

波浪对太湖梅梁湾底泥氧气侵蚀深度的影响

王永平^{1,2}, 吴挺峰¹, 丁艳青^{1,2}, 申霞³, 朱广伟¹, 洪大林³, 秦伯强¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:通过室内波浪水槽试验, 利用溶解氧微电极研究了波浪对太湖梅梁湾底泥中氧气侵蚀深度的影响. 结果显示, 太湖梅梁湾底泥在水槽中一夜平衡后, 氧气侵蚀深度约为 5 mm. 经 4 cm 波高的波影响 2 h 后, 表层底泥基本没有被侵蚀, 而表层溶解氧质量浓度从原来的 6.29 mg/L 上升至 6.90 mg/L, 氧气侵蚀深度约达 6 mm. 初始值和 4 cm 小波后两者拟合方程具有相近的斜率(-0.0777 与 -0.0728). 经 10 cm 波高的波影响 2 h 后, 可能受采泥管管壁形成的回旋涡流影响, 底泥表层的物理侵蚀达到 (1.33 ± 0.15) cm. 同时, 氧气侵蚀深度降至 3.2 mm 左右, 其拟合方程的斜率减小为 0.0123. 由此可以表明, 小波可以增加底泥表层溶解氧和氧气侵蚀深度, 而大波能造成表层底泥受到严重的物理侵蚀并破坏原溶氧层而形成新的较浅的溶氧层, 最终将可能影响微生物活动和营养盐释放.

关键词:波浪水槽试验 物理侵蚀 溶解氧微电极 氧气侵蚀深度 太湖

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)02-0126-05

氧气在底泥中的分布可以反映深海底泥中大部分生物地球化学过程^[1], 也因氧化物的消耗和底泥的再矿化速率之间有一定的定量关系而常用来代表深海底泥中的微生物作用过程^[2-3]. 由于受技术手段限制, 对底泥中氧气侵蚀深度(oxygen penetration depth, OPD)的研究一直停留在模拟和概念阶段, 直到 1986 年 Reimers 等首次利用微电极对深海底泥的 OPD 进行原位研究^[4]. 随后, 国内外学者针对氧气在底泥中的分布开展了大量的实验室及原位研究^[5-11]. 人们在研究各种底泥环境中 OPD 及其分布的重要意义的同时, 也关注着影响 OPD 的环境因素, 例如扩散、水平对流、生物扰动、好氧异养生物活动和还原物质(NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , HS^-)的氧化等^[12].

由于目前大部分相关试验针对深海开展, 而深海的水文条件、温跃层和生物影响等因素和浅水湖泊有很大差异. 在浅水湖泊, 特别是动力扰动频繁的浅水湖泊中相关试验较少, 关于波浪扰动条件下浅水湖泊底泥中 OPD 的研究报道更是少见. 本文利用溶解氧微电极技术, 在室内波浪水槽中开展波浪动力扰动条件对底泥 OPD 的影响研究, 以期解释动力扰动条件下浅水湖泊水土界面微环境变化特征和探讨内源释放机理提供理论依据.

1 试验材料与试验方法

1.1 试验底泥和波浪水槽

本文试验所用泥柱于 2009 年 5 月 18 日采自太湖梅梁湾中部区域, 采样点水域开阔, 水体富营养化严重, 泥层较厚. 自制有机玻璃采泥管直径 5 cm, 长 20 cm. 采泥柱从上而下按 0.5 cm 间隔分层, 共分 6 层, 带回实验室进行背景分析. 当天赶回南京将泥柱置于南京水利科学研究院波浪水槽中, 平衡一夜后, 于第 2 日开始试验.

波浪水槽如图 1 所示, 长度为 25 m, 内宽 0.5 m, 高度 0.8 m. 波浪水槽一端装有推板式造波机, 用以制造固定周期的波高. 另一端为消浪网装置. 中间玻璃观测段长约 15 m, 铺设底泥段长约 7 m. 在底泥铺设端的两

端均设有 MTS 公司生产的电容式波高仪以测量波高,所得均值即为试验波高.泥柱插于底泥中部,上端与泥面相平.

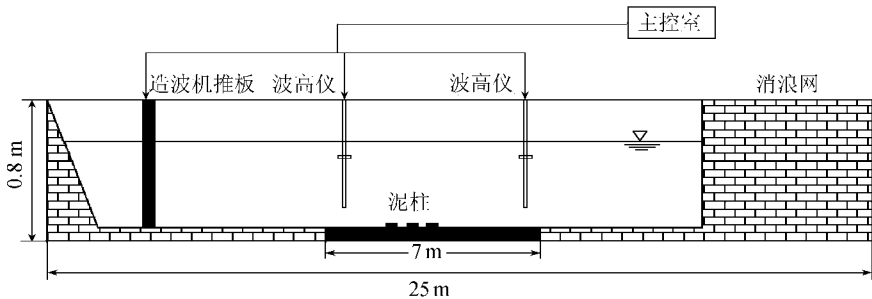


图 1 波浪水槽示意图

Fig. 1 Layout of wave flume

正式试验时采用太湖中常见的 1.5 s 波周期,分别按波高 4 cm 和波高 10 cm 持续造波 2 h.

1.2 底泥氧气侵蚀深度测定

溶解氧的测定采用溶解氧微电极 (PreSens, 德国) 进行. 电极反应时间小于 1 s. 使用前采用饱和空气 (100% 氧气) 和饱和 Na₂SO₃ 纯净水 (0% 氧气) 进行两点校准. 试验时,将微电极安装在微电极操作器上,利用放大镜裸眼确定水土界面后,每隔 0.2 mm 下移一次进行连续测定,直至氧气质量浓度减小为 0 mg/L 为止. 按照以上方法,分别测定造波前、波高 4 cm 持续造波 2 h 后和波高 10 cm 持续造波 2 h 后 3 次各 3 根泥柱.

1.3 泥样分析

泥样的含水量参照《湖泊富营养化调查规范》^[13] 测定,孔隙率根据 Noel 等的公式计算^[14] :

$$P = \frac{(W_w - W_d) \times 100}{(W_w - W_d) + W_d/2.5} \times 100\%$$

式中:W_w——新鲜底泥质量;W_d——烘干后底泥质量.

粒径由英国 Malvern 公司生产的 Masterisizer 2000 型激光粒度仪分析.

2 试验结果与分析

2.1 采样点泥样背景值

太湖梅梁湾采样点底泥性质如图 2 所示. 泥样表层 3 cm 的含水量和孔隙率自上而下逐渐降低,而 D50 中值粒径与底泥深度没有明显相关.

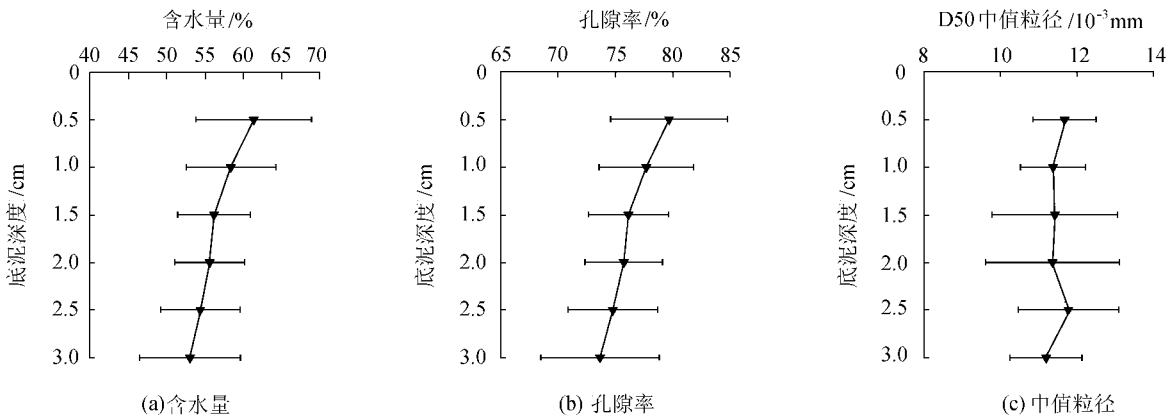


图 2 采样点泥样含水量、孔隙率和中值粒径垂直分布

Fig. 2 Vertical profiles of water content, porosity and median grain size of sediment

2.2 波浪对底泥的侵蚀

试验过程中观察到,波高 4 cm 持续造波 2 h 后,泥柱表层底泥表面基本没有受到侵蚀.而在波高 10 cm 持续造波 2 h 后,泥柱表层底泥受侵蚀非常明显,达到 (1.33 ± 0.15) cm. 如图 3 所示,左边泥柱是初始状态,右边泥柱是波高 10 cm 持续造波 2 h 后的状况.

2.3 波浪对 OPD 的影响

波浪动力扰动对底泥中 OPD 的影响如图 4 所示. 经过一夜平衡之后, 初始状态下底泥表层的溶解氧质量浓度为 6.29 mg/L, 随着深度增加, 溶解氧质量浓度逐渐降低, 约在底泥深度为 5 mm 时接近于 0.00 mg/L. 该曲线拟合方程为

$$H = -0.0777\rho(\text{DO})^2 + 1.2559\rho(\text{DO}) - 4.92 \quad (R^2 = 0.9987)$$



图 3 泥面受波浪侵蚀示意图
Fig. 3 Physical erosion of surface sediment by waves

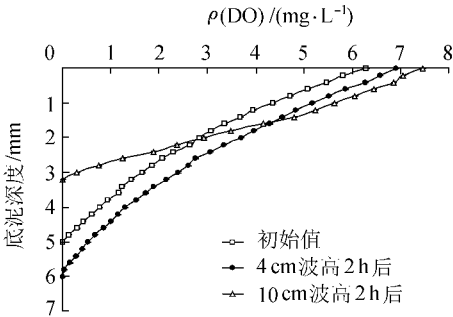


图 4 不同波高对沉积物-水界面溶解氧层的影响
Fig. 4 Effects of different wave heights on oxygen layers of sediment-water interface

经 4 cm 波高持续造波 2 h 后, 底泥表层的溶解氧质量浓度明显升高, 达到 6.90 mg/L. 随着底泥深度增加, 溶解氧的质量浓度逐渐降低, 且拟合曲线斜率与初始状态时相近, 约在底泥深度为 6 mm 处接近 0.00 mg/L. 该曲线拟合方程为

$$H = -0.0728\rho(\text{DO})^2 + 1.3042\rho(\text{DO}) - 5.7162 \quad (R^2 = 0.9968)$$

经 10 cm 波高持续造波 2 h 后, OPD 发生了明显的改变. 底泥表层溶解氧质量浓度由于波浪的复氧作用仍呈升高趋势, 约为 7.45 mg/L. 随着底泥深度的增加, 溶解氧质量浓度降低, 约在底泥深度为 3.2 mm 时即达到 0.00 mg/L. 该曲线拟合方程为

$$H = 0.0123\rho(\text{DO})^2 + 0.3093\rho(\text{DO}) - 3.0738 \quad (R^2 = 0.9955)$$

斜率明显小于初始值和 4 cm 波后.

3 讨 论

3.1 波浪对底泥的物理侵蚀深度

前人研究结果表明, 波浪切应力对湖泊底泥的作用效果受各种复杂因素的影响. 由于底泥临界起动应力与底泥粒径、黏性、含水率、密度和其他化学特性有关, 目前并没有很好的观察和判断湖泊原位底泥物理侵蚀深度的手段与技术. 本文试验中, 采用采集野外泥柱带回实验室进行水槽试验的方法, 一方面避免了野外底泥层理结构的破坏, 另一方面也能直观地观察到侵蚀状况. 试验结果显示, 表层底泥在 4 cm 波影响下基本未见侵蚀, 与秦伯强等^[15-16]的研究结果基本一致. 然而 10 cm 波对底泥的侵蚀程度明显大于前人研究结果, 其原因可能是由于受采泥管管壁产生的回旋涡流影响, 加上部分悬浮起来的底泥没能沉降回采泥管中, 波浪引起的侵蚀作用被放大, 导致侵蚀程度加深.

3.2 波浪对 OPD 的影响

底泥表层的溶解氧层一直受到众人关注. OPD 是表征深海底泥中微生物活动的有效指标^[17], 也可以反应深海底泥中发生的早期成岩作用等大部分生物地球化学过程^[1]. 由于以往相关试验主要在深海中开展, 因此关注的是底泥物理或者化学性质, 以及生物扰动对 OPD 的影响, 而波浪对 OPD 影响的研究少见报道. 本文研究结果表明, 在小波时, 波浪扰动在引起水体复氧的同时, 也将加速沉积物-水界面的气体交换, 从而导致 OPD 加深. 而在扰动达到一定的强度, 足以破坏原有沉积物-水界面, 引起大量底泥悬浮时, 原来浅层底泥被侵蚀, 同时被侵蚀的还有原来的溶解氧层, 这与 Gerhardt 等^[18]的研究结果部分一致. 而野外调查结果显示, 越往下, 底泥的含水量和孔隙率越低, 因此, 氧气的侵蚀也就越困难. 这也就导致了大波过后, 表层底泥的溶解氧层没有加深, 反而呈现变浅的现象.

3.3 OPD 的改变对营养盐释放的影响

很多湖泊学家研究营养盐在底泥与上覆水间交换时,也对溶解氧层给予了足够的重视^[19-22].而风浪扰动引起底泥悬浮,同时营养盐大量释放的现象已有大量报道.更有学者发现了随着扰动的持续,水体中的溶解性营养盐,特别是溶解态磷并未一直升高,反而在后期出现降低的现象.以往的研究将其归结为铁、锰氧化物的吸附作用.而笔者的研究发现,OPD 的改变也有可能是其共同机制.小波状态下水体逐渐复氧,并且由于氧气的扩散,OPD 与初始状态相比有所加深,从而增加了好氧菌的活动范围,同时对营养盐的释放将产生抑制作用,朱广伟等^[23]的试验结果也证实了这一现象.10 cm 波高状态时,底泥发生大量悬浮.在波浪对底泥的物理侵蚀作用下,原表层底泥的含氧层完全被侵蚀,露出原厌氧环境.在此过程中,悬浮释放和厌氧环境下 2 种释放机制同时起作用,使营养盐大量释放.受技术手段限制,前人在进行水动力对内源释放通量影响研究时大部分研究悬浮产生的释放,而对后者没有足够的关注.随后由于复氧过程,上覆水中的氧气逐渐扩散进表层底泥,重新形成营养盐释放“抑制层”,从而减少了底泥的释放,加上铁、锰氧化物吸附作用,共同导致了持续扰动后期水体中溶解态磷浓度的减小.

4 结 论

本文通过室内波浪水槽试验,利用溶解氧微电极研究了波浪对太湖梅梁湾底泥中 OPD 的影响.试验结果表明:小波可以增加沉积物-水界面水体溶解氧质量浓度和底泥中 OPD,而一旦波大到能造成表层底泥受到严重的物理侵蚀时,原溶氧层将被破坏而形成新的较之前浅的溶氧层.

参考文献:

[1] RYSGARRD S, GLUD R N, RISGARRD-PETERSEN N, et al. Denitrification and anammox activity in Arctic marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49: 1493-1502.

[2] THAMDRUP B, CANFIELD D E. Benthic respiration in aquatic sediments, methods in ecosystem science [M]. New York: Springer, 2000: 86-103.

[3] BENDER M L, HEGGIE D T. Fate of organic carbon reaching the deep sea floor: a status report [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 977-986.

[4] REIMERS C E, FISCHER K M, MEREWETHER R, et al. Oxygen microprofiles measured in situ in deep ocean sediments [J]. *Nature*, 1986, 320: 741-744.

[5] REIMERS C E. An in situ microprofiling instrument for measuring interfacial pore water gradients: methods and oxygen profiles from the North Pacific Ocean [J]. *Deep-Sea Research*, 1987, 34(12): 2019-2021.

[6] GUNDERSEN J K, JØRGENSEN B B. Microstructure of diffusive boundary layers and oxygen uptake of the seafloor [J]. *Nature*, 1990, 345: 604-607.

[7] GUNDERSEN J K, JØRGENSEN B B, LARSEN E, et al. Mats of giant sulphur bacteria on deep-sea sediments due to fluctuating hydrothermal flow [J]. *Nature*, 1992, 360: 454-455.

[8] CAI Wei-jun, REIMERS C E. The development of pH and $p\text{CO}_2$ microelectrodes for studying the carbonate chemistry of pore waters near the sediment-water interface [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, 38(8): 1762-1773.

[9] CAI Wei-jun, REIMERS C E, SHAW T. Microelectrode studies of organic carbon degradation and calcite dissolution at a California continental rise site [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(3): 497-511.

[10] RASMUSSEN H, JØRGENSEN B B. Microelectrode studies of seasonal oxygen uptake in a coastal sediment: role of molecular diffusion [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 261: 289-303.

[11] JØRGENSEN B B, GLUD R N, HOLBY O. Oxygen distribution and bioirrigation in Arctic fjord sediments (Svalbard, Barents Sea) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 292: 49-58.

[12] WENZHÖFER H, HOLBY O, KOHLS O. Deep penetrating benthic oxygen profiles measured in situ by oxygen optodes [J]. *Deep-Sea Research I*, 2001, 48: 1741-1755.

[13] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

[14] NOEL R U, CHRISTIAN D, BEMHARD W. Solute transfer across the sediment surface of a eutrophic lake: I. porewater profiles from dialysis samplers [J]. *Aquat Sci*, 1997, 59: 1-25.

[15] QIN Bo-qiang, HU Wei-ping, GAO Guang, et al. The dynamics of resuspension and conceptual mode of nutrient releases from sediments in

large shallow Lake Taihu, China[J]. Chinese Sciences Bulletin, 2004, 49: 54-64.

- [16] LUO Lian-cong, QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei, et al. Nutrient fluxes induced by disturbance in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Science in China Series D Earth Sciences, 2006, 49(Sup 1): 186-192.
- [17] GLUD N R, WENZHÖFER F, TENGBERG A, et al. Distribution of oxygen in surface sediments from central Sagami Bay, Japan: in situ measurements by microelectrodes and planar optodes[J]. Deep-Sea Research I, 2005, 52: 1974-1987.
- [18] GERHARDT S, SCHINK B. Redox changes of iron caused by erosion, resuspension and sedimentation in littoral sediment of a freshwater lake[J]. Biogeochemistry, 2005, 74: 341-356.
- [19] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖底泥-水界面氮磷交换的影响[J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 337-342. (FAN Cheng-xin, MORIHIRO A. Effects of aerobic and anaerobic conditions on exchange of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in Lake Kasumigaura[J]. Journal of Lake Sciences, 1997, 9(4): 337-342. (in Chinese))
- [20] 吴又先. 土壤氧化还原过程及其生态效应[J]. 土壤学进展, 1995, 23(4): 32-37. (WU You-xian. Soil oxidation-reduction process and its ecological effects[J]. Progress in Soil Science, 1995, 23(4): 32-37. (in Chinese))
- [21] HOHENER P, GACHTER R. Nitrogen cycling across the sediment-water interface in an eutrophic artificially oxygenated lake[J]. Aquatic Sciences, 1994, 56(2): 115-131.
- [22] SPAN D, ARBOUILLE D, HOWA H, et al. Variation of nutrient stocks in the superficial sediments of the Lake Geneva from 1978 to 1988[J]. Hydrobiologia, 1990, 207: 161-166.
- [23] 朱广伟, 秦伯强, 张路, 等. 太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 61-68. (ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, ZHANG Lu, et al. Wave effects on nutrient release of sediments from Lake Taihu by flume experiments[J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1): 61-68. (in Chinese))

Effects of waves on oxygen penetration depth of sediment from Meiliang Bay of Taihu Lake

WANG Yong-ping^{1,2}, WU Ting-feng¹, DING Yan-qing^{1,2}, SHEN Xia³,
ZHU Guang-wei¹, HONG Da-lin³, QIN Bo-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. River and Harbor Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Through laboratory wave flume experiments, the effects of waves on oxygen penetration depth (OPD) of lake sediment from Meiliang Bay of Taihu Lake were studied by using oxygen microsensor. It was found that the OPD of sediment from Meiliang Bay was about 5 mm after being balanced in the flume for one night. After effects of little waves 4 cm in height for 2 hours, the surface of the sediment was not eroded by and large. While the oxygen concentration of sediment surface was raised from 6.29 mg/L to 6.90 mg/L, and the OPD was about 6 mm. The fitting equations for the initial values and the little waves had similar slopes (-0.0777 and -0.0728). After effects of strong waves 10 cm in height for 2 hours, the surface of sediment was eroded about (1.33 ± 0.15) cm, which might be influenced by the eddy waves produced by tube wall. Meanwhile, the OPD was reduced to about 3.2 mm, and the slope of the fitting equation became 0.0123. A conclusion is drawn that the little waves can raise the surface oxygen concentration and the OPD, while the strong waves cause physical erosion of surface sediment and destroy the original oxygen layer so as to induce new and shallow OPD. It will further have impact on the activities of microbes and the release of nutrients in the sediment.

Key words: laboratory wave flume experiment; physical erosion; oxygen microsensor; oxygen penetration depth; Taihu Lake