

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.002

基于微量分析的沉积物-水界面磷铁相关性研究

燕文明,王 汗,宋兰兰,徐俊增

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:为了更好地控制和治理湖泊富营养化,探究沉积物-水界面中磷和铁的相关性特征。通过室内培养原位沉积柱,利用微界面分析技术和高分辨率平衡式间隙水采集技术(HR-Peeper),分3时段(加入摇蚊幼虫后的第7天、第21天和第35天),探究好氧环境中摇蚊幼虫扰动与铁的氧化耦合作用下沉积物-水界面体系中磷形态的迁移转化规律。研究结果表明:摇蚊幼虫扰动增加了沉积物中氧气的渗透深度和氧化还原电位 E_h 值,在第21天扰动最激烈;扰动降低了3个时段沉积物间隙水中的溶解态磷SRP(最大58%)、溶解态铁Soluble Fe(Ⅱ)(最大44%)的浓度;SRP与Soluble Fe(Ⅱ)在第7天和第21天也高度相关。可见,摇蚊幼虫的扰动作用所引起的沉积物中磷的变化受到了铁的氧化吸附控制。

关键词:微量分析;沉积物-水界面;摇蚊幼虫;磷;铁;相关性

中图分类号:X171.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)06-0492-07

Research of correlation between phosphorus and iron in the sediment-water interface based on the micro interface analysis

YAN Wenming, WANG Han, SONG Lanlan, XU Junzeng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the correlation between phosphorus and iron in the sediment-water interface, by the indoor cultivation of situ sediment column, this study used the micro interface analysis technology and the interstitial water collection technology of high resolution balance type (HR - Peeper), and designed three stages (7, 21 and 35 days after adding the Chironomus larva), to explore the transfer mechanism of phosphorus in the sediment-water interface system under the oxidative coupling of Chironomus larva disturbance and iron in aerobic environment. The results show: the disturbance of Chironomus larva increased the penetration depth and E_h of oxygen in sediments, and the disturbance was most intense on the 21st day; the disturbance reduced the concentration of Solubility Reactive Phosphorus (SRP) with maximum 58% and Soluble Fe (Ⅱ) with maximum 44% in the interstitial water of three stages; SRP and Soluble Fe (Ⅱ) were also highly correlated on days 7 and 21. It can be seen that the change of P in the sediment caused by the disturbing action of *Chironomus* larva is controlled by the oxidation adsorption of Fe.

Key words: micro analysis; sediment-water interface; *Chironomus* larva; phosphorus; iron; correlation

目前国际上对沉积物-水界面过程的研究已经从常规尺度进入微观尺度。微界面过程被认为是促进污染物迁移转化和降解的重要因素^[1-2],微界面特征可通过微电极测量技术得以反映。 O_2 和 E_h 微电极(尖端

基金项目: 中央高校/科研院所基本科研业务费专项(2018B44414/Y217003);江苏省重点研发计划(BE2019392)
作者简介: 燕文明(1982—),女,高级实验师,博士,主要从事环境水文及水环境保护研究。E-mail: ywm0815@163.com
通信作者: 宋兰兰,讲师,博士。E-mail: 252690639@qq.com
引用本文: 燕文明,王汗,宋兰兰,等. 基于微量分析的沉积物-水界面磷铁相关性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):492-498.
YAN Wenming, WANG Han, SONG Lanlan, et al. Research of correlation between phosphorus and iron in the sediment-water interface based on the micro interface analysis[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(6): 492-498.

直径可达 10 μm),已被广泛应用在环境微界面研究中。王建军等^[3]用微电极测量了太湖及南四湖环境沉积物-水微界面的 O_2 ,Finke 等^[4]利用微电极定量描述了墨西哥湾深海高盐地区光合作用过程中生物垫的 O_2 ,王敬富等^[5]利用微电极技术揭示了红枫湖沉积物-水界面扩散边界层厚度、 O_2 的扩散通量和渗透深度。可见,从微尺度研究环境微界面过程需要微电极测量系统的介入。

研究认为沉积物中磷的迁移转化易受到 Fe 的氧化控制^[6]。铁结合态磷作为最活跃的磷组分,是参与界面磷迁移的直接来源^[7]。而铁的化学形态主要受控于氧化还原电位(E_h),界面磷的迁移与氧化还原环境有密切联系^[8]。但由于离心法、抽吸法^[9]和 Rhizon 法^[10]等分析技术的空间分辨率低,且容易破坏沉积物原有结构,导致磷铁关联性的分析结果偏差。近年来,一些原位高分辨率(mm 级)的被动采样技术如:微界面技术和高分辨率平衡式间隙水采集技术(HR-Peeper)等的出现,很好地解决了这一问题,这些技术的诞生使得对界面特性的描述更加微观、原位和多维。Lewandowski 等^[11]、Xu 等^[12]的 HR-Peeper(www.easysensor.net)技术基于间隙水渗析的原理,使得其分辨率由 cm 级别提高到了 mm 级,并且缩短了平衡时间(48 h)。HR-Peeper 能及时获取间隙水中溶解态磷(SRP)和溶解态磷铁(Soluble Fe(II))微尺度空间分布的信息^[11],为微界面的研究提供宝贵的数据。

众多研究表明,水动力和沉水植物能够影响或改变沉积物中营养盐的释放规律^[13-17],而摇蚊幼虫扰动对沉积物中磷的影响目前仍存在争议。摇蚊幼虫扰动会引起沉积物颗粒的垂向分布变化,从而影响沉积相的理化性质^[18],降低间隙水中的 Soluble Fe(II)、SRP 以及磷的释放通量^[11,19-22];加速有机物的矿化降解过程,促进磷的释放^[23-24];而 Meysman 等^[25]认为摇蚊幼虫对磷释放的影响不显著。因此需要对湖泊沉积物地球化学过程做进一步的分析。

本文基于微量分析技术,将沉积物中 HR-Peeper 所获取的间隙水 SRP 和 Solution Fe 联系起来,探究摇蚊幼虫扰动下沉积物-水界面中磷与铁的相关性。

1 实验设计

1.1 采样区域概况

研究选取大纵湖作为研究对象。大纵湖位于淮河流域的里下河腹部区,由于受人类活动影响,湖面逐年萎缩,水体呈现富营养化现象。现场调查发现,在大纵湖湖心(31°30′31.1″N,120°10′31.0″E)采集到底栖动物 13 种,其中寡毛类为 15.38%,摇蚊幼虫为 38.46%,软体动物为 30.77%。从相对密度来看,摇蚊幼虫在大纵湖湖心区所占的比例最多(为 58.24%)。可见,摇蚊幼虫在大纵湖湖心区占有主导地位,选用其作为研究对象,研究其扰动下沉积物中磷的迁移转化过程。

1.2 实验设计

用柱状采样器(长×内径=50 cm×9 cm)在大纵湖湖心采集 8 根沉积物柱,沉积物至少 30 cm 深,同时采集上覆水样用于实验室沉积柱的培养,并在采样点附近采集摇蚊幼虫。沉积物柱按每 2 cm 分层,共分为 12 层,并将 8 根柱子同一层位的沉积物混匀,过 30 目筛去除大颗粒物和底栖动物。最后将沉积物按从深层到表面的顺序装入 8 根(长×内径=30 cm×9 cm)柱中,沉积物高 24 cm,预留 6 cm 上覆水高度。将所有柱子平均分配放入 2 个整理箱中(长×宽×高=72 cm×53 cm×42 cm)。将采集的上覆水用虹吸法缓慢引入整理箱中淹没培养。模拟湖泊原位环境,每天保持 12 h 光照,12 h 黑暗,恒温 15℃,5 min/h 曝气。培养 2 周后,向其中 1 个整理箱中的 4 根柱中加入摇蚊幼虫,每根 12 个,设置为摇蚊组;另外的 1 个整理箱中不添加摇蚊幼虫,设置为对照组。

1.3 样品采集及分析方法

取样时间分为 3 个时段,分别在加入摇蚊幼虫后的第 7 天、第 21 天和第 35 天。在取样时,首先,用微电极测定摇蚊组和对照组沉积物中的 DO 和 E_h ,取 2 mL 上覆水;接着,投入 HR-Peeper 装置,稳定平衡 48 h 后,回收 HR-Peeper 装置;清理干净后,收集各小室中的间隙水样品,采用微量比色法^[26-27]在多功能酶标仪(M2e, Molecular Devices)分析间隙水样品中的 SRP 和 Soluble Fe(II)浓度;最后,从 2 个处理组中各取出 1 根柱子,每隔 2 cm 分层用 SMT 法^[28]分析 TP、IP、OP、NAIP 和 AP 5 种磷形态。

上覆水 SRP 通量的计算方法:在沉积物-水界面 0.5 cm 处取 2 mL 上覆水,用 0.45 μm 孔径的硝酸纤维素滤膜过滤后测定上覆水中的 SRP 浓度(C_{SRP}),每隔 1 h 取 1 次,连续取 5 h。上覆水 SRP 的测定参照钼蓝

比色法^[29]。将所测得的 SRP 浓度对时间作图,得浓度对时间的回归斜率 K ,然后计算溶解物质在沉积物-水界面通量 F 。

$$F=K\frac{V}{S}$$

(1)

式中: V ——上覆水体积,L; S ——柱样沉积物的表面积, m^2 。

1.4 数据统计分析

利用单因素方差分析(one-way repeated ANOVA) DO、 E_h 、磷通量、间隙水 SRP 和 Soluble Fe (II) 和磷分级等各指标在不同处理组之间的差异性。分析时将不同处理组设置为主变量,如不同处理组之间存在显著差异($p<0.05$),再利用 Tukey 事后检验(Tukey’s post-hoc test) 分别分析每个时段摇蚊组与对照组之间是否存在显著性差异。所有 Tukey 事后检验出的摇蚊组与对照组显著差异结果在对应图中标注(* $p<0.05$ 、* * $p<0.01$),或根据需要用表列出 Tukey 事后检验结果。所有统计分析利用软件 SPSS 22.0 (SPSS) 完成。文中各图由 Excel 和 Origin 8.0 软件绘得。

2 结果与讨论

2.1 沉积物间隙水中 DO 及 E_h 的剖面信息

图 1 为对照组和摇蚊组沉积物中氧气浓度的剖面分布。由图 1 可知:摇蚊幼虫扰动显著增加沉积物间隙水中的氧气渗透深度(OPD) (One-way ANOVA, treatment effect, $p<0.05$)。在第 7 天、第 21 天和第 35 天,摇蚊组的 OPD 分别为 6.2 mm、7.8 mm 和 6.4 mm,比同期对照组的 2.6 mm、2.2 mm 和 2.2 mm 深。从第 7 天开始,摇蚊组 OPD 不断加深,最大扰动出现在第 21 天,之后逐渐减弱(图 1),这与前人的研究结果类似^[20]。摇蚊在沉积物中筑“U”形或“J”形洞穴,不断地将富含氧气的上覆水引灌入洞穴供其呼吸作用,当富含氧气的上覆水进入洞穴之后,增加了沉积物中的 OPD^[27]。

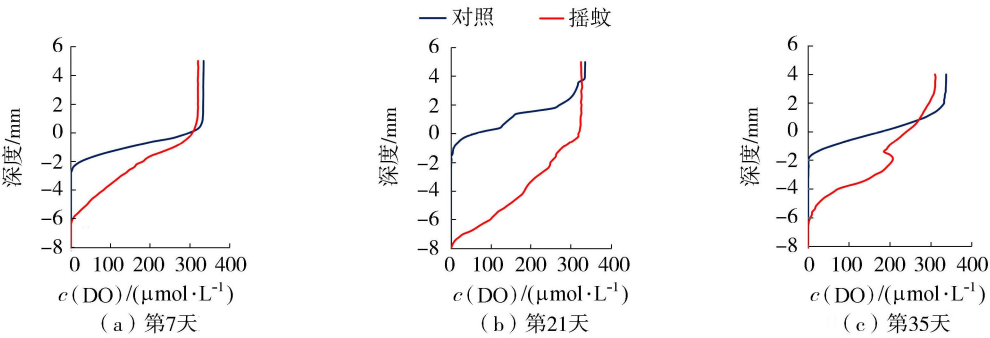


图 1 摇蚊扰动对氧气渗透深度(OPD)的影响

Fig.1 Influence of the Chironomus larva treatment on oxygen penetration depth

图 2 为对照组和摇蚊组沉积物中氧化还原电位浓度的剖面分布。由图 2 可知,摇蚊幼虫扰动显著增加间隙水中的 E_h (One-way ANOVA, treatment effect, $p<0.05$)。在第 7 天、第 21 天和第 35 天,摇蚊组 E_h 平均值(381 mV、335 mV 和 304 mV)比对照组(316 mV、276 mV 和 265 mV)增加了 20%、22% 和 15%。在第 21 天,摇蚊组 E_h 的平均值增加幅度最大,说明此阶段摇蚊的扰动最激烈,之后逐渐减弱(图 2)。摇蚊不断地将富含氧气的上覆水引灌入洞穴,增加了间隙水中的 E_h 。 E_h 与 DO 的变化相一致。

2.2 摇蚊扰动下沉积物中磷的迁移转化

2.2.1 界面间的 SRP 通量

由图 3 可知,对照组 3 个采样期的磷通量为正值,SRP 的值介于 0.076 ~ 0.081 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 之间,说明对照组沉积物向上覆水体中释放磷。摇蚊组前 2 个采样时期磷通量为负值,分别为 0.023 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 0.024 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,表明沉积物吸附上覆水中的 SRP;第 3 个采样期摇蚊组的 SRP 通量为正值(0.048 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),说明此时摇蚊组中沉积物向上覆水释放磷。

2.2.2 间隙水 SRP 的变化

在 3 个采样期,摇蚊扰动显著降低了间隙水中的 SRP 浓度 C_{SRP} (One-way ANOVA, treatment effect, $p<0.05$)。

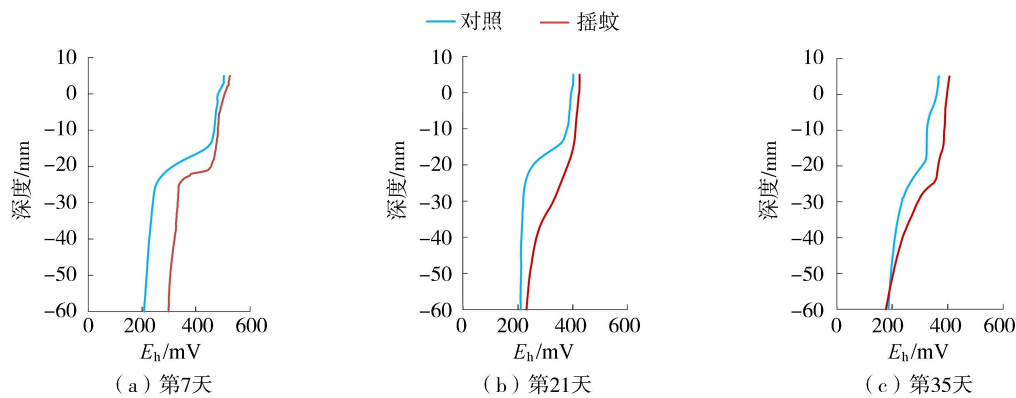


图 2 摇蚊扰动对氧化还原电位 E_h 的影响

Fig. 2 Influence of the *Chironomus* larva treatment on E_h profiles

C_{SRP} 最大降低幅度发生在第 21 天,降低了 沉积物间隙水中 58% 的 SRP 浓度,影响深度从沉积物-上覆水界面至沉积物以下 -110 mm 左右;第 21 天之后,摇蚊扰动影响逐渐减小,到第 35 天,两组间的 C_{SRP} 基本相同。

可见,摇蚊扰动增加了沉积物中的 OPD(图 1)和 E_h (图 2),从而影响了间隙水中的 C_{SRP} 。 C_{SRP} (图 4)的变化与 DO、 E_h 的变化相一致。研究结果与文献[11,20,30]的研究成果相一致。

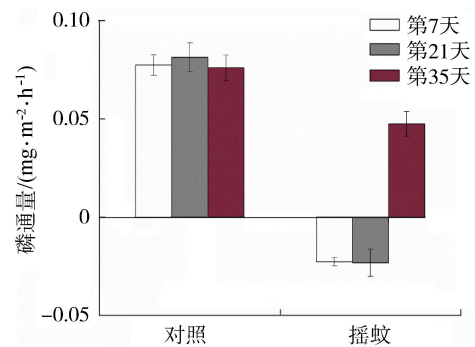


图 3 沉积物-水界面中 SRP 的通量

Fig. 3 Fluxes of C_{SRP} across the SWI

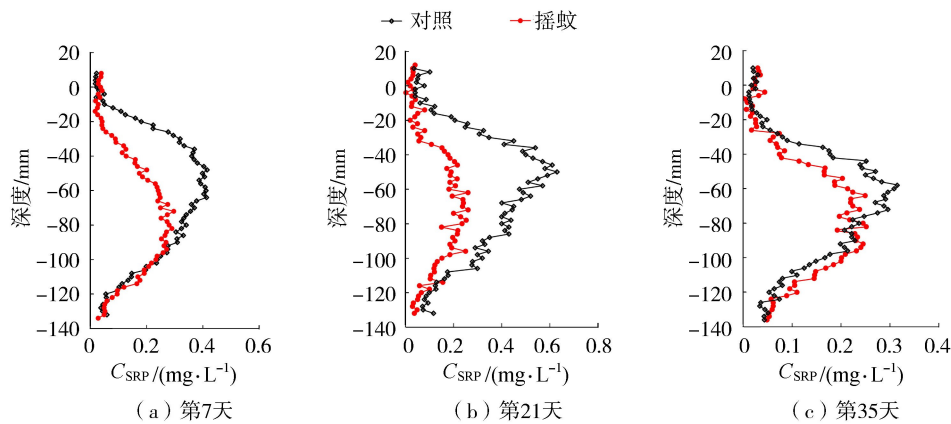


图 4 摇蚊幼虫扰动对间隙水中 C_{SRP} 的影响

Fig. 4 Effects of *Chironomus* larva bioturbation on C_{SRP} concentrations in sediment profiles

2.2.3 摇蚊扰动对沉积物磷的影响

在加入摇蚊之后第 7 天、第 21 天和第 35 天,分别取 2 根不同处理组沉积柱表层 6 cm 沉积物进行磷形态分级实验(表 1)。由表 1 可知,摇蚊组表层 6 cm 沉积物铁结合态磷(NAIP)显著增加(One-way ANOVA, treatment effect, $p < 0.05$)。除了铁结合态磷之外,总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)、钙磷(AP)都无明显变化(One-way ANOVA, treatment effect, $p > 0.05$)。这一结果与文献[11,19,26]的研究结果类似。

2.3 摇蚊扰动对沉积物间隙水中 Fe(II) 的影响

摇蚊扰动对沉积物间隙水中 Soluble Fe(II) 的影响(图 5)与对 SRP 的影响类似。在 3 个采样期间,摇蚊扰动显著降低了间隙水中的 Soluble Fe(II) 的浓度(One-way ANOVA, treatment effect, $p < 0.05$)。Soluble Fe(II) 最大降幅发生在第 21 天,降低了沉积物间隙水中 44% 的 Soluble Fe(II) 浓度,影响深度从沉积物-水

表1 摇蚊幼虫扰动对沉积物中磷形态的影响

Table 1 Influence of the *Chironomus* larva treatment on phosphorus concentration in sediments

处理组	深度/cm	$c(\text{TP})/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	$c(\text{IP})/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	$c(\text{OP})/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	$c(\text{NAIP})/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	$c(\text{AP})/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$
对照	0~1	1.083±0.020	0.376±0.005	0.750±0.014	0.09±0.005	0.276±0.007
	1~2	1.024±0.009	0.344±0.005	0.685±0.009	0.106±0.003	0.223±0.002
	2~4	0.940±0.014	0.347±0.020	0.573±0.030	0.080±0.002	0.262±0.008
	4~6	0.950±0.040	0.393±0.041	0.555±0.025	0.082±0.002	0.299±0.006
第7天	0~1	1.109±0.059	0.389±0.020	0.778±0.063	0.097±0.003	0.276±0.009
	1~2	1.037±0.060	0.345±0.026	0.683±0.049	0.116±0.005	0.219±0.009
	2~4	0.935±0.030	0.351±0.030	0.576±0.030	0.085±0.002	0.263±0.006
	4~6	0.952±0.040	0.397±0.025	0.538±0.044	0.090±0.004	0.297±0.009
第26天	0~1	1.095±0.030	0.377±0.019	0.760±0.038	0.095±0.005	0.276±0.011
	1~2	1.031±0.032	0.347±0.021	0.669±0.028	0.112±0.003	0.225±0.007
	2~4	0.922±0.020	0.346±0.014	0.597±0.020	0.089±0.006	0.260±0.005
	4~6	0.950±0.030	0.393±0.034	0.576±0.017	0.092±0.004	0.298±0.012
第35天	0~1	1.071±0.026	0.373±0.019	0.790±0.009	0.108±0.002	0.279±0.010
	1~2	1.036±0.030	0.345±0.015	0.681±0.037	0.120±0.005	0.228±0.005
	2~4	0.921±0.030	0.353±0.020	0.581±0.020	0.096±0.003	0.262±0.006
	4~6	0.955±0.043	0.392±0.010	0.560±0.023	0.098±0.002	0.297±0.016

界面至-70mm;第21天之后,摇蚊扰动影响逐渐减小;到第35天,两组间的 Soluble Fe(Ⅱ)基本相同(One-way ANOVA, treatment effect, $p>0.05$),摇蚊扰动对 Soluble Fe(Ⅱ)影响减弱。Soluble Fe(Ⅱ)的变化与 DO 和 E_h 的变化相一致(图1,图2)。

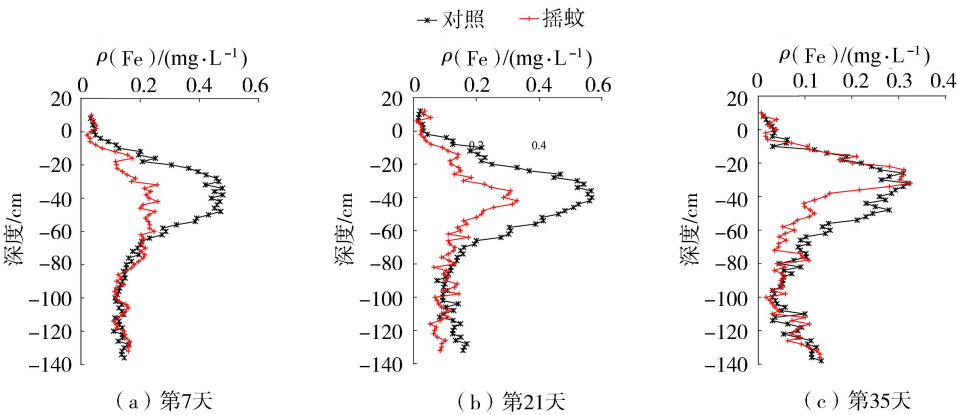


图5 摇蚊幼虫扰动对间隙水中 Soluble Fe(Ⅱ)的影响

Fig.5 Effects of *Chironomus* larva bioturbation on soluble Fe(Ⅱ) concentration in sediment profiles

摇蚊引灌增加了沉积物中的 OPD 和 E_h ,使部分沉积物中原本的还原条件变成氧化条件,从而使沉积物中的 Soluble Fe(Ⅱ)被氧化成 Fe(Ⅲ) oxyhydroxides,降低了间隙水中的 Soluble Fe(Ⅱ)(表1)。

2.4 磷铁相关性分析

由 SPSS 软件中的 Pearson 相关性分析可知(表2),在第7天、第21天和第35天,对照组 SRP 与 Soluble Fe(Ⅱ)在前2个采样时期呈正相关,前2个采样时期 SRP 与 Soluble Fe(Ⅱ)呈正相关,最后一个采样阶段,SRP 与 Soluble Fe(Ⅱ)呈负相关。可见,P 的变化主要受到 Fe 的氧化吸附所控制。

表2 磷与铁相关性分析结果

Table 2 Correlation analyses between soluble P and Fe

处理组	时间/d	相关度 r	p 值
摇蚊	7	0.554 **	<0.01
	21	0.418 **	<0.01
	35	-0.445 **	<0.01
对照	7	0.631 **	<0.01
	21	0.663 **	<0.01
	35	0.119	

注:**表示正相关。

3 结 语

通过室内培养沉积物柱状样,结合微界面分析技术和 HR-Peeper 技术,从微观尺度探究了摇蚊幼虫扰动下沉积物-水界面中磷的迁移转化规律。结果表明,在3个研究时段(第7天、第21天、第35天),摇蚊幼虫

的扰动作用增加了沉积物中的 OPD 和 E_h ,降低了 3 个研究时段间隙水中的 SRP(最大 58%) 和 Soluble Fe(II)(最大 44%),SRP 与 Soluble Fe(II)在第 7 天和第 21 天呈正相关。综上表明,磷的降低主要是由于铁的氧化吸附所致。该研究成果可为控制和治理湖泊富营养化提供科学依据。

参考文献:

[1] 但孝香,刘建超,陆光华. 水体中微界面对 PhACs 环境行为影响的研究进展[J]. 水资源保护,2018,34(2):75-82. (DAN Xiaoxiang,LIU Jianchao,LU Guanghua. Effects of micro interface on behavior of pharmaceuticals in water[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):75-82. (in Chinese))

[2] 曲久辉,贺泓,刘会娟. 典型环境微界面及其对污染物环境行为的影响[J]. 环境科学学报,2009,29(1):2-10. (QU Jiuhui, HE Hong, LIU Huijuan. Typical environm ental micro-inferfaces and its effect on environmental behaviors of pollutants [J]. Acta Scientiae Circum Stantiae, 2009, 29(1):2-10. (in Chinese))

[3] 王建军,沈吉,张路,等. 湖泊沉积物-水界面氧气交换速率的测定及影响因素[J]. 湖泊科学,2009,21(4):474-482. (WANG Jianjun, SHEN Ji, ZHANG Lu, et al. Spatial heterogeneity of oxygen exchange between sediment-water interface in lakes[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4):474-482. (in Chinese))

[4] FINKE N, HOEHLER T M, POLERECKY L, et al. Competition for inorganic carbon between oxygenic and anoxygenic phototrophs in a hypersaline microbial mat, Guerrero Negro, Mexico[J]. Environmental Microbiology, 2013, 15(5):1532-1550.

[5] 王敬富,陈敬安,曾艳. 微电极测量系统在湖泊沉积物-水界面生物地球化学过程研究中的应用[J]. 地球与环境,2013,41(1):65-70. (WANG Jingfu, CHEN Jing' an, CENG Yan. Applcation of microelectrode measurement system in research on biogeochemical processes across the water-sediment interface in Hongfeng Lake[J]. Earth and Environment, 2013, 41(1):65-70. (in Chinese))

[6] ZHANG Lei, LIAO Qianjiahua, GU Xiaozhi, et al. Oxygen and phosphorus dynamics in freshwater sediment after the deposition of flocculated cyanobacteria and the role of tubificid worms[J]. Journal of Hazardous Materials,2014,266:1-9.

[7] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research,2000,34:2037-2042.

[8] SONDERGAARD M, JENSEN J P, JEPPESEN E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 2003,506:135-145.

[9] BERTOLIN A, RUDELLO D, UGO P. A new device for in-situ pore-water sampling[J]. Marine Chemistry,1995,49:233-239.

[10] SEEBERG-ELVERFELDT J, SCHLÜTER M, FESEKER T, et al. Rhizon sampling of pore waters near the sediment/water interface of aquatic systems[J]. Limnology and Oceanography: Methods,2005,3:361-371.

[11] LEWANDOWSKI J, SCHADACH M, HUPFER M. Impact of macrozoobenthos on two-dimensional small-scale heterogeneity of pore water phosphorus concentrations: in-situ study in Lake Arendsee (Germany)[J]. Hydrobiologia,2005,549:43-55.

[12] XU Di, WU Wei, DING Shiming, et al. A high-resolution dialysis technique for rapid determination of dissolved reactive phosphate and ferrous iron in pore water of sediments[J]. Science of the Total Environment,2012,421:245-252.

[13] 燕文明,刘凌,钱宝,等. 浅水湖泊表层沉积物粒度垂向分布及其水动力表征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):345-349. (YAN Wenming, LIU Ling, QIAN Bao, et al. Vertical distribution of particle size and hydrodynamic characterization of surface sediments in shallow lakes[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(4):345-349. (in Chinese))

[14] 华祖林,王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):95-105. (HUA Zulin, WANG Yuan. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(2):95-105. (in Chinese))

[15] ZHANG Xiufeng, MEI Xueying. Effects of benthic algae on release of soluble reactive phosphorus from sediments: a radioisotope tracing study[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(2):127-131.

[16] 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. (YAN Wenming, MA Lin, XIANG Long, et al. Effects of different densities of *Potamogeton crispus* L. on exchangeable nitrogen at sediment-water interface[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):119-122. (in Chinese))

[17] 张松贺,袁树东,韩冰. 自然河道中沉水植物苦草对水流的生理响应[J]. 水资源保护,2018,34(3):96-103. (ZHANG Songhe,YUAN Shudong,HAN Bing. Physiological response of Vallisneria natans to water flow in wild river[J]. Water Resources Protection,2018,34(3):96-103. (in Chinese))

- [18] 王汗, 燕文明, 宋兰兰, 等. 摇蚊幼虫扰动对沉积物-水界面结构特征的影响[J]. 水资源保护, 2017, 33(5):177-182. (WANG Han, YAN Wenming, SONG Lanlan, et al. Bioturbation effects of *Chironomus plumosus* on structural characteristics of sediment-water interface[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):177-182. (in Chinese))
- [19] LEWANDOWSKI J, KRISTINA R, HUPFER M. Two-dimensional small-scale variability of pore water phosphate in freshwater lakes: results from a novel dialysis sampler[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36:2039-2047.
- [20] ZHANG Lei, GU Xiaozhi, FAN Chengxin, et al. Impact of different benthic animals on phosphorus dynamics across the sediment-water interface[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22:1674-1682.
- [21] REITZEL K, LOTTER S, DUBKE M, et al. Effects of Phoslock (R) treatment and chironomids on the exchange of nutrients between sediment and water[J]. Hydrobiologia, 2013, 703(1):189-202.
- [22] 杨艳青, 刘凌, 陈沐松, 等. 摇蚊幼虫生物扰动对富营养化湖泊内源磷释放的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(6):485-490. (YANG Yanqing, LIU Ling, CHEN Musong, et al. Effect of chironomid larvae bioturbation on release of internal phosphorus in eutrophic lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(6):485-490. (in Chinese))
- [23] GALLEPP. Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms[J]. Ecology, 1979, 60(3):547-556.
- [24] ANDERSSON G, GRAM W, STENSON J, et al. The influence of animals on phosphorus cycling in lake ecosystems[J]. Hydrobiologia, 1988, 170: 267-284.
- [25] MEYSMAN F J R, GALAKTIONOV O S, BRITTA G, et al. Bioirrigation in permeable sediments: advective pore water transport induced by burrow ventilation[J]. Limnology & Oceanography, 2006, 51(1):142-156.
- [26] MURPHY J, RILEY J P. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters[J]. Anal Chim Acta, 1962, 26: 31-36.
- [27] CHEN Musong, DING Shiming, LIU Ling, et al. Iron-coupled inactivation of phosphorus in sediments by macrozoobenthos (chironomid larvae) bioturbation: evidences from high-resolution dynamic measurements[J]. Environmental Pollution, 2015, 204:241-247.
- [28] 朱梦圆, 朱广伟, 钱君龙, 等. SMT 法插标分析沉积物中磷的地球化学形态[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8):1502-1507. (ZHU Mengyuan, ZHU Guangwei, QAIN Junlong, et al. SMT method for geochemical phosphorus fraction analysis in sediment by reference material inserting[J]. China Environmental Science, 2012, 32(8):1502-1507. (in Chinese))
- [29] JI Lei, SONG Chunlei, CAO Xiuyun, et al. Spatial variation in nutrient excretion by macrozoobenthos in a Chinese large shallow lake (Lake Taihu)[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2015, 30(1):169-180.
- [30] LEWANDOWSKI J, LASKOV C, HUPFER M. The relationship between *Chironomus plumosus*, burrows and the spatial distribution of pore-water phosphate, iron and ammonium in lake sediments[J]. Freshwater Biology, 2010, 52(2):331-343.

(收稿日期:2018-07-26 编辑:张志琴)