

袁轶君,刘娜娜,陈传红,等. 环境因子对鄱阳湖沉积物中内源磷释放的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(5):227-235.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.05.046

环境因子对鄱阳湖沉积物中内源磷释放的影响

袁轶君¹, 刘娜娜¹, 陈传红¹, 黄德娟¹, 徐 将¹, 毕永红²

(1. 东华理工大学化学生物与材料科学学院,江西南昌 330013; 2. 中国科学院水生生物研究所,湖北武汉 430072)

摘要:以大型通江湖泊鄱阳湖为研究对象,研究温度和扰动等环境因素对湖泊沉积物内源磷释放的影响。结果表明,在 5 ℃ 条件下,PY40、PY45 和 PY54 这 3 个站位总磷的最大释放量分别为 90.08、96.42、112.64 mg/g;在 15 ℃ 条件下,总磷的最大释放量分别为 91.65、105.79、119.86 mg/g;在 25 ℃ 条件下,总磷的最大释放量分别为 92.08、117.2、136.69 mg/g;在 40 ℃ 条件下总磷的最大释放量分别为 107.04、132.89、159.19 mg/g;静置条件下,总磷的最大释放量分别为 2.9、3.42、4.03 mg/g;低速扰动(转速为 60 r/min)时总磷的最大释放量分别为 3.4、3.74、4 mg/g,高速扰动(转速为 120 r/min)时总磷的最大释放量分别为 3.19、3.64、4.29 mg/g。温度对内源磷的释放有明显影响,随着环境温度的不断升高,沉积物释磷量明显增加。通过扰动促使沉积物再悬浮,促进了沉积物中的磷释放,加速了沉积物间隙水中磷的扩散,从而增加了磷的释放。

关键词:鄱阳湖;沉积物;温度;扰动;内源磷;磷释放

中图分类号: X524;X820 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)05-0227-09

近年来,随着工业化进程的发展和居民生活水平的提高,人类活动对水环境造成的压力及影响日益加重,湖泊富营养化日益成为全球性的水环境污染问题。磷作为湖泊生态系统主要营养元素之一,也是影响湖泊富营养化的关键性限制元素^[1-2]。而作为水体中的沉积物,在一定条件下可以成为湖泊富营养化的主导因子^[3-4]。当前,外源磷负荷得到了有效的控制,而沉积物磷的释放在一定程度上决定了湖泊富营养化的进程。因此,内源沉积物对水体营养盐的贡献成为人们关注的焦点。沉积物磷释放能够为湖泊富营养化提供磷源^[5-6],是湖泊水质恶化的重要因素。

水-沉积物界面磷的迁移转化在内源磷释放过程中有重要影响,相关研究证实在浅水湖泊中,表层沉积物中的磷通过再悬浮很容易进入到上覆水^[7-10]。影响沉积物磷释放的因素很多,主要有溶解氧含量、温度、光照、pH 值等。不同因素对水-沉

积物界面磷的迁移转化的影响不同。水温通过改变沉积物-水界面间的磷平衡影响磷循环的过程。pH 值是水质的重要指标,对土壤-水界面的物理化学过程有重要影响^[11-12]。水动力条件是湖泊生态系统的重要驱动因子,是造成污染物释放的关键因素之一^[13-15]。其中,水位变化可对湖泊 pH 值、温度、溶解氧、扰动等产生影响^[16-18],使沉积物磷含量、形态及生物有效性发生变化^[19-20],进而影响湖泊上覆水水质。

鄱阳湖位于江西省北部,是我国第一大淡水湖和通江湖泊,上承“五河”(赣江、抚河、修水、信江、饶河)来水,下接长江。近年来,长江流域进入连续枯水年,来水量减少,加上上游三峡水利工程的运行,汛期后长江三峡水利工程蓄水过猛,长江湖口水位持续走低,鄱阳湖湖水外泄量加大,水位迅速走低,鄱阳湖提前步入枯水期,且枯水期时间延长^[21]。这一变化打破了鄱阳湖水量吞吐平衡,造成鄱阳湖枯水期水位持续下降,沉积物出露面积增加,出露时间提前并延长,使鄱阳湖沉积物中不同形态有机磷含量显著增加^[18],进而增大沉积物中磷释放的风险。本研究针对鄱阳湖这种特定生态水文特征,通过研究上覆水温度、扰动等环境因子对沉积物磷释放的影响,试图建立沉积物磷释放特征与温度和扰动等条件的响应关系,以期为评估环境因素对湖泊水体磷的影响提供合理充分的理论

收稿日期:2019-02-28

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(编号:GJJ160586);国家自然科学基金地区项目(编号:41562021、41867063);江西省自然科学基金面上项目(编号:20161BAB204191)。

作者简介:袁轶君(1989—),男,江西上饶人,博士,讲师,主要从事湖泊生态学研究。E-mail:yuanyijun1229@163.com。

通信作者:刘娜娜,博士,讲师,主要从事藻类生理生态学研究。

E-mail:liunana812@163.com。

基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2016 年 7 月在鄱阳湖湖心区 (PY45) 和非湖心区 (PY40, PY54), 利用彼得森采泥器采集表层沉积

物样, 避光条件下快速运送至实验室。沉积物经冷冻干燥, 碾碎研磨, 充分混匀后过 100 目筛, 密封保存备用。采样同时, 测定水体叶绿素 a (Chl a) 含量、透明度 (SD)、水温 (T)、溶解氧量 (DO)、pH 值、氧化还原电位 (ORP)、总氮 (TN) 含量、总磷 (TP) 含量如表 1 所示。

表 1 水体理化指标

站位	Chl a 含量 (mg/m ³)	SD (m)	T (℃)	DO (mg/L)	pH 值	ORP (mV)	TN 含量 (mg/L)	TP 含量 (mg/L)
PY40	3.794	0.500	31.17	10.000	7.990	160.0	1.213	0.091
PY45	17.010	1.350	31.45	9.900	8.260	150.0	0.822	0.082
PY54	6.445	1.000	29.82	9.980	7.600	222.0	1.098	0.054

1.2 模拟试验设计

试验按照《湖泊富营养化调查规范》^[22] 进行, 将 10 g (干质量) 沉积物置于 500 mL 锥形瓶底部平铺, 缓慢加入 300 mL 去离子水, 并记录液面位置。每 24 h 取中层水样 100 mL, 测量总磷和正磷酸盐含量。取样后, 补充上覆水至已记录的液面, 保证上覆水体积不变。

温度条件: 在避光、pH 值为 7.1、以蒸馏水为上覆水条件下, 选择在 5、15、25、40 ℃ 温度下进行释放试验。

扰动条件: 将以蒸馏水为上覆水的锥形瓶装置置于 25 ℃ 恒温摇床中, 分别进行静置、低速扰动 (60 r/min) 和高速扰动 (120 r/min) 条件下的磷释放试验。

1.3 样品分析方法

试验过程中, 总磷及正磷酸盐含量用钼锑抗分光光度法^[23] 测定, 磷的累计释放量计算公式^[24] 如下:

$$R = [V(C_n - C_0) + \sum_i^n V_i C_i] / m。$$

式中: R 为沉积物氮化合物累积释放量 (mg/g); V 为反应装置剩余水样体积 (mL); C_0 为初始水样浓度 (mg/L); V_i 为每次取样量 (mL); C_n 、 C_i 为第 n 、第 i 次采样时营养物的浓度 (mg/L); m 为底泥质量 (g)。

2 结果与分析

2.1 温度对沉积物磷释放的影响

由图 1 和图 2 可知, 温度的升高有利于沉积物中总磷的释放。5 ℃ 时, 样点 PY40 上覆水中总磷浓

度在 0 ~ 1 d 内剧烈增加至 0.54 mg/L, 在 2 d 时上覆水中总磷浓度达到最大值, 为 0.65 mg/L; 样点 PY45 总磷浓度 0 ~ 1 d 内剧烈增加至最大值, 为 0.65 mg/L, 然后逐渐下降; 样点 PY54 上覆水中总磷浓度在 0 ~ 1 d 增加至 0.71 mg/L, 5 d 时总磷浓度达到最大值, 为 0.75 mg/L。15 ℃ 时, 上覆水中总磷浓度最大值与 5 ℃ 时差别不大, 样点 PY40、PY45 和 PY54 上覆水中总磷浓度最大值分别为 0.58、0.65、0.90 mg/L。随着温度升高到 25、40 ℃ 时, 上覆水中最大总磷浓度也明显增加。在 25 ℃ 时, 样点 PY40、PY45 和 PY54 上覆水中总磷浓度最大值分别为 0.58、0.78、0.88 mg/L; 40 ℃ 时, 样点 PY40、PY45 和 PY54 上覆水中总磷浓度最大值分别为 0.71、0.84、1.01 mg/L。由图 2 可以看出, 随着温度的升高, 沉积物总磷的累积释放量也逐渐增加。在样点 PY40, 试验结束 (13 d) 时, 在 5、15、25、40 ℃ 条件下沉积物中总磷的累积释放量分别为 90.08、91.65、92.08、107.04 mg/g; 而在样点 PY45, 在 5、15、25、40 ℃ 条件下对应的沉积物中总磷的累积释放量分别为 96.42、105.79、117.20、132.89 mg/g; 在样点 PY54, 在 5、15、25、40 ℃ 温度下沉积物中总磷的累积释放量分别为 112.64、119.86、136.69、159.19 mg/g。

温度对沉积物中正磷酸盐释放的影响同样表现为随着温度的升高释放量呈逐渐增大的趋势。从图 3 可以看出, 上覆水中正磷酸盐浓度在 0 ~ 1 d 内均呈现剧烈增加的趋势。在样点 PY40, 在 5、15、25、40 ℃ 温度下上覆水中正磷酸盐浓度最大值分别为 0.34、0.34、0.47、0.51 mg/L; 而在样点 PY45, 温度为 5 ℃、15 ℃、25 ℃、40 ℃ 时对应的上覆水中

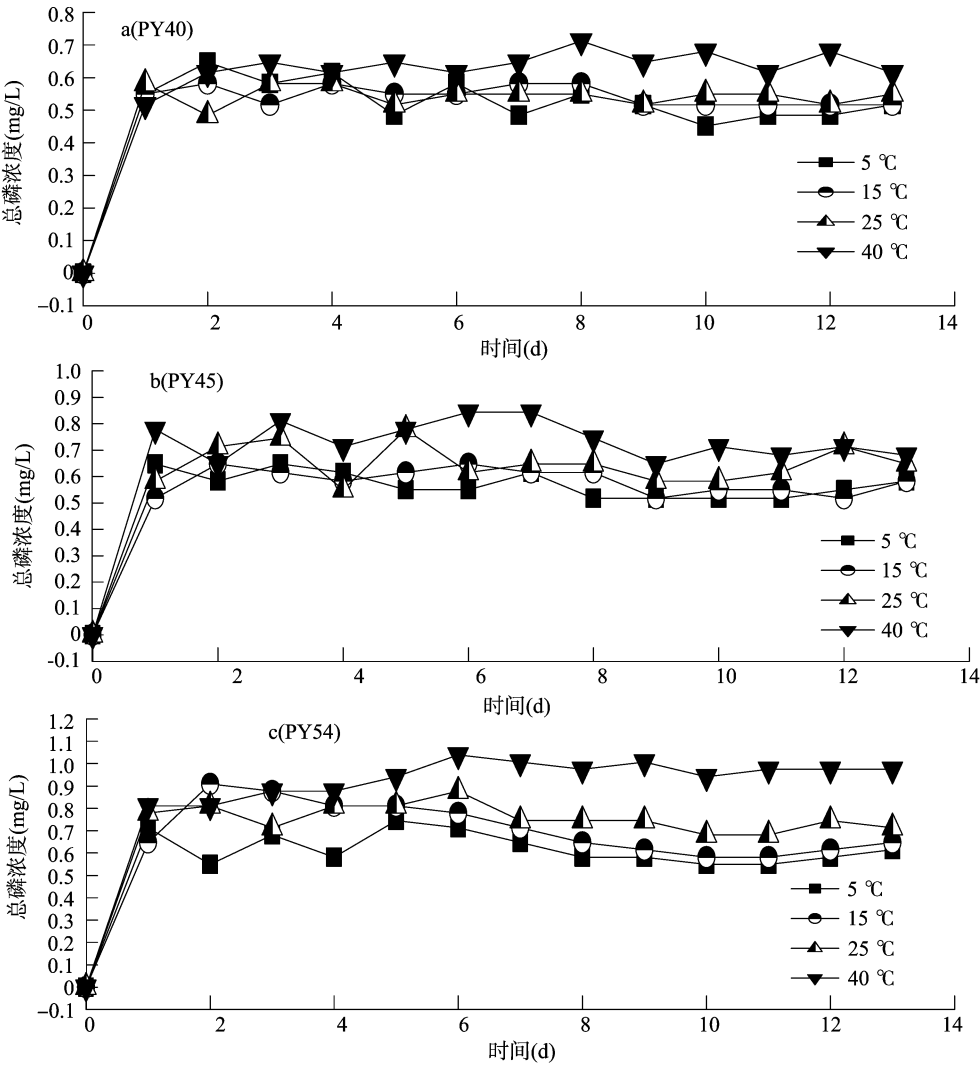


图1 温度对上覆水中总磷浓度的影响

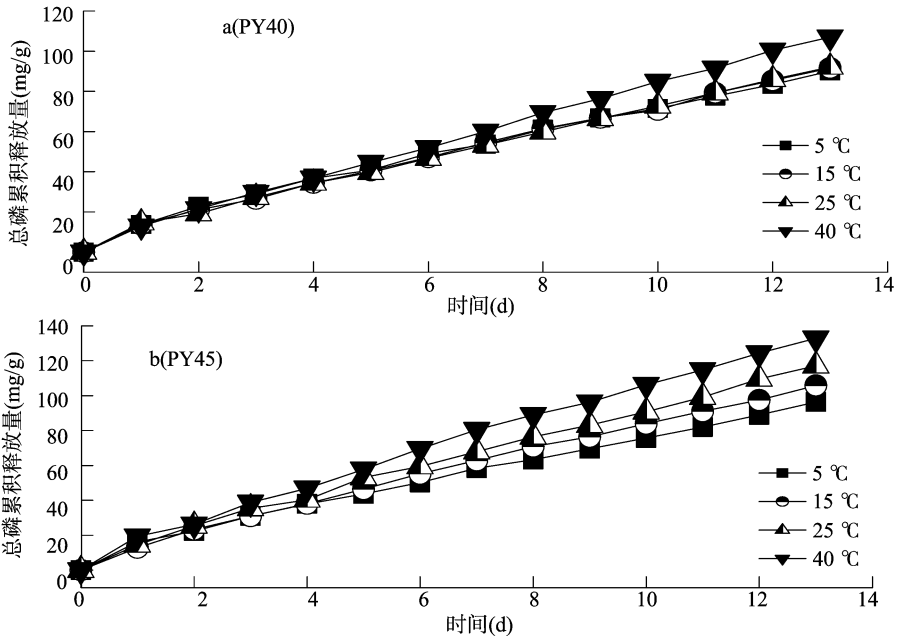


图2 温度对沉积物总磷累积释放量的影响

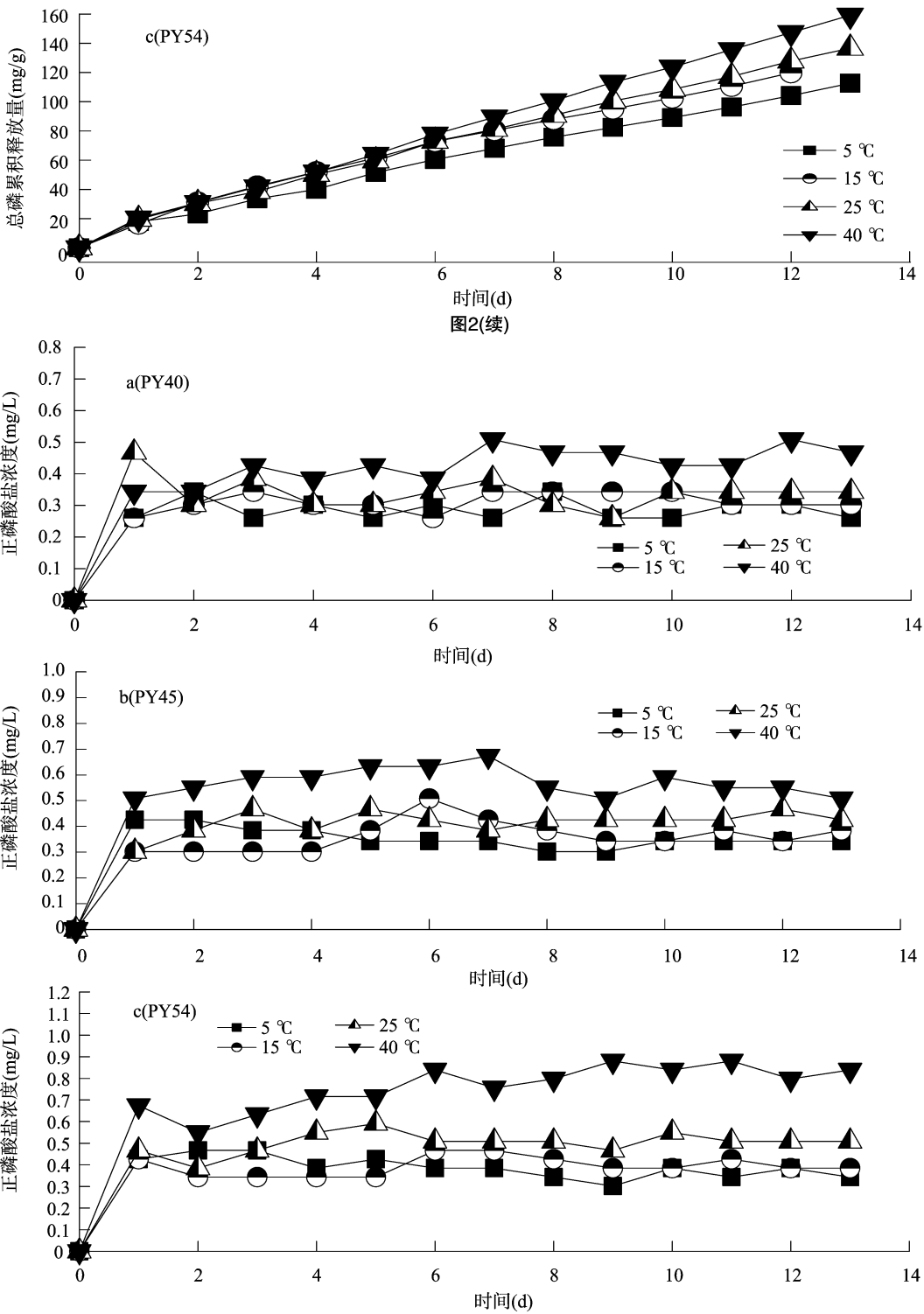


图3 温度对上覆水中正磷酸盐浓度的影响

正磷酸盐浓度最大值分别为 0.43、0.51、0.47、0.67 mg/L;在样点 PY54,在 5、15、25、40 °C 温度下上覆水中正磷酸盐浓度最大值分别为 0.47、0.47、0.59、0.88 mg/L。从图 4 可以看出,沉积物正磷酸盐的累积释放量与总磷的累积释放量相似,同样表现为随着温度的升高而逐渐增大。在试验结束

(13 d)时,在样点 PY40,在 5、15、25、40 °C 温度下沉积物中正磷酸盐的累积释放量分别为 48.00、52.51、57.51、73.00 mg/g;而在样点 PY45,在 5、15、25、40 °C 温度下对应的沉积物中正磷酸盐的累积释放量分别为 59.99、61.51、70.49、95.86 mg/g;在样点 PY54,在 5、15、25、40 °C 温度下沉积物中正磷酸

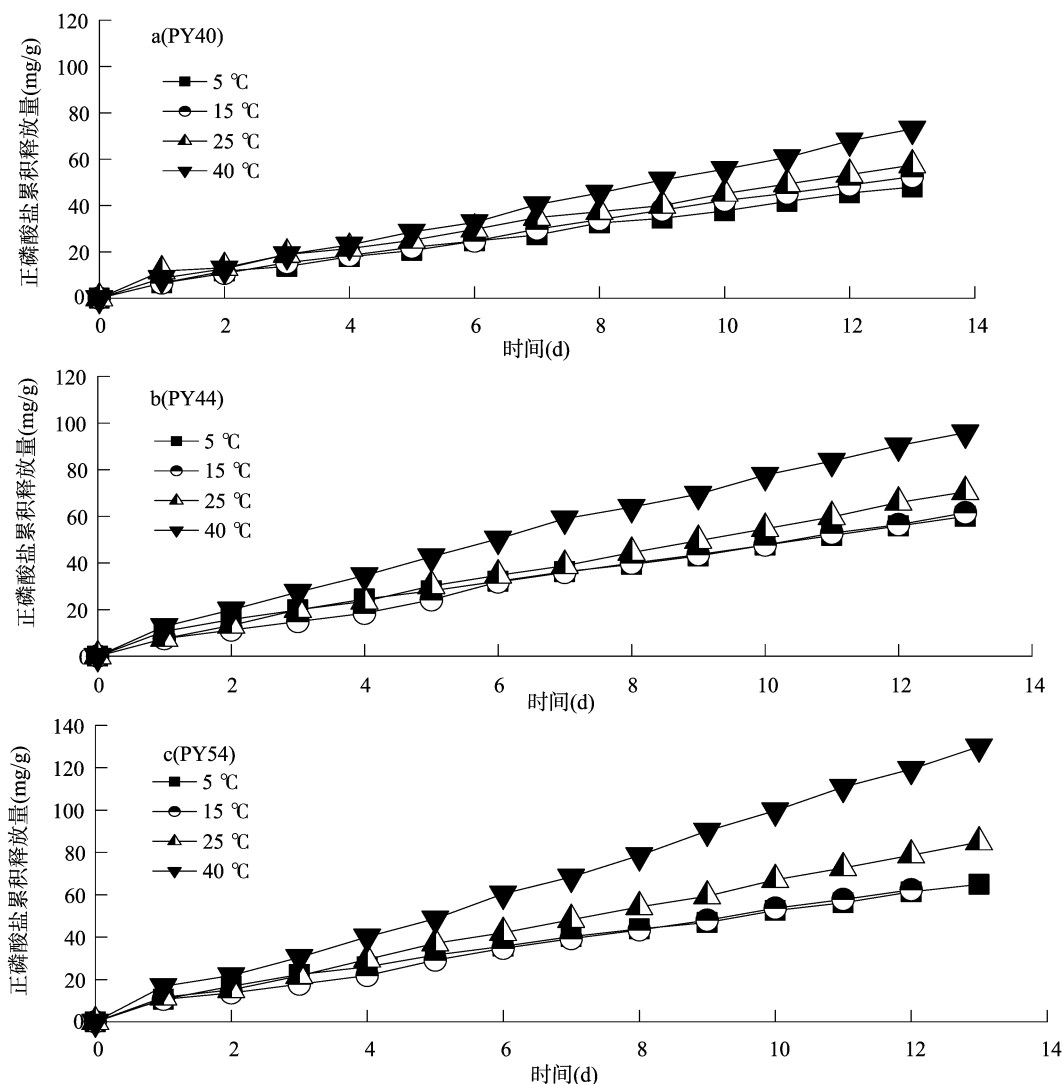


图4 温度对沉积物中正磷酸盐累积释放量的影响

盐的累积释放量分别为 64.94、65.35、84.84、129.92 mg/g。

试验结果表明,沉积物中的总磷和正磷酸盐的释放量随温度的升高逐渐递增,这与张义等研究西湖沉积物磷释放时得到的结论^[25]一致。该结果似乎解释了夏季许多湖泊富营养化程度加剧的原因。温度主要是通过影响沉积物中微生物的活性和数量来影响不同形态磷的释放量。一方面,温度升高,微生物活动增加,耗氧加快,溶解氧减少,使环境由氧化状态向还原状态转化,促使沉积物磷释放^[26]。同时,微生物的活动还可以使沉积物中有机磷转化成无机磷酸盐^[27]。另一方面,温度对含钙沉积物的作用也显著影响沉积物的磷释放,随着温度升高,有机质矿化作用加剧,产生大量的 CO₂,含钙沉积物会加速溶解,沉积物磷的释放也相应加

快^[26]。此外,随着温度的升高,沉积物中的磷逐渐释放^[28]。

2.2 扰动对沉积物磷释放的影响

从图 5 中可以看出,在样点 PY40,静置、低速扰动、高速扰动条件下上覆水中总磷浓度最大值分别为 0.023、0.032、0.025 mg/L;而在样点 PY45,静置、低速扰动、高速扰动条件下对应的上覆水中总磷浓度最大值分别为 0.029、0.033、0.029 mg/L;在样点 PY54,静置、低速扰动、高速扰动条件下上覆水中总磷浓度最大值分别为 0.033、0.033、0.039 mg/L。由图 6 可以看出,随着扰动转速的增加,沉积物总磷的累积释放量也逐渐增加。在样点 PY40,试验结束时,静置、低速扰动、高速扰动条件下沉积物中总磷的累积释放量分别为 2.90、3.40、3.19 mg/g;而在样点 PY45,静置、低速扰动、高速扰动条件下对应的

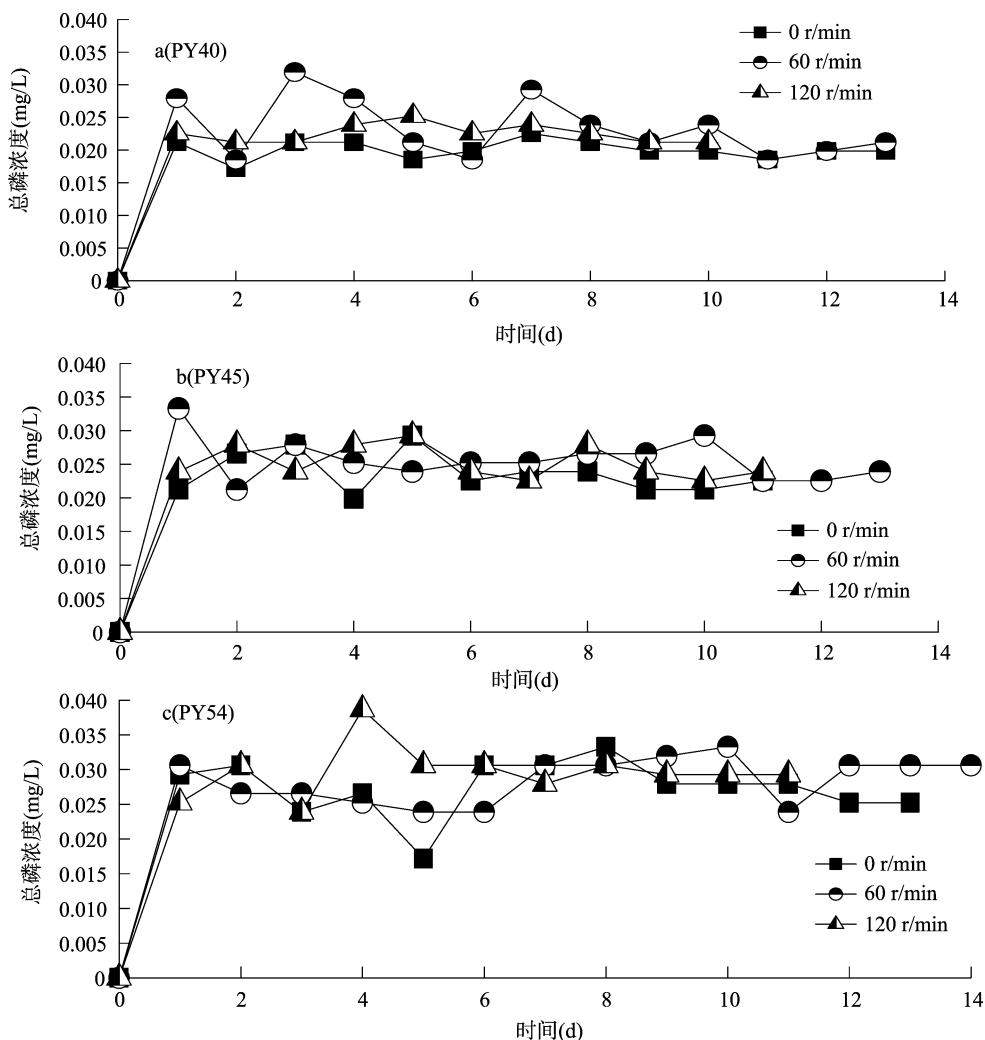


图5 扰动对上覆水中总磷浓度的影响

沉积物中总磷的累积释放量分别为 3.42、3.74、3.64 mg/g;在样点 PY54,静置、低速扰动、高速扰动条件下沉积物中总磷的累积释放量分别为 4.03、4.00、4.29 mg/g。

扰动对沉积物中正磷酸盐释放的影响同样表现为随着扰动转速的增加释放量呈逐渐增大的趋势。从图 7 中可以看出,在样点 PY40,静置、低速扰动、高速扰动条件下上覆水中正磷酸盐浓度最大值分别为 0.018、0.029、0.016 mg/L;而在样点 PY45,静置、低速扰动、高速扰动条件下对应的上覆水中正磷酸盐浓度最大值分别为 0.018、0.021、0.023 mg/L;在样点 PY54,静置、低速扰动、高速扰动条件下上覆水中正磷酸盐浓度最大值分别为 0.023、0.031、0.026 mg/L。由图 8 可以看出,随着扰动转速的增加,沉积物正磷酸盐的累积释放量也逐渐增加。在样点 PY40,试验结束时,静置、低速扰

动、高速扰动条件下沉积物中正磷酸盐的累积释放量分别为 1.84、2.17、2.10 mg/g;而在样点 PY45,静置、低速扰动、高速扰动条件下对应的沉积物中正磷酸盐的累积释放量分别为 2.25、2.54、2.64 mg/g;在样点 PY54,静置、低速扰动、高速扰动条件下沉积物中正磷酸盐的累积释放量分别为 2.74、2.85、3.07 mg/g。

试验结果表明,沉积物中总磷及正磷酸盐的释放量随扰动转速的增加而增大。扰动是影响浅水湖泊沉积物-水界面反应的重要物理因素之一。其原因可能有 2 个方面:一方面,间隙水中的可溶性磷的浓度远高于上覆水,扰动加快了间隙水与上覆水体的物质交换速度与量,增加磷向水体的释放;另一方面,扰动可使沉积物的颗粒悬浮,增大颗粒与水体接触的表面积,促进磷的释放^[29]。在本研究中,低速扰动条件下沉积物总磷及正磷酸盐的释

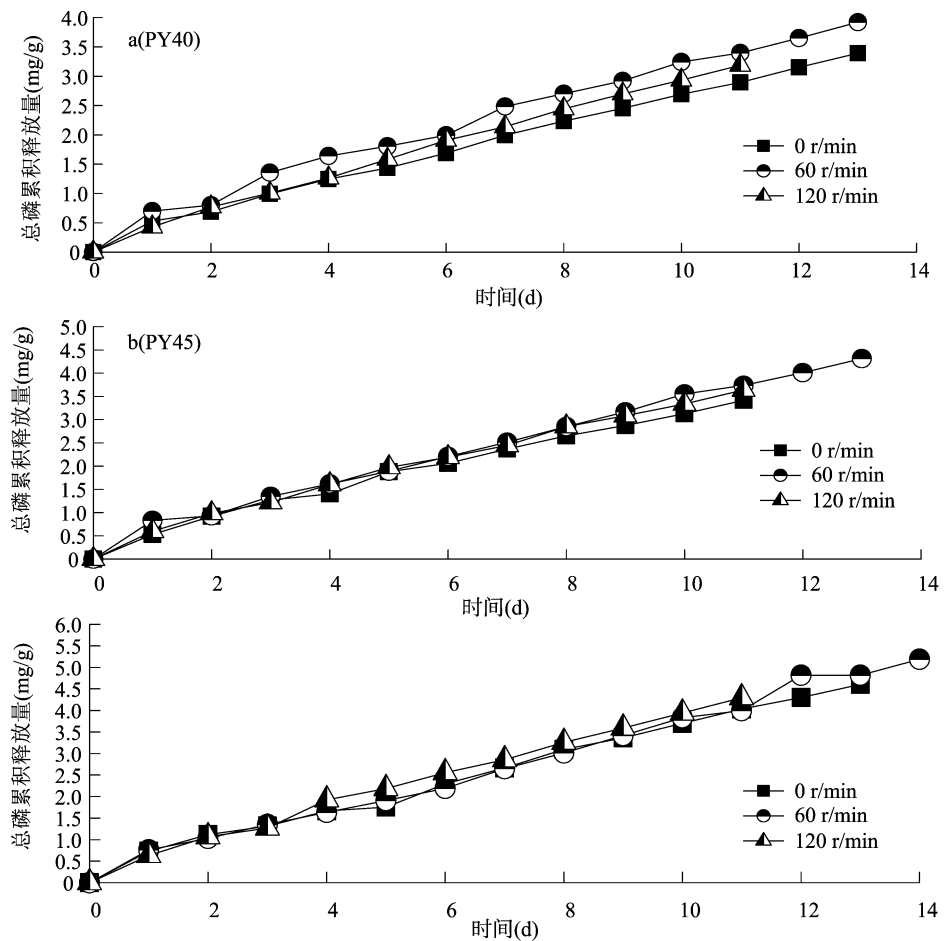


图6 扰动对沉积物中总磷累积释放量的影响

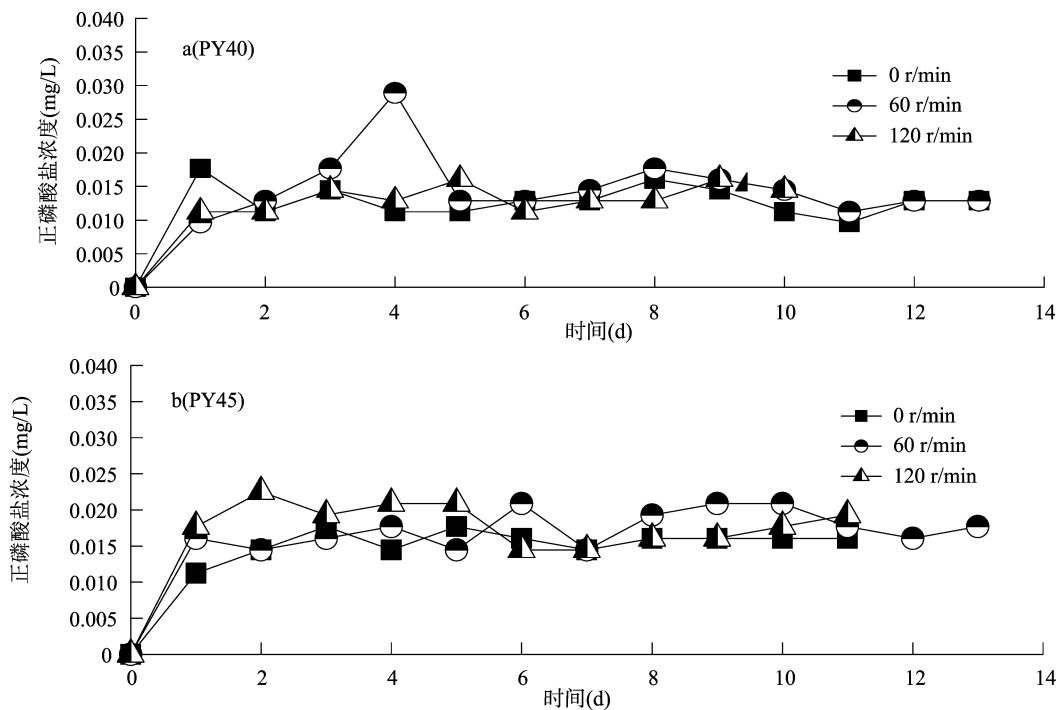


图7 扰动对上覆水中正磷酸盐浓度的影响

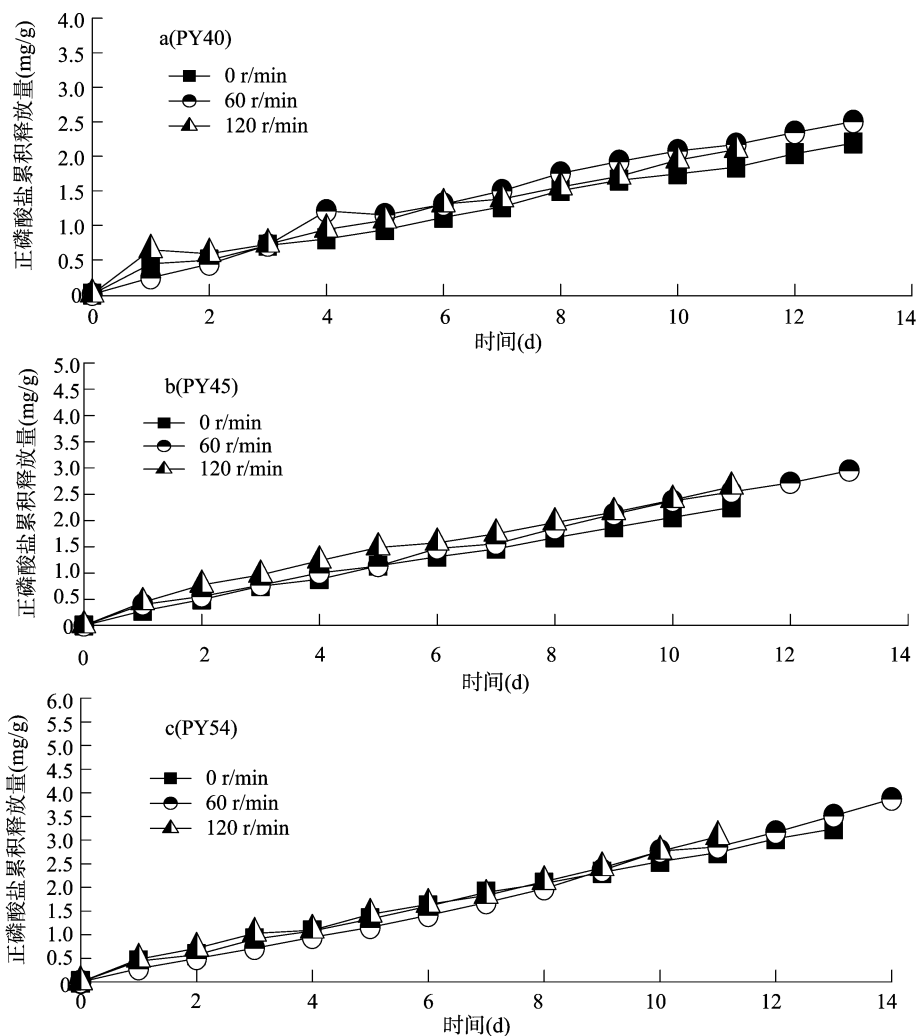
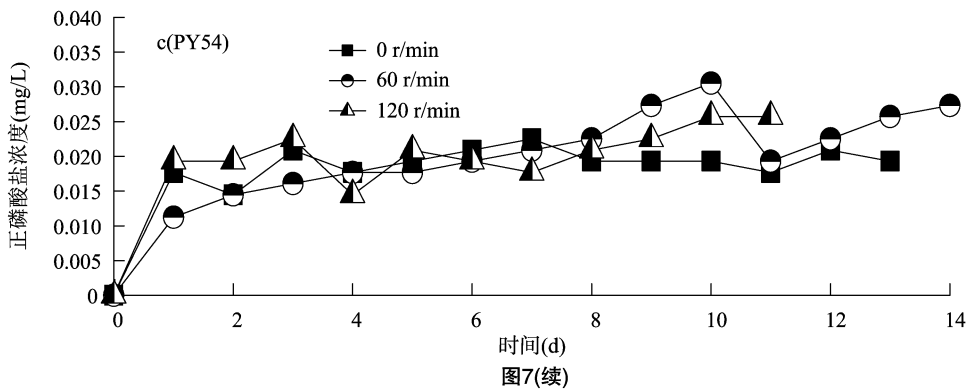


图8 扰动对沉积物正磷酸盐累积释放量的影响

放量在某些时段要大于高速扰动条件下的磷释放量,这是因为扰动太剧烈可能使部分已释放的磷又被沉积物吸附。由此可见,一定条件的扰动会加速浅水型湖泊内源磷的释放。但水动力条件对磷释放的影响仅是有限的短期效应,张路等在扰动条件下研究了太湖表层沉积物的释磷行为,发现沉积物-水体是湖泊磷酸盐天然的缓冲体系^[30]。当水

体磷酸盐负荷较低时,沉积物处于释磷状态,释磷强度随扰动强度的加大而增加;反之当水体磷负荷较高时,沉积物则充当磷的吸收剂。该研究结果可为控制湖泊富营养化提供一定的理论指导。

3 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,温度升高对沉积物释磷的影响较大。水温升高不仅可以提高各类磷酸盐的饱和度,而且可以增强微生物的活性,使底泥释磷强度加大。

水动力学条件的改变,如对水体的扰动,有利于底泥在较短时间内达到最大的释磷能力。因此,一定条件的扰动效应会加速浅水型湖泊内源磷的释放。

对于浅水湖泊鄱阳湖而言,夏季水温的升高以及江湖关系变化导致的扰动强度的增加,将引起内源磷的释放,水体磷的浓度增加,从而进一步加剧水体的富营养化。

参考文献:

- [1] 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 [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3): 391 – 399.
- [2] Zhang C, Zhu M Y, Zeng G M, et al. Active capping technology: a new environmental remediation of contaminated sediment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(5): 4370 – 4386.
- [3] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments [J]. *Water Research*, 2000, 34(4): 1187 – 1200.
- [4] 陈建良, 胡明明, 周怀东, 等. 洱海蓝藻水华暴发期浮游植物群落变化及影响因素 [J]. *水生生物学报*, 2015, 39(1): 24 – 28.
- [5] 黎 睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(6): 1831 – 1839.
- [6] Christophoridis C, Fytianos K. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1181 – 1192.
- [7] 张亚昆, 杨丽标, 雷 坤, 等. 黄河下游沉积物 – 水界面氮磷交换与沉积通量研究 [J]. *泥沙研究*, 2013(6): 66 – 74.
- [8] Testa J M, Brady D C, Di T D M, et al. Sediment flux modeling: simulating nitrogen, phosphorus, and silica cycles [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013, 131: 245 – 263.
- [9] Martinez – Soto M C, Martinez G. Organic carbon, phosphorus and nitrogen in surface sediments of the marine – coastal region north and south of the Paria Peninsula, Venezuela [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(2): 429 – 439.
- [10] Wu D, Hua Z L. The effect of vegetation on sediment resuspension and phosphorus release under hydrodynamic disturbance in shallow lakes [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 69: 55 – 62.
- [11] Boers C M P. The influence of pH on phosphorus release from lake sediments [J]. *Water Research*, 1991, 25(3): 309 – 311.
- [12] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 曝气复氧对富营养化水体底泥氮磷释

- 放的影响 [J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 812 – 815.
- [13] Graham N D, Bouffard D, Loizeau J L. The influence of bottom boundary layer hydrodynamics on sediment focusing in a contaminated bay [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(24): 1 – 15.
 - [14] Shakibaeinia A, Dibike Y B, Kashyap S, et al. A numerical framework for modelling sediment and chemical constituents transport in the Lower Athabasca River [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 17(4): 1 – 20.
 - [15] 燕文明, 麻 林, 向 龙, 等. 沉积物 – 水界面中可交换态氮对不同菹草密度的响应 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(2): 119 – 122.
 - [16] 刘 凯, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖不同高程沉积物中磷形态特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(3): 856 – 861.
 - [17] Ni Z, Wang S, Zhang L, et al. Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(13): 10116 – 10129.
 - [18] 马双丽, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3607 – 3614.
 - [19] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, et al. Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from lake sediments [J]. *Colloids and Surfaces A (Physicochemical and Engineering Aspects)*, 2008, 316(1/2/3): 245 – 252.
 - [20] Li Y, Zhou Y B, Zhou Z H, et al. Effects of sustained – release composite on the oxygen levels and sediment phosphorus fractions of an urban river in Shanghai [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(17/18/19/20): 2176 – 2182.
 - [21] 胡振鹏. 调节鄱阳湖枯水位维护江湖健康 [J]. *江西水利科技*, 2009, 35(2): 82 – 86.
 - [22] 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, 1990: 230 – 232.
 - [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243 – 246.
 - [24] 陶玉炎, 耿金菊, 王荣俊, 等. 环境条件变化对河流沉积物“三氮”释放的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(6L): 41 – 44.
 - [25] 张 义, 刘子森, 张珪磊, 等. 环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响 [J]. *水生生物学报*, 2017, 41(6): 1354 – 1361.
 - [26] 周启星, 俞 洁, 陈 剑, 等. 某城市湖泊中磷的循环特征及富营养化发生潜势 [J]. *环境科学*, 2004, 25(5): 138 – 142.
 - [27] 范成新, 张 路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2003, 33(8): 760 – 780.
 - [28] 王晓蓉, 王兆哲, 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.
 - [29] 王茹静, 赵 旭, 曹瑞钰. 富营养化水体中底泥释磷的影响因素及其释放机理 [J]. *新疆环境保护*, 2005, 27(3): 5 – 8.
 - [30] 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.