

文章编号:1009-2722(2013)06-0044-08

长江口低氧区底栖有孔虫组合

蔡庆芳^{1,2}, 王飞飞², 印 萍², 刘冬雁¹, 贾培蒙¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘 要:对全球低氧区的分布、形成机制以及低氧区海水表层特征、海底地球化学特征、生物特征等进行了系统的描述。着重对全球低氧区的底栖有孔虫特征进行了分析、对比,并与长江口底栖有孔虫特征相结合,讨论适合指示长江口低氧区的底栖有孔虫组合,初步分析认为 *Epistominella naraensis* (奈良小上口虫)、*Bulimina marginata* (具缘小泡虫)、*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Florilus* spp. (花朵虫诸种)、*Ammonia* spp. (卷转虫诸种)以及 *Bulliminella* spp. (微泡虫诸种)为长江口低氧区的敏感种,具有低氧环境的指示意义,并可以作为古低氧事件研究的标志。但实际应用时应根据研究需要取合适的属种组合使用。

关键词:长江口;低氧区;有孔虫;低氧有孔虫组合

中图分类号:Q915.811.1

文献标识码:A

海水中的溶解氧(dissolved oxygen, DO)是水体重要的理化性质参数之一,也是水环境健康的重要指标。当海水底部耗氧增多且与上层氧交换受阻时,DO 浓度开始下降,我们称 DO 浓度低至大部分生物死亡或逃离时($DO \leq 2$ mg/L)的环境为“低氧环境”。目前,在全球许多河口和近海都已经观测到低氧现象^[1-2]。

低氧的产生与水体富营养化、赤潮及养殖病害等现象密切相关,都是威胁人类经济生产及近海生态系统的重要因素。低氧环境会导致许多水生生物大量死亡,使得生物多样性大大降低,从而破坏海底生态系统,即使中等程度的低氧事件也会破坏近海生态系统^[3]。低氧能改变海洋环境的氧化-还原条件,进而影响到物质的循环^[2,4,5]。在还原条件下,海水中离子、分子会发生价位、状态的转变,导致海水的地球化学成分发生改变,并

可能会使原先积累在沉积物中的有毒、有害化学物质(如重金属)活化重新对水体造成危害。近几十年来,随着人类生产的发展,近海、河口等地的低氧现象更加严重,引起了国内外的广泛关注。GEOHAB、IMBER、LOICZ 等国际科学计划都有针对性的开展低氧区的研究。

低氧现象不仅出现于现在的海洋里,而且海底沉积物中也成功记录了过去发生的低氧现象,而了解过去低氧现象的影响因素和变化规律,有助于预测未来低氧现象的发生规律,从而避免或降低低氧现象给人类带来的危害。本文重点综述全球低氧现象研究的环境替代指标,初步讨论了长江口低氧区的有孔虫综合特征。

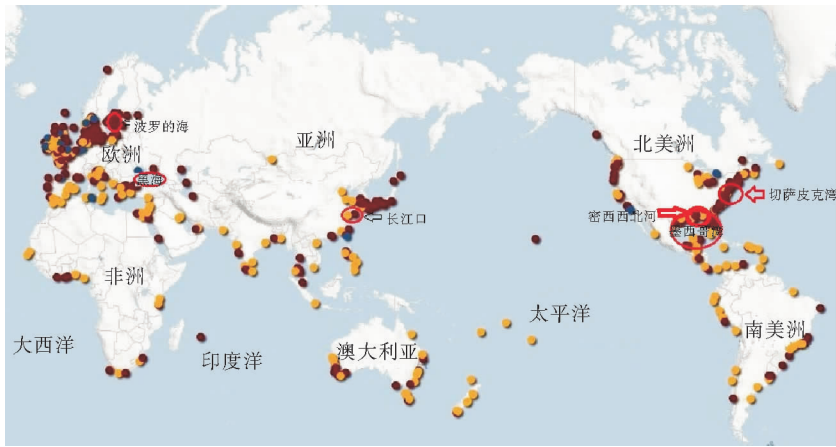
1 全球低氧区的分布及形成机制

在世界许多河口、海湾和沿岸,常常发生低氧或季节性低氧现象^[6,7]。如图 1 所示,全球低氧分布区域有北美洲东海岸、南美洲西海岸、印度洋北部沿岸、地中海、黑海、波罗的海以及中国的东海岸等。其中,波罗的海、墨西哥湾、黑海、密西西比

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国土资源海洋地质专项“海陆相互作用和海岸带地质灾害研究”(GZH201100203)

作者简介:蔡庆芳(1987—)女,在读硕士,主要从事全球变化及海岸带区域响应研究工作。E-mail: ccfrenzhe@126.com



(黄点表示富营养化区域;红点表示低氧区域;蓝点表示低氧程度得到改善的区域;红圈表示低氧现象突出地区)

图 1 1850s 以来世界主要富营养化及低氧区域分布(据文献[10])

Fig. 1 Distribution of major eutrophic and hypoxic areas in the world since 1850s(from reference [10])

河口、切萨皮克湾^[8,9]以及长江口等在全球研究较多。

尽管低氧和低氧环境在历史时期一直存在,但随着人类活动导致营养盐的富集增多,浅滩、沿海和河口地区低氧现象不断加剧。Diaz^[6]认为低能量(潮汐弱、流速小、风速小)且大规模淡水输入的海洋系统易于形成低氧区。生物化学过程耗氧、水体层化阻碍表层高氧水体与底部低氧水体交换,是导致水体低氧形成的直接原因^[11]。

首先,溶解氧消耗主要包括降解有机质耗氧、氧化无机物耗氧、底泥耗氧和呼吸作用耗氧等。由河口输入和浮游生物死亡产生的有机物降解需要消耗大量溶解氧,而随着人类活动产生的工业、生活、农业污水的大量排入,造成了河口、海岸有机质含量的大幅度增加,同时浮游植物、藻类等大量繁殖形成水体富营养化,从而使更多的植物残体光合作用产生的颗粒态有机碳沉降到水底,在微生物的分解作用下消耗大量的氧,二者的相互作用大大加剧了溶解氧的消耗。另外,还原态无机物如 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等的氧化作用和 NH_4^+ 的硝化作用,底泥中的颗粒态有机碳分解矿化以及水体生物的呼吸作用都会消耗大量的溶解氧。除了外在因素,氧本身的溶解度会随温度的升高而降低,因此,在海水温度升高的情况下过饱和的溶解氧会向空气中释放^[12]。

其次,除了溶解氧的消耗,水体层化阻碍来自上层的溶解氧补充也是导致低氧产生的必备条

件。河水流量大的季节,淡水输入增多主要位于近表层,而底层海水密度较高位于淡水层以下,又加上水体结构稳定性较高,从而形成盐跃层造成水体层化现象。由于盐跃层以下几乎没有光合作用,主要靠上下层水体的互换补充溶解氧,而水体层化现象的产生恰恰阻碍了底层溶解氧的这一重要来源,因此,造成了底层低氧。

不同海域甚至同一海域的不同部分或不同时间导致水体层化和底部耗氧的因素都各不相同,而不论是导致水体层化的因素,还是影响生物地球化学耗氧的因素,归根结底都与动力场相关^[13]。背景动力场要素颇多,主要包括环流、潮汐、风、径流冲淡水等等,都会对低氧产生不同程度的影响。

2 低氧区的沉积环境特征

低氧的发生不仅会导致海水中的物理、化学以及生物性质发生变化,同时水和沉积物界面发生化学作用,以及生物死亡和沉积作用等会将这些变化记录在沉积物中。因此,通过沉积物中的地球化学特征和生物特征等可以推测低氧现象发生规律。

2.1 沉积物地球化学特征

能够指示低氧环境的沉积物地球化学指标包括氧化还原敏感性元素、硫化物、生物硅、C/N 以

及其他元素组合或比值等。

对沉积区氧化还原条件十分敏感的元素称为“氧化还原敏感性元素”(redox sensitive elements, 简称 RSE), 低氧会使溶解态 RSE 自生沉淀、富集。许淑梅等^[14]通过长江口低氧区低氧环境对元素分布的影响研究表明, RSE 的分布受低氧还原环境影响显著, 并在低氧区富集。张晓东等^[15]也发现在低氧区内 RSE 呈斑块状富集, 这与研究区主体粒级的分布具有相反的趋势。冯旭文等^[16]对长江口低氧区内外柱样元素对比分析发现外柱样中大部分元素具有“粒度控制”规律, 而低氧区内沉积物中部分 RSE 和亲生物元素不受控于“粒控效应”, 其中 Mo、Cd、As 等 RSE 和亲生物元素 Ca、Sr、P 含量自 20 世纪 70 年代以来明显富集, 而 Mn 出现贫化, 表明受人类活动影响, 长江口低氧区水体富营养化加剧、底层水体季节性低氧严重。

沉积物在低氧状态下部分氧化由硫酸盐细菌完成, 这些细菌产生的硫化物以 H_2S 气体的方式从水柱中逸出或通过沉积物中结合生成硫化铁, 最终生成黄铁矿^[17]。因此, 在部分低氧河口或海湾, S、DOP (黄铁矿中铁含量与总活性铁含量之比值)、AVS/CRS (AVR 为 FeS , CRS 为 FeS_2 和 S) 都是低氧状态参考指标, 且 AVS/CRS 比值较 DOP 值, 而 DOP 值较 TOC 值, 更有效地指示出底层水的氧化条件是更可靠的氧化还原指标^[18,19]。

生物硅 (BSi) 主要来源于硅藻、放射虫和海绵骨针等的残骸, 是低氧环境的标志之一, 表层沉积物中 BSi 含量越高, 代表该区域低氧越严重。随着人类活动影响的加剧, 包括溶解氮、磷在内的营养盐输入加强, 导致了长江口海区表层硅藻类生产力的爆发, 生物硅的沉积大大增加, 产生了生物硅的高积累^[20]。Turner 等^[21]对墨西哥湾的研究发现, 墨西哥湾低氧区 BSi 含量在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初呈显著上升态势, 而低氧区外的沉积物中 BSi 含量则表现为相对稳定的状态, 对应了研究区自 20 世纪 70 年代低氧区的不断扩大。

C/N 以及 TOC (总有机碳)、OC (有机碳)、TN (总氮)、POC (陆源颗粒有机碳) 等有机质相关指标, 因与有机质的来源、运输、沉积有密切关系而在适合的条件下可作为低氧环境的替代指标。

如低氧环境中有机质的不断输入和氧化分解作用的不断减弱会导致其 TOC 或 OC 的含量较正常氧含量区域要高。墨西哥湾低氧区的柱状样品中, TN 自下而上递增, 而 C/N 比值表现为递减, C/N 比值及 TN 在沉积物中的分布的规律性能较好地解释低氧的发生^[22]。

此外, 自然氧化—还原反应可以改变元素在不同环境中的分布状态。元素的沉淀、迁移以及共存都会受到还原反应的控制和影响, 如变价元素的分布和转移, 共生元素间的分离和扩散。处于氧化环境的 V、U、S, 一般以高价 V^{5+} 、 U^{6+} 、 S^{6+} 的形式存在, 容易发生迁移; 处于还原环境的低价 V^{3+} 、 U^{4+} 、 S^{2-} , 容易发生沉淀^[23], 因此, 了解不同元素的价位可以间接指示低氧环境。

2.2 生物特征

海洋中的藻类、细菌、病毒以及有孔虫等生物的分布与含量变化都会受到水体溶解氧的影响, 因此他们亦是指示低氧环境的有效替代指标。

季倩^[24]研究发现, 长江口水体在正常—低氧—正常的过程中, 微微型浮游生物的丰度先增加后减少, 其中聚球藻和病毒是生物量的主要贡献者, 聚球藻和病毒的丰度比低氧形成前及消退后高一个数量级, 而微微型真核浮游植物的丰度却减少了一个数量级; Chen 等^[25]根据 Louisiana 陆架区沉积物中的 *Chlorobium phaeovibroides* 和 *C. phaeobacteroides* (厌氧光合绿硫细菌)、*bacteriochlorophyll* 和 *bacteriopheophytine* (衍生细菌色素及其衍生物) 的百年浓度变异发现, 近 50 年来低氧事件有加剧之势; 王丹^[26]通过对 2006 年 6 月长江口低氧区及邻近水域浮游植物群落特征的研究表明, 浮游植物多样性指数和均匀度指数均能指示低氧环境。

程广芬^[27]对加利福尼亚湾的研究表明, 厌氧沉积中的有孔虫组合以 *Bolivina* spp. (箭头虫诸种) 和 *Bulliminella* spp. (微泡虫诸种) 为优势种, 其中以能适应低氧环境的 *Bolivina* spp. (箭头虫诸种) 和 *Nonionella stella* (星九字虫) 等常见种和少量厌氧种为特征, 其中底栖有孔虫较浮游有孔虫数量多、保存完整, 因此, 底栖有孔虫组合是揭示近海底层水低氧事件的良好标志^[28]。

3 低氧区有孔虫特征及环境替代指标

在通常情况下,圆形的、壳室多的以及瓷质壳底栖有孔虫被认为是高氧环境产物,而体型小、扁平、伸长、薄壁壳体底栖有孔虫被认为是低氧环境的产物^[29]。在不同地区的有孔虫组合属种是不同的,即使是同一个属,种可能不同,种相同的情况其特征也未必相同。因此,清楚所要研究区域所适合的耐低氧底栖有孔虫组合特征是至关重要的。

Kaiho^[30]、Den Dulk^[31]等曾统过计世界各大低氧区有孔虫低氧种的类型,如 *Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Bulimina* spp. (小泡虫诸种)、*Cassidulina* spp. (小盔虫诸种)、*Ceratobulimina pacifica* (太平洋角泡虫)、*Fissurina* spp. (缝口虫诸种)、*Hoeglundina elegans* (优美缘缝虫)、*Lagena* spp. (瓶虫诸种)、*Lenticulina* spp. (透镜虫诸种)、*Melonis* spp. (苹果虫诸种)、*Nonion* spp. (九字虫诸种)、*Nonionella* spp. (小九字虫诸种)、*Pullenia* spp. (幼体虫诸种)、*Rosalina* spp. (玫瑰虫诸种)以及 *Uvigerina* spp. (葡萄虫诸种)等。

3.1 PEB 指标

PEB 指标是 *Pseudononion* (假小九字虫属)、*Epistominella* (小上口虫属)和 *Bulimina* (小泡虫属)3 个有孔虫属的拉丁文首字母组合,这 3 个有孔虫属的百分比之和在低氧区通常表现为高值。PEB 指标最早应用于墨西哥湾地区^[32],主要指示陆架、陆坡的低氧环境。

PEB 指标在国际上应用较多,主要集中于墨西哥湾以及其附近的路易斯安那陆架和德克萨斯州海岸以及密西西比河三角洲等地。Osterman^[32]利用 PEB 指标对墨西哥湾大陆架的 74 个沉积物样品进行了有孔虫分析,PEB 最高值出现于路易斯安那州陆架低氧区,德克萨斯州南部海岸 PEB 值升高表明其可能存在周期性低氧现象。*Ammonia* (卷转虫属)和 PEB 指标曾被用来验证密西西比河三角洲的历史性低氧^[28,33-36]。Platon 等^[35]对路易斯安那陆架区研究发现,在水深 < 60

m 处的胶结质壳和瓷质壳有孔虫含量在低氧期间表现出明显的下降,特别是 *Quinqueloculina* (五块虫)受到低氧加剧的严重影响几乎从研究区消失,相反几个玻璃质属种,特别是 PEB 属种,能够适应氧气的不断消耗。Osterman^[34]利用 PEB 指标对一个柱状样和一个表层样的组合 (MRD05-4 和 05-6)分析后表明,路易斯安那陆架在 ¹⁴C 年龄近 1 000 a 以来,发生过周期性低氧事件。

3.2 A—E 指标

A—E 指标中的“A”和“E”分别指的是 *Ammonia* (卷转虫属)和 *Elphidium* (希望虫属),在低氧地区前者相比后者丰度增高。A—E 指标主要用于指示内陆浅水环境,最早应用于墨西哥湾地区 (< 30 m 水深)^[28,37]。

在对密西西比河口三角洲附近的浅海环境底栖有孔虫进行分析时,Gupta 等^[28]利用 A—E 指标分析发现季节性低氧环境在过去 200 年特别是近 50 年来在不断加剧扩大。但 A—E 指标遭到 Brunner^[38]等人的怀疑,他们认为此指标只能通过其他指标间接反映低氧环境,且其只适用于水深 < 30 m 的环境^[37]。

3.3 其他有孔虫指标

在靠近意大利亚得里亚海 Po 河的一个研究站点,Duijnsteet 等^[39]发现有些有孔虫,如 *Nonionella* (小九字虫属)、*Bolivina* (箭头虫属)和 *Eggerella* (伊格尔虫属)等表现出较其他种强的耐低氧能力。

对于阿拉伯海永久性低氧区又名最小含氧区 (oxygen minimum zones, OMZs, 水深约 100 ~ 1 200 m),Paulmier 和 Ruiz Pino^[40]的研究表明,尽管多样性和丰度普遍较低,OMZs 区仍然存在丰富的有孔虫种群,包括 *Ammodiscus* spp. (砂盘虫诸种)、*Uvigerina* spp. (葡萄虫诸种)、*Bulimina* spp. (小泡虫诸种)、*Epistominella* spp. (小上口虫诸种)、*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)等。此外,Erbacher 和 Nelskamp^[41]发现,*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)在硫化菌含量较多的环境内及周边占主导。

以上的 PEB 指标、A—E 指标以及其他指标

中的属种类型统称为低氧区有孔虫组合(low-oxygen foraminiferal assemblages, LOFA)。Bernhard 和 Gupta^[42]认为, LOFA 组合主要包括 *Rotaliida*(轮虫科)和 *Buliminida*(小泡虫科), 前者主要包括 *Epistominella*(小上口虫属)、*Ammonia*(卷转虫属)和 *Pseudononion*(假小九字虫属), 后者主要包括 *Bulimina*(小泡虫属)、*Bulliminella*(微泡虫属)和 *Fursenkoina*(福尔先科虫属), 它们不止存在于低氧区, 但是它们在低氧区表现出很强的适应与生存能力。

4 长江口低氧区沉积物有孔虫特征

长江口的低氧现象最早可追溯到 1959 年开展的海洋普查, 20 世纪 80 年代陆续有科学家开始关注长江口的低氧问题。顾宏堪^[43]基于 1959 年夏季 8 月黄海的溶解氧 DO 分析资料, 曾指出长江河口外存在一个溶解氧的低值区; 其后 1980—1981 年中美合作调查项目“长江口及其邻近东海水域沉积动力学研究”也发现了长江河口外海域存在 DO 低值区^[44]。随着长江口海域海洋环境的恶化和赤潮等灾害的频发, 人们认识低氧环境对海洋生态系统与社会经济重要影响的加深, 20 世纪初以来长江河口外低氧区再次成为海洋环境学家研究的焦点。

李道季等^[45]通过对 1999 年 8 月的调查资料分析发现, 长江河口外发育有一处面积达 13 700 km²、平均厚度达 20 m 的底层低溶解氧分布区(DO<2 mg/L), 低氧区中心位于 122°45'E 和 123°E 之间的 30°50'N 附近。张哲等^[46]对前人文献中提到的有关长江口低氧区的发生时间(监测到的时间)、低氧区的面积、低氧中心的位置、DO 最小值和低氧区内 DO 平均值总结后认为, 长江口低氧区的范围主要位于 28.5°~33.5°N, 122°~124°E 海域内; 每年的 8 月份长江口均有低氧现象存在; 低氧区低氧状态持续的时间可能在变长; 长江口南侧海域监测到的低氧现象的频率有增加的趋势。

自 20 世纪以来, 有关长江河口外低氧事件的研究得到了长足的进展, 能够反演低氧事件的代用指标主要包括底栖有孔虫 LOFA 组合、RSE、POC、PON、TOC、球藻等。而利用底栖有孔虫

LOFA 组合对长江口低氧区古低氧事件研究的相对较少, 且没有形成适用于长江口低氧区的标准 LOFA 组合。

总结前面所介绍的世界各大低氧区出现的底栖有孔虫属种发现, 以下有孔虫属种见于低氧环境中, 如 *Ammodiscus* spp. (砂盘虫诸种)、*Ammonia* spp. (卷转虫诸种)、*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Bulimina* spp. (小泡虫诸种)、*Bulliminella* spp. (微泡虫诸种)、*Cassidulina* spp. (小盔虫诸种)、*Ceratobulimina pacifica* (太平洋角泡虫)、*Eggerella* (伊格尔虫属)、*Elphidium* spp. (希望虫诸种)、*Epistominella* spp. (小上口虫诸种)、*Fissurina* spp. (缝口虫诸种)、*Fursenkoina* spp. (福尔先科虫诸种)、*Hoeglundina elegans* (优美缘缝虫)、*Lagena* spp. (瓶虫诸种)、*Lenticulina* spp. (透镜虫诸种)、*Melonis* spp. (苹果虫诸种)、*Nonion* spp. (九字虫诸种)、*Nonionella* spp. (小九字虫诸种)、*Nonionella stella* (星九字虫)、*Pseudononion* spp. (假小九字虫诸种)、*Pullenia* spp. (幼体虫诸种)、*Rosalina* spp. (玫瑰虫诸种)和 *Uvigerina* spp. (葡萄虫诸种)。由此可见, 能够指示低氧现象的有孔虫较多, 而在不同的低氧区具有不同的 LOFA 组合, 应根据实际研究需要挑选出最合适的 LOFA 组合。其中, 以上属种在长江口低氧区百分含量较高的有: *Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Florilus* spp. (花朵虫诸种)、*Bulimina* spp. (小泡虫诸种)、*Elphidium* spp. (希望虫诸种)、*Epistominella* spp. (小上口虫诸种)、*Bulliminella* spp. (微泡虫诸种)和 *Ammonia* spp. (卷转虫诸种)等^[47]。

根据长江口本身的有孔虫特点, Li 等^[36]将 *Epistominella naraensis* (奈良小上口虫), *Ammonia* spp. (卷转虫诸种), *Bulimina marginata* (具缘小泡虫)和 *Bulliminella* spp. (微泡虫诸种)作为长江口的底栖有孔虫 LOFA 组合, 研究发现近 60 年来特别是 20 世纪 80 年代中期后 LOFA 含量显著增加, 这与 1990 年以来长江口低氧事件的范围急剧增加的事实相符合。Wang 等^[48]通过长江口低氧区 ECS-0702 孔的有孔虫单种与所有低氧有孔虫的组合特征进行了对比, 发现 *Epistominella naraensis* (奈良小上口虫)、*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Bulimina marginata* (具缘小

泡虫)和 *Ammonia convexidorsa* (凸背卷转虫) 可以作为长江口低氧区的 LOFA 组合,特别是 *A. convexidorsa* (凸背卷转虫) 可以指示人类活动的影响。因此,认为 *Epistominella naraensis* (奈良小上口虫)、*Bulimina marginata* (具缘小泡虫)、*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Florilus* spp. (花朵虫诸种)、*Ammonia* spp. (卷转虫诸种) 以及 *Bulliminella* spp. (微泡虫诸种) 为长江口低氧区的 LOFA 组合,但在实际应用时还应该根据研究区的实际情况,从中挑选更合适的属种组合作为研究区的 LOFA 组合。

5 结论与建议

(1) 能够指示低氧环境的沉积物地球化学指标包括氧化还原敏感性元素、硫化物、生物硅、C/N 以及其他元素组合或比值等,生物指标包括海洋中的藻类、细菌、病毒以及有孔虫等。

(2) 全球低氧区有孔虫环境替代指标主要包括 PEB 指标、A—E 指标以及其他一些适合研究区低氧环境的低氧有孔虫组合。

(3) 长江口低氧区的有孔虫组合研究相对较少,本文将 *Epistominella naraensis* (奈良小上口虫)、*Bulimina marginata* (具缘小泡虫)、*Bolivina* spp. (箭头虫诸种)、*Florilus* spp. (花朵虫诸种)、*Ammonia* spp. (卷转虫诸种) 以及 *Bulliminella* spp. (微泡虫诸种) 作为长江口低氧区的 LOFA 组合,但在实际应用时还应该根据研究区的实际情况,从中挑选更合适的属种组合作为研究区的 LOFA 组合。

因对长江口的低氧有孔虫组合研究较少,并没有形成完整的适合长江口低氧区的指标体系,所以应结合国际上的有孔虫研究现状及长江口本身的有孔虫分布特点选出适合指示长江口低氧区的 LOFA 组合。长江口低氧区的发育具有季节性特征,有孔虫组合及分布与低氧带的相关性研究工作还十分有限。建议下一步工作中加强相关研究工作,一方面在低氧事件发生时取得有孔虫活体,开展与水体化学和海底地球化学的对比研究,建立低氧有孔虫组合,评估有孔虫对环境变化的敏感性;另一方面加强全新世中晚期沉积地层中低氧事件记录与相关有孔虫组合的形成。

参考文献:

- [1] Chen C C, Gong G C, Shiah F K. 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.
- [2] Bianchi T S, DiMarco S F, Cowan J H, et al. The science of hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(7): 1 471-1 484.
- [3] Osterman L E, Poore R Z, Swarzenski P W. The last 1000 years of natural and anthropogenic low-oxygen bottom-water on the Louisiana shelf, Gulf of Mexico[J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 66(3): 291-303.
- [4] 张 经. 关于陆—海相互作用的若干问题[J]. *科学通报*, 2011, 56(24): 1 956-1 966.
- [5] Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition [J]. *Marine Chemistry*, 2011, 125(1): 108-116.
- [6] Diaz R J. Overview of hypoxia around the world[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 275-281.
- [7] Rabalais N N, Turner R E, Wiseman Jr W J. Gulf of Mexico hypoxia, a. k. a. "The dead zone"[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 235-263.
- [8] Rabalais N N, Turner R E. Oxygen Depletion in the Gulf of Mexico Adjacent to the Mississippi River[J]. *Past and Present Water Column Anoxia*, 2006: 225-245.
- [9] Zillén L, Conley D J, Andrén T, et al. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact[J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 91(1): 77-92.
- [10] World Resources Institute. Washington DC, China, India and (in 2013) Brazil and works in over 40 countries on five continents. [EB/OL]. (2013). <http://www.wri.org/project/eutrophication/map>.
- [11] Hetland R D, DiMarco S F. How does the character of oxygen demand control the structure of hypoxia on the Texas-Louisiana continental shelf? [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1): 49-62.
- [12] 唐逸民. 海洋学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [13] 王海龙, 丁平兴, 沈 健. 河口/近海区域低氧形成的物理机制研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(1): 115-125.
- [14] 许淑梅, 翟世奎, 张爱滨, 等. 长江口外缺氧区沉积物中元素分布的氧化还原环境效应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(03): 1-8.
- [15] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅, 等. 长江口外缺氧区沉积物中氧化还原敏感性元素的“粒控效应”[J]. *中国海洋大学学报*, 2005, 35(5): 868-874.

- [16] 冯旭文,金翔龙,章伟艳,等. 长江口外缺氧区柱样沉积物元素的分布及其百年沉积环境效应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 25-32.
- [17] 冯旭文,于晓果,陈建芳,等. 河口季节性缺氧在沉积物中记录的研究进展[J]. 海洋学研究, 2006, 24(1): 50-61.
- [18] Roden E E, Tuttle J H. Inorganic sulfur cycling in mid and lower Chesapeake Bay sediments[J]. Mar. Ecol. Prog. Ser., 1993, 93: 101-118.
- [19] Zimmerman A R, Canuel E A. A geochemical record of eutrophication and anoxia in Chesapeake Bay sediments; anthropogenic influence on organic matter composition[J]. Marine Chemistry, 2000, 69(1): 117-137.
- [20] 赵真. 长江口海区近百年沉积物中的生物硅记录及其对流域人类活动的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [21] Turner R E, Rabalais N N, Justic D. Gulf of Mexico hypoxia: Alternate states and a legacy[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(7): 323-327.
- [22] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. Chemical Geology, 1994, 114(3): 289-302.
- [23] 王争鸣. 缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. 甘肃地质学报, 2003, 12(02): 55-58.
- [24] 季倩. 长江口邻近海域水体及底栖微微型浮游生物研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [25] Chen N, Bianchi T S, McKee B A, et al. Historical trends of hypoxia on the Louisiana shelf: application of pigments as biomarkers[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(4): 543-561.
- [26] 王丹,孙军,周锋,等. 2006年6月长江口低氧区及邻近水域浮游植物[J]. 海洋与湖沼, 2008, (6): 619-627.
- [27] 程广芬. 厌氧沉积中有孔虫组合特征[J]. 山东海洋学院学报, 1988, 18(1): 70-80.
- [28] Gupta B K S, Turner R E, Rabalais N N. Seasonal oxygen depletion in continental-shelf waters of Louisiana: Historical record of benthic foraminifers[J]. Geology, 1996, 24(3): 227-230.
- [29] Van der Zwaan G J, Jorissen F J. Biofacial patterns in river-induced shelf anoxia[M]//Tyson R V, Pearson T H. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia. Geological Society of London, Special Publication (No. 58). London: Geological Society, 1991: 65-82.
- [30] Kaiho K. Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI)[J]. Marine Micropaleontology, 1999, 37(1): 67-76.
- [31] Den Dulk M, Reichert G J, Van Heyst S, et al. Benthic foraminifera as proxies of organic matter flux and bottom water oxygenation? A case history from the northern Arabian Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 161(3): 337-359.
- [32] Osterman L E. Benthic foraminifers from the continental shelf and slope of the Gulf of Mexico: an indicator of shelf hypoxia. Estuar. Coast. Shelf Science, 2003, 58(1): 17-35.
- [33] Osterman L E, Poore R Z, Swarzenski P W, et al. Reconstructing a 180 yr record of natural and anthropogenic induced low-oxygen conditions from Louisiana continental shelf sediments[J]. Geology, 2005, 33(4): 329-332.
- [34] Osterman L E, Poore R Z, Swarzenski P W. The last 1000 years of natural and anthropogenic low-oxygen bottom-water on the Louisiana shelf, Gulf of Mexico[J]. Marine Micropaleontology, 2008, 66(3): 291-303.
- [35] Platon E, Sen Gupta B K, Rabalais N N, et al. Effect of seasonal hypoxia on the benthic foraminiferal community of the Louisiana inner continental shelf: The 20th century record[J]. Marine Micropaleontology, 2005, 54(3): 263-283.
- [36] Li X X, Bianchi T S, Yang Z S, et al. Historical trends of hypoxia in Changjiang River estuary: Applications of chemical biomarkers and microfossils[J]. Journal of Marine Systems, 2011, 86(3): 57-68.
- [37] Platon E, Gupta B K S. Benthic foraminiferal communities in oxygen-depleted environments of the Louisiana continental shelf[J]. Coastal and Estuarine Studies, 2001, 58(1): 147-164.
- [38] Brunner C A, Beall J M, Bentley S J, et al. Hypoxia hotspots in the Mississippi Bight[J]. The Journal of Foraminiferal Research, 2006, 36(2): 95-107.
- [39] Duijnster I, de Lugt I, Vonk Noordegraaf H, et al. Temporal variability of foraminiferal densities in the northern Adriatic Sea[J]. Marine Micropaleontology, 2004, 50(1): 125-148.
- [40] Paulmier A, Ruiz-Pino D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean[J]. Progress in Oceanography, 2009, 80(3): 113-128.
- [41] Erbacher J, Nelskamp S. Comparison of benthic foraminifera inside and outside a sulphur-oxidizing bacterial mat from the present oxygen-minimum zone off Oceanographic Research Papers, 2006, 53(5): 751-775.
- [42] Bernhard J M, Gupta B K S. Foraminifera of oxygen-depleted environments[M]//Modern Foraminifera. Amsterdam: Springer, 2003: 201-216.
- [43] 顾宏堪. 黄海溶解氧垂直分布中的最大值[J]. 海洋学报, 1980, 2(2): 70-79.
- [44] Limeburner R, Beardsley R C, Zhao J. Water masses and circulation in the East China Sea[C]//Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea. 1983: 285-294.
- [45] 李道季,张经,黄大吉,等. 长江口氧的亏损[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(8): 686-694.

[46] 张 哲,张志锋,韩庚辰,等. 长江口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.

[47] 汪品先. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京:海洋出版社,1988.

[48] Wang F F, Liu J D, Qiu J D, et al. Historical evolution of hypoxia over the last ~13,000 years off the Changjiang River estuary in East China Sea:Evidence from the benthic foraminiferal community[J]. Marine Micropaleontology, 2013(in press).

BENTHIC FORAMINIFERAL ASSEMBLAGES

IN THE HYPOXIC AREA OF YANGTZE RIVER ESTUARY

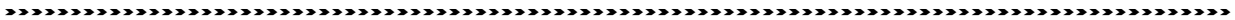
CAI Qingfang^{1,2}, WANG Feifei², YIN Ping², LIU Dongyan¹, JIA Peimeng¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: In this paper, we described the spatial distribution of the hypoxic zone in the world and discussed its formation mechanisms, sea surface features, and seabed geochemical and biological characteristics. The benthic foraminiferal assemblages found in the Yangtze River Delta were compared with those in the hypoxic areas of the world. It is found that the species of *Epistominella naraensis*, *Bulimina marginata*, *Bolivina* spp., *Florilus* spp., *Ammonia* spp. and *Bulimina* spp. are sensitive species in the hypoxic zone of the Yangtze River estuary and can be used as a proxy to denote a low oxygen environment for study of the hypoxic events in the history. However, selection of right foraminiferal assemblages is required before environmental interpretation is made.

Key words: Yangtze River; hypoxia; foraminifera; benthic foraminiferal assemblages



关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部

2013 年 1 月 10 日