改变,甚至对河流与海洋的生态系统造成整体性破坏^[8-9],如某些鱼类在 DO 质量浓度低于 3 mg/L 就开始出现生理反应^[10];当水体中 DO 质量浓度低于 2 mg/L 时,底层拖网的渔获量就几乎为零^[11]。且由于表层沉积物的氧化还原环境遭到破

作者简介:龚松柏(1993—),男,硕士研究生,研究方向为海洋地质研究。E-mail:gsongbai@stu.xmu.edu.cn

坏,原先积聚在沉积物中的有毒、有害物质可能重新活化并释放到水体中,造成严重的二次污染^[12]。

河口区是河流与海洋相互作用的耦合地带,具有独特的地理环境,河流携带的大量物质在此区域堆积,同时又受到海洋潮汐、洋流和波浪等海洋营力的影响。河口区也是人类活动频繁、工农业集中的区域^[13],人类排放的工业污水和生活污水将大量还原性污染物携带入海,给河口和近海环境造成巨大压力。在自然水体层化和人为富营养化双重作用下,河口区及其邻近海域时常发生缺氧现象^[11]。在国外发现早、影响较大的河口及其邻近海域缺氧现象当属墨西哥湾^[6]。中国河口和近岸区域的低氧现象早在 20 世纪 50 年代末被发现,低氧现象研究则始于 20 世纪 80 年代^[14]。近年来,针对河口和近海 DO 的研究^[15-17] 逐渐增多,对河口和近海区 DO 的调查涉及空间范围较广,时间跨度较长,积累了大量的研究成果。笔者对长江、珠江、辽河、海河、黄河、钱塘江和闽江等河流河口区及其邻近海域的缺氧现象进行了总结,归纳其河口和邻近海域缺氧现象的时间和空间分布特征,分析影响 DO 分布变化的环境要素,并探讨低氧区的形成机制,以期为今后缺氧现象的进一步研究、河口水质保护和环境管理等提供参考。

1 河口及其近海水域缺氧现象研究概况

早在 1985 年,Rosenberg^[18]便在波罗的海近岸发现面积达 84 000 km² 的缺氧现象。著名的墨西哥湾北部“死亡水域”的 DO 质量浓度曾长期低于 2 mg/L,2001 年墨西哥湾内缺氧面积达 20 700 km²^[6]。Mee^[19]曾于 2005 年报道黑海西北部缺氧面积约为 40 000 km²。另外,在阿拉伯海、孟加拉湾以及太平洋东北部和东南部均有不同程度的缺氧现象^[20]。据不完全统计,缺氧现象在欧洲、美国东部以及日本等国家和地区的近岸海域总面积超过 245 000 km²^[21]。总体上,中国河口及其邻近海域 DO 质量浓度,在空间分布上呈现河口区较低,近海区域较高;在季节上体现冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的变化规律^[14-17]。从具体区域来看,缺氧现象以长江口和珠江口及其近海水域最为严重^[16,22];从缺氧现象的生消过程来看,缺氧现象自夏初 5—6 月形成,始于河口局部底层水;7—8 月发育到最盛,至秋季 9—10 月有微弱残余,11 月基本消失,其中长江口缺氧面积大且持续时间久^[22]。

1.1 长江口及其近海

长江口及其近海缺氧现象发现于 1959 年 8 月,观测到的 DO 质量浓度最小值为 0.49 mg/L,缺

氧面积约为 1 800 km²;20 世纪 80 年代也偶有低氧现象发生,但程度较轻^[14](图 1)。1999 年 8 月观察到的缺氧现象处于水深 10 m 以下,其长度可达 250 km,平均厚度约 20 m,估测面积达 13 700 km²,约是 1959 年 8 月的 7.6 倍^[23]。2006 年夏季缺氧水域分布在盐度为 3.28% ~ 3.36% 之间的水域,是一次程度较重的缺氧现象;从南北方向上看,北端缺氧区域幅度较宽阔,尤其是 32°N 纬线以北更为严重,DO 质量浓度低于 2 mg/L;南端较狭窄,并有延伸至浙江北部沿岸的趋势;DO 质量浓度小于 3 mg/L 的面积约为 85 200 km²,DO 质量浓度最低为 1.10 mg/L^[24-25]。

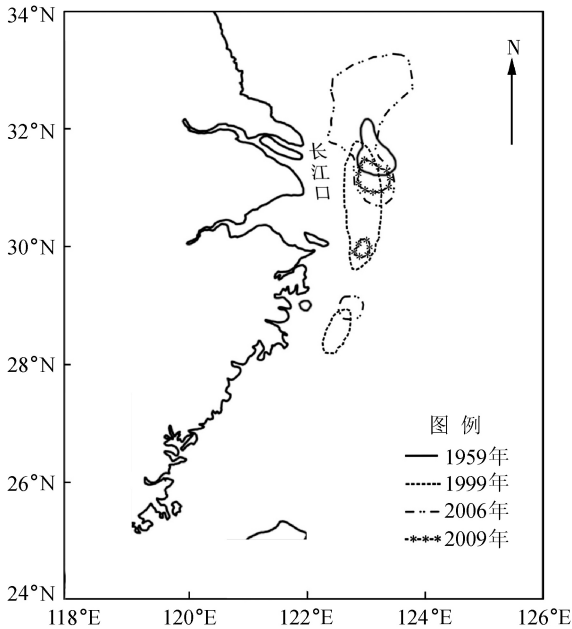


图 1 长江口夏季缺氧范围的年际变化

近年来,发现长江口底层缺氧中心区因时间不同而略有变动,但主要位于 122.5°E,东西横跨 120 km,南北向延伸约 100 km,南部界限估计可达 29°N,即能延伸至浙江北部沿岸;北界因受黄海富氧冷水团阻挡,维持在 32°N 左右^[26-27]。韦钦胜等^[22]曾研究长江口缺氧现象的年内生消过程,发现长江口缺氧现象于 6 月始发,7—8 月达到强盛,入秋后开始消退,至冬季完全消失。

需要指出的是,1999 年以来长江口及其近海夏季缺氧现象空间形态的显著特征具有“双核分布”趋势。“双核”是指在长江口以北以及浙江北部沿岸各存在 1 个缺氧中心(图 1),其中浙江沿岸缺氧中心主要位于象山港外 20 m 等深线 29°N ~ 30°N 水域;长江口附近缺氧中心主要位于 122.5°E,31°N ~ 32°N 水域。与浙江沿岸缺氧中心相比,长江口附近的缺氧范围更大,DO 质量浓度更低;而浙江沿岸缺氧面积相对较小,DO 质量浓度相对较高。这显示缺氧中心与江河入海口位置、水动

力状况及耗氧物质入海通量密切相关。从年际变化角度来看,“双核”均有向北移动的趋势,且缺氧面积不断扩大,而南部水域的缺氧范围却有缩小的趋势^[22,25]。由于不同航次所设站位和覆盖面积不同,不同年份耗氧物质入海通量不同,以及研究海域动力环境时空变化较大,“双核分布”特征并非每个航次都能观测到,这也体现出缺氧现象形成及其变异的复杂多变性^[25]。

1.2 珠江口及其近海

早在1981年7月,珠江口邻近水域便观测到底层DO质量浓度小于2 mg/L的缺氧现象,但缺氧范围较小;1990年7月,甚至观测到DO质量浓度为0.93 mg/L的低值^[4]。1999年缺氧现象出现在伶仃洋中西部水域,其中伶仃洋中部DO质量浓度较高,DO亏损程度较低^[28-29](图2)。2003年夏季底层缺氧现象在广州黄埔至东莞河段均十分明显,DO质量浓度为1.98~2.25 mg/L^[30]。2009年底层缺氧现象向伶仃洋东南部移动,DO质量浓度呈现由口门内向口门外递减的变化趋势,在口外万山群岛北侧出现大片缺氧区域^[29]。2011年夏季缺氧现象在河口湾水深大于20 m的水域发育,在万山群岛北部底层DO质量浓度仅为1.38 mg/L,实际缺氧范围可能向东南外海延伸至更广阔的海域^[4]。总体上,珠江口的缺氧范围局限于伶仃洋中西部浅滩和磨刀门水域^[16]。

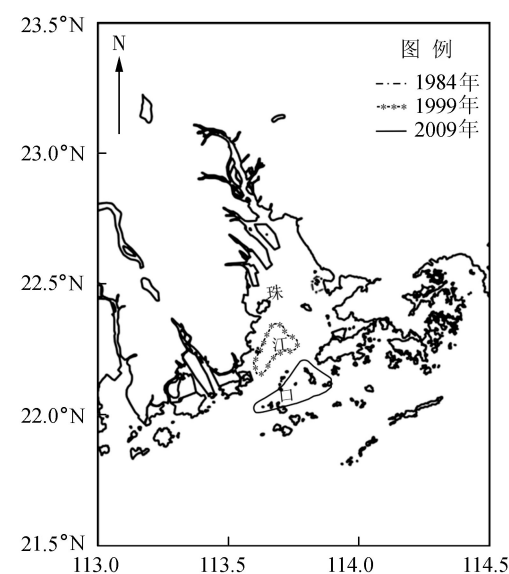


图2 珠江口夏季缺氧范围的年际变化

珠江口及其邻近海域缺氧现象的形成和演变与长江口既有共性又有特殊性。共性在于两者缺氧现象均集中发生于夏季(6—8月),为季节性缺氧,这与该季节水体层化作用较强有密切关系;差异在于珠江口缺氧现象并非连续发生,在20世纪90年代发生频率较高,总体变化趋势不明显;此外,珠江口

缺氧的程度和范围较长江口轻、小,且最低DO质量浓度变化幅度也不大^[29-30]。

1.3 其他河口及其近海

辽河、钱塘江等河口及其邻近海域缺氧程度相对较轻。2003年,辽河入海段缺氧区域于营口市、辽河公园等河段发育,DO质量浓度小于4 mg/L的面积为60~80 km²^[31];也曾于2009年夏季观测到1.36 mg/L的极低值,局部河段甚至低于1 mg/L^[2]。这主要是由于初级生产力对辽河口DO的贡献很小,不足以抵消有机污染物等物质对DO的消耗^[31-32];其次营口河段存在微弱的垂向分层现象,河流输送的有机污染物是该段的主要耗氧因素;而在河口区域,由于河水与潮汐带来的富氧海水相互混合,因此缺氧现象并不明显^[33]。

海河下游及河口段存在2个缺氧区域,一个位于河口淡水区域;另一个位于塘沽口盐度1.2%~1.3%的水域,该处DO最低质量浓度仅为1.71 mg/L^[34]。2001年,在海河河口区曾观测到DO质量浓度低至1.45 mg/L的极低值^[35],是该河段近年来有文献记录的DO质量浓度最低水平。由于接受多个排污口排放的大量污染物,2007年海河干流8个排污口污水排量高达9351 m³/a,导致海河河口有机污染和无机污染严重^[36],其NH₄⁺-N和还原性污染物耗氧是塘沽口段缺氧的主要原因^[37-38]。

钱塘江下游富阳段曾出现缺氧现象,缺氧区位于距离富春江水电站50~60 km处,从河道深槽到边滩均出现缺氧现象,且缺氧程度相差不大^[39];发生时间集中在夏季和冬季,2008年5月底层DO质量浓度曾一度低于1 mg/L^[40-41]。调查显示,TN和TP质量浓度在相同水域也达到最高值。该河段两岸为富阳城区及其工业区,工业分布十分密集,工厂排放的污水特别是造纸厂排放的污水,是造成该河段DO质量浓度降低和水质恶化的主要原因^[41],但杭州湾暂未有缺氧现象的报道。

黄河口DO研究则以渤海控制断面为主。夏季在断面中部底层出现DO质量浓度较低的水体,但没有达到缺氧的程度,其DO质量浓度较低与黄河口接受的陆源和人类生产生活污染物有关^[42]。虽然环渤海的海河与辽河均有不同程度的缺氧现象出现,但渤海大部分水域暂未发生缺氧现象,推断其原因主要在2方面:一是虽然海河与辽河对渤海缺氧都有一定程度贡献,但远小于黄河的影响;二是黄河本身输送的有机物和污染物质量浓度相对较低,且有下降的趋势,因此对河口和近海水体造成的耗氧负荷较小^[43-44]。

闽江是中国大陆东南沿海最大的河流,下游河

口段流经福州市汇入台湾海峡,但有关闽江口 DO 的研究较少。2008 年 1—12 月,闽江口 DO 质量浓度介于 5.46~8.03 mg/L 间,饱和度在 77%~111% 间变化,未出现缺氧现象^[45]。历史资料也反映出闽江下游与河口水域未曾出现缺氧的迹象,年均 DO 质量浓度最低值也都高于 4 mg/L^[46]。

2 影响缺氧现象消长的因素分析

2.1 水动力

水体垂直运动减弱是导致低氧现象出现的重要诱因。河口及其近海水域之所以会形成典型的层化水体,其原因是低密度的淡水覆盖于高密度的咸水之上。具体来说,中国东部、南部河流均在夏季 6—8 月达到汛期,河流径流量显著增加,大量相对高温低盐的淡水进入河口区及其近海^[16],在外海洋流的影响下,上下层水文差异可能进一步扩大^[25]。水体上层高温低盐低密度,下层低温高盐高密度,盐度-密度锋面发育,因此易在锋面内形成稳定的层化结构。表层富氧水是底层 DO 的主要来源,但层化结构阻碍了上下层水体 DO 的交换过程。因此水体层化作用越强,底层缺氧程度越严重。对长江、珠江河口和邻近海域缺氧现象的众多研究均表明,缺氧水域存在明显的盐度和密度跃层,表层、底层的 DO 质量浓度差值与表层、底层盐度差和温度差密切相关,且水体层化稳定程度与 DO 表层底层差异达到显著相关水平^[24]。

影响水体垂向运动的另一个重要因素是洋流。当河口径流作用力有限时,其携带的陆源有机颗粒较少,耗氧过程就可能由上升流携带的物质控制。李宏亮等^[47]认为长江口外缺氧范围向外延伸至 122.5°E 就与上升流有关。另外,中国边缘海又受黑潮、台湾暖流等流系的影响,夏季台湾暖流相对高盐低温,在河流冲淡水的共同作用下,可使缺氧水域的表层、底层温差达到 6℃^[23, 25],会有效增强水体层化强度,加剧底层水体缺氧。

潮流带来的外海水与径流相互作用的程度,直接影响到底层水体 DO 质量浓度的分布和变化趋势,甚至影响缺氧区的范围和缺氧持续时间。潮汐作用的强度因河口地形地貌、水流特性等因素而不同。一般情况下,大潮时海水与淡水垂直混合剧烈,DO 垂直交换作用也相应增强;而小潮时 DO 的垂直交换作用明显减弱,底层水体中 DO 被各种生物作用消耗,上层富氧水又不能及时补充,更易造成底层缺氧。如珠江口内、外伶仃洋表层 DO 质量浓度等值线涨潮时呈东西走向,落潮时呈南北走向;在一个潮周期内,潮汐对伶仃洋西部浅滩的影响较小,水体

混合程度微弱,为缺氧环境的形成创造了条件^[48-49]。同时在枯水年份径流量较小的情况下,可能使河口层化的程度较正常年份明显降低,由于径流作用较弱,从而延长了河流输送物质在河口区域的停留时间,进而促进浮游植物的暴发,甚至造成赤潮现象,导致河口区生源有机物和非生源有机物得到有效沉降和降解,最终引发底层水体缺氧^[4]。

2.2 营养盐与叶绿素 a

叶绿素质量浓度是衡量浮游植物现存量的指标之一,其中叶绿素 a 质量浓度还可以作为衡量浮游植物光合作用效率的指标。叶绿素 a 质量浓度升高意味着初级生产力增加以及浮游植物向水体释放氧气通量增加,因此叶绿素 a 质量浓度与 DO 质量浓度呈显著的正相关关系^[50]。但浮游植物暴发后,浮游动物和浮游细菌等也大量繁殖,尤其在赤潮暴发期间,浮游动物的呼吸作用会大量消耗 DO,且表层浮游细菌快速生长繁殖也会迅速降解有机质并消耗 DO;同时这些浮游生物死亡后部分残体沉降进入底层水,在分解过程中消耗 DO,继而成为潜在的耗氧因素。在水体层化等因素的共同作用下,表层叶绿素 a 质量浓度较高的水域其底层也可能会出现缺氧现象^[47]。另外在局部叶绿素 a 质量浓度较低的水域,初级生产力较低,光合作用对 DO 质量浓度增加的贡献较小,不起决定性作用,且叶绿素 a 与营养盐亦不相关^[51]。叶绿素 a 与 DO 关系的不确定,表明浮游植物初级生产力的变化可能不是影响 DO 变化的主要过程。

营养盐为浮游植物大量繁殖提供了物质基础,刺激浮游植物的暴发和叶绿素 a 的升高,光合作用加强,可能使局部水域 DO 迅速升高,甚至达到 190% 的过饱和状态^[47]。从这一角度而言,营养盐是刺激 DO 来源增强的要素,可能降低缺氧程度。

但值得说明的是,随着工业化和城镇化的发展,河流输送的陆源营养盐质量浓度不断升高,引起河口营养盐结构变动,DO 与营养盐关系亦随之发生改变,高营养盐浓度水域不仅初级生产力和叶绿素 a 质量浓度较高,其输出的有机负荷也相对较强。当这些浮游生物的呼吸作用和死亡后的分解作用耗氧超过光合作用产氧时,水体也可能会出现缺氧现象。在人口和工农业分布密集的长江和珠江等河口区,人类活动排放大量 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 营养盐进入河口区,导致水体 DIN(溶解无机氮)质量浓度较高,3 种 DIN 之间的相互转化,即 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 通过硝化作用转化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以及反硝化过程会消耗大量 DO,这也可能导致水体中 DO 质量浓度发生变化^[2, 12]。

另一方面,营养盐在河口水域可能存在独特的

地球化学作用,导致营养盐与 DO 关系复杂化。如在沉积物-水界面中,当 DO 充足时,促使 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,并与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 结合,同时抑制 $\text{PO}_4\text{-P}$ 向水体释放;而当 DO 浓度较低时,还原环境促使 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,利于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的释放,从而增加了水体中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度^[52]。也有研究表明,长江口 DIN 的主要形态随季节而变,春季以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主,冬季 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占比显著增加^[11]。DIN 形态的季节性变化进一步增加了营养盐与 DO 关系的不确定性和复杂性。

2.3 有机质耗氧

有机质分解的生化耗氧过程在底层水体缺氧现象中亦发挥着不可忽视的作用^[37-38]。生源有机质的自然分解过程消耗了底层水体的大量 DO。在夏季高温强光的条件下,浮游植物利用河口区的营养盐生长繁殖加速,其迁移出真光层的有机质在沉降过程中分解会大大增加底层水的耗氧量,进而造成底层水体缺氧^[53]。

由河流携带入海的还原性有机质则是造成水体缺氧的重要外因^[54-55]。在辽河口、珠江口等水域均发现 DO 与 COD 呈显著负相关关系^[56-57],且在珠江口缺氧区入海污染物耗氧占据主导地位^[55],表明还原性有机质在水体中的分解是重要的耗氧过程。监测表明,长江、珠江入海的 COD 通量巨大,近年来均处于中国河流前列^[58](表 1)。这些巨量耗氧物质在河口区域停留并下沉,消耗底层水的 DO;再加上物理层化作用的影响,深层水 DO 缺少足够的补充,极易导致缺氧现象发生。

表 1 2010—2015 年中国部分河流 COD 入海通量

河流	COD 入海通量					
	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
长 江	1078.4	954.3	777.0	626.5	733.2	665.9
钱塘江	99.2	82.3	84.7			
珠 江	63.2	65.9	46.5	53.6	116.3	191.3
闽 江	61.5	89.6	81.4	117.1	123.3	101.0
黄 河	54.9	18.1	44.0	34.9	15.6	28.3

另外,底泥中有机质的分解和再悬浮过程也是底层水体 DO 消耗的直接过程^[59],沉积和悬浮状态有机质残体的降解需要消耗大量 DO,如在加拿大圣劳伦斯河口沉积物耗氧比例约占底层 DO 亏损量的 2/3^[60],因此底泥耗氧也不容忽视。

综上所述,温度变化引起的水体层化阻碍了上下水层 DO 的交换,而物理过程(风)引起的水气交换是水体 DO 的重要来源,并通过垂直对流把表层的富氧水带到深部,降低底层缺氧程度;同时将底层的营养盐带到表层,促进表层浮游生物暴发;生物光合作用增强并向水体释放氧气,成为水体中 DO 的

另一重要来源;但是生物活动会导致水体中有机物增加,生物通过呼吸作用又消耗水中的 DO,但这一过程存在一定的时差或相位差。因此物理过程、生物作用和营养盐等因素既是 DO 的来源,也可能造成 DO 的消耗,但是人类活动输入的有机污染物则是不折不扣的耗氧因子。区分水体耗氧过程中这些因素的贡献率存在一定的难度,但是不同生物地球化学过程引起的氧同位素分馏会反馈到 DO 同位素组成中^[59],因此利用稳定氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}_{\text{DO}}$)来辨析各过程对耗氧的贡献率是新兴的技术手段,也是未来的研究方向。而对于某一河口区或者海区而言,径流荷载的大量营养物质和耗氧有机污染物是河口及邻近海域缺氧现象形成的重要原因,水体层化等物理过程与上述生物、化学过程一起直接或间接决定了水体缺氧的规模、程度和持续时间。

3 结 语

中国近海近年来呈现污染物种类不断增加、年通量居高不下、排污量严重超标等现象,陆源污染物始终是引发中国近海污染的主要人为原因。因此,首先要严格控制入海污染物的排放,严格控制污染物入海排放总量与标准;其次要加强研究,深入认识缺氧现象的生物地球化学过程,建立物理-化学-生态动力学耦合模式,揭示缺氧现象的演化规律;进一步掌握河口及其邻近海域 DO 分布现状,尤其在缺氧现象频发的季节和区域要重点监测,提升缺氧区的灾害预警能力;另外,要深入探讨不同时空条件下各要素对缺氧现象的影响权重与缺氧现象形成的机制机理,以期针对性地改善缺氧状况;最后要健全完善海洋保护法律法规,加强群众的海洋环境保护意识,提高广大群众保护海洋环境和海洋资源的责任感和自觉性。

参考文献:

[1] 叶丰,黄小平,刘庆霞. 2010 年夏季珠江口海域溶解氧的分布特征和海气交换通量 [J]. 海洋环境科学, 2012,31(3): 347-351. (YE Feng, HUANG Xiaoping, LIU Qingxia. Characteristics of dissolved oxygen and O_2 flux across the water-air interface of the Pearl River Estuary during summer 2010 [J]. Marine Environmental Science,2012,31(3):347-351. (in Chinese))

[2] 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 estuarine zone of the Daliaohe River [J]. Environmental Science, 2011,32

- (1):51-57. (in Chinese))
- [3] 石强,杨朋金,卜志国. 渤海冬季溶解氧与表观耗氧量年际时空变化[J]. 海洋湖沼通报,2014(2): 161-168. (SHI Qiang, YANG Pengjin, BU Zhiguo. The spatial-temporal change of dissolved oxygen and apparent oxygen utilization in the Bohai Sea in winter [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(2): 161-168. (in Chinese))
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] DIAZ R J. Overview of hypoxia around the world [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 275-281.
- [6] RABALAIS N N, TURNER R E, WISEMAN J W. Gulf of Mexico hypoxia, a. k. a. "The dead zone" [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 235-263.
- [7] 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.
- [8] BIANCHI T S, DIMARCO S, COWAN J, et al. The science of hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: a review [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(7): 1471-1484.
- [9] RABALAIS N N, TURNER R E. Coastal hypoxia: consequences for living resources and ecosystems [M]. Washington D C: American Geophysical Union, 2001: 241-267.
- [10] CHEN Chungchi, GONG Gwoching, SHIAH Fuhkwo. Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low-oxygen areas in the world [J]. Marine Environmental Research, 2007, 64(4): 399-408.
- [11] 李祥安. 长江口富营养化水域营养盐输送通量与低氧区形成特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [12] 王丽芳,戴民汉,翟惟东. 近岸、河口缺氧区域的主要生物地球化学耗氧过程[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(增刊1): 33-37. (WANG Lifang, DAI Minhan, ZHAI Weidong. Biogeochemical processes associated with dissolved oxygen consumption in hypoxic areas in coastal regions [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2007, 46(Sup1): 33-37. (in Chinese))
- [13] 林雪美. 河口地形动力学: 台湾河口地形变动的时空特性[M]. 台北: 吉欧文教事业有限公司, 2009: 1-6.
- [14] 朱卓毅. 长江口及邻近海域低氧现象的探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [15] 张哲, 张志锋, 韩庚辰, 等. 长江口外低氧区时空变化特征及形成、变化机制初步探究[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 469-473. (ZHANG Zhe, ZHANG Zhifeng, HAN Gengchen, et al. Spatial-temporal variation, formation and transformation of the hypoxia area off the Yangtze River Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(4): 469-473. (in Chinese))
- [16] 蔡树群, 郑舒, 韦惺. 珠江口水动力特征与缺氧现象的研究进展[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 1-8. (CAI Shuqun, ZHENG Shu, Wei Xing. Progress on the hydrodynamic characteristics and the hypoxia phenomenon in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(5): 1-8. (in Chinese))
- [17] 李若华, 曲璐, 高亮, 等. 钱塘江河口低溶解氧现象及形成机理初探[J]. 人民长江, 2013, 44(21): 100-103. (LI Ruohua, QU Lu, GAO Liang, et al. Preliminary study on low DO phenomenon and formation mechanism in estuary of Qiantang River [J]. Yangtze River, 2013, 44(21): 100-103. (in Chinese))
- [18] ROSENBERG R. Eutrophication: the future marine coastal nuisance? [J]. Marine Pollution Bulletin, 1985, 16(6): 227-231.
- [19] MEE L D. Eutrophication in the Black Sea and a basin-wide approach to its control [C]//Science and Integrated Coastal Management. Berlin: Dahlem University Press, 2001: 71-92.
- [20] PAULMIER A, RUIZ-PINO D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean [J]. Progress in Oceanography, 2009, 80(3): 113-128.
- [21] DIAZ R J, ROSENBERG R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems [J]. Science, 2008, 321(5891): 926-929.
- [22] 韦钦胜, 王保栋, 陈建芳, 等. 长江口外缺氧区生消过程和机制的再认知[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 187-206. (WEI Qinsheng, WANG Baodong, CHEN Jianfang, et al. Recognition of mechanish of the hypoxia in Changjiang Estuary [J]. Science in China, 2015, 45(2): 187-206. (in Chinese))
- [23] LI Daoji, ZHANG Jing, Huang Daji, et al. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 45(12): 1137-1146.
- [24] 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. (in Chinese))
- [25] 周锋, 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. (ZHOU Feng, HUANG Daji, NI

- Xiaobo, et al. Hydrographic analysis on the multi-time scale variability of hypoxia adjacent to the Changjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (17): 4728-4740. (in Chinese))
- [26] 陈东,张丽旭,刘汉奇,等. 长江口海域春夏季溶解氧分布特征及其相关因素分析[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(增刊1): 49-53. (CHEN Dong, ZHANG Lixu, LIU Hanqi, et al. Distribution characteristics and correlating factors analysis of dissolved oxygen in spring and summer in the Yangtze Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(Sup1): 49-53. (in Chinese))
- [27] 刘海霞,李道季,高磊,等. 长江口夏季低氧区形成及加剧的成因分析[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(2): 186-197. (LIU Haixia, LI Daoji, GAO Lei, et al. Study on main influencing factors of formation and deterioration of summer hypoxia off the Yangtze River Estuary [J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(2): 186-197. (in Chinese))
- [28] 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 Shiyun, LI Hongmei. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Pearl River Estuary in summer [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005, 44(6): 118-122. (in Chinese))
- [29] 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. (YANG Wei, LUO Lin, GAO Yongli, et al. Comparison of environmental constituents in the Pearl River Estuary during summer of 1999 and 2009 [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011, 30(4): 16-23. (in Chinese))
- [30] 魏鹏,黄良民,冯佳和,等. 珠江口广州海域 COD 与 DO 的分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1631-1637. (WEI Peng, HUANG Liangmin, FENG Jiahe, et al. Distribution characteristics of COD and DO and its influencing factors in the Guangzhou Sea Zone of the Pearl River Estuary [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 1631-1637. (in Chinese))
- [31] 李艳云,王作敏. 大辽河口和辽东湾海域水质溶解氧与 COD、无机氮、磷及初级生产力的关系[J]. 中国环境监测, 2006, 22(3): 70-72. (LI Yanyun, WANG Zuomin. The relation among dissolution oxygen (DO) to COD, inorganic nitrogen, reactive phosphate and primary yield power in the Liaodong Gulf and Seaport of Daliaohe [J]. Environmental Monitoring in China, 2006, 22(3): 70-72. (in Chinese))
- [32] 王继龙,海热提,郑丙辉,等. 辽河口水域溶解氧与营养盐关系[J]. 水资源保护, 2004, 20(4): 5-7. (WANG Jilong, HAI Reti, ZHENG Binghui, et al. The relationship between dissolved oxygen and nutrients in Liaoh River Estuary waters [J]. Water Resource Protection, 2004, 20(4): 5-7. (in Chinese))
- [33] 王继龙. 辽河口水质调查及低氧区形成机理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
- [34] 熊代群,杜晓明,唐文浩,等. 海河天津段与河口海域水体氮素分布特征及其与溶解氧的关系[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 1-4. (XIONG Daiqun, DU Xiaoming, TANG Wenhao, et al. Nitrogen distribution in the water of the Haihe River mainstream and estuary seawater and its relationship with water dissolved oxygen levels [J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 1-4. (in Chinese))
- [35] 文威,黄岁樑. 海河污染研究进展[J]. 水资源保护, 2007, 23(5): 55-58. (WEN Wei, HUANG Suiliang. Review on research of pollution in Haihe River [J]. Water Resources Protection, 2007, 23(5): 55-58. (in Chinese))
- [36] 张国立,唐广鸣,刘光学. 海河干流入河排污口调查与评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(4): 23-25. (ZHANG Guoli, TANG Guangming, LIU Guangxue. Investigation and assessment of wastewater outlets into main branch of Haihe River [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(4): 23-25. (in Chinese))
- [37] 马兴,胡万里,邵德智,等. 海河塘沽段水污染指数变化及其原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(1): 69-72. (MA Xing, HU Wanli, SHAO Dezhi, et al. Changes of water contaminative indexes and its reasons in Tanggu Reach of Haihe River [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(1): 69-72. (in Chinese))
- [38] 宋晓霄,闫浩文,田秉晖,等. 海河流域污染状况与常规污染指标数据分析[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 98-101. (SONG Xiaoxiao, YAN Haowen, TIAN Binghui, et al. Analysis of pollution in Haihe River and its conventional indicator [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 98-101. (in Chinese))
- [39] 董志勇,王硕硕,辜勇. 钱塘江河口区水生生态监测研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 87-92. (DONG Zhiyong, WANG Shuoshuo, GU Yong. Monitoring and investigation of aquatic ecosystem in Qiantang Estuary Zone [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 87-92. (in Chinese))
- [40] 潘向忠,高玉蓉,李佳,等. 钱塘江杭州段水体中溶解氧现状及其影响因素[J]. 环境保护科学, 2011, 37(4): 13-16. (PAN Xiangzhong, GAO Yurong, LI Jia, et al. Dissolved oxygen in water and influencing factors of Qiantang River in Hangzhou Section [J]. Environment Protection Science, 2011, 37(4): 13-16. (in Chinese))
- [41] 王硕硕. 钱塘江桐庐至七堡段边滩水质监测分析及岸边排放试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [42] 崔毅,杨琴芳,宋云利. 夏季渤海无机磷酸盐和溶解氧分布及其相互关系[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(4):

- 31-35. (CUI Yi, YANG Qinfang, SONG Yunli. Distribution of phosphate and dissolved oxygen and the relation in the Bohai Sea in summer [J]. Marine Environmental Science, 1994, 13(4): 31-35. (in Chinese))
- [43] 陈静生, 李荷碧, 夏星辉, 等. 近 30 年来黄河水质变化趋势及原因分析 [J]. 环境化学, 2000, 19(2): 97-102. (CHEN Jingsheng, LI Hebi, XIA Xinghui, et al. A study on water quality trend in the Yellow River system from 1960s to 1990s [J]. Environmental Chemistry, 2000, 19(2): 97-102. (in Chinese))
- [44] 俎婷婷, 鲍献文, 谢骏, 等. 渤海中部断面环境要素分布及其变化趋势 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(6): 889-894. (ZU Tingting, BAO Xianwen, XIE Jun, et al. Distribution and variation trends of the environmental factors in the central section of the Bohai Sea [J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Sciences), 2005, 35(6): 889-894. (in Chinese))
- [45] 郑小宏. 闽江口海域化学需氧量与溶解氧周年变化特征分析 [J]. 四川环境, 2009, 28(6): 65-67. (ZHENG Xiaohong. Characteristics analysis of annual change of COD and DO in Minjiang River Estuary [J]. Sichuan Environment, 2009, 28(6): 65-67. (in Chinese))
- [46] 罗丹. 闽江下游水体溶解氧变化及其成因初探 [J]. 海峡科学, 2015(6): 64-68. (LUO Dan. The variation and its reasons of dissolved oxygen in Minjiang River downstream [J]. Straits Science, 2015(6): 64-68. (in Chinese))
- [47] 李宏亮, 陈建芳, 卢勇, 等. 长江口水体溶解氧的季节变化及底层低氧成因分析 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 78-87. (LI Hongliang, CHEN Jianfang, LU Yong, et al. Seasonal variation of DO and formation mechanism of bottom water hypoxia of Changjiang River Estuary [J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(3): 78-87. (in Chinese))
- [48] LIN Weiqiang, LI Shiyun. Three-D water quality mathematical simulation of COD, DO, inorganic phosphorus and organic phosphorus in the Zhujiang River Estuary [J]. ACTA Oceanologica Sinica, 2003, 25(3): 129-137.
- [49] 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. (LUO Lin, LI shiyu, WANG Dongxiao. Modelling of hypoxia in the Pearl River Estuary in summer [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 729-735. (in Chinese))
- [50] GAO Xuelu, SONG Jinming. Dissolved oxygen and O₂ flux across the water-air interface of the Changjiang Estuary in May 2003 [J]. Journal of Marine Systems, 2008, 74(1): 343-350.
- [51] 崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因 [J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6309-6316. (CUI Yanping, WANG Baodong, CHEN Qiwen. The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze Estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6309-6316. (in Chinese))
- [52] 李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 等. pH 及 DO 对磷酸盐在长江口混合过程中迁移、转化的影响 [J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 497-502. (LI Hongmei, SHI Xiaoyong, CHEN Peng, et al. Effects of pH and DO on the migration and transformation of phosphate in the process of mixing in the Changjiang Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(4): 497-502. (in Chinese))
- [53] WANG Baodong, TU Jianbo. Biogeochemistry of nutrient elements in the Changjiang (Yangtze River) Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2005, 7(2): 72-79.
- [54] 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.
- [55] HE Biyan, DAI Minhan, ZHAI Weidong, et al. Hypoxia in the upper reaches of the Pearl River Estuary and its maintenance mechanisms: a synthesis based on multiple year observations during 2000-2008 [J]. Marine Chemistry, 2014, 167: 13-24.
- [56] 蔡阳扬, 岑竞仪, 欧林坚, 等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价 [J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(3): 221-227. (CAI Yangyang, CEN Jingyi, OU Linjian, et al. Distribution characteristics of COD, DO and nutrients in Pearl River Estuary and its eutrophication assessment in summer and autumn [J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(3): 221-227. (in Chinese))
- [57] 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. (in Chinese))
- [58] 国家海洋局. 中国海洋环境质量公报 [EB/OL]. [2016-07-31]. <http://www.soa.gov.cn/zwgk/gkml/>.
- [59] 叶丰, 贾国东, 韦刚健. 海洋环境中溶解氧稳定氧同位素研究进展 [J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 636-642. (YE Feng, JIA Guodong, WEI Gangjian. Progress in oxygen isotopic composition of dissolved oxygen in marine systems [J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(4): 636-642. (in Chinese))
- [60] LEHMANN M F, BARNETT B, GELINAS Y, et al. Aerobic respiration and hypoxia in the Lower St. Lawrence Estuary: Stable isotope ratios of dissolved oxygen constrain oxygen sink partitioning [J]. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6): 2157-2169.

(收稿日期: 2016-09-15 编辑: 彭桃英)