

岱海表层沉积物中内源磷的释放

何 江, 孙 英, 吕昌伟, 刘二东, 沈丽丽

(内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要:以北方半干旱地区典型内陆封闭湖泊岱海为研究对象,开展了上覆水质及多种环境因子(温度,pH,溶解氧,扰动,光照)对湖泊沉积物内源磷释放的影响研究。结果表明:(1)温度升高有利于内源磷的释放,湖泊水体在温度较高的夏季更易呈现富营养化状态;(2)碱性条件有利于磷的释放,岱海水体属微碱性环境($pH\ 8.8$),若水体pH进一步升高,将会造成沉积物内源磷的大量释放;(3)厌氧条件($\rho DO < 0.8\ mg/L$)有利于磷的释放,岱海湖心区水深较深,易形成厌氧环境,因此湖心区内源磷释放强度较浅水区大;(4)强烈扰动有利于磷的释放,这会对浅水区的底质产生较大影响;(5)照度通过底栖藻类的生物作用,间接地限制了沉积物释磷对上覆水中磷浓度的影响。

关键词:沉积物; 磷; 内源释放; 环境因子; 岱海

Research on phosphorus release from the surface sediments in the Daihai Lake

HE Jiang, SUN Ying, LÜ Changwei, LIU Erdong, SHEN Lili

Department of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

Abstract: The Daihai Lake ($40^{\circ}29'27''$ — $40^{\circ}37'6''N$, $112^{\circ}33'31''$ — $112^{\circ}46'40''E$) is a typical inland lake in a semiarid region in Inner Mongolia, China. This research is mainly focus on phosphorus release from the surface sediments in different environmental conditions which is temperature, pH, dissolved oxygen (DO), disturbance and illumination. The results are described as follows: (1) the concentration of phosphorus release from the sediments increases with temperature. (2) It is higher in alkali condition, therefore it will cause a lot of phosphorus release when pH increases in the Daihai Lake ($pH\ 8.8$). (3) It is higher in anaerobic condition ($\rho DO < 0.8\ mg/L$), and the concentration of phosphorus in overlying water is higher in deep water area in which the DO is lower than in shallow water. (4) The disturbance is propitious to phosphorus release, which has an impact on the sediment in shallow water. (5) The illumination has an influence on phosphorus release from the surface sediments indirectly through biological action of benthic algae.

Key Words: sediments; phosphorus; endogenesis release; environmental condition; the Daihai Lake

湖泊沉积物是湖泊营养物质的重要蓄积库。来自各种途径的营养物质,经过一系列物理、化学及生物作用,其中一部分沉积于湖泊底部,成为湖体营养物的内源负荷。研究表明^[1-2],当外源输入被控制后,内源释放仍可维持水体继续保持富营养化水平^[3]。水-沉积物界面是环境中水相和沉积物相之间的转换区,水-沉积物界面是溶解物质在地球化学循环与生物体系之间进行耦合作用的最初场所,也是水生生态系统物质循环不可缺少的环节。N、P等生源要素在湖泊水-沉积物界面及其附近发生剧烈的生物地球化学循环,并控制N、P等在上覆水体和沉积物间的物质平衡、形态转化和沉积剖面分布等^[4-9]。风浪的扰动、湖水垂直分层产生的对流运动、水生动物及其它环境条件如pH、DO、铁含量、温度等对湖泊底泥中磷的释放和扩散均有显著影响^[10-16]。内源磷的释放研究既有助于评价沉积物中磷的可交换性和生物可利用性,又有助于理解水环境中

基金项目:内蒙古自然科学基金及内蒙古大学“513工程”基金联合资助项目

收稿日期:2008-10-21; 修订日期:2009-03-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ndjhe@imu.edu.cn

磷的循环过程与再生机制,为生态环境评价提供科学依据^[17-21]。

岱海是典型的内陆封闭微咸水湖泊。近年来湖水咸化程度逐渐增高,湖泊富营养化进程日趋加剧^[22-25]。针对岱海的现状,本文开展了岱海沉积物内源磷的释放研究,以期为湖泊水体富营养化的综合防治提供科学依据。

1 研究区概况及样品采集

1.1 研究区概况

湖区($40^{\circ}29'27''$ — $40^{\circ}37'6''N$, $112^{\circ}33'31''$ — $112^{\circ}46'40''E$)位于内蒙古中部凉城县境内,处于温带半干旱区向干旱区的过渡地带,是西伯利亚干冷气团南下与热带海洋湿暖气团北上相交锋的敏感地带^[26]。岱海东西长约25km,南北宽约10km,平均水深约7m,最大水深18.4m,蓄水量 $13.3 \times 10^8 m^3$,湖水矿化度在2.5g/L左右,流域面积约 $2084.4 km^2$,是典型的断陷式内陆封闭微咸水构造湖泊,具有调蓄洪涝、引水灌溉、水产养殖和景观旅游的功能,素有塞上明珠的美誉。湖中有草、鲢、鲤、鲫等29种鱼类。近年来由于气候干旱,流入岱海的河流多数已干涸,目前已无河流补水,致使岱海水位逐年下降、水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高,湖泊富营养化进程日趋加剧,对水资源、渔业资源、滩地资源、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

按照国家环境保护总局“地表水和污水检测技术规范(HJ/T91-2002)”,于2007年8月对岱海进行了系统的现场监测和样品采集(图1)。沉积物样品视湖泊深度分别用挪威Swedaq公司产KC mod A och B型无扰动采样器或荷兰Eijkelkamp公司产SA Beeker型沉积物原状采样器采集,同步采集上覆水并现场用 $0.45\mu m$ 滤膜过滤。沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于 $-24^{\circ}C$ 冷冻保存。采样站位用全球卫星定位系统(GPS)定位,同时结合地形图校正。

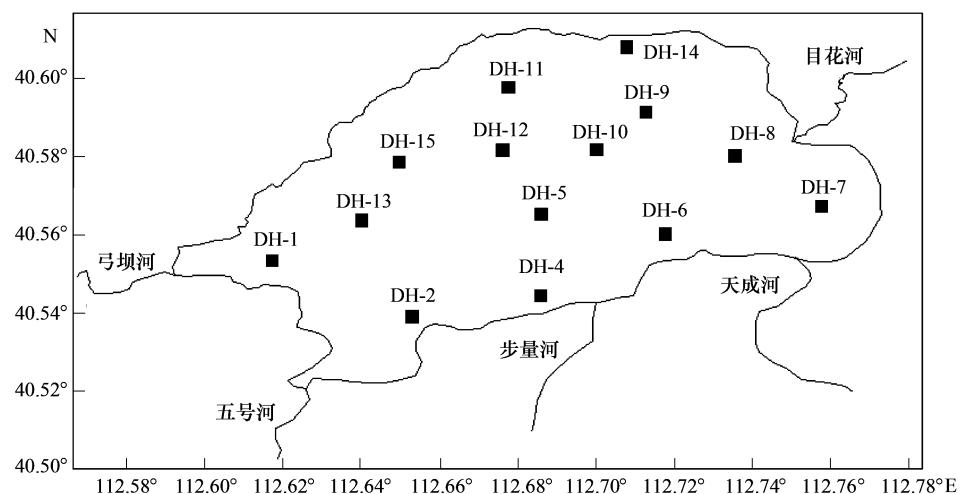


图1 采样站位分布图
Fig. 1 Location of the samples

2 材料与方法

2.1 实验材料

沉积物 清除杂质的岱海表层沉积物(0—10cm)。不同深浅湖区的水-沉积物界面具有不同的水动力、氧化还原、扰动强度以及沉积物性状等条件。DH-5,DH-10,DH-12,DH-15等4个站位处于深水区,DH-1,DH-2,DH-4,DH-6,DH-7,DH-8,DH-9,DH-11,DH-13,DH-14等10个站位处于浅水区,根据岱海的水深分布及现场采样的实际情况,分别将湖心区(DH-I,包括DH-5,DH-10,DH-12,DH-15)和非湖心区(DH-II,包括DH-1,DH-2,DH-4,DH-6,DH-7,DH-8,DH-9,DH-11,DH-13,DH-14)相应站位的表层沉积物均匀混合备用。

上覆水 研究岱海水质对营养盐释放影响所用的上覆水为现场经 $0.45\mu m$ 滤膜过滤的湖水(pH8.8,TP

浓度为 0.133 mg/L);研究其它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 mg/L),除 pH 对营养盐释放影响的实验外,其余实验所用的去离子水均用 1 mol/L HCl 和 1 mol/L NaOH 调节至 pH 值为 8.5。

2.2 实验方法

实验按照《湖泊富营养化调查规范》^[27]进行,将 10 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。除光照对磷释放的影响实验外,其它实验的实验装置均密封避光。根据不同的实验要求,用恒温箱控制温度,恒温振荡器控制转速,日光灯控制光照,用通入空气和氮气控制 DO(好氧时 ρ DO > 5 mg/L;厌氧时, ρ DO < 0.8 mg/L)。实验按平行两组进行,以评价实验的可靠性。

实验过程中,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。整个实验期间,利用 1 mol/L HCl 和 1 mol/L NaOH 调节上覆水的 pH^[28],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。pH 用 PHS-2 型酸度计测定,TP 用钼锑抗分光光度法测定。

沉积物的释放量按下式^[27]计算:

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

式中, γ 为释放量(mg/kg); 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(mg/L); C_0 为沉积物上覆水的起始总磷浓度(mg/L); $C_{\text{混}}$ 为补充上覆水后沉积物上覆水中总磷浓度(mg/L); V_n 为每次取上覆水样体积; n 为取样次数。

3 结果与讨论

3.1 上覆水质对沉积物中内源磷释放的影响

研究表明,当环境条件一定时,上覆水水质对磷的释放有较大影响(图 2)。当上覆水为湖水时,湖心区表层沉积物(DH-I) TP 的最大释放量为 2.201 mg/kg,非湖心区表层沉积物(DH-II) TP 的最大释放量为 3.710 mg/kg;当上覆水为去离子水时,湖心区表层沉积物 TP 的最大释放量为 4.009 mg/kg,非湖心区表层沉积物 TP 的最大释放量为 4.566 mg/kg。

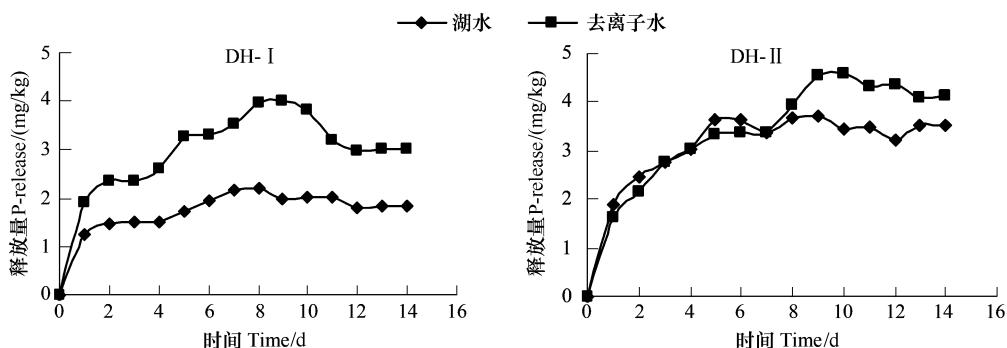


图 2 上覆水质对内源磷释放的影响

Fig. 2 Impact of water quality of overlying water on TP release

当上覆水为湖水时,因湖水本身含有一定浓度的磷,与沉积物间的浓度差小,从而导致磷的释放量和释放速率均较小;当上覆水为去离子水时,由于去离子水与沉积物间的浓度梯度大,磷的释放量和释放速率均较前者大。标明水-沉积物间磷的浓度梯度是影响与控制磷释放及其速率的重要因素。2 种上覆水中湖心区和非湖心区表层沉积物 TP 释放量的差异则可能与表层沉积物的粒度、矿物组成、有机质含量、磷的形态分布等因素有关。由实验结果可知,尽管不同的上覆水质对湖心区和非湖心区表层沉积物 TP 的释放影响程度不同,但均分别在第 8 天和第 9 天时达到释放平衡,故可用去离子水作为上覆水探讨不同环境因子对内源磷释放的影响。

3.2 环境因子对沉积物中内源磷释放的影响

3.2.1 温度对沉积物中内源磷释放的影响

研究表明,表层沉积物中内源磷的释放量均随温度的升高而增大(图3a、c)。在40、30、20℃和5℃时,湖心区表层沉积物(DH-I)中TP的最大释放量分别为10.105、7.386、4.337 mg/kg和3.266 mg/kg,5℃时的最大释放量仅为40℃时的1/3;非湖心区表层沉积物TP的最大释放量分别为12.808、9.686、5.906 mg/kg和4.182 mg/kg,5℃时的最大释放量不足40℃时的1/3。从温度与最大释放量的线性回归图(图3 b, d)可以看出,湖心区和非湖心区表层沉积物TP的最大释放量与温度均呈现较好的相关性(相关系数分别为0.9194和0.9425)。因此,许多水体夏季富营养化状况增强,可能与随温度升高沉积物的释磷量增多有关。温度升高增强了底泥中微生物和生物体的活动性,提高了生物扰动作用和底泥有机物的矿化作用,使底泥中有机态磷转化为无机态的磷酸盐从而促进了磷的释放;同时温度升高,微生物活性增强,耗氧增多,溶解氧减少,水环境由氧化状态向还原状态转化,有利于 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ 转化,加速了底泥中铁结合磷的释放^[15,29-30]。

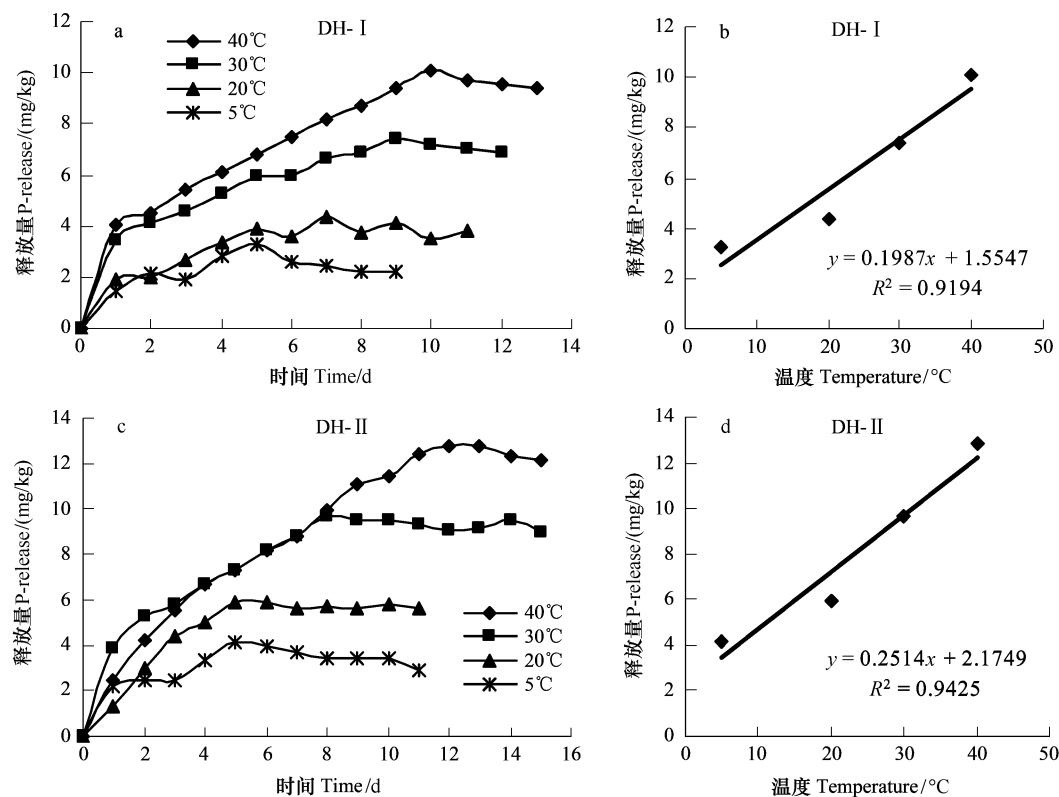


图3 温度对内源磷释放的影响

Fig. 3 Impact of temperature on TP release

3.2.2 pH对沉积物中内源磷释放的影响

研究表明,在pH为4—8.5的范围内,表层沉积物中TP的释放量变化不大(图4)。湖心区表层沉积物中TP的释放量在2.567—5.258 mg/kg之间,非湖心区表层沉积物中TP的释放量在3.550—5.620 mg/kg之间,湖心区和非湖心区表层沉积物中TP的最小释放量均出现在pH=5时。在实验的pH范围内,当pH超过9时湖心区和非湖心区表层沉积物中TP的释放量均显著增加,最大释放量均出现在pH=11时,分别为31.029 mg/kg和37.041 mg/kg,为pH=5时最小释放量的12倍和10倍(图5)。

实验结果显示,碱性条件最有利于沉积物中磷的释放。碱性条件下, OH^- 与被 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等束缚的磷酸盐阴离子具有竞争作用,水体中 OH^- 与沉积物中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 生成更为稳定的氢氧化物,使与 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 结合的磷由于离子交换作用而被重新释放到水中^[28,31]。湖泊沉积物中有机磷具有部分活性,大约50%—60%的有

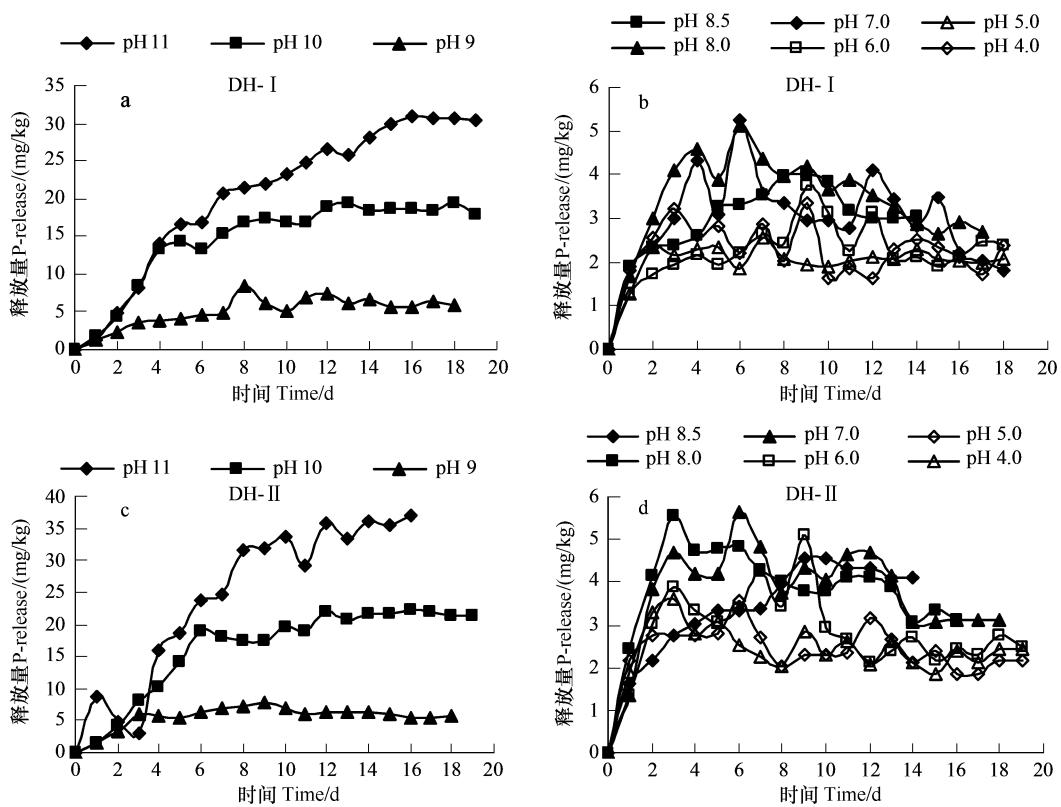


图4 pH对表层沉积物中内源磷释放的影响

Fig. 4 Impact of pH on TP release

机磷可被降解或水解为生物可利用磷形态,是沉积物中重要的“磷蓄积库”^[32-33]。岱海表层沉积物中有机磷平均约占总提取磷的20%左右^[34],沉积物中以腐殖质结合态存在的碱可提取有机磷的含量较高^[35]。因此,随pH值升高,沉积物中碱可提取有机磷被大量提取出来并扩散至上覆水体,导致碱性条件下磷的释放量明显增大。结合岱海表层沉积物中铁磷、铝磷和有机磷的含量水平^[34],本研究认为,碱性条件下沉积物中碱可提取有机磷的释放居主导地位。岱海水体的pH在8.8左右,属微碱性环境,补给水源减少及湖水碱化程度的升高都将促进沉积物内源磷的大量释放,加剧湖泊富营养化程度。

3.2.3 溶解氧对沉积物中内源磷释放的影响

总体上,厌氧条件下的释放速率和最大释放量均大于好氧条件(图6、图7)。好氧时,湖心区和非湖心区表层沉积物中TP的释放分别于第8天和第6天时达到平衡,最大释放量分别为3.037mg/kg和4.224mg/kg;厌氧时,湖心区和非湖心区表层沉积物中TP的释放分别于第11天和第12天达到平衡,最大释放量分别为11.070mg/kg和10.197mg/kg,分别约为好氧时释放量的3.6倍和2.4倍。通常认为无论溶解氧水平如何,沉积物中的磷在任何情况下都会释放。沉积物磷释放与磷的沉淀形态有关^[36]。磷一般以有机磷、铝磷、铁磷、钙磷等形态存在,其中铁磷的存在直接影响沉积物释磷,而铁磷的存在形态与水体中的DO直接相关^[37-38]。高溶解氧水平有利于Fe²⁺氧化成Fe³⁺,Fe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

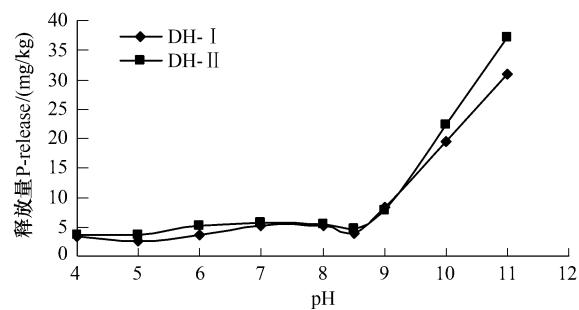


图5 TP的最大释放量与pH的关系

Fig. 5 Relation of pH and TP

放作用减弱。低溶解氧水平下, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , $[\text{Fe(OH)}_3]_x$ 胶体转化成可溶的 Fe(OH)_2 ^[39], 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; 此外, 厌氧条件下微生物的存在能加快铁的还原, 从而进一步促进沉积物中磷向上覆水释放^[40]。因此, 高溶解氧水平可抑制底泥向上覆水体释磷, 维持水体中 TP 浓度的较低水平。岱海湖泊湖心区水深, 受扰动影响不大, 大气复氧不易上下混合, 水-沉积物界面易形成厌氧环境, 从而造成底泥中磷的大量释放, 进而使湖心区内源磷释放强度大于浅水区。

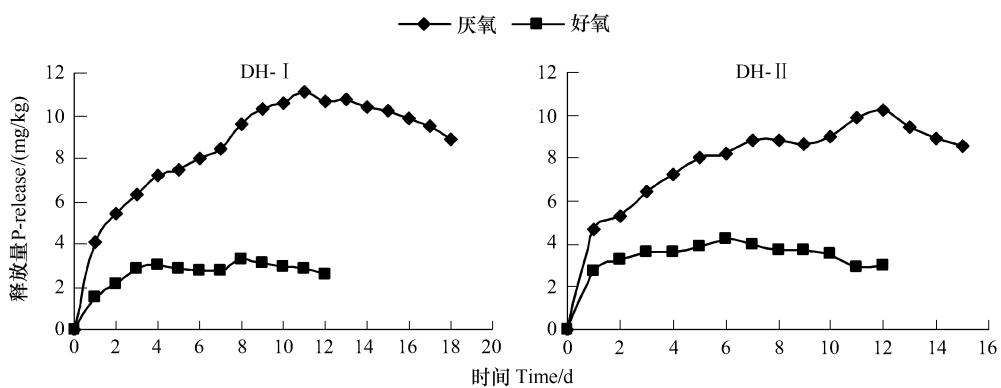


图 6 溶解氧对沉积物中内源磷释放的影响

Fig. 6 Impact of DO on TP release

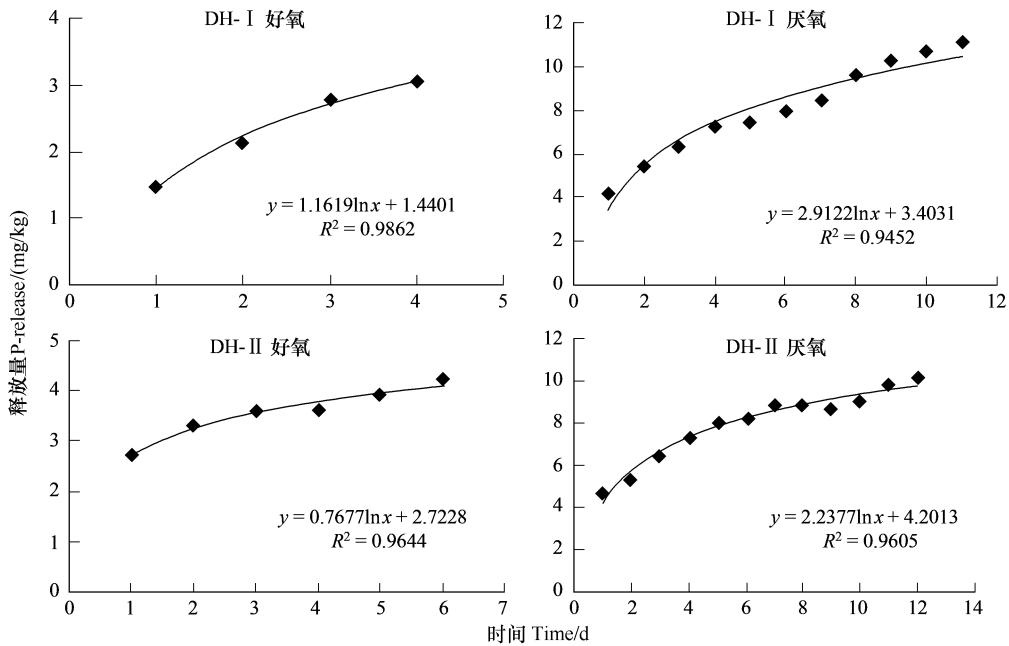


图 7 不同溶解氧条件下 TP 的释放曲线

Fig. 7 Release curves of TP in different DO content

3.2.4 扰动对沉积物中内源磷释放的影响

扰动是影响浅水湖泊和湖泊浅水区沉积物-水界面反应的重要物理因素之一, 扰动越大, 内源磷的释放速率和释放量就越大。高速扰动下($R = 120\text{r}/\text{min}$), 湖心区表层沉积物 TP 的最大释放量为 $8.305\text{mg}/\text{kg}$, 分别为低速($R = 60\text{r}/\text{min}$)和静置($R = 0\text{r}/\text{min}$)时的 1.5 倍和 2 倍, 并于第 4 天达到最大释放量, 而静置时则在第 9 天才达到最大释放量; 高速扰动下, 非湖心区表层沉积物 TP 的最大释放量为 $14.858\text{mg}/\text{kg}$, 分别为低速和静置时的 1.4 倍和 3 倍, 并于第 4 天时达到最大释放量, 而静置时则在第 10 天时才达到最大释放量(图 8)。扰动对底泥中磷释放的影响是一种物理过程, 扰动增强会促使底泥中颗粒磷再悬浮, 增加沉积物-水界面的磷交换

反应,同时也加速了底泥溶解磷从孔隙水向上覆水扩散,有利于磷向上覆水体的释放。岱海是内蒙古自治区著名的旅游胜地,在旅游旺季游船、快艇等造成的人为扰动对浅水区底质会产生较大影响,加之风力等自然因素的影响,浅水区底泥将会受到较大的扰动,促使沉积物的再悬浮,从而促进沉积物中的磷释放,使水体中磷的浓度升高。

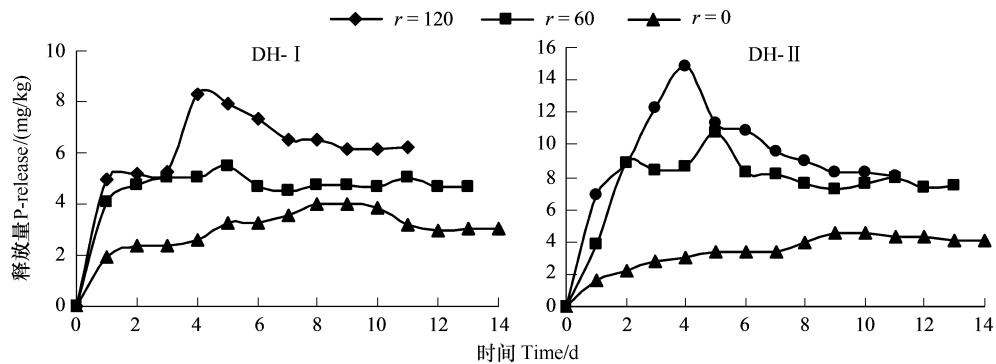


图8 扰动对沉积物中内源磷释放的影响

Fig. 8 Impact of disturbance on TP release

3.2.5 光照对沉积物中内源磷释放的影响

研究表明,光照强度不同,内源磷的释放量及释放速率不同,并总体呈现随光照强度的增加TP的释放量减小(图9)。湖心区表层沉积物中,强光和避光条件下TP的最大释放量分别为4.480mg/kg和8.293mg/kg,后者约为前者的1.85倍,二者都在第5天达最大释放量;非湖心区表层沉积物中,强光和避光条件下TP的最大释放量分别为6.762mg/kg和8.240mg/kg,后者为前者的1.2倍,分别于第5天和第7天达最大释放量。照度和底栖藻类的生长呈正相关性^[41],藻类的生长过程中需吸收大量营养盐,这种同化作用能抑制上覆水中营养盐浓度升高,底栖藻类成为阻挡磷从沉积物向上覆水释放的一个生物“屏障”,既照度通过底栖藻类的生物作用,间接地限制了沉积物释磷对上覆水中磷浓度的影响。

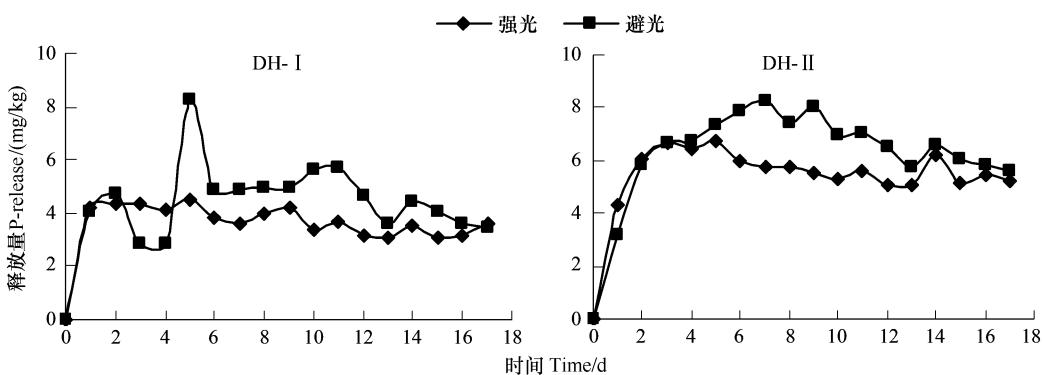


图9 光照对沉积物中内源磷释放的影响

Fig. 9 Impact of illumination on TP release

4 结论

不同环境因子对沉积物内源磷释放影响的模拟实验研究表明,温度升高、碱性条件、厌氧条件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。

属微碱性环境的岱海水体,在水面不断缩小,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程度。

References:

- [1] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes. *Hydrobiologia*, 1999, 408: 145-152.
- [2] Sarazin G, Gaillard J F, Philippe L, Rabouille C. Organic matter mineralization in the pore water of a eutrophic lake (Aydat Lake, Puy de Dôme, France). *Hydrobiologia*, 1995, 315(2): 95-118.
- [3] Jorcin A, Nogueira M G. Temporal and spatial patterns based on sediment and sediment-water interface characteristics along a cascade of reservoirs (Paranapanema River, south-east Brazil). *Lakes & Reservoirs*, 2005, 10(1): 1-12.
- [4] Fan C X, Zhang L, Bao X M, You B S, Zhong J C, Wang J J, Ding S M. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu II. chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(3): 207-217.
- [5] Wang Y, Shen Z Y, Hu L J, Niu J F. Adsorption and release of phosphorus from sediments from the main branches of the Three-Gorges Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8): 1654-1661.
- [6] Li B, Ding S M, Fan C X, Zhong J C, Zhao B, Yin H B, Zhang L. Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Nitrogen and Phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 114-120.
- [7] Wu F, Qing H R, Wan G J. Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from Southwestern China Plateau. *Water Research*, 2001, 35(5): 1334-1337.
- [8] Wu F C, Qing H R, Wan G J, Tang D G, Huang R G, Cai Y R. Geochemistry of HCO_3^- at the sediment-water interface of lakes from the Southwestern Chinese plateau. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1997, 99(1): 381-389.
- [9] Wu F C, Wan G J. The Influence of Diffusive Processes on Overlying Waters at the Sediment-water Interface of Lake Lugu. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1996, 17(1): 10-12.
- [10] Andersen F, Ring P. Comparison of phosphorus release from littoral and profundal sediments in a shallow, eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 1999, 408: 175-183.
- [11] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, Wu F C. Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 2008.
- [12] Zhang L, Fan C X, Wang J J, Chen Y W, Jiang J H. Nitrogen and phosphorus forms and release risks of lake sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(3): 263-270.
- [13] Su Y P, Lin J, Lin W Z, Wu J, Wang J L. A Study on the Limiting Factors for the Release of Phosphorus at the Sediment-Water Interface in the Shanzi Reservoir in Fujian Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1465-1470.
- [14] Zhang D F, Lu W, Wang P P, Yang L L, Zhang Z Y, Zeng X D. On release and transformation regularity of phosphorus sediment with different pH values. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(1): 1-5.
- [15] Cai J B, Ding X F, Peng H Y, Chang H Q, Yang X E, Pu P M. Impact of Environmental Factors and Submerged Plant on Phosphate Release from Sediment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 151-154.
- [16] Wu F C, Bai Z G, Wan G J, Wan X. Remobilization of P in the sediments of Lake Baihua, Guizhou. *Advances in Environmental Science*, 1996, 4(3): 58-61.
- [17] Qin B Q, Zhu G W, Zhang L, Luo L C, Gao G, Gu B H. Release Model and Estimate Method for Phosphorus from Lake Sediments- For the Case of Taihu Lake Science in China Series D; *Earth Sciences*, 2005, 35: 33-44.
- [18] Song J M. Transferable Phosphorus in Sediments of the Huanghe River Estuary Adjacent Waters. *Marine Sciences*, 2000, 24(7): 42-45.
- [19] Zhu G W, Gao G, Qin B Q, Zhang L, Luo L C. Geochemical characteristics of phosphorus in sediments of a large shallow lake. *Advances In Water Science*, 2003, 14(6): 714-719.
- [20] Lv X X, Zhai S K, Yu Z H. Nutrient distribution and controlled factors at the surface sediment of the Changjiang Estuary and adjacent sea area. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(3): 1-5.
- [21] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by *Microcystis* blooms-an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 391-399.
- [22] Li C W, He J, Sun H M, Xue H X, Liang Y, Bai S, Sun Y, Shen L L, Fan Q Y. Application of allochthonous organic carbon and phosphorus forms in the interpretation of past environmental conditions. *Environmental Geology*, 2008, 55(6): 1279-1289.
- [23] Wang H J, Jiang J H, Li X G. Stude on Changes of Lake Shoreline Morphology in Daihai Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(5): 674-677.
- [24] Cao J T, Wang S M, Shen J, Jin Z D. The Main Causes of Water Level Drawdown of Daihai Lake in Inner Mongolia since the Last 40 Years. *Arid*

- Zone Research, 2002, 19(1): 1-6.
- [25] Huang Q, Jiang J H. Analysis of Water Level Descent in Daihai Lake. Journal of Lake Science, 1999, 11(4): 304-310.
- [26] Wang S M, Yu S Y, Wu R J. Daihai Lake-Lake Environment and Climate Change. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1990.
- [27] Jin X C, Tu Q Y. Investigation Rules for Lakes Eutrophication. Beijing: Press of Chinese Environmental Science, 1990.
- [28] Guo Z Y, Li X C, Wang C, Ma H T. Influence of pH Value on the Release and the Chemical Fractions of Phosphorus in Sediments of Xuanwu Lake. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 873-877.
- [29] Han W M. Phosphorus Release from Sediments and Its Effects on the Eutrophication of the West Lake. Journal of Lake Sciences, 1993, 5(1): 71-77.
- [30] Jin X C. Pollution Chemistry. Beijing: Press of Chinese Environmental Science, 1992.
- [31] Li Y, Wang C. Control Factors of Phosphorus from City Shallow Lake Sediments. Jiangsu Environmental Technology, 2002, 15(4): 4-6.
- [32] Rydin, E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [33] Hantke B, Fleischer P, Domany I, koch M, pless P, wiendl M, melzer A. P-release from DOP by phosphatase activity in comparison to P excretion by zooplankton. Studies in hardwater lakes of different trophic level. Hydrobiologia, 1996, 317(2): 151-162.
- [34] Liu C W, He J, Sun H M, Gao X D, Xue H X. The Difference of Phosphorus Forms between Different Types of Lakes. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 508-512.
- [35] Wang C, Zou L M, Wang P F, Lin Z P. Relation Between Distribution of Phosphorus Form in the Sediment of Typical Urban Shallow Lakes and Eutrophication. Environmental Science, 2008, 29(5): 1303-1307.
- [36] Jensen H S, Andersen F O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. Limnology and Oceanography, 1992, 37(3): 577-589.
- [37] Li W H, Chen Y X, Sun J P. Influence of Different Dissolved Oxygen (DO) Amounts on Released Pollutants from Sediment to Overlying Water. Journal of Agro-environmental Science, 2003, 22(2): 170-173.
- [38] Sun S J, Huang S L. Phosphorus Release from Haihe Sediments. Environmental Science Research, 2008, 21(4): 126-131.
- [39] Fan C X, Morihiko Aizaki. Effects of Aerobic and Anaerobic Conditions on Exchange of Nitrogen and Phosphorus Across Sediment-water Interface in Lake Kasumigaura. Journal of Lake Science, 1997, 9(4): 337-342.
- [40] Fan C X, Zhang L, Qin B Q, Wang S M, Hu W P, Zhang C. Phosphorus Release from Suspended Particulate Matter of Taihu Lake Under Storm. Science in China, Ser. D, 2003, 33(8): 760-768.
- [41] Yao Y, Jin X C, Jiang X, Li L H. Study on Effects of Light on Phosphorus Release and Phosphorus Form Change in Lake Sediments. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(z1): 30-33.

参考文献:

- [4] 范成新, 张路, 包先明, 尤本胜, 钟继承, 王建军, 丁士明. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及定量化-2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207-217.
- [5] 王颖, 沈珍瑶, 呼丽娟, 牛军峰. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1654-1661.
- [6] 李宝, 丁士明, 范成新, 钟继承, 赵斌, 尹洪斌, 张路. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算. 环境科学, 2008, 29(1): 114-120.
- [9] 吴丰昌, 万国江. 泸沽湖沉积物-水界面扩散作用对上覆水体基本化学组成的影响. 环境科学, 1996, 17(1): 10-12.
- [12] 张路, 范成新, 王建军, 陈宇炜, 姜加虎. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系. 湖泊科学, 2008, 20(3): 263-270.
- [13] 苏玉萍, 林佳, 林婉珍, 吴筠, 王家乐. 亚热带深水库沉积物-水界面磷释放受控因子的研究. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1465-1470.
- [14] 张登峰, 鹿雯, 王盼盼, 杨丽莉, 张志勇, 曾向东. 沉积磷在不同 pH 水平下的释放与转化规律. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 1-5.
- [15] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云, 常会庆, 杨肖娥, 潘培民. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究. 水土保持学报, 2007, 21(2): 151-154.
- [16] 吴丰昌, 白占国, 万国江, 万曦. 贵州百花湖沉积物中磷的再迁移作用. 环境科学进展, 1996, 4(3): 58-61.
- [17] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 罗激葱, 高光, Gu Binghe. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例. 中国科学 (D辑), 2005, 35: 33-44.
- [18] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷. 海洋科学, 2000, 24(07): 42-45.
- [19] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 张路, 罗激葱. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征. 水科学进展, 2003, 14(6): 714-719.
- [20] 吕晓霞, 翟世奎, 于增慧. 长江口及邻近海域表层沉积物中营养元素的分布特征及其控制因素. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 1-5.

- [23] 王红娟, 姜加虎, 李新国. 岱海湖泊岸线形态变化研究. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 674-677.
- [24] 曹建廷, 王苏民, 沈吉, 金章东. 近40年来内蒙古岱海水位下降的主要原因. 干旱区研究, 2002, 19(1): 1-6.
- [25] 黄群, 姜加虎. 岱海水位下降原因分析. 湖泊科学, 1999, 11(4): 304-310.
- [26] 王苏民, 余源盛, 吴瑞金. 岱海——湖泊环境与气候变化. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [27] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [28] 郭志勇, 李晓晨, 王超, 马海涛. pH值对玄武湖沉积物中磷的释放及形态分布的影响. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 873-877.
- [29] 韩伟明. 底泥释磷及其对杭州西湖富营养化的影响. 湖泊科学, 1993, 5(1): 71-77.
- [30] 金相灿. 沉积物污染化学. 中国环境科学出版社, 1992.
- [31] 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. 江苏环境科技, 2002, 15(4): 4-6.
- [34] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 高兴东, 薛红喜. 乌梁素海和岱海沉积磷形态分布的差异性研究. 沉积学报, 2008, 26(3): 508-512.
- [35] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 林志评. 典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系. 环境科学, 2008, 29(5): 1303-1307.
- [37] 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. JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE, 2003, 22(2): 170-173.
- [38] 孙淑娟, 黄岁樑. 海河沉积物磷释放模拟实验研究. 环境科学研究, 2008, 21(4): 126-131.
- [39] 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. 湖泊科学, 1997, 9(4): 337-342.
- [40] 范成新, 张路, 秦伯强, 王苏民, 胡维平, 张琛. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学(D辑), 2003, 33(8): 760-768.
- [41] 姚扬, 金相灿, 姜霞, 李丽和. 光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态变化的影响研究. 环境科学研究, 2004, 17(z1): 30-33.