

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.011

富营养化湖泊中铜锈环棱螺分解对钨迁移影响

刘振海¹, 宋兰兰¹, 燕文明^{1,2}, 邢小蕾¹, 赵梓屹¹, 陈翔¹, 李琪¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 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:以富营养化的太湖梅梁湾为研究对象,利用平面光极、高分辨率平衡式间隙水采样(HR-Peeper)装置和薄膜扩散梯度(DGT)技术获取沉积物-水界面溶解氧(DO)二维平面和溶解态/生物有效态钨(W)一维垂向分布信息,分析铜锈环棱螺分解对太湖底泥中钨迁移的影响效应。试验结果表明:铜锈环棱螺死亡分解后会迅速降低沉积物-水界面 DO 浓度,形成厌氧环境,引起间隙水及上覆水中溶解态钨质量浓度的增加,溶解态钨平均质量浓度增加幅度是对照组的 28.92%~114.46%,显著提升了沉积物-水界面钨的生物有效性(DGT 所测结果);与钨质量浓度变化类似,铜锈环棱螺分解前期(第 8 天)沉积物间隙水中铁、锰质量浓度同步增加且与钨浓度变化呈显著正相关($R^2\geq 0.716, p<0.01$)关系,水相中溶解态钨质量浓度增加是由厌氧环境下沉积物中铁锰氧化物还原溶解所致,分解后期(第 16 天和 36 天)间隙水中钨质量浓度的增加主要是由于铜锈环棱螺体内累积的钨释放所致。

关键词:钨迁移;铜锈环棱螺;沉积物;富营养化湖泊;太湖

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)04-0083-07

Effects of *Bellamya aeruginosa* decomposition in eutrophication lake on tungsten migration

LIU Zhenhai¹, SONG Lanlan¹, YAN Wenming^{1,2}, XING Xiaolei¹, ZHAO Ziyi¹, CHEN Xiang¹, LI Qi¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the Meiliang Bay of Lake Taihu as the research object, to investigate the effect of *Bellamya aeruginosa* degradation on the migration characteristics of tungsten in sediments, the planar optode technique was used to measure the two-dimensional plane distribution of dissolved oxygen (DO) in sediment-water interface, and the High-resolution Peeper (HR-Peeper) and Diffusive Gradients in Thin Films (DGT) technique were used to analysis the one-dimensional vertical distribution information of dissolved/biological labile tungsten (W) concentration. The results showed that *Bellamya aeruginosa* decomposition significantly reduced the dissolved oxygen (DO) concentration in the sediment-water interface. Anaerobic conditions formed by degradation caused the concentration increase of dissolved tungsten in the interstitial water and the overlying water. The average concentration of dissolved W in sediments profile increased by 28.92%~114.46% compared with that in the control group and the bioavailability of tungsten at the sediment-water interface was significantly improved according to results measured by the DGT. Similar to tungsten concentration changes, the concentration of iron and manganese also increased significantly during *B. aeruginosa* decomposition (Day 8), and the change of iron and manganese was significantly positively associated with the concentration change of tungsten ($R^2\geq 0.716$ and $p<0.01$), which indicated that the increase of dissolved tungsten concentration was mainly due to the reduction and dissolution of iron-manganese oxides under anaerobic conditions. On days 16 and 36 of degradation, the accumulated tungsten release from *B. aeruginosa* caused an increase in the tungsten concentration.

Key words: tungsten migration; *Bellamya aeruginosa*; sediment; eutrophication lake; Lake Taihu

近年来,随着工业的快速发展和城市化进程的加快,太湖水体污染问题日益突出,尤其是重金属等污染

基金项目: 科研院所基本科研业务费专项(Y221005)
作者简介: 刘振海(1996—),男,硕士研究生,主要从事水环境治理及生态修复研究。E-mail: 983704454@qq.com
通信作者: 宋兰兰(1973—),女,讲师,博士,主要从事环境水文与水环境保护研究。E-mail: Lanlan_song@hhu.edu.cn
引用本文: 刘振海,宋兰兰,燕文明,等. 富营养化湖泊中铜锈环棱螺分解对钨迁移影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):83-89.
LIU Zhenhai, SONG Lanlan, YAN Wenming, et al. Effects of *Bellamya aeruginosa* decomposition in eutrophication lake on tungsten migration [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 83-89.

物排放量的不断增加,不仅造成了严重的环境问题,对人类健康也构成了极大的威胁^[1-3]。重金属进入水体后,通过吸附、共沉淀等作用贮存于沉积物中,当沉积物-水界面环境发生变化,沉积物中蓄积的重金属会再次活化而被释放出来,成为太湖水体重金属的源和汇^[4-6]。钨一直被认为是微毒元素^[7],由于其化学性质稳定且难溶于水,因此,水环境中关于钨迁移的研究较少。但近来有关研究发现,钨可被生物富集而进入食物链,进而对人体健康造成危害^[8-10],会增加罹患糖尿病、心血管病、甲状腺疾病^[11-13]和儿童白血病^[14-17]的风险。沉积物中钨受铁锰氧化还原所控制:好氧环境下,钨与铁锰氧化物形成稳定的矿物沉淀^[18];厌氧环境下,钨伴随着铁锰氧化物还原溶解,被再次释放^[19]。

水生生物是水生态系统的重要组成部分,它们的存在能够加快碎屑分解,促进物质交换和水体净化^[20]。但水生生物死亡后,又会对沉积物-水界面附近的重金属地球化学循环产生影响^[21]。汤亚洲等^[22]发现蓝藻降解消耗了大量的溶解氧,钨可通过锰氧化物的还原溶解释放至上覆水,锰氧化物的形态控制着钨的迁移。底栖动物作为水生态系统的一个重要生态类群,其死亡分解必然也会引起沉积物重金属形态的变化,而底栖动物死亡分解对钨迁移的影响目前未见报道。

本文以太湖梅梁湾为研究对象,通过模拟自然状态下铜锈环棱螺死亡分解所引起的钨形态变化,分析水体富营养化后铜锈环棱螺死亡分解对沉积物中钨迁移的影响。

1 材料与方法

1.1 研究对象及采样

太湖是中国第三大淡水湖,蓝藻频繁暴发是太湖面临的重要挑战之一^[23-25]。为探究太湖富营养化后铜锈环棱螺死亡分解状况及水体中钨形态对其的响应变化,选取富营养化湖区梅梁湾(31°26'18" N,120°11'12"E)为研究对象,利用重力采样器(直径 90 mm,高度 500 mm)采集 16 根沉积柱样品(1/3 上覆水,2/3 沉积物);同步采集梅梁湾湖水,作为室内模拟试验中上覆水水样,同时补充试验中水损耗,并于当地水产市场购买产自太湖的铜锈环棱螺。所有样品尽快运回实验室,途中注意避免对沉积物-水界面的扰动。

1.2 试验设计

模拟自然条件下铜锈环棱螺死亡分解。

1.2.1 试验模拟

将沉积柱敞口置于 25℃、上覆水深 45 cm 的恒温水箱中培养,分 3 组,用于溶解氧(DO)、上覆水溶解态钨、沉积物间隙水 HR-Peeper 溶解态 W/Fe(Ⅱ)/Mn 以及沉积物间隙水 DGT 生物有效态钨的测量。铜锈环棱螺置于-20℃下冷冻致死。

第 1 组:将 pH 和 DO 的荧光膜贴在 10 cm×10 cm×20 cm(长×宽×高)矩形有机玻璃容器的前玻璃内侧。选择 1 根沉积柱将其放入玻璃容器中,并在 25℃恒温水箱中培养 15 d,以消除扰动影响。然后,选取 8 只冷冻致死的铜锈环棱螺投入沉积柱,继续恒温培养 36 d。

第 2 组:选取 3 根沉积柱,在沉积物-水界面处水平插入 Rhizon 装置至沉积柱中心,并于 25℃恒温水箱中培养 2 d 进行预处理。预处理后,在每根沉积柱中分别加入 8 只冷冻致死的铜锈环棱螺,继续恒温培养 36 d。

第 3 组:选取 12 根沉积柱,在 25℃恒温水箱中培养 2 d 进行预处理。预处理后,选取其中 9 根沉积柱,每根沉积柱中分别加入 8 只冷冻致死的铜锈环棱螺,每 3 根为一组,分别恒温培养 8 d、16 d 和 36 d。

培养过程中,每隔 3~4 d 用原湖水补充沉积柱中水的损耗。

1.2.2 样品采集频率

上覆水采集:使用土壤溶液采样器(Rhizon)装置,通过外管连接注射器主动抽提上覆水^[26]。

间隙水采集:使用高分辨率平衡式间隙水采样(HR-Peeper)装置和薄膜扩散梯度(DGT)装置采集。

①HR-Peeper 装置:依据膜渗透平衡原理,即间隙水中溶解态待测样品与 HR-Peeper 装置小室中介质物质交换达到平衡(48 h)后,通过测定每个采样小室中溶剂的化学浓度,获得溶解态待测样品物质的质量浓度^[27-28]。装置见图 1(参考 www.easysensor.net)。②DGT 装置:依据费克第一扩散定律,利用固定膜液相之间形成的浓度梯度,对固定时间内穿过一定厚度扩散膜的元素进行计算而获得准确的元素有效态质量浓度值^[29],分析 24 h 后固定膜累积吸附的样品量,即沉积物-水界面处可被吸附的物质^[30]。DGT 所测定的有效态质量浓度能很好地表征生物有效性^[31-32],因此使用生物有效态定义 DGT 所测结果。采集频率设置如下。

第1组:恒温培养15d后,用平面光极技术对沉积柱拍照,作为DO对照组;然后投入8只冷冻致死的铜锈环棱螺,在第2天、8天、16天和36天分别进行拍照,测界面处DO的二维分布,作为铜锈环棱螺检测组。

第2组:在预培养(无铜锈环棱螺)和加入铜锈环棱螺后每隔4d,分别使用Rhizon装置抽取2mL上覆水,用于溶解态钨的测定。

第3组:在预培养(无铜锈环棱螺)后选取剩余的3根沉积柱作为对照组,另外9根每3根为一组,分别作为铜锈环棱螺8d、16d和36d检测组,恒温培养后在每根沉积柱中先垂直插入1根HR-Peeper装置,24h后再投入1根ZrO-Chelex DGT装置,稳定平衡24h后,将DGT装置和HR-Peeper装置同时拔出,收集间隙水。

1.2.3 样品分析

- a. 溶解态Fe(II)。采取邻菲罗啉法,通过酶标仪(Epoh)测定。
- b. 钨和锰的测定。①上覆水金属测定:使用3%优级纯硝酸溶液(2.5mL)稀释上覆水,用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定。②HR-Peeper装置样品测定:取出HR-Peeper装置后,迅速用半干的滤纸清理干净滤膜表面的沉积物,用移液枪吸取间隙水样品。③DGT装置样品测定:DGT装置回收后,用去离子水冲洗干净表面的沉积物,避免再次吸附。取出ZrO-Chelex膜,使用陶瓷排刀每隔2mm将ZrO-Chelex膜切割为长条,并用800μL浓度为1mol/L的硝酸溶液浸泡条状膜16h以上。④测定过程利用水系沉积物标准物质(GBW-07307a)、平行样和空白样进行质量控制,结果符合质控要求。

1.3 数据分析

生物有效态钨质量浓度计算:

$$\rho_{DGT} = M\Delta g / (DA t)$$
 (1)

式中: ρ_{DGT} 为扩散层线性梯度靠近环境介质一端的质量浓度,μg/L; M 为固定膜中钨的累积量,μg; Δg 为扩散层厚度,cm; D 为扩散系数,cm²/s,钨的扩散系数为7.47×10⁻⁶cm²/s; A 为条状膜面积,cm²; t 为DGT装置放置时间,s。

2 结果与讨论

2.1 沉积物-水界面处DO二维剖面变化

平面光极技术不仅能够快速(20s)获取二维空间的氧分布变化信息,避免微电极应用中电磁噪声干扰的问题,而且成本较微电极低廉,具有更好的灵活性和更高的二维时空分辨率^[33],在沉积物溶解氧分布研究中运用更广。溶解氧(DO)二维剖面变化如图2所示。

对照组:上覆水溶解氧浓度维持在200μmol/L以上,在沉积物-水界面附近出现DO剧烈降低的现象,从150μmol/L下降至50μmol/L;沉积物中DO维持在较低浓度水平。

铜锈环棱螺检测组:铜锈环棱螺分解显著影响沉积物-水界面处DO的浓度。投入铜锈环棱螺后,上覆水DO浓度降至50μmol/L以下,沉积物中DO浓度更低,整个培养体系处于缺氧状态。由于试验在“敞口”状态下进行,说明铜锈环棱螺分解消耗大量的DO^[34],大气复氧速率低于微生物分解耗氧速率,引起DO浓度变化。

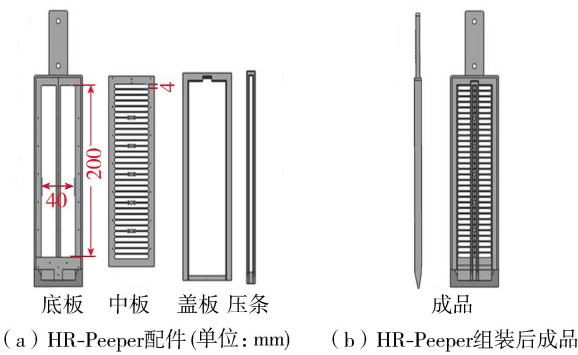


图1 高分辨率平衡式间隙水采样(HR-Peeper)装置
Fig.1 High-resolution Peeper (HR-Peeper) device

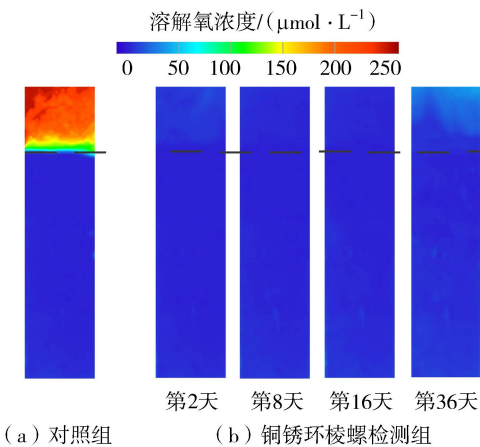


图2 分解过程中沉积物-水界面处DO二维分布
Fig.2 Two-dimensional distribution of DO near sediment-water interface during decomposition

2.2 溶解态钨和生物有效态钨垂向分布

沉积物-水界面处溶解态钨和生物有效态钨质量浓度垂向分布如图3所示。

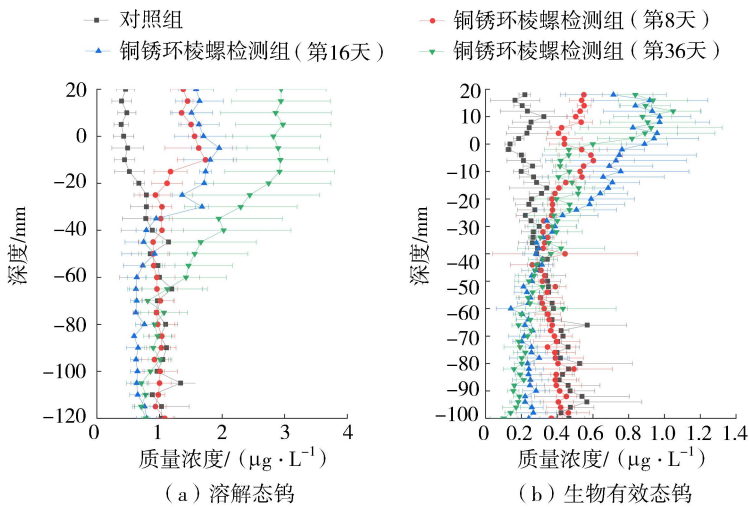


图3 沉积物间隙水溶解态钨和生物有效态钨质量浓度垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of dissolved W and labile W in sediment interstitial water profiles

2.2.1 溶解态钨

- a. 对照组:间隙水溶解态钨质量浓度在深度上呈现先增加后减少的变化趋势。上覆水溶解态钨质量浓度较低,而在沉积物-水界面处增加,于深度-105 mm(以沉积物-水界面为0,以上为正,以下为负)处达到峰值($1.34 \mu\text{g/L}$);随后随深度增加钨质量浓度保持稳定或逐渐减小。
- b. 铜锈环棱螺检测组:加入铜锈环棱螺后上覆水溶解态钨质量浓度显著增加。在8~36 d 溶解态钨质量浓度逐渐增加,与对照组相比较,上覆水中钨质量浓度出现了最高值,并保持至沉积物-水界面以下20 mm左右,然后质量浓度逐渐下降。该现象表明:铜锈环棱螺分解导致沉积物间隙水中的钨大量向水体释放。

2.2.2 生物有效态钨

与间隙水溶解态钨类似,铜锈环棱螺的分解造成生物有效态钨质量浓度增大。对照组中,钨质量浓度变化较明显,上覆水中钨质量浓度较低,在 $0.14 \sim 0.33 \mu\text{g/L}$ 之间波动,在沉积物-水界面附近钨质量浓度随深度增加而增加,并在-66 mm 附近达到峰值($0.57 \mu\text{g/L}$)后逐渐下降。铜锈环棱螺加入的第8天,钨质量浓度有一个小幅度的增加,并在-6 mm 附近达到峰值($0.60 \mu\text{g/L}$)后逐渐下降至对照组浓度大小,影响深度为上覆水至沉积物-水界面下40 mm,上覆水钨质量浓度在 $0.41 \sim 0.55 \mu\text{g/L}$ 之间波动。第16天和第36天,钨质量浓度继续增加。

2.3 溶解态钨和生物有效态钨平均质量浓度变化

沉积物剖面溶解态钨(深度20~-120 mm)和DGT生物有效态钨(深度20~-100 mm)平均质量浓度变化如图4所示。其中溶解态钨在对照组以及3个分解阶段剖面的平均质量浓度分别为 $0.83 \mu\text{g/L}$ 、 $1.12 \mu\text{g/L}$ 、 $1.07 \mu\text{g/L}$ 和 $1.78 \mu\text{g/L}$,分解第8天与16天与对照组钨平均质量浓度相比较分别增加了34.94%和28.92%,随后分解影响继续增加。在分解的第36天,溶解态钨质量浓度平均值增加114.46%;DGT生物有效态钨在对照组以及3个分解阶段剖面的质量浓度分别为 $0.33 \mu\text{g/L}$ 、 $0.41 \mu\text{g/L}$ 、 $0.45 \mu\text{g/L}$ 和 $0.40 \mu\text{g/L}$,随着铜锈环棱螺分解的进行,生物有效态钨平均质量浓度逐渐增加,在第16天达到最大,较对照组增加36.36%。随着分解的继续进行,生物有效态钨的平均质量浓度有所下降,但还是高于对照组,相比于对照组平均质量浓度增加了21.21%。

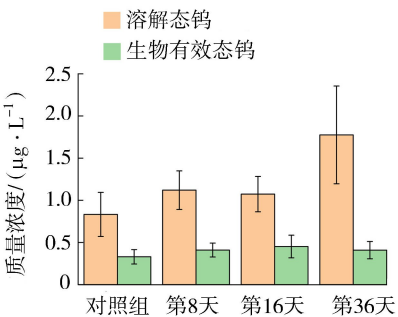


图4 沉积物剖面溶解态钨和生物有效态钨平均质量浓度

Fig.4 Mean concentration of dissolved W and labile W in sediment profiles

2.4 上覆水溶解态钨质量浓度变化

铜锈环棱螺分解体系中上覆水溶解态钨质量浓度变化如图 5 所示。溶解态钨质量浓度随分解天数的增加而持续上升,初始质量浓度为 0.049 μg/L,铜锈环棱螺加入后,溶解态钨质量浓度处于持续上升趋势,分解 36 d 时,达 0.545 μg/L,表明上覆水溶解态钨质量浓度增加主要来自铜锈环棱螺的分解。

2.5 溶解态 Fe(Ⅱ)/Mn 平均质量浓度变化

- a. 对照组:沉积物间隙水中溶解态 Fe(Ⅱ)和 Mn 的平均质量浓度分别为 1.24 mg/L 和 2.15 mg/L。
- b. 铜锈环棱螺检测组:铜锈环棱螺的分解显著增加了间隙水中溶解态 Fe(Ⅱ)和 Mn 的平均质量浓度(图 6),在分解第 8 天、16 天和 36 天后间隙水溶解态 Fe(Ⅱ)和 Mn 的平均质量浓度分别增加至 11.12 mg/L、8.53 mg/L、5.13 mg/L 和 11.50 mg/L、8.06 mg/L、5.07 mg/L。与对照组相比,溶解态 Fe(Ⅱ)和 Mn 的平均质量浓度分别增加了 796.77%、587.90%、313.71% 和 434.88%、274.88%、135.81%。在分解第 36 天后与第 8 天相比,溶解态 Fe(Ⅱ)和 Mn 的平均质量浓度虽有所降低,但是仍然显著高于对照组。

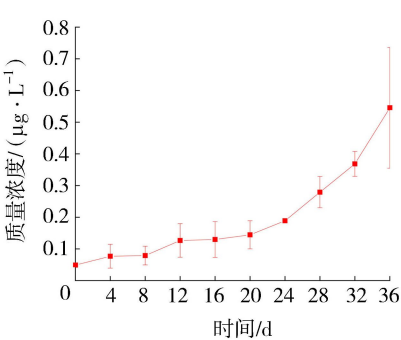


图 5 铜锈环棱螺分解阶段上覆水溶解态钨质量浓度变化

Fig. 5 Mass concentration changes of dissolved W in overlying water at decomposition stage of Bellamya aeruginosa

由溶解态钨和溶解态 Fe(Ⅱ)/Mn 的 Person 相关分析显示(表 1),溶解态钨和溶解态 Fe(Ⅱ)/Mn 在对照组及分解的第一个阶段中均呈显著正相关($R^2 \geq 0.588, p < 0.01$)。随着分解的继续进行,溶解态钨和溶解态 Fe(Ⅱ)的相关性由正相关($R^2 \geq 0.371, p < 0.05$)变为负相关;溶解态钨和溶解态 Mn 不成相关性。

2.6 铜锈环棱螺分解对沉积物中钨迁移的影响特征

水体中 DO 的变化会影响沉积物中重金属的分布和释放^[35]。对比对照组 DO、钨和 Fe(Ⅱ)/Mn 的变化发现,上覆水 DO 浓度较高时,W 和 Fe(Ⅱ)/Mn 却保持较低水平(见图 2、图 4 和图 6),这是由于沉积物表层形成铁锰氧化物,吸附微量金属并阻止深层金属向上覆水扩散^[36]。底栖动物的分解消耗了沉积物-水界面附近大量的 DO^[37],使得沉积物-水界面厌氧,沉积物中的铁锰氧化物发生还原分解进入间隙水中,与对照组相比溶解态铁锰平均质量浓度显著增加(图 6),这与汤亚洲等^[22]的研究结果一致。该研究发现,环境处于厌氧状态时,溶解态锰质量浓度平均值与对照组相比增加了 38%~67%。王永平等^[38]发现在厌氧状态下铁锰氧化物发生还原反应,铁锰能从沉积物中再释放出来。与对照组相比,第 8 天沉积物剖面溶解态/生物有效态钨的平均质量浓度分别增长了 34.94% 和 24.24%(图 4),同时 W 与 Fe(Ⅱ)/Mn 表现出高度的一致性($R^2 \geq 0.716, p < 0.01$),表明铜锈环棱螺分解过程前期沉积物中钨的释放主要受铁锰的氧化还原控制。钨与铁锰氧化物的氧化还原反应是沉积物中钨释放的重要控制机制。当环境处于厌氧状态时,W 随着 FeOOH 和 MnOOH 的溶解而释放进入间隙水^[19]。

随着分解时间的延长,溶解态钨和生物有效态钨质量浓度持续增加(图 4)。李志良等^[39-40]研究发现,铜

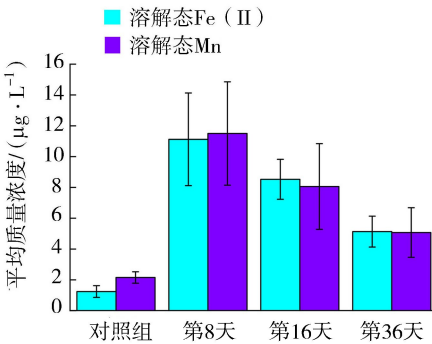


图 6 沉积物剖面溶解态 Fe(Ⅱ)/Mn 平均质量浓度

Fig. 6 Mean mass concentration of dissolved Fe(Ⅱ)/Mn in sediment profiles

表 1 沉积物剖面溶解态钨和溶解态 Fe(Ⅱ)/Mn 的 Person 相关分析

Table 1 Person correlation analysis of dissolved W and dissolved Fe(Ⅱ)/Mn in sediment profiles

类型	时间/d	W 与 Fe(Ⅱ)相关性	W 与 Mn 相关性
对照组		0.639 **	0.588 **
铜锈环棱螺组	8	0.716 **	0.755 **
	16	0.371 *	-0.112
	36	-0.574 **	-0.323

注: * 为显著相关, $p < 0.05$; ** 为显著相关, $p < 0.01$ 。

锈环棱螺具有较高的重金属富集能力,且邓佑锋等^[41-43]发现铜锈环棱螺体内所富集的重金属在分解时可以被重新释放,引起上覆水重金属浓度迅速增加。因此,分解后期(第16天和第36天)界面处溶解态钨和生物有效态钨质量浓度持续增加是由铜锈环棱螺体内所累积的钨释放所致。

3 结 论

a. 水体中 DO 的变化会影响沉积物中重金属的分布和释放。铜锈环棱螺的分解增加了湖泊中钨的释放风险。铜锈环棱螺分解前期(第8天),沉积物中钨的释放主要受到铁锰的氧化还原控制。铜锈环棱螺的分解过快消耗了沉积物-水界面附近的溶解氧,使沉积物-水界面处于厌氧环境,W 随着 FeOOH 和 MnOOH 的溶解而释放进入间隙水中。

b. 随着铜锈环棱螺分解进入后期(第16天和第36天),沉积物-水界面处溶解态钨和生物有效态钨质量浓度持续增加,这是由于铜锈环棱螺具有较高的重金属富集能力,且富集的重金属在分解时可以被重新释放,此时铜锈环棱螺体内累积的钨的释放是造成钨质量浓度增加的另外一个原因。

参考文献:

[1] EDU E,EDWIN-W N L,INEGBEDION A. Bio-monitoring of mangal sediments and tissues for heavy metal accumulation in the mangrove forest of cross river estuary[J]. Sov Zdravookhr,2015,4(1):79-87.

[2] 施玥,王沛芳,胡斌,等. 太湖和洪泽湖天然有机质与重金属结合特性研究[J]. 水资源保护,2019,35(5):86-94. (SHI Yue,WANG Peifang,HU Bin,et al. Study on binding characteristics of natural organic matter and heavy metals in Taihu Lake and Hongze Lake[J]. Water Resources Protection,2019,35(5):86-94. (in Chinese))

[3] 杜晓丽,梁卉,闫鑫瑞,等. 城市地表径流胶体对重金属下渗迁移行为的影响[J]. 水资源保护,2021,37(1):118-123. (DU Xiaoli,LIANG Hui,YAN Xinrui,et al. Effects of urban surface runoff colloid on infiltration and migration behavior of heavy metals[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):118-123. (in Chinese))

[4] ZENG H,WU J. Heavy metal pollution of lakes along the mid-lower reaches of the Yangtze River in China:intensity,sources and spatial patterns[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health,2013,10(3):793-807.

[5] ZAHRA A,HASHMI M Z,MALIK R N,et al. Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah—Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir,Pakistan[J]. Science of the Total Environment,2014,470-471(2):925-933.

[6] 李志清,吴苏舒,诸晓华,等. 石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):73-78. (LI Zhiqing,WU Sushu,ZHU Xiaohua,et al. Distribution of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shijiu Lake and its pollution assessment[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):73-78. (in Chinese))

[7] 谢丽庄,王鑫,许忠杰,等. 钴、钨及其化合物毒性与硬金属肺病[J]. 职业卫生与应急救援,2015,33(6):416-419. (XIE Lizhuang,WANG Xin,XU Zhongjie,et al. Toxicity of cobalt tungsten and its compounds and hard metal lung disease[J]. Occupational Health and Emergency Rescue,2015,33(6):416-419. (in Chinese))

[8] HUA Z,JIANG Y,DING M,et al. Level,source identification,and risk analysis of heavy metal in surface sediments from river-lake ecosystems in the Poyang Lake,China[J]. Environmental Science and Pollution Research,2017,24(5):1-15.

[9] AHMAD N I,NOH M,MAHIYUDDIN W,et al. Mercury levels of marine fish commonly consumed in Peninsular Malaysia[J]. Environmental Science & Pollution Research,2015,22(5):3672-3686.

[10] YI Yujun,YANG Zhifeng,ZHANG Shanghong. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin[J]. Environmental Pollution,2011,159(10):2575-2585.

[11] MENKE A,GUALLAR E,COWIE C C. Metals in urine and diabetes in United States adults[J]. Diabetes,2015,65(1):164-171.

[12] NAVAS-ACIEN A,SILBERGELD E K,PASTOR-BARRIUSO R,et al. Arsenic exposure and prevalence of type 2 diabetes in US adults[J]. The Journal of the American Medical Association,2008,300(7):814-822.

[13] CHRISTENSEN Y,KRISTA L. Metals in blood and urine,and thyroid function among adults in the United States 2007—2008 [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health,2013,216(6):624-632.

[14] KOUTSOSPYROS A,BRAIDA W,CHRISTODOULATOS C,et al. A review of tungsten:from environmental obscurity to scrutiny [J]. Journal of Hazardous Materials,2006,136(1):1-19.

[15] SHEPPARD P R,SPEAKMAN R J,RIDENOUR G,et al. Temporal variability of tungsten and cobalt in fallon,Nevada[J]. Environmental Health Perspectives,2007,115(5):715-719.

[16] SEILER R L, STOLLENWERK K G, GARBARINO J R. Factors controlling tungsten concentrations in ground water, Carson Desert, Nevada[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(2):423-441.

[17] SHEPPARD P R, RIDENOUR G, SPEAKMAN R J, et al. Elevated tungsten and cobalt in airborne particulates in Fallon, Nevada: possible implications for the childhood leukemia cluster[J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21(1):152-165.

[18] SUNDBY B. Transient state diagenesis in continental margin muds[J]. *Marine Chemistry*, 2006, 102(1-2):2-12.

[19] STOCKDALE A, DAVISON W, HAO Z, et al. The association of cobalt with iron and manganese (Oxyhydr) oxides in marine sediment[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2010, 16(4):575-585.

[20] 朱朋辉,潘保柱,李志威,等. 云南小江流域典型泥石流沟中底栖动物群落特征及其对河流地貌的响应[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(3):869-880. (ZHU Penghui, PAN Baozhu, LI Zhiwei, et al. Macroinvertebrate communities characteristics and their responses to fluvial geomorphological feature of typical debris flow gullies in the Xiaojiang River Basin, Yunnan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3):869-880. (in Chinese))

[21] ZENG Liqing, YAN Changzhou, GUO Jianhua, et al. Influence of algal blooms decay on arsenic dynamics at the sediment-water interface of a shallow lake[J]. *Chemosphere*, 2019, 219:1014-1023.

[22] 汤亚洲,陈沐松,李财. 蓝藻降解对湖泊沉积物钨迁移转化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(19):300-304. (TANG Yazhou, CHEN Musong, LI Cai. Effects of cyanobacteria degradation on migration and transformation of tungsten in lake sediments [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(19):300-304. (in Chinese))

[23] CHEN Musong, DING Shiming, GAO Shuaishuai, et al. Efficacy of dredging engineering as a means to remove heavy metals from lake sediments[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 665:181-190.

[24] 朱喜,李贵宝,王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. *水资源保护*, 2020, 36(6):106-111. (ZHU Xi, LI Guibao, WANG Shengrui. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6):106-111. (in Chinese))

[25] 李蓓,李勇涛,蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6):506-513. (LI Bei, LI Yongtao, CAI Mei. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(6):506-513. (in Chinese))

[26] 王燕. 沉积物界面重金属高分辨同步获取及微尺度迁移机制研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2018.

[27] 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. (in Chinese))

[28] TEASDALE P R, BATLEY G E, APTE S C, et al. Pore water sampling with sediment peepers[J]. *Trac Trends in Analytical Chemistry*, 1995, 14(6):250-256.

[29] DA VLSON W, ZHANG H. In situ speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels[J]. *Nature*, 1994, 367(6463):546-548.

[30] DING Shiming, WANG Yan, ZHANG Lipng, et al. New holder configurations for use in the diffusive gradients in thin films(DGT) technique[J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2016, 6(91):88143-88156.

[31] MONBET P, MCKELVIE I D, WORSFOLD P J. Combined gel probes for the in situ determination of dissolved reactive phosphorus in porewaters and characterization of sediment reactivity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(14):5112-5117.

[32] 贾艳霞,尹洪斌,唐婉莹. 河蚬扰动对不同质地沉积物中重金属生物有效性与毒性的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2):67-73. (JIA Yanxia, YIN Hongbin, TANG Wanying. Effects of corbicula fluminea disturbance on bioavailability and toxicity of heavy metals in sediments with different qualities[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2):67-73. (in Chinese))

[33] 崔尚公,于新生,赵广涛,等. 海底边界层溶解氧通量原位观测技术方法研究[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(2):122-131. (CUI Shangong, YU Xinsheng, ZHAO Guangtao, et al. Research on the in-situ observation methods for dissolved oxygen flux in the benthic boundary layer[J]. *Ocean Technology*, 2017, 36(2):122-131. (in Chinese))

[34] ZHANG W Z, GU P, ZHU W J, et al. Effects of cyanobacterial accumulation and decomposition on the microenvironment in water and sediment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(5):2510-2525.

[35] 杨婷婷,刘凌,陈沐松,等. 摇蚊幼虫扰动对富营养化湖泊沉积物:水微界面磷释放的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(12):69-73. (YANG Tingting, LIU Ling, CHEN Musong, et al. Influence of chironomid Larvae Bioturbation on phosphorus concentrations of micro scale in sediment-water interface[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(12):69-73. (in Chinese))

[36] PAN Feng, LIU Huatai, GUO Zhanrong, et al. Metal/metalloid and phosphorus characteristics in porewater associated with manganese geochemistry: a case study in the Jiulong River Estuary, China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255:11.

Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(2):95-105. (in Chinese))

[21] TAMURA H,GOTO K,YOYSUYANAGI T,et al. Spectrophotometric determination of iron(Ⅱ) with 1,10-phenanthroline in the presence of large amounts of iron(Ⅲ)[J]. Talanta,1974,21(4):314-318.

[22] BOUDREAU B P. The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1996,60(16):3139-3142.

[23] KONG Ming,LIU Feifei,TAO Yue,et al. First attempt for in situ capping with lanthanum modified bentonite (LMB) on the immobilization and transformation of organic phosphorus at the sediment-water interface[J]. Science of the Total Environment,2020,741:140342.

[24] RASTINFARD A, NAZARPAK M H, MOZTARZADEH F. Controlled chemical synthesis of CaO₂ particles coated with polyethylene glycol;characterization of crystallite size and oxygen release kinetics[J]. RSC Advances,2018,8(1):91-101.

[25] YANG Fan,ZHANG Shuaishuai,SUN Yuqing,et al. Fabrication and characterization of hydrophilic corn stalk biochar-supported nanoscale zero-valent iron composites for efficient metal removal[J]. Bioresource Technology,2018,265:490-497.

[26] LI Yuanhui,SABDRA G. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,1974,38(5):703-714. .

[27] MADISON A S,TEBO B M,MUCCI A,et al. Luther Ⅲ Abundant porewater Mn(Ⅲ) is a major component of the sedimentary redox system[J]. Science,2013,341(6148):875-878

[28] 张帅,李大鹏,丁玉琴,等. 过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用[J]. 环境科学,2020,41(6):204-211. (ZHANG Shuai, LI Dapeng, DING Yuqin, et al. Effect of calcium peroxide composite tablets on water remediation and phosphorus control in sediment[J]. Environmental Science,2020,41(6):204-211. (in Chinese))

[29] 高卫民,程寒飞,詹茂华,等. 锅法和两步法合成磁性羟基磷灰石重金属吸附材料的研究[J]. 化学试剂,2019(8):784-788. (GAO Weimin, CHENG Hanfei, ZHAN Maohua, et al. Synthesis of magnetic HAP for the enrichment of heavy ions by one-pot and two-step ways[J]. Chemical Reagents,2019(8):784-788. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-15 编辑:胡新宇)

(上接第 89 页)

[37] XING Xiaolei,CHEN Musong,WU Yuexia,et al. The decomposition of macrozoobenthos induces large releases of phosphorus from sediments[J]. Environmental Pollution,2021,283:1-8.

[38] 王永平,谢瑞,晁建颖,等. 蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响[J]. 环境科学,2018,39(7):3179-3186. (WANG Yongping,XIE Rui,CHAO Jianying,et al. Effects of algal blooms and their degradation on the sediment-water microinterface[J]. Environmental Science,2018,39(7):3179-3186. (in Chinese))

[39] 李志良,刘俊,朱允华,等. 湖南湘江铜锈环棱螺中 5 种重金属元素富集和分布特征[J]. 湖南生态科学学报,2019,6(1):1-8. (LI Zhiliang,LIU Jun,ZHU Yunhua,et al. Enrichment and distribution of five metal elements in Bellamya aeruginosa from Xiangjiang River of Hunan Province[J]. Journal of Hunan Ecological Science,2019,6(1):1-8. (in Chinese))

[40] 宋超,张聪,孟顺龙,等. 长江下游流域铜锈环棱螺体内重金属含量及风险评估[J]. 中国渔业质量与标准,2016,6(4):6-11. (SONG Chao,ZHANG Cong,MENG Shunlong,et al. Content and risk assessment of heavy metal in Bellamya aeruginosain lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Fishery Quality and Standards,2016,6(4):6-11. (in Chinese))

[41] 邓佑锋,刘冬,张文强,等. 植物残体腐解驱动的沉积物:水界面重金属释放通量研究[J]. 安徽农业科学,2019,47(23):88-92. (DENG Youfeng, LIU Dong, ZHANG Wenqiang, et al. Heavy metal emission flux at the sediment-water interface in shallow freshwater ecosystems caused by decomposition of plant debris[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences 2019,47(23):88-92. (in Chinese))

[42] 徐亮,王仙子,孔令杰,等. 重金属 Zn、Pb 在铜锈环棱螺体内的积累[J]. 南昌大学学报(理科版),2013,37(1):67-71. (XU Liang,WANG Xianzi,KONG Lingjie,et al. Accumulation of heavy metal of Zn and Pb in snail Bellamya aeruginosa[J]. Journal of Nanchang University(Natural Science),2013,37(1):67-71. (in Chinese))

[43] 邢小蕾. 底栖动物分解对沉积物-水界面磷和重金属释放的影响研究[D]. 南京:河海大学,2021.

(收稿日期:2021-08-16 编辑:胡新宇)