

湖泊生态系统有机磷相关研究进展

杨森

重庆三峡学院重庆市三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室

DOI:10.12238/eep.v7i11.2329

[摘要] 在湖泊生态系统中,磷能够凭借对初级生产力的作用,进而影响水气CO₂通量,对全球碳循环以及生态环境的改变产生作用。有机磷(Po)作为湖泊中关键的磷组分,其形成、转化以及藻华爆发受到多种过程的调控。但现有的研究关于湖泊内部的有机磷系统的来源及影响分析较少。因此,本文主要对Po的预处理技术、针对Po化学组成与生物利用度的研究情况、湖泊与生物地球化学过程Po的来源分析以及影响因素、湖泊沉积物与水界面物质交换过程量化分析。本文结果将会为进一步了解湖泊富营养化及其控制提供科学依据。

[关键词] 湖泊生态系统; 有机磷含量; 碳循环; 富营养化

中图分类号: Q148 文献标识码: A

Progress in the study of composition, sources and environmental impacts of organic phosphorus in lake ecosystems

Sen Yang

Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Prevention in Chongqing Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Three Gorges University

[Abstract] In lake ecosystems, phosphorus can contribute to the global carbon cycle and ecosystem modification by virtue of its role in primary productivity, which in turn affects water-gas CO₂ fluxes. Po as a key phosphorus component in lakes, its formation, transformation, and algal bloom outbreaks are regulated by a variety of processes. However, few existing studies have analyzed the sources and effects of organic phosphorus systems within lakes. Therefore, this paper focuses on the pretreatment techniques of Po, the studies on the chemical composition and bioavailability of Po, the analysis of the sources of Po in lakes and biogeochemical processes and the factors affecting them, and the quantitative analysis of the processes of material exchange at the interface between lake sediments and water. The results of this paper will provide a scientific basis for further understanding of lake eutrophication and its control.

[Key words] Lake ecosystems; Organic phosphorus content; Carbon cycle; Eutrophication

引言

湖泊作为重要的水生生态系统,在地球的生态平衡与物质循环中扮演着重要角色。在城市化等多重影响下,全球湖泊面临着严重的水资源短缺问题,水环境恶化和脆弱性增加。磷是湖泊中的基本营养物质之一,其分布、含量和地球化学循环直接影响水生植物的初级生产力和浮游生物的数量,进而影响全球碳循环甚至全球气候。但以往湖泊沉积物磷释放研究主要针对总磷和无机磷^[1],而忽视了对整体释放过程的分析。近年来,随着沉积物外源磷负荷得到有效防控,其沉积物内源磷释放正不断成为水体磷负荷的重要贡献来源^[2]。磷在湖泊中是重要的限制元素,大气中O₂和CO₂的变化是由磷的变化引起的,碳循环与磷含量紧密相关。因此,控制水环境磷负荷是维持湖泊环境质量的首要问题。

自2000年来,科研投入增加使典型湖泊富营养化综合指数达拐点、总磷得到较好控制,但蓝藻华爆发的严重程度和频率并未降低。研究表明:有机磷占沉积物中磷总量的21~60%,占水生植物和藻类中总磷的15.5~72.4%,占颗粒物总磷的50%以上^[3]。它也是生物可利用磷的潜在来源,导致蓝藻藻华频繁爆发,是维持地表水富营养化状态的关键因素。本文综述了近年来湖泊有机磷的研究进展,目的在于能够更加深入、全面地认识湖泊中磷的来源途径及动态变化规律,从而有效控制湖泊水体富营养化,本研究综述了目前的研究方法及常见问题,旨在为湖泊生态保护提供合理的解决方案。

1 湖泊生态系统中有机磷的化学组成及结构特征研究进展

目前,主流的方法是采用固、液态 ^{31}P 核磁共振光谱、傅里叶变换红外光谱和傅里叶变换离子回旋共振质谱等表征湖泊Po的化学成分。液态 ^{31}P 核磁共振光谱广泛用于表征多媒体中Po的化学成分,该技术可以精确地分离Po组分,其中包括无机磷和Po。无机磷包括正磷酸盐、焦磷酸盐和聚磷酸盐,Po包括单磷、磷酸二酯和磷酸盐。

溶解态磷(DP)和颗粒态磷(PP)都含有大量的单磷,但前者含有更多磷酸二酯分子。而单磷是磷的主要成分,分别约占水生植物和藻类总磷的90%和80%。不同营养状态的淡水湖中,溶解态磷和颗粒态磷的组成结构和分布不同,中度富营养化湖泊>轻度富营养化湖泊>中营养化湖泊。相关结果显示,富营养化湖泊应重视正磷酸盐和单磷的施用。在充分考虑湖泊及营养类型的变化后,建议对湖泊科学分类,以确保富营养化控制策略的有效实施。研究显示Ortho-P和Mono-P在DP和PP中都占主导地位,PP中焦磷酸盐的用量是DP的5倍(图1)。

藻类和水生植物含有22种形式的磷,单磷和磷酸二酯在Po中占主导地位,还有一些甘油酯和腺苷酸。单磷在藻类和水生植物中分别占Po的80%和90%。这表明藻类残留物是湖泊颗粒物质的主要来源(图2)。

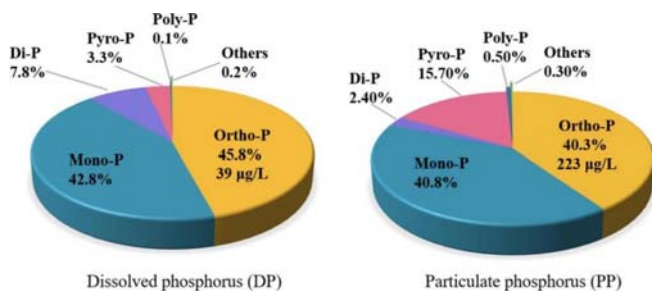


图1 中国10个典型湖泊和水库中DP和PP的组成、特征及其差异^[4]

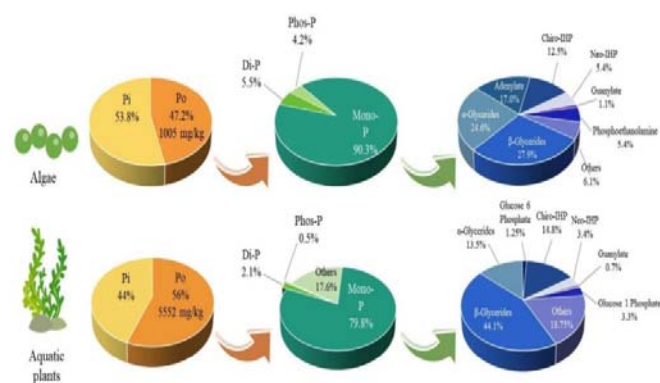


图2 湖泊藻类和水生植物中磷的组成和结构特征及其差异 (Pi: 无机磷; Po: 有机磷; Ortho-P: 正磷酸盐; Mono-P: 单对磷酸单酯; Di-P: 对磷酸二酯; Pyro-P: 焦磷酸盐; Poly-P: 多磷酸盐; Phos-P: 磷酸脂; Chiro-IHP: 手性肌醇磷酸盐; neo-IHP: 新肌醇磷酸盐)^[5]

2 湖泊生态系统中有机磷的来源

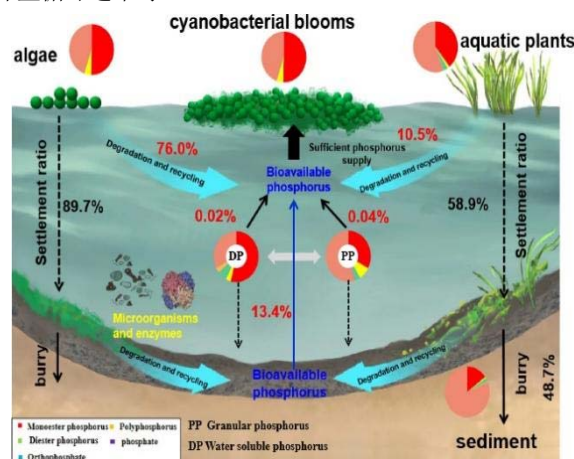
目前, 磷酸盐氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$) 在地球化学研究领域的应用

愈发广泛,其能精准地追踪自然界里磷元素的来源以及解析磷的循环路径。不同来源磷酸盐氧同位素组成有显著差异,在平衡分馏前,磷酸盐与氧羟酶催化交换,且 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 可体现磷的生物利用度与速率。水体-沉积物和水体-藻类界面易受营养理化性质变化影响并体现生物正效应,这些界面处营养物质的转换、循环与交换活跃,现有研究多关注无机磷的界面相关情况,对单磷在相关介质中的界面迁移和转化行为研究较少。

湖泊生态系统有机磷来源主要分外源和内源两类。内源主要是湖底厌氧环境下沉积的有机物质经微生物分解转化可形成有机磷化合物,部分会与金属氧化物等结合成稳定络合物;湖泊内生物残体分解也能产生有机磷,水生生物死亡后其体内有机磷物质释放到水体和沉积物中,经生物地球化学过程参与湖泊磷循环。流域输入是湖泊有机磷的主要外源途径,具体包含多方面:农业活动中含磷化肥和农药会随地表径流入湖中;生活污水排放含多种有机磷成分;工业废水可能有含磷有机废物;含磷颗粒物等可经大气传输沉降到湖泊表面。

3 湖泊生态系统中有机磷的环境影响

有机磷是湖泊中浮游植物与水生植物的磷源, 水体无机磷浓度低时部分藻类可利用有机磷生长繁殖, 如蓝藻能分解有机磷转变成无机磷形式, 这使藻类能维持较高初级生产力, 影响湖泊生态系统食物网结构和能量流动。当有机磷供应充足时易引发水华, 破坏湖泊生态平衡。有机磷与湖泊中的有机物、矿物存在复杂相互作用, 它能和铁、铝、钙等金属离子形成络合物, 改变金属离子在水体中的迁移性与生物可利用性。有机磷还可与腐殖质等大分子有机物结合, 影响其降解速率和生物可利用性, 这些相互作用多方面影响湖泊水质, 包括透明度、酸碱度及营养盐循环速率等。

图3 不同环境介质中Po对湖泊藻华爆发的贡献及其循环过程^[6]

最近,一些研究提出了典型湖泊中Po生物地球化学循环的定量模型。基于理论模型、湖泊沉积物、藻类和水生植物数据,以及相应的模拟实验结果(图3,定量评估了来自不同介质的Po对太湖蓝藻华的贡献。研究结果显示,藻类Po、沉积物Po、水生植物Po、水体PP和DP对蓝藻华的贡献占比分别为76%、13.4%、10.5%和<0.1%,且沉积物中48.7%的Po趋于长时间埋藏,

这表明Po在湖泊富营养化过程中起关键作用,由此提出关键Po指标与湖泊富营养化程度的关系。鉴于Po在控制湖泊污染方面的重要性与贡献远超以往认知,当下迫切需要优先深入了解与之相关的知识。

4 结论

近年来,在湖泊生态系统中有有机磷的研究方面取得了丰硕的成果。对其化学组成、来源和环境影响有了较为深入的认识,相关研究方法也在不断创新和完善。然而,仍存在许多问题和挑战需要进一步探索。本文对湖泊有机磷的化学成分、来源和环境影响进行了综述,结论如下:液态³¹P核磁共振光谱优先用于表征Po的化学成分;正磷酸盐和单磷因其特性在富营养湖泊的含量应得到进一步重视;参照最新建立的湖泊Po生物地球化学循环模型及前人的研究成果为控制内源污染和蓝藻暴发提供了一定的参考。未来的研究可以进一步整合多学科的研究方法,如将微生物学、地球化学、生态学等学科的理论和技术有机结合,深入探究湖泊生态系统中有有机磷的微观过程和宏观生态效应之间的内在联系。

[参考文献]

[1]张路,范成新,王建军,等.太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J].环境科学,2006,(08):1537-1543.

[2]张巧颖,杜瑛珣,罗春燕,等.镧改性膨润土钝化湖泊中的

磷及其生态风险的研究进展[J].湖泊科学,2019,31(06):1499-1509.

[3]Feng WY, Zhu YR, Wu FC, Meng W, Giesy JP, He ZQ, Song LR, Fan M (2016a) Characterization of phosphorus forms in lake macrophytes and algae by solution ³¹P nuclear magnetic resonance spectroscopy. Environ Sci Pollut Res 23:7288-7297.

[4]Feng WY, Yang F, Zhang C, Liu J, Song FH, Chen HY, Zhu YR, Liu SS, Giesy JP (2020) Composition characterization and biotransformation of dissolved, particulate and algae organic phosphorus in eutrophic lakes. Environ Pollut 265b:114838.

[5]Liu SS, Zhu YR, Feng WY, He ZQ, Zhao XL, Liu Y, Guo JY, Giesy JP, Wu FC (2018) Bioavailability and preservation of organic phosphorus in lake sediments: Insights from enzymatic hydrolysis and ³¹P nuclear magnetic resonance. Chemosphere 211: 50-61.

[6]Feng W, et al., Chemical composition, sources, and ecological effect of organic phosphorus in water ecosystems: a review. Carbon Research, 2023, 2(1).

作者简介:

杨森(1996--),男,汉族,黑龙江五大连池人,硕士,研究方向:水环境。