

哈素海表层沉积物中内源磷的释放研究

沈丽丽, 何江, 吕昌伟, 孙英

(内蒙古大学生态与环境科学系, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要 以浅水湖泊哈素海为研究对象,开展了上覆水质、温度、pH、溶解氧、扰动和光照等环境要素对湖泊沉积物内源磷释放的影响试验研究。结果表明,温度升高、碱性条件、厌氧和强烈的扰动作用等均有利于内源磷的释放,而照度则间接地限制了沉积物释磷对上覆水中磷浓度的影响。HSH-2、HSH-5 和 HSH-6 等 3 个站位 TP 的最大释放量在自然光照条件下分别为 1.53、1.39 和 1.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 避光条件下分别为 1.77、1.52 和 1.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 静置条件下分别为 1.42、1.38 和 1.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $R=60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时分别为 1.75、1.50 和 2.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $R=120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时分别为 2.52、2.64 和 4.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 $\text{pH}=11$ 时释放量最大,分别为 10.82、6.83 和 16.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。各环境因子中,以 pH 和扰动对哈素海沉积物内源磷的释放影响最大。哈素海为浅水湖泊,在湖水咸化程度逐渐增高的条件下,将会导致湖泊沉积物内源磷的大量释放,从而将进一步加剧水体的富营养化。

关键词 沉积物 磷 内源释放 环境因子 哈素海

中图分类号 X524 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2009)06-1219-06

Phosphorus Release from Surface Sediment of the Hasuhai Lake

SHEN Li-li, HE Jiang, LV Chang-wei, SUN Ying

(Inner Mongolia University Ecology and Environmental Science Department, Hohhot 010021, China)

Abstract Based on the releasing experiment of sediment phosphorus (P), the effects of environmental factors such as overlying water, temperature, pH values, dissolved oxygen levels, turbulence and illumination on the release of sediment phosphorus was studied in the Hasuhai Lake in the paper. The results showed that temperature increasing, alkalescence condition, anaerobic and strong turbulence could improve the release capacity of sediment P, but illumination indirectly limited the release of P from sediment to overlying water. Under the condition of illumination, the maximum release capacity of sediment P in HSH-2, HSH-5 and HSH-6 stations were 1.53, 1.39 and 1.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively; While were 1.77, 1.52 and 1.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the dark condition. When enhanced the turbulence strength ($R=120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), the maximum release capacity of sediment P in the three stations were 2.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 2.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 4.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. At $\text{pH}=11$, the maximum release capacity of sediment P in the three stations were 10.82, 6.83 and 16.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. In all the environmental factors, pH and turbulence were the key ones. With the increase of salinity of the overlying water, more sediment P will release to overlying water, resulting in lake eutrophication improvement.

Keywords sediments; phosphorus; release; environmental factors; the Hasuhai Lake

湖泊沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,是湖泊营养物质循环的中心环节及水-沉积物界面物质的特殊缓冲载体。湖泊水体中磷的来源分外源性磷和内源性磷^[1],当外源磷负荷得到控制后,沉积物中内源磷的释放将成为水体富营养化的主导因子。湖泊沉积物中营养盐的释放多发生在浅水湖泊,特别是城市浅水湖泊。城市浅水湖泊因具有营养盐含量高,水-沉积物界面易受扰动,易受外界环境因素影响等特点,其

内源负荷对水体富营养化的影响更强。

哈素海是黄河改道后形成的牛轭湖,是呼和浩特市土默特左旗重要的渔业生产基地,也是呼和浩特市生态系统的重要组成部分。但随城市化进程的加快,近年来哈素海水质日趋下降,富营养化特征非常明显。针对哈素海的现状,本文开展了湖泊沉积物中内源磷的释放研究,以期对湖泊水体富营养化的综合防治提供科学依据。此外,有关哈素海湖泊沉积物中内源磷的释放研究迄今未见报道。

1 研究区概况及样品采集

1.1 研究区概况

哈素海 (E 110°56'~111°01', N 40°34'~40°38') 地

收稿日期 2008-10-10

基金项目 内蒙古自然科学基金 内蒙古大学“513 工程”基金

作者简介 沈丽丽 (1981—),女,内蒙古赤峰人,硕士,主要研究方向为环境地球化学。

通讯作者 何江 E-mail: indjhe@imu.edu.cn

处土默川平原北端,内蒙古呼和浩特市土默特左旗西部,距呼和浩特市 73 km,包头市 81 km。湖泊南北长约 9 km,东西宽约 5 km,总面积约 29.7 km²,平均水深 1 m 左右,中部偏南水深可达 2~3 m,具有引水灌溉、水产养殖和景观旅游的功能。湖中鱼类主要有鲤和鲫,尚有麦穗、棒花、泥鳅以及从外地引进的青、草、鲢、鳙等。近年来哈素海水质日趋下降,对水资源、渔业资源、经济作物资源的进一步开发利用构成了极大威胁。

1.2 样品采集

于 2007 年 8 月用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A och B 型无扰动采样器采集哈素海湖心区 (HSH-5) 和非湖心区 (HSH-2 和 HSH-6) 表层沉积物样品,同步采集上覆水并现场用 0.45 μm 滤膜过滤后避光保存。沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回试验室于 -24 ℃ 冷冻保存。

2 材料与方法

2.1 试验材料

释放试验所用沉积物为清除杂质的哈素海表层沉积物 (0~10 cm)。哈素海上覆水和沉积物的基本理化性质见表 1 和表 2。

表 1 上覆水基本理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of overlying water

站位	pH	DO/ mg·L ⁻¹	TN/ mg·L ⁻¹	氨氮/ mg·L ⁻¹	硝态氮/ mg·L ⁻¹	亚硝态氮/ mg·L ⁻¹	TP/ mg·L ⁻¹
HSH-2	8.40	6.91	1.900	0.158	0.113	0.002	0.107
HSH-5	8.60	6.78	1.524	0.177	0.115	0.002	0.115
HSH-6	8.40	6.69	2.545	0.085	0.107	0.002	0.105

表 2 底泥基本理化性质

Table 2 The physical and chemical properties of sediment

性质	HSH-2	HSH-5	HSH-6
pH	7.72	7.99	7.63
TP/g·kg ⁻¹	0.64	0.75	0.67
有机质/%	7.10	8.45	6.16
含水率	0.40	0.38	0.45

2.2 试验方法

根据《湖泊富营养化调查规范》^[2],将 10.000 0 g (湿重) 沉积物置于 500 mL 烧杯底部平铺,缓慢加入 250 mL 上覆水,并记录液面位置。分别开展上覆水质、光照、扰动、温度、pH、溶解氧 (DO) 等环境因子对磷释放的影响试验。

(1) 上覆水质:用经 0.45 μm 滤膜过滤的湖水和去离子水进行对比释放试验,探讨上覆水质对磷释放

的影响。

(2) 光照条件:分别进行自然光照和避光条件下的磷释放试验。

(3) 扰动条件:分别进行静置、 $R=60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $R=120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下的磷释放试验,试验过程中用恒温振荡器控制转速。

(4) 温度条件:将试验装置放入恒温箱内,分别在 5 ℃、20 ℃、30 ℃ 和 40 ℃ 下进行磷释放试验。

(5) pH 条件:哈素海上覆水体 pH=8.47。为模拟上覆水体 pH 值的极端影响,用 HCl 和 NaOH 调节上覆水样起始 pH 值,pH 值分别调节为 4 ± 0.1 、 5 ± 0.1 、 6 ± 0.1 、 7 ± 0.1 、 8 ± 0.1 、 9 ± 0.1 、 10 ± 0.1 、 11 ± 0.1 等 8 种环境条件。

(6) DO 条件:分别用通入空气和氮气控制 DO 条件。好氧状态将充气管置于上层水中,开动充气泵,使上层 $\rho\text{DO} > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;厌氧状态时以高纯 N₂ (含量 99.999%) 作为充入气体,充气 30 min 后用保鲜膜密封,全程控制 $\rho\text{DO} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

在环境因子影响底泥磷释放的试验中,设计重复试验 2 次,减去各处理间的重复,共有 27 个处理。研究其他环境因子对营养盐释放影响所用的上覆水均为去离子水 (TP 浓度为 $0.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。除 pH 对营养盐释放影响的试验外,其余试验所用的去离子水均用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 调节至 pH 值为 8.47。除光照对磷释放的影响试验外,其他试验均密封避光条件。

试验过程中,每间隔 24 h 用注射器抽取水样,测定总磷浓度,同时测定上覆水的 pH。整个试验期间,利用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 调节上覆水的 pH,确保其在设定范围内。取样后,补充相同 pH 的上覆水至已记录的液面,保证上覆水体积不变。

沉积物的释放量按下式^[2]计算:

$$\gamma = [V(C_n - C_0) + \sum V_n(C_{n-1} - C_n)] / 10 \quad (1)$$

式中: γ 为释放量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; V 为沉积物上覆水的体积, L; C_n 为第 n 次取样时水中总磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_0 为沉积物上覆水的起始总磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $C_{\text{混}}$ 为补充上覆水后沉积物上覆水中总磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_n 为每次取上覆水样体积; n 为取样次数。

试验过程中, pH 用 PHS-2 型酸度计测定, TP 用钼锑抗分光光度法测定, 具体方法参照国家环保局的《水和废水监测分析方法 (第四版)》, TN 采用 UV-2401PC 紫外分光光度法测定, 氨氮采用纳氏试剂光度法测定, 硝态氮采用酚二磺酸法光度法测定, 亚硝态氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定。沉积物中

TP 采用酸溶光度法测定,有机质采用重铬酸钾外加热氧化法测定。

3 结果与讨论

3.1 上覆水质对磷释放的影响

试验结果表明,当环境条件一定时,上覆水水质对磷的释放有一定影响(图1)。当上覆水为湖水时,HSH-2、HSH-5和HSH-6等3个站位表层沉积物TP的最大释放量分别为1.39、1.13和1.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;当上覆水为去离子水时,HSH-2、HSH-5和HSH-6等3个站位表层沉积物TP的最大释放量分别为1.42、1.38和1.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

以含有一定浓度磷的湖水为上覆水时,水-沉积物间的浓度梯度较小,使磷的释放量和释放速率均较

小,以去离子水为上覆水时,水-沉积物间的浓度梯度较大,磷的释放量和释放速率均较前者大,表明水-沉积物间磷的浓度梯度是影响与控制磷释放及其速率的较重要因素。两种上覆水中,HSH-2、HSH-5和HSH-6等3个站位表层沉积物中TP的释放量均存在一定差异,这与表层沉积物的粒度、化学和矿物组成、有机质含量、磷的形态分布等因素有关。

3.2 光照对磷释放的影响

试验结果表明,避光有利于磷的释放(图2)。自然光照条件下,HSH-2、HSH-5和HSH-6等3个站位TP的最大释放量分别为1.53、1.39和1.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;避光条件下,3个站位TP的最大释放量分别为1.77、1.52和1.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

照度和底栖藻类的生长呈正相关性^[3],藻类对营

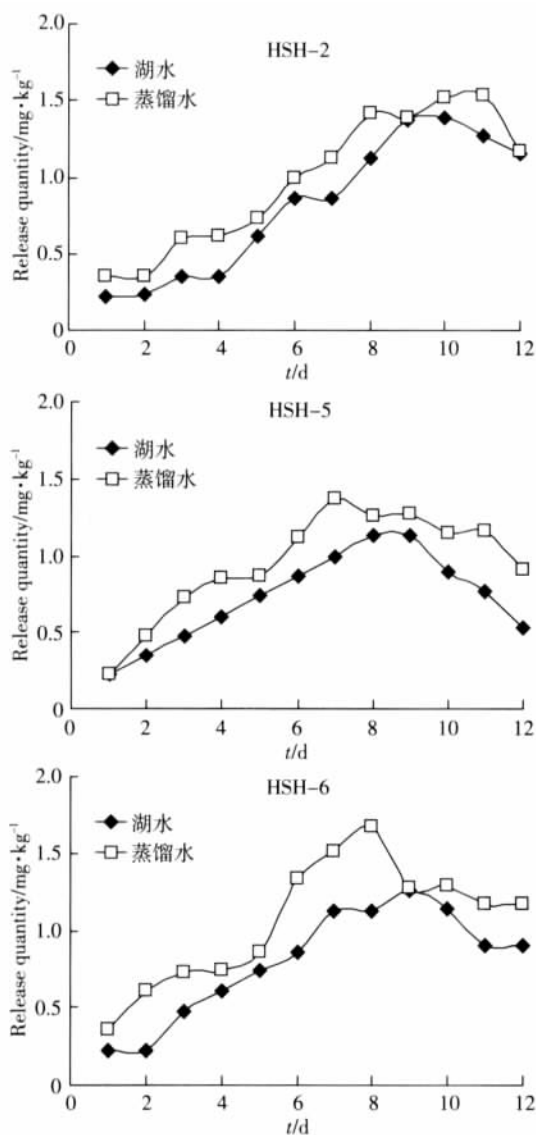


图1 上覆水质对哈素海沉积物磷释放的影响
Figure 1 The effect of overlying water on phosphorus release in sediment

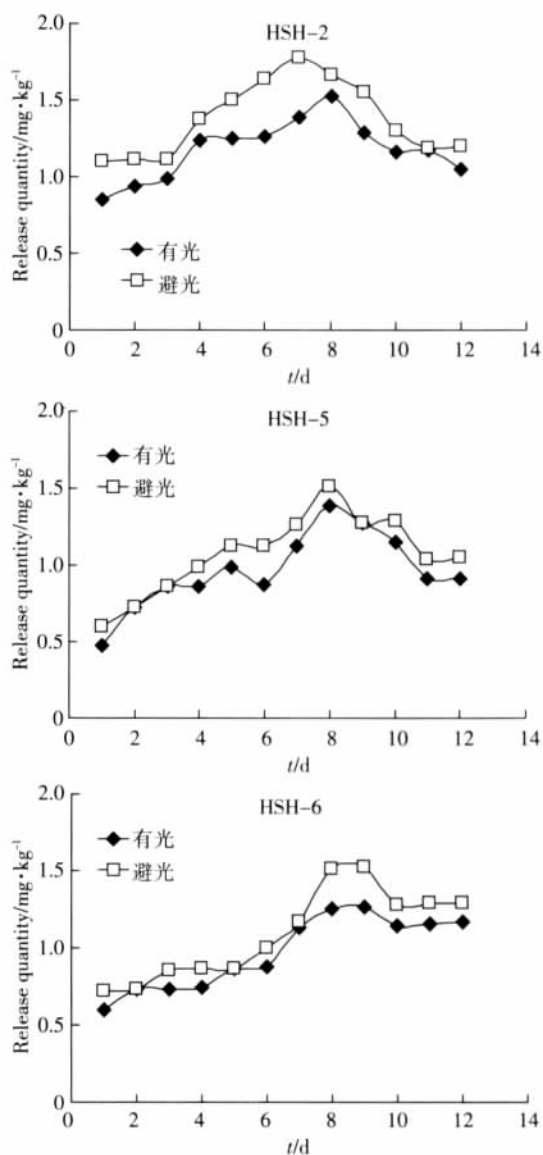


图2 光照对沉积物磷释放的影响
Figure 2 The effect of illumination on phosphorus release in sediment

养盐具有同化作用。在上覆水营养盐浓度较低的情况下,沉积物向上覆水释放的营养盐就成为藻类生长的营养来源。光照通过控制底栖藻类生物作用的强度,间接地降低了磷释放对上覆水中磷浓度的影响。

3.3 扰动对磷释放的影响

静置条件下,HSH-2 和 HSH-6 站位 TP 的释放均于第 8 d 达到平衡,最大释放量分别为 1.42 和 1.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;HSH-5 站位于第 7 d 达到平衡,最大释放量为 1.38 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $R=60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,HSH-2、HSH-5 和 HSH-6 等 3 个站位 TP 释放均于第 5 d 达到平衡,最大释放量分别为 1.75、1.50 和 2.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $R=120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,HSH-2、HSH-5 和 HSH-6 站位 TP 的释放均于第 5 d 达到平衡,最大释放量分别为 2.52、2.64 和 4.02 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验结果表明,沉积物中 TP 的释放量随扰动强度的增加而增大(图 3)。

扰动是影响浅水湖泊水-沉积物界面反应的主要物理因素,扰动促使沉积物颗粒再悬浮,从而增大了沉积物颗粒的反应界面,促进了沉积物中磷的释放^[4]。当释放量达到最大后,释放强度则有所下降,表明水动力条件对磷释放的影响是有限的短期效应,当表层沉积物和悬浮物受水动力搅动向水体释放的磷达到一定程度后,进入磷释放的“枯竭”状态,此时底泥和悬浮物中磷的释放与沉积物和再悬浮物对水体中磷的沉积和吸附达到动态平衡^[5]。

3.4 温度对磷释放的影响

试验结果表明,沉积物中 TP 的释放量随温度升高而递增(图 4)。温度升高,有利于增加沉积物中微生物等生物体的活动,促进生物扰动、矿化作用和厌氧转化,使氧化还原电位降低,使沉积物中 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ 的化学反应易于发生,导致铁结合态磷的释放^[6],使沉积物对磷的吸附量减少。同时温度升高,使吸附反应、溶解反应、化学沉淀反应等物化反应向解吸、溶解方向移动,促使沉积物中磷的释放^[7]。

3.5 pH 值对磷释放的影响

研究表明,在试验的 pH 范围内,pH<9 时,沉积物中 TP 的释放量变化不大且释放量低;pH>9 时,沉积物中 TP 的释放量明显随 pH 的增高而增大(图 5),并最大释放量均出现在 pH=11 时,HSH-2、HSH-5 和 HSH-6 等 3 个站位 TP 的最大释放量分别为 10.82、6.83 和 16.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。碱性条件下, OH^- 将取代底泥中含有磷酸铁(Fe-P)类、磷酸钙(Ca-P)类、磷酸铝(Al-P)的磷酸根离子,促使 Fe、Al 对磷的固定性减弱,使磷酸盐的解吸过程增强,增加了底泥中 TP 向

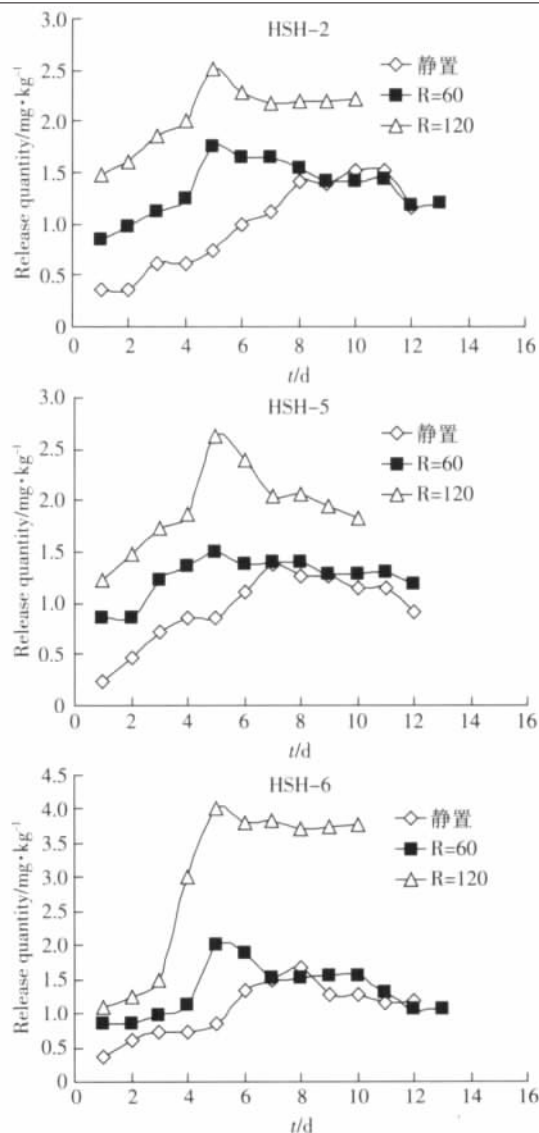


图 3 扰动对沉积物磷释放的影响

Figure 3 The effect of disturbing on phosphorus release in sediment

水溶液中释放的速率^[8-9],故 pH 升高时底泥中 TP 的最大释放量增加。pH 升高的同时,TP 的释放将以离子交换为主,体系中 OH^- 与铁、铝磷酸盐复合体中的磷酸盐发生交换,也会使磷的最大释放量增大。此外, OH^- 大量存在,同底泥胶体中的阴离子相互竞争吸附位,进而促使底泥中 TP 的释放。上述因素综合作用的结果导致了 TP 的释放量增大。酸性和弱碱性条件下 TP 的释放量低则与磷与铁、铝作用生成不溶性的磷酸盐,增强了 Fe、Al 对磷的固定作用有关。

3.6 溶解氧对磷释放的影响

试验结果表明,厌氧条件下 TP 的释放量大于好氧条件,厌氧有利于 TP 的释放(图 6)。

底泥中磷的释放与磷的形态有关,其中 Fe-P 的存在形态与水体中的 DO 直接相关^[10]。高溶解氧水平

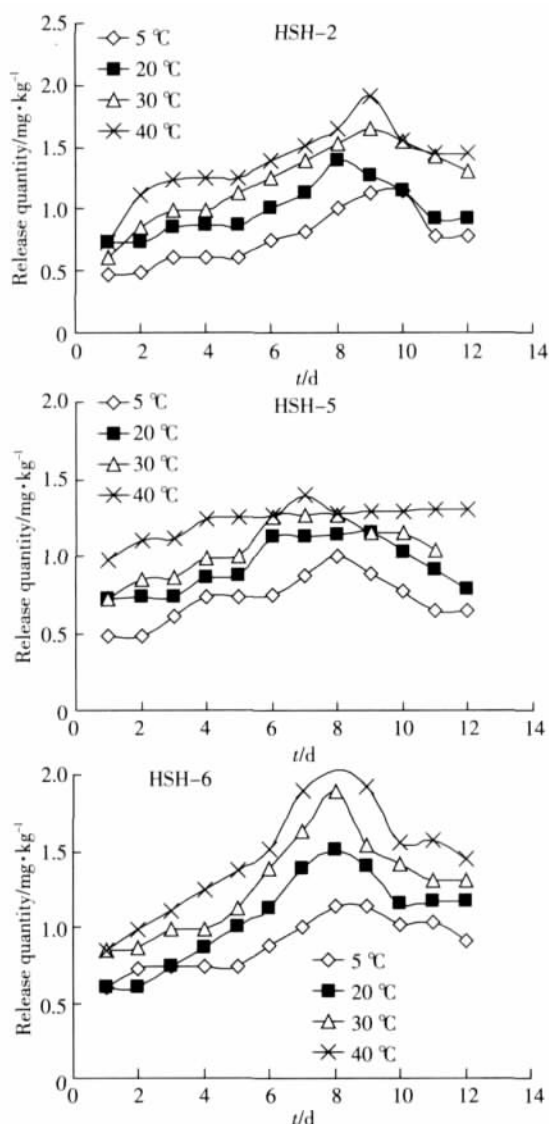


图4 温度对沉积物磷释放的影响

Figure 4 The effect of temperature on phosphorus release in sediment

有利于 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 与磷酸盐结合形成难溶的磷酸铁, 使得好氧状态下底泥对磷的释放作用减弱; 碱性环境中, $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_x$ 胶体也会吸附水体中的游离磷, 致使好氧条件下底泥对上覆水中磷浓度的影响作用不明显。低溶解氧水平下, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_x$ 胶体转化成可溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_2^{[11]}$, 使得 PO_4^{3-} 脱离沉积物进入孔隙水, 进而向上覆水体扩散, 导致上覆水体中 TP 浓度升高。由试验结果可知, 高溶解氧水平可抑制底泥向上覆水体释磷, 使水体中 TP 浓度维持在较低水平。哈素海为浅水湖泊, 受扰动影响较大, 大气复氧容易上下混合, 水-沉积物界面处不易形成厌氧环境, 故与深水湖泊相比, 溶解氧对哈素海沉积物中磷的释放影响不大。

对比浓度梯度、光照、扰动、温度、pH 值及 DO 等

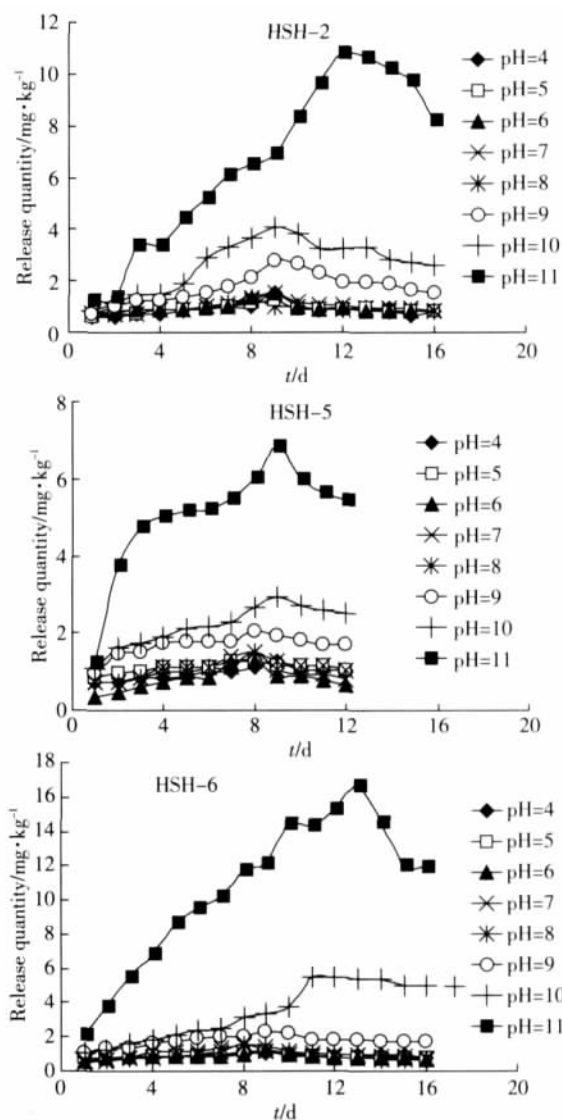


图5 pH 值对沉积物磷释放的影响

Figure 5 The effect of pH on phosphorus release in sediment

环境因素对 TP 的释放影响试验结果可知, 在各环境因子相同条件下, 位处哈素海湖心区 HSH-5 站位沉积物中 TP 含量水平虽较高, 但其 TP 的释放量均比其他 2 个站位小, 这可能与不同湖区沉积物的性质有关。HSH-5 站位的沉积物为黄色粘泥, 有机质的含量 (8.45%) 较其他 2 个站位高。腐殖质能和铁、铝形成有机无机复合体, 提供了重要的无机磷吸附位点, 从而增强了对磷的吸附, 进而抑制了磷的释放。此外, 有机质降解过程中释放出的 H^+ 可使矿物表面基团质子化而有利于磷的吸附。

4 结论

不同环境因子对沉积物中内源磷释放影响的模拟试验研究表明, 温度升高、碱性条件、厌氧和强烈的

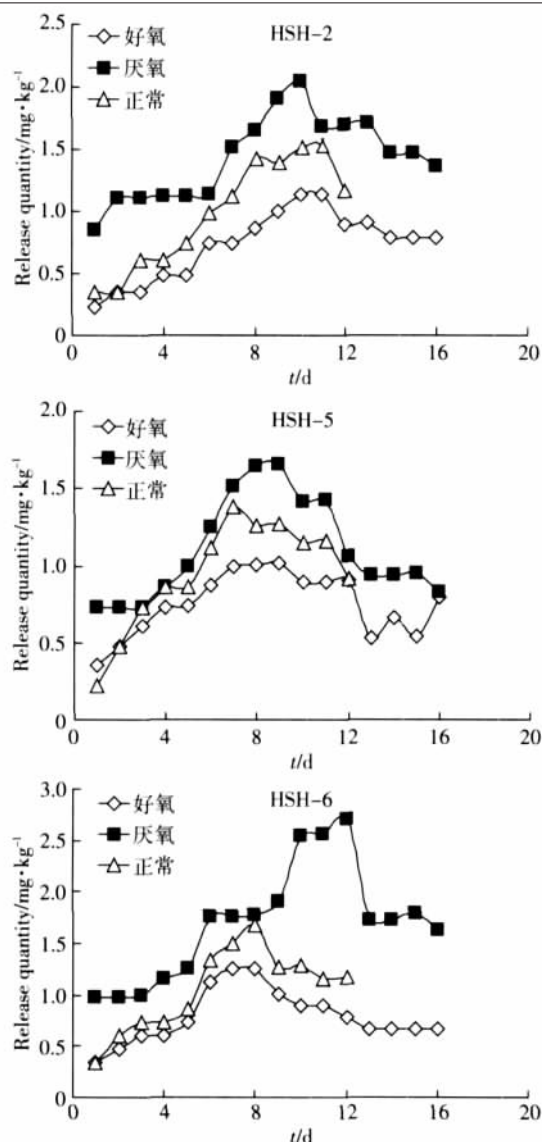


图6 DO对沉积物磷释放的影响

Figure 6 The effect of DO on phosphorus release in sediment

扰动作用等均有利于内源磷的释放,而照度则间接地限制了沉积物释磷对上覆水中磷浓度的影响。

各环境因子中,以 pH 和扰动对哈素海沉积物内源磷的释放影响最大。哈素海为浅水湖泊,在湖水咸化程度逐渐增高的条件下,将会促使湖泊沉积物内源磷的释放,从而进一步加剧水体的富营养化。

参考文献:

- [1] Pomeroy L R, Smith E E, Grant C M. The exchange of phosphorus between estuarine water and sediments [J]. *Limnol Oceanogr*, 1965, 10 (1): 167-172.
- [2] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. Investigation criterion of lakes eutrophication (second edition) [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990.

- [3] 姚 扬, 金相灿, 姜 霞, 等. 光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态变化的影响研究[J]. *环境科学研究*, 2004, 17 (增刊): 30-33.
- YAO Yang, JIN Xiang-can, JIANG Xia, et al. Study on effects of light on phosphorus release and phosphorus form change in lake sediments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17 (Supplement): 30-33.
- [4] 唐孟成, 贾之慎, 朱荫湄. 西湖沉积物磷释放影响因子的研究[J]. *浙江农业大学学报*, 1997, 23 (3): 289-292.
- TANG Meng-cheng, JIA Zhi-shen, ZHU Yin-mei. Study on influential factors of phosphorus release from the West Lake sediments[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1997, 23 (3): 289-292.
- [5] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. *环境科学学报*, 2002, 22 (6): 107-110.
- WANG Jia-quan, SUN Ya-min, QIAN Jia-zhong et al. Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22 (6): 107-110.
- [6] Henning Skovgaard Jensen, Frede Stergaard Andersen. Important of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37 (3): 577-589.
- [7] 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.
- WANG Xiao-rong, HUA Zhao-zhe, XU Ling, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15 (1): 15-19.
- [8] 李 勇, 王 超. 城市浅水型湖泊底泥磷释放的环境因子影响实验研究[J]. *江苏环境科技*, 2002, 15 (4): 4-6.
- LI Yong, WANG Chao. Experimental test of environmental factor influence of bottom silt phosphorus release in municipal shallow lake[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2002, 15 (4): 4-6.
- [9] 付春平, 钟成华, 邓春光. pH 与三峡库区底泥磷释放关系的试验[J]. *重庆大学学报*, 2004, 27 (10): 125-127.
- FU Chun-ping, ZHONG Cheng-hua, DENG Chun-guang. Relationship between pH value of the water and release silt bottom of nitrogen & phosphate in the Three Gorges[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2004, 27 (10): 125-127.
- [10] 李文红, 陈英旭, 孙建平. 不同溶解氧水平对控制底泥向上覆水体释放污染物的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22 (2): 170-173.
- LI Wen-hong, CHEN Ying-xu, SUN Jian-ping. Influence of different dissolved oxygen (DO) amounts on released pollutants from sediment to overlying water[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22 (2): 170-173.
- [11] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响[J]. *湖泊科学*, 1997, 9 (4): 337-342.
- FAN Cheng-xin, Morihiro Aizaki. Effects of aerobic and anaerobic conditions on exchange of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in Lake Kasumigaura[J]. *Journal of Lake Science*, 1997, 9 (4): 337-342.