

浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子——铁和水动力

朱广伟, 秦伯强, 高 光

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘 要: 就当前湖泊内源磷释放机制研究中的几个主要方面进行了探讨, 指出了研究中的不足, 为进一步研究湖泊磷的内源释放机制和湖泊富营养化治理提供参考。

关键词: 磷; 内源负荷; 湖泊; 沉积物; 富营养化

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2003)06 – 0762 – 03

Hydrodynamics and Iron: The Key Factors Affecting Resuspension of Phosphorus from Shallow Lake Sediments

ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The releasing mechanism of phosphorus from lake sediments has been studied for several decades, while the internal loading of phosphorus, as well as the relative eutrophication problem, is still difficult to be solved. What were ignored by the previous studies may be the hydrodynamics. In this review, the effects of hydrodynamics and iron geochemistry on biogeochemistry of phosphorus in shallow lake were discussed.

Keywords: phosphorus; internal loading; lake; sediment; eutrophication

湖泊富营养化是一个全球性的环境问题。高营养盐负荷是湖泊富营养化的主要成因之一。控制、降低水体营养盐浓度作为湖泊富营养化治理的前提, 已经成为国内外湖泊生态管理者的共识。在 C、N、P、S、Si、Fe、Mn 等各种营养元素中, 磷是湖泊富营养化最常见的限制性营养盐。控制湖泊的磷负荷成为许多湖泊富营养化治理的基本条件之一。

湖泊磷的来源主要包括外源输入和内源释放。随着环境管理的不断完善, 湖泊外源磷的输入逐渐得到有效的控制, 内源释放的影响就显得尤为突出。许多富营养化湖泊的治理经验表明, 治理工作的后期难点基本都转到如何有效控制沉积物的内源释放问题上来。然而, 尽管对湖泊磷的内循环问题已经进行了数十年的研究, 仍无法提出行之有效的内源磷释放控制措施。尤其是在富营养化相对更为严重的浅水湖泊, 进一步的研究仍是非常必要的。本文对湖泊内源磷释放机制研究中存在的几个问题进行了探讨。

1 沉积物磷释放的影响因素

湖泊内源磷的释放是一个涉及湖泊物理、化学、生物过程的极其复杂的过程。当湖泊中的磷主要以有机磷的形式沉积

到沉积物表面时, 一系列的物理、化学、生物过程随之发生, 即沉积物的早期成岩过程 (Diagenesis)。在沉积物的早期成岩过程中, 磷的释放是非常明显的。一般在沉积物 C、N、P 含量的垂向分布中, 随着沉积深度的增加, C/P、N/P 比都呈明显的下降趋势^[1], 说明沉积物早期成岩过程中, 磷的再利用程度远大于碳和氮。

沉积物磷释放的影响因子非常复杂。沉积物 – 上覆水的氧化还原电位、pH、水生生物状况、有机质的含量及组成、铁锰氧化物、水动力状况、温度、光照等等外界条件都会影响这一过程^[2~6]。而且同一影响因子对磷释放的影响作用也是多方面的。比如升高温度既可以增加无机磷在沉积物胶体上的吸附 – 解吸速率, 加快磷的释放, 还可以影响沉积物表面上的微生物活动; 有机质本身是沉积物中主要的磷库之一, 同时有机质又可以通过吸附影响磷的释放; 大型水生植物, 生长过程中需要吸收水体、沉积物中的无机磷, 其根际环境又可以通过根际分泌物、根际微生物群落影响沉积物中磷的循环。如此复杂的释放机制, 在实际水体当中哪个因子占主导作用? 目前的研究结果似乎还不能回答这个问题, 在实际湖泊富营养化控制中, 也很难提出操作性强的沉积物磷释放控制措施。大多数关于沉积物磷释放影响因子的研究都是在室内模拟实验条件下获得的, 这些模拟试验的试验条件很难与实际环境一致, 尤其是风浪等水动力作用影响强烈、水生生物活动多样的浅水湖泊, 实验室模拟的能力很有限。因此, 必须谨慎应用这些实验室研究结果进行实际的湖泊富营养化治理。另外, 针对具体的湖

收稿日期: 2002 – 11 – 19

基金项目: 中科院知识创新重大项目 (KZCX1 – SW – 12 – 11 – 02); 国家自然科学基金项目 (40203007; 40071019); 中国博士后科学基金 (2002031226)

作者简介: 朱广伟 (1972—), 男, 博士研究生, 从事水体沉积物中污染物的环境行为研究工作。E – mail: gwzhu@niglas. ac. cn

泊,长期的、系统的观测研究非常必要,而不应在湖泊发生了富营养化之后,各种相关的因子都进行控制,即所谓的十全大补的控制对策。

2 沉积物中的铁与磷的内源释放

铁对沉积物中磷释放的影响在 20 世纪 90 年代初就受到研究者的关注。丹麦科学家 Jensen^[7]在对丹麦 100 多个湖泊沉积物中 Fe 和 P 的调查发现,沉积物中的总铁含量与总磷含量呈显著正相关。然而湖泊上覆水中的总磷浓度却与沉积物中 Fe:P 比呈负相关。沉积物中 Fe:P 越大,上覆水中的总磷浓度就越低。根据这一调查结果,Jensen 认为沉积物 Fe:P 比为 15 时可以作为沉积物磷释放是否显著的判断标准。然而 Jensen 的这一研究结果并没有在后期的研究中得到重视,也没有进一步的研究报告出现。该情况对丹麦的情况适用,是否在世界其它地区适用也需要作进一步研究。另外,关于沉积物 Fe:P 比与上覆水总磷含量之间相关的原因,以及沉积物铁、磷相关之间的机制也还不清楚。

铁结合态磷(即按照连续提取法进行分级时的还原提取态磷)是沉积物中性质最活泼的一种磷的存在形态。Rydin 等^[8]利用硫酸铝限制沉积物中磷的释放时发现,对于沉积物 NH_4Cl 提取态磷(即可交换态磷)含量相当而铁磷含量相差悬殊的沉积物,达到同样的固定效果时铁磷含量高的沉积物需要的硫酸铝固定剂量是铁磷含量低的沉积物的 6 倍。也就是说,铁磷对水体磷沉淀剂起到了很大的缓冲作用。在进一步的研究中^[9],Rydin 利用连续流动法测定沉积物中各种形态的磷在氧化、还原条件下的释放潜力,同样发现沉积物中的铁磷几乎都具有活性,还原环境下沉积物中的铁磷几乎全部可以释放出来。进一步证明了铁磷的不稳定性。

以上两方面的研究结果说明,沉积物磷的释放与铁的存在关系密切。在一定条件下沉积物中的铁结合态磷有时是上覆水的主要磷释放源。那么,在何种条件下沉积物中的铁表现出汇的作用,什么情况下又表现出源的作用,这种源汇转化的机制如何,并没有很好地得到研究。

3 沉积物-水界面的铁、锰、硫循环与沉积物磷释放

近几年,铁、锰、硫循环由于在沉积物的早期成岩过程中起到极为关键的作用而备受关注^[10,11]。该观点是 Canfield 在 1993 年系统提出的^[12]。沉积物早期成岩过程中的铁、锰、硫机制的提出很好地解决了当时争议很大的海洋沉积物中有机质的矿化机制问题,同时 Canfield 又通过模拟试验证明了这一机制的存在。根据沉积物中的电子受体的反应自由能顺序^[13],当沉积物中氧的供应缺乏时,铁锰氧化物就成为有机质分解时微生物利用的主要电子受体。由于大多沉积物中的铁锰供给远远较氧的供给丰富,铁-锰-硫循环成为沉积物早期成岩过程中最基本的地球化学循环过程之一。

随后,万国江、陈振楼、吴丰昌等人以云贵高原湖泊为研究对象,对沉积物-水界面的 Fe-Mn-S-C-N 循环进行了一系列的研究^[10,14~18]。如陈振楼在调查贵阳阿哈湖沉积物-水

界面的 Fe、Mn 释放特征时发现,在沉积物-上覆水界面存在一个清晰的、梯度很大的 Fe、Mn、S 浓度界面^[19]。如此大的浓度梯度的存在,对沉积物-上覆水的化学交换过程必定产生很大的影响。另外,突变界面并不一定与沉积物的物理界面保持一致,几种电子受体之间的突变界面也不相同,表明他们在电子供给能力上的区别。

进一步的研究发现,沉积物-水界面附近的铁锰氧化-还原边界层在一年中并不是一成不变的,而是随着季节变化明显地发生迁移^[10,15,20]。如马英军^[20]在研究泸沽湖的沉积物-水界面地球化学行为时发现,冬天由于水生生产力低下,沉积物-水界面的供氧相对充足,水中(包括间隙水)铁锰的浓度峰值界面明显下移,与之对应,沉积物中铁锰的含量也较高。在夏季,由于大量的生物耗氧降解作用,氧化还原界面上移到水体中,沉积物中铁锰的浓度也明显下降。沉积物中铁锰的这种季节性变化对于有机质降解、C、N、P、S、重金属的迁移转化等早期成岩过程有重要影响^[10,14~18]。

沉积物-上覆水界面附近的性质突变明显、季节性变化多样的铁、锰、硫化学界面及其循环过程必将对沉积物-上覆水之间的磷交换产生重要影响。然而由于沉积物-水界面铁-锰-硫的循环规律研究工作开展时间短,对于沉积物-水界面铁-锰-硫等的循环与沉积物磷的释放-沉积之间的关系一直没有得到研究。从目前的研究时间尺度上,目前对于铁-锰-硫循环的变化主要考虑的是季节性变化,没有更短时间尺度上的循环研究,如风浪等水动力周期中的环境效应研究。铁-锰-硫循环中氧化还原反应的速度很快,短时间尺度上的铁-锰-硫循环规律研究可能对理解沉积物磷释放以及富营养化的发生机制、湖泊藻类暴发机制等具有更重要的参考价值。由于实验条件和费用等方面的限制,目前关于湖泊沉积物-水界面铁-锰-硫循环的观测主要是湖中一两个观测点、一年进行一两次观测。由于沉积物在空间分布上的差异性很大,氧化还原变化较大^[21],如此低的采样频率和密度研究中的一些结果也需要更多的观测结果来进一步验证。另外,铁-锰-硫循环研究主要集中在海洋沉积物和深水湖泊中,极少涉及浅水湖泊。那么,在氧化还原电位状况及变化明显不同于深水水体的浅水湖泊当中,沉积物-水界面的铁-锰-硫循环规律如何?铁-锰-硫循环与沉积物磷释放之间的关系如何?是一个值得探讨的问题。

4 水动力作用与沉积物磷释放

由于大多数人类活动都集中在浅水湖泊地区,所以浅水湖泊的富营养化的发生也比深水湖泊普遍。浅水湖泊中明显不同于深水水体的特征是风浪等水动力作用可以大大影响沉积物-水界面的物质交换。许多观测发现强风作用可以大大增加浅水湖泊沉积物的再悬浮量^[22~25]。强风引起的水动力扰动既可能会增加湖泊磷的沉积^[26],也可能会增加沉积物向水体释放磷的通量^[27]。Kristensen 等^[28]在 1988 年 8 月对丹麦一个浅水湖泊的观测发现,当风速由 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,水中悬浮物(SS)浓度由 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $190 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷

的浓度由 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。室内水动力扰动的模拟实验也发现类似现象^[29]。范成新等人对湖沉积物磷释放的模拟研究发现, 水体扰动可以使覆水磷浓度增加数倍^[6]。然而沉积物磷的释放并不与水体扰动强度成正比。例如王庭健^[4]模拟水动力对玄武湖沉积物磷释放的影响时发现, 扰动可以增加上覆水磷浓度, 但扰动强度增加到一定程度时上覆水磷浓度反而下降。由文辉^[30]在研究华东师范大学的校河时也发现了类似的现象。这反映出水动力作用对沉积物磷交换的双重影响特点。其中沉积物的源、汇转换机制并不十分明确。可能的一点是水动力作用增加了水体复氧强度, 从而改变有机质降解速率和途径, 影响了磷在沉积物中的沉积机制。

总磷浓度的变化并不能完全反映出水动力作用对沉积物磷释放的影响。Sondergaard 等^[27]模拟研究发现, 水动力作用下沉积物磷的再悬浮是有选择性的。沉积物再悬浮引起的上覆水 TP 浓度和溶解态活性磷浓度都相应增加, 但在水动力作用停止后, TP 浓度下降的速度明显大于 SRP 的下降速度, 也就是说, 沉积物再悬浮更多地引起溶解态活性磷的释放。那么, 在水动力过程强烈干扰下的浅水湖泊中沉积物-水界面磷的释放机制与深水湖泊有何不同, 需要进一步研究。

关于水体沉积物的内源释放机制问题虽然已经进行了多年的研究, 但是对于风浪等水动力作用影响强烈的浅水湖泊关注较少, 对水动力作用与沉积物磷循环之间的关系认识还很不足。沉积物-水界面的铁-锰-硫循环与包括磷的沉积和释放在内的沉积物早期成岩过程有密切的联系, 然而这方面的研究也主要在海洋、高原湖泊等深水水体中进行, 其研究也主要针对沉积物-水界面氧化还原状况的季节性变化, 对于风浪等水动力作用影响下的短期界面循环规律并未进行研究。尽管大量研究发现沉积物中的铁对磷的释放-沉积行为具有关键的影响作用, 然而并未将沉积物-上覆水界面铁锰硫的循环与磷的释放行为联系起来进行研究。解决湖泊的富营养化问题, 这些方面的深入研究还很必要。

参考文献:

[1] Brenner M, Keenan L W, Miller S J, et al. Spatial and temporal patterns of sediment and nutrient accumulation in shallow lakes of the Upper St. Johns River Basin, Florida[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 1999, 6: 221–240.

[2] 翁焕新, 刘云峰, Armstrong D. 滨海沉积物和间隙水中的磷研究——以美国墨西哥湾为例[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2): 148–153.

[3] 焦念志. 关于沉积物释磷问题的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1989, (2): 80–84.

[4] 王庭健, 苏 睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(4): 12–19.

[5] 王晓蓉, 华兆哲, 徐 菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 15–19.

[6] 范成新. 湖沉积物理化特征及磷释放动力学[J]. 湖泊科学, 1995, 7(4): 341–350.

[7] Jensen H S, Kristensen P, Jeppesen E, et al. Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 235/236: 731–743.

[8] Rydin E and Welch E B. Aluminum dose required to inactivate phosphate in lake sediments[J]. *Water Research*, 1998, 32(10): 2969–2976.

[9] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037–2042.

[10] 罗莎莎. 云贵高原湖泊近代沉积作用的 Fe、Mn、S 指示[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士学位论文, 2001.

[11] 罗莎莎. 湖泊沉积物早期成岩过程中铁-锰-硫体系的研究——以云贵高原洱海、泸沽湖及奥地利 Wallersee 为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所硕士学位论文, 1998.

[12] Canfield D E, Thamdrup B, Hansen J W. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: Iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction[J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1993, 57: 3867–3883.

[13] Froelich P N, Klinkhammer G P, Bender M L, et al. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: Suboxic diagenesis[J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1979, 43: 1075–1090.

[14] 吴丰昌. 云贵高原湖泊沉积物和水体氮、磷和硫的生物地球化学作用和生态环境效应[J]. 地质地球化学, 1996, 24(6): 88–89.

[15] 万 曦, 万国江, 黄荣贵, 等. 阿哈湖 Fe、Mn 沉积后再迁移的生物地球化学机理[J]. 湖泊科学, 1997, 9(2): 129–134.

[16] 吴丰昌, 白占国, 万国江, 等. 贵州百花湖沉积物中磷的再迁移作用[J]. 环境科学进展, 1996, 4(3): 58–61.

[17] 马英军, 万国江. 湖泊沉积物-水界面微量重金属扩散作用及其水质影响研究[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 7–11.

[18] 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录[J]. 地球化学, 2000, 29(2): 189–197.

[19] 陈振楼, 普 勇, 黄荣贵, 等. 阿哈湖沉积物-水界面 Fe、Mn 的季节性释放特征[J]. 科学通报, 1996, 41(7): 629–632.

[20] 马英军, 万国江, 刘丛强, 等. 泸沽湖氧化还原边界层的季节性迁移及其对水质的影响[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 27–30.

[21] Oehm N J, Luben T J, Ostrofsky M L. Spatial distribution of acid-volatile sulfur in the sediments of Canadota Lake, PA[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 345: 79–85.

[22] Aalderink R H, Lijklema L, Breukelman J, et al. Quantification of wind-induced resuspension in a shallow lake[J]. *Water Science & Technology*, 1984, 17: 903–914.

[23] Carper G L and Bachmann R W. Wind resuspension of sediments in a prairie lake[J]. *Canadian Journal of Fishery Aquatic Science*, 1984, 41: 1763–1767.

[24] Luetlich R A, Harleman D R F and Somlódy L. Dynamic behaviour of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events[J]. *Limnology & Oceanography*, 1990, 35: 1050–1067.

[25] Bengtsson L, Hellstrom T, and Rakoczy L. Redistribution of sediments in three Swedish lakes[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 192: 167–181.

[26] Gunatilaka A. Phosphate adsorption kinetics of resuspended sediments in a shallow lake, Neusiedlersee, Austria[J]. *Hydrobiologia*, 1982, 91: 293–298.

[27] Sondergaard M, Kristensen P and Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind exposed Lake Arreso, Denmark[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228: 91–99.

[28] Kristensen P, Sondergaard M and Jeppesen E. Resuspension in a shallow eutrophic lake[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 228: 101–109.

[29] 张 路, 范成新, 秦伯强, 等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 35–42.

[30] 由文辉. 沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 上海环境科学, 1997, 16(12): 23–25.