

# 海洋缺氧对生态系统健康及其可持续发展的影响

张莹<sup>1</sup> 张英<sup>2</sup> 管博<sup>3</sup>

(1. 山东省海洋水产研究所山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

2. 山东师范大学山东省可持续发展研究中心, 山东 济南 250014;

3. 中国科学院海岸带环境过程重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东 烟台 264003)

**摘要** 海洋缺氧是一个全球性问题, 已给生态系统造成严重后果, 甚至开始影响到我们人类所使用的海洋资源。本文通过综述的方法, 一方面探讨了全球海洋缺氧的现状, 指出富营养化是诱导海洋缺氧的主要因素, 并通过比较分析海洋缺氧区域碳含量的变化, 揭示了海洋缺氧对次级生产力的影响。另一方面, 重点阐述河口缺氧对浮游生物、游泳动物和底栖生物群落结构与功能, 以及对海洋生态系统营养动力学过程的影响。因此, 采取适当的保护措施, 维护海洋生态健康, 降低海洋缺氧区域面积, 对维持环境与人类可持续发展具有重要意义。

**关键字** 海洋缺氧; 富营养化; 生态健康; 可持续发展

海洋缺氧 (hypoxia) 是指水体中溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 的含量低于 2 mg/L<sup>[1]</sup>。1925年 Smitt 首次发现开阔大洋中层水中存在缺氧现象<sup>[2]</sup>, 随后, 科学家们陆续发现大陆架近岸海域和河口区等底层海域也存在缺氧现象, 其中以墨西哥湾和密西西比河河口区域的缺氧现象最为严重<sup>[3,4]</sup>。研究表明, 氧气正在从越来越广泛的海域中逐渐消失, 这可能又是一个由全球变暖所造成的环境问题。在过去的 50 年里, 海洋缺氧水域面积一直在扩大, 并且, 它将引发一连串物理和化学反应, 这些反应的发生更加重了海洋缺氧所引发的环境效应。根据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的预测, 本世纪末的大气温度将增加 4℃, 而海洋温度升高无疑将扩大现有的海洋缺氧区域面积, 长时间海洋缺氧将会引发“死海”的形成, 很少有鱼类和贝类能够幸免于难。这些“死海”将覆盖印度洋、北美、中美及太平洋东部等几万平方公里的海域, 并且, 它的分布符合人类生活足迹<sup>[5]</sup>。海洋缺氧是一个全球性问题, 已给生态系统造成严重后果, 甚至开始影响到我们人类所使用的海洋资源。

## 1. 全球海洋缺氧现状分析

海洋缺氧区域的全球分布与人口密集程度和河流输入海中营养物质的含量是密切相关的<sup>[5]</sup>。这些海洋缺氧区域在最初研究时并不缺氧, 而从上世纪中叶起, 随着工业的迅速发展, 许多沿海生态系统受到富营养化的严重影响, 溶解氧浓度急剧降低。工业发展中氮肥施用开始于上个世纪 40 年代末, 而溶解氧浓度的降低滞后十年时间, 大概在上个世纪 60 年代到 70 年代, 溶解氧含量爆发性降低<sup>[6]</sup>。

全球海洋系统数据显示, 上个世纪 50 年代, 第一次观测到的海洋缺氧的海域是北部亚得里亚海, 随后陆续观察的缺氧海域有黑海、卡特加特海峡、波罗的海、奇沙比克湾、墨西哥湾和斯堪的那维亚海岸系统<sup>[5]</sup>。这些缺氧海域的有孔虫比值和有机物、无机物成分分析表明, 这些海域的缺氧现象已经不是海洋生态系统循环自然发生的生态现象, 而是由于人为扰动或者环境污染而引发的海洋缺氧问题, 从上个世纪 60 年代开始至今, 每隔十年, 海洋缺氧的海域面积都会翻一番。然而, 海洋缺氧问题往往被忽视, 直到海洋缺氧已经严重威胁生态系统健康才会引起足够重视。比如, 在卡特加特海峡, 海洋缺氧并没有成为一个环境问题被重视, 直到海峡底部海域缺氧引发鱼类大量死亡, 当年挪威龙虾渔业市场崩溃, 这才引起人们对海洋缺氧环境问题的关注<sup>[7]</sup>。单一环境因子很难引起整个生态系统结构和功能的改变, 通常生态系统结构和功能的破坏都是由于多种人为或环境因素叠加引起的。富营养化引起海洋底层缺氧, 加上当地渔民对渔业资源的过度捕捞和外来种侵入, 共同造成了黑海西北部大陆架底层渔业资源的锐减。上个世界 90 年代, 黑海西北部由于沿岸营养盐输入的减少, 底层缺氧现象消失, 生态系统功能恢复正常。然而, 随着农业开发的扩张, 营养盐成分随之而来, 海洋底层缺氧现象可能再现<sup>[8]</sup>。

海洋长期缺氧对于生态系统的影响是具有较低的次级生产力和缺少底栖生物群落。评估波罗的海的“死海”区域, 因为持续缺氧每年损失的碳为 264 000 吨, 占整个波罗的海次级生产力的 30%<sup>[9]</sup>。奇沙比克湾由于缺氧每年损失的碳为 10 000 吨, 占整个波罗的海次级生产力的 5%<sup>[10]</sup>。墨西哥湾地区面临严重的季节性缺氧问题, 底栖生物生物量



减少大约  $1.4\text{t}/\text{km}^2$ , 假设转换效率为 60%, 那么每年相当于损失 17 000 吨底层渔业资源<sup>[11]</sup>。季节性缺氧引起的次级生产力的损失, 是由其它季节的次级生产力进行补充, 还是由缺氧以外海域的次级生产力进行补偿呢? 波罗的海缺氧海域的次级生产力是由其外围海域进行补偿的, 研究表明, 当波罗的海部分海域由于富营养化引起缺氧时, 其外围海域的次级生产力是正常时的 2 倍<sup>[12]</sup>。假设波罗的海缺氧海域不计其内, 那么其他海域碳含量将增加 30% 到 50%。奇沙比克湾部分海域缺氧消失后三个月, 其生产力水平补充为正常值。评估全球范围内由于缺氧造成的生物量损失表明, 超过 245 000  $\text{km}^2$  的海域面积上损失了 343 000-734 000 吨的碳。

## 2. 河口缺氧的生态学效应

世界许多河口都存在季节性缺氧的现象, 并且低氧出现的频率、范围、持续时间、强度都有明显上升的趋势, 因此, 河口缺氧引起的生态效应受到人们越来越多的关注。当河口底层水域呈现缺氧状态时, 表明河口附近水域的生态状况已经急剧恶化, 而很多水生生物都无法正常生活。同时, 底层沉积物的氧化环境遭到破坏, 其中的有毒、有害化学物质将重新活化, 释放到水体中, 形成二次污染<sup>[13]</sup>。河口缺氧主要由两方面因素造成, 一是夏季温跃层、盐跃层阻碍了上层水体氧气的扩散, 造成底层环境缺氧<sup>[14]</sup>; 二是人类活动加剧河口富营养化程度, 导致河口底层水域诱发季节性缺氧。近年来, 随着工业生产的发展, 大量工业废水和生活污水直接排入河中, 导致河口水体富营养化加剧, 使缺氧出现的频率、范围、持续时间、强度都有明显上升的趋势<sup>[15]</sup>。

河口缺氧不仅影响河口生物的结构和组成, 而且还会改变群落结构以及生态系统功能<sup>[16]</sup>。在缺氧水域中, 部分浮游动物可以在一定程度上适应缺氧环境, 但由于它们运动能力不强, 所以只有一些耐受缺氧环境的种类能够生存, 而大多数浮游动物都将面临死亡。Stalder 等报道了 3 种桡足类都不能有效避开缺氧水域环境, 在缺氧水体中数量急剧下降<sup>[17]</sup>; Auel 小组研究表明, 桡足类和浮游动物不能忍受  $\text{DO}$  小于  $1.1\text{mg}/\text{L}$  的环境, 其在河口缺氧水域中生物量都显著下降<sup>[18]</sup>。游泳生物, 游泳能力较强, 可以通过迁移和改变生理机能来应对缺氧环境。在缺氧环境中的游泳生物的摄食、生长、繁殖几乎都会受到影响, 但是, 不同种类游泳动物受影响程度存在差异。例如, 挪威海螯虾 (*Nephrops norvegicus*)<sup>[19]</sup>、狼鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 在面临缺氧环境时摄食量降低<sup>[20]</sup>, 软口鱼 (*Chondrostoma nasus*) 胚胎致死率增加、孵化成

功率下降<sup>[21]</sup>。沉积物-水界面是最先缺氧的水体区域, 因此缺氧对底栖生物的影响也最为显著。当河口底层水域  $\text{DO}$  浓度低于  $0.5\text{mg}/\text{L}$  时, 底栖动物大规模死亡, 造成大面积缺氧死亡区, 它们的临界生存  $\text{DO}$  浓度是  $0.98\text{mg}/\text{L}$ <sup>[22]</sup>。Nilsson 研究小组报道了瑞典西部海岸沉积物在经历 10 个月的缺氧时期, 底部环境没有生命迹象<sup>[23]</sup>。河口缺氧不仅改变海洋生物群落结构和组成, 还能影响生态系统的营养动力学过程。海洋缺氧会引起生态系统营养途径的改变, 而且死亡生物的增加还会加速能量流向分解者, 对高营养级海洋生物产生危害。此外, 海洋缺氧也可能引起海洋生态系统中  $k$ -对策海洋生物物种逐渐被  $r$ -对策物种所取代, 长食物链逐渐被短食物链取代, 直接改变生态系统结构<sup>[24]</sup>。

## 3. 结语

生态系统是人类生存和发展的物质基础, 生态系统健康也是人类健康的基础, 因此, 健康的生态系统是人类可持续发展的重要前提。海洋缺氧关系到海洋生态系统健康, 其可导致生物栖息地丧失, 生物种群受损或减少, 影响整个生态系统的结构与功能、服务与产出, 严重的低氧事件会造成海洋生态系统和渔业资源的崩溃。因此, 采取适当的保护措施, 维护海岸带生态健康, 降低海洋缺氧区域面积, 对维持环境与人类可持续发展具有重要意义。对于如何降低海洋缺氧区域面积提供几点建议: 第一, 减少化肥使用, 增加其管理工作。雨水会将草坪和农村中的过量肥料冲进小溪和河流, 而一些具有挥发性质的肥料通过大气循环也最终进行海洋。因此, 加强化肥使用的管理工作, 降低其流入河流或海洋的量, 具有重要意义; 第二, 去除废水中的营养盐, 大量的营养盐是诱发海洋缺氧的重要条件; 第三, 减少发电厂的数量。无论是电力发电厂或汽车尾气, 都会产生氮氧化物。氮氧化物在空气中转化为硝酸盐, 然后遍布整个国家上空, 最终通过降水进入河流, 这种现象特别是在东亚的密西西比河尤为显著; 第四, 环保用船。这体现在选择和应用产生少量氮氧化物的发动机上, 并且避免船只将废水直接排入水中; 第五, 保护土地相邻的河流和小溪。这里提到的土地, 通常称为河岸缓冲区, 可以发挥重要作用阻止营养盐流入河流中的作用, 同时, 它也是野生动物栖息地和鸟类迁徙地, 并提高溪流或河流生态健康。

### 致谢

本课题得到中国科学院海岸带环境过程重点实验室(烟台海岸带研究所)开放基金资助(编号:201202)和“十二五”国家科技支撑计划项目子课题(编号:2012BAC19B08)基金支持。



## 参考文献

- [1] Diaz R J. Overview of Hypoxia around the World[J]. *Environ Qual*, 2001, 30(2):275-281.
- [2] Riley J P, Skirrow G. 化学海洋学3[M]. 吴瑜瑞,杨逸萍,译. 北京:海洋出版社,1984:1-12.
- [3] Turner R E, Rabalais N N. Coastal Eutrophication near the Mississippi River Delta[J]. *Nature*, 1994, 168:619-621.
- [4] Rabalais N N, Turner R E, et al. Gulf of Mexico hypoxia, the Dead Zone[J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 2002, 33:235-263.
- [5] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems[J]. *Science*, 2008, 321:926-929.
- [6] Galloway J N, Townsend A R. Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions[J]. *Science*, 2008, 320:889-892.
- [7] Rosenberg R. Eutrophication:the Future Marine Coastal Nuisance[J]. *Mar Pollut Bull*, 1985, 16(6):227-231.
- [8] Tilman D, Fargione, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. *Science*, 2001, 292:281-284.
- [9] Karlson K, Rosenberg R, et al. Temporal and Spatial Large-scale Effects of Eutrophication and Oxygen Deficiency on Benthic Fauna in Scandinavian and Baltic Waters—A Review[J]. *Oceanogr Mar Biol Annual Rev*, 2002, 40:427-489.
- [10] Diaz R J, Schaffner L C. In Perspectives in the Chesapeake Bay: Advances in Estuarine Sciences[A]. Haire M, Krome E C, et al. Chesapeake Research Consortium, Gloucester Point, VA, 1990[M], pp. 25-56.
- [11] Rabalais N N, Turner R E, et al. Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems. American Geophysical Union, Washington, DC, 2001[M].
- [12] Elmgren R. Man's Impact on the Ecosystem of the Baltic Sea: Energy Flows Today and at the Turn of the Century[J]. *Ambio*, 1989, 18:326-332.
- [13] Riedel G F, Sanders J G, et al. Biogeochemical Control on the Flux of Trace Elements from Estuarine Sediments: Effects of Seasonal and Short-term Hypoxia[J]. *Mar Environ Res*, 1999, 47(4):349-372.
- [14] Pihl L, Baden S P, et al. Hypoxia Induced Structural Changes in the Diet of Bottom-feeding Fish and Crustacean[J]. *Mar Biol*, 1992, 113:349-361.
- [15] Elmgren R. Man's Impact on the Ecosystem of the Baltic Sea: Energy Flows Today and at the Turn of the Century[J]. *Ambio*, 1989, 18:322-326.
- [16] 陈春辉,等. 河口缺氧生物效应研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29:2595-2602.
- [17] Stalder L C, Marcus N H. Zooplankton Responses to Hypoxia: Behavioral Patterns and Survival of Three Species of Ealanoid Eopepods[J]. *Mar Biol*, 1997, 127:599-607.
- [18] Auel H, Verheye H M. Hypoxia Tolerance in the Copepod *Calanoides Carinatus* and the Effect of an Intermediate Oxygen Minimum Layer on Copepod Vertical Distribution in the Northern Benguela Current Upwelling System and the Angola-Benguela Front[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2007, 352:234-243.
- [19] Baden S P, Loo L O, et al. Effects of Eutrophication on Benthic Communities Including Fish: Swedish West Coast[J]. *Ambio*, 1990, 19:113-122.
- [20] Thetmeyer H, Waller U, et al. Growth of European Sea Bass (*Dicentrarchus labrax* L.) under Hypoxic and Oscillating Oxygen Conditions[J]. *Aquaculture*, 1999, 174:355-367.
- [21] Keckeis H, Nemeschkal B, et al. Effects of Reduced Oxygen Level on the Mortality and Hatching Rate of *Chondrostoma Naatta* Embryos[J]. *J Fish Biol*, 1996, 49:430-440.
- [22] Levings C D. Demersal and Benthic Communities in Howe Sound Basin and Their Responses to Dissolved Oxygen Deficiency[M]. *Can Tech Rpt Fish Aquat Sci*, 1980, 951:1-27.
- [23] Montagna P A, Ritter C. Direct and Indirect Effects of Hypoxia on Benthos in Corpus Christi Bay, Texas, USA[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2006, 330(1):119-131.
- [24] Wu R S S. Hypoxia: from Molecular Responses to Ecosystem Responses[J]. *Mar Pollut Bull*, 2002, 45(1):35-45.

## 作者简介

张莹,女,山东省海洋水产研究所,助理研究员,主要从事海洋生态修复研究。联系地址:山东省烟台市开发区长江路216号;邮政编码:264006 联系电话:13553131809;电子邮箱:zhangying99g99@163.com