

文章编号: 1000-5641(2018)06-0074-07

内源硫影响污染河湖磷营养盐环境行为的研究进展

许怡雯^{1,2}, 韩 静^{1,2}, 何 岩^{1,2}, 黄民生^{1,2}

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;

2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 硫和磷都是生物地球化学循环中重要的生源要素, 两者的环境行为和耦合机制共同影响着污染河湖内源污染的释放. 本文总结了污染河湖沉积物中硫与磷的环境行为以及它们之间耦合机制的最新研究进展, 指出硫驱动的磷释放进而造成的水体富营养化是污染河湖中值得重视的环境问题, 并同时就硫循环与其他生物地球化学循环耦合过程的研究提出展望, 以期对治理污染河湖中的内源污染提供借鉴.

关键词: 沉积物; 内源硫; 内源磷; 富营养化

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.009

A review of the effect of endogenous sulfur on the environmental behavior of phosphorus in sediment from polluted rivers and lakes

XU Yi-wen^{1,2}, HAN Jing^{1,2}, HE Yan^{1,2}, HUANG Min-sheng^{1,2}

(1. *School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;*

2. *Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China)*

Abstract: Sulfur and phosphorus are important elements in the geochemical cycle. Both their environmental behavior and their coupled relationship are intertwined to regulate the release of endogenous pollution from sediment in polluted rivers and lakes. This paper summarizes the environmental behavior of sulfur and phosphorous as well as the latest research progress on their coupling mechanisms. The study also notes that sulfur-driven eutrophication is an important type of water eutrophication in polluted rivers and lakes. Lastly, we discuss future perspectives on related research in terms of coupled S-cycling with other biogeochemical cycles, which can provide referential significance for the treatment of endogenous pollution in polluted rivers and lakes.

Keywords: sediment; endogenous sulfur; endogenous phosphorus; eutrophication

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(41877477); 上海市自然科学基金(16ZR1408800); 上海市科技创新行动计划(18DZ1203806); 上海市浦江人才计划(16PJD023)

第一作者: 许怡雯, 女, 硕士研究生, 研究方向为河道治理与修复. E-mail: mgzc52bella@163.com.

通信作者: 何 岩, 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水环境治理与修复.

E-mail: yhe@des.ecnu.edu.cn.

0 引言

磷是引起水体富营养化的关键限制性因素^[1]。硫作为水圈地球化学循环的重要生源要素,其环境行为直接影响着沉积物—水界面的氧化还原带分布,而且硫在沉积物中的含量往往高于磷营养盐1—2个数量级^[2]。近年来关于内源硫影响磷营养盐环境行为的研究日益受到重视,并有一些研究者提出了“硫驱动富营养化(Sulfur-driven Eutrophication)”的概念^[3-4],突破了传统对富营养化的认识,对于有效控制水体富营养化的发生提供了崭新的视角。因此,内源硫如何影响污染河湖磷营养盐的迁移转化是一项值得探讨的科学问题。

然而,目前关于内源硫影响磷营养盐环境行为的研究主要涉及海洋^[5-6]、河口海岸^[7-9]、湿地^[10-11]以及湖泊沉积物^[12-14],且大部分是对不同生境下硫与磷季节性分布特征的研究,对污染河湖中硫与磷的耦合作用机制的研究很少。

本文系统总结了内源硫、磷在沉积物中的赋存形态以及环境行为,重点对硫驱动富营养化的机制进行了分析,以期对污染河湖沉积物的治理和富营养化的控制提供参考。

1 内源硫的环境行为研究

沉积物中的硫可分为无机硫和有机硫。无机硫的存在形式主要是硫酸盐、硫化物和单质硫,其中硫化物以酸可挥发性硫(AVS)、黄铁矿硫为主^[15]。有机硫则包括酯硫和碳键硫。黄铁矿硫和有机硫是主要的硫沉积形式。

污染河湖的沉积物普遍呈现缺氧还原态,硫化物大多以 H_2S 或 S^{2-} 的形态存在。由于铁在沉积物中的含量比其他重金属的含量高出一个数量级,所以相比于AVS, SO_4^{2-} 会优先被还原形成FeS,并与单质硫进一步结合形成黄铁矿保存在沉积物中。当沉积物中富含有机质、缺乏氧气且活性铁含量较低不足以沉淀溶解态的硫化物时,会形成有机硫。有机硫主要通过硫酸盐同化还原和有机质硫化两种路径形成^[16]。

当沉积物氧化还原条件改变时,不同形态的硫之间可以相互转化,这些过程往往需要依靠微生物的代谢来实现,图1总结了污染河湖内源硫的生物地球化学循环过程,主要包括硫酸盐异化还原、同化还原和生物氧化3个过程。硫酸盐异化还原过程(Microbial sulfate reduction, MSR)是硫酸盐在微生物参与下被还原成低价态硫化物,并伴随着铁硫化物及其他微量金属硫化物和有机硫的形成,是沉积物中有机质矿化的主要路径,也是硫循环的开始,主要发生在沉积物的表层^[17]。硫酸盐同化还原过程则是硫酸盐在微生物的作用下被转化为生物有机硫的过程,而生物氧化过程是硫化物在好氧硫杆菌的作用下被氧化为单质硫和硫酸盐的过程。

当前关于污染河湖内源硫的环境行为研究主要针对内源硫的时空分布特征^[18-19]以及内源硫与铁或氮之间的相互作用关系^[20-22]。例如朱瑾灿等发现太湖沉积物中还原性硫含量夏季显著高于春季,且聚藻区沉积物中还原性硫和有机硫均明显高于非聚藻区^[18];叶焰焰发现罗源湾沉积物中还原性无机硫主要以黄铁矿硫的形态存在,且其还原效率高^[19];段勋等和Julian等通过对沉积物柱芯中不同形态铁和硫的空间分布进行分析,发现有机碳的代谢途径存在硫酸盐异化还原和铁异化还原的竞争^[20-21];Zhu等探讨了硫与氮循环之间可能存在硫酸盐与硝酸盐还原作用的竞争关系^[22]。另外,对于黑臭河道硫的环境行为主要从致黑致臭的角度进行分析。例如孙韶玲发现不同水质条件下形成的黑臭水体,其致臭物质主要是 H_2S 和甲硫醇^[23]。目前关于黑臭的形成机理尚待进一步研究。

积物中的铁磷几乎都具有活性, 还原环境下几乎全部可以释放出来^[31], 是导致水体富营养化的重要磷形态^[32-33]. 同时 MSR 过程还会强化有机磷的矿化, 这部分磷释放至上覆水后易被藻类利用^[28], 造成水华现象, 对富营养化的贡献高于无机磷^[37].

目前关于硫驱动的磷释放已在水库^[47]、湖泊^[29,38-39]、河口^[40]、湿地^[41]中得以研究. 表1总结了目前关于硫驱动的磷释放的相关研究. 此外, 还有一些研究表明^[41-46], 向实验水体中投加硫酸盐, 会引起上覆水磷营养盐的升高, 造成水体富营养化. 例如 Myrbo 等分别进行了实验室小试和现场测定, 都发现向沉积物中投加硫酸盐会使间隙水和上覆水的磷含量上升^[41]; Geurts 等对实验围隔的湿地投加硫酸盐发现间隙水磷和硫化物都出现不同程度的升高^[42]; Lamers 等在硫酸盐污染的水体中发现当沉积物中铁含量较高时, 上覆水磷含量明显上升^[43]. 因此, 对于污染河湖环境中硫驱动的磷释放引起的富营养化是值得重视的环境问题.

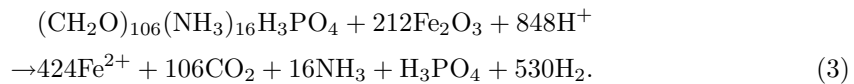
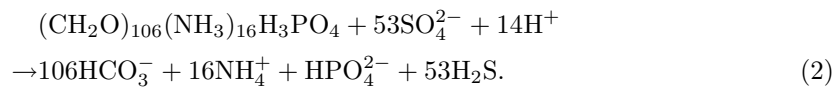
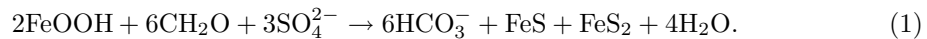
表 1 内源硫与磷耦合关系的相关研究

Tab. 1 Study on the coupling of endogenous sulfur and phosphorus		
生境	研究区域	硫与磷的关系
水库	A-ha reservoir ^[47]	将硫作为评价因子(Fe/S比)纳入沉积物释磷潜力评价体系
	红枫湖 ^[29]	MSR与铁异化还原过程引起铁磷释放
湖泊	滇池 ^[38]	MSR促进的FeOOH的还原使铁磷释放
	太湖 ^[39]	MSR驱动有机磷的分解使磷释放
	Linsley Pond(热分层湖泊) ^[13]	硫光合细菌会阻碍间隙水中的磷向上覆水迁移
河口	K. obovata forest ^[40]	MSR引起铁磷释放
人工湿地	Wetland mesocosms(低硫环境) ^[41]	MSR仍可驱动有机磷矿化引起磷释放

硫驱动的磷释放的反应机制可从氧化态硫和还原态硫两方面讨论. 氧化态硫对磷释放的作用机制可归结为3种: 物理释磷, 化学释磷和生物释磷. 图2总结了硫驱动磷释放可能的耦合关系.

物理释磷的机制为 PO_4^{3-} 对吸附点位的竞争: ① 每还原 1 g SO_4^{2-} 会生成 1.042 g 碱度, pH 值的升高会使 OH^- 与 PO_4^{3-} 发生吸附点位的竞争, 引发磷的释放; ② 研究发现铁还原菌和 SRB 菌在微环境下会同时存在, 即同时发生矿化(公式1), 铁氧化物被还原为 FeS_x , 降低了水体的 Fe/P 比, 固相铁磷 (FeOOH-PO_4 化合物) 中的磷失去吸附点位, 释放进入上覆水^[48].

化学释磷主要是通过有机质矿化和铁氧化物的氧化还原两个过程实现: ① MSR 过程增强了有机磷的矿化(公式2和3), 释放氮磷和二价铁, 每还原 1 g SO_4^{2-} 会生成 0.02 g HPO_4^{2-} , 每还原 1 g Fe_2O_3 生成 2.9 mg H_3PO_4 , 不仅加剧了水体富营养化^[41], 还有重金属污染的风险, 自然状态下硫与磷的反应更为复杂, 其释放量也会随之变化; ② MSR 过程释放的 H_2S 是强还原剂, 可以从磷酸铁 (FePO_4) 中置换磷酸盐, 也伴随有二价铁的释放 ($2\text{Fe}^{3+} + \text{HS}^- \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + \text{S}^0 + \text{H}^+$)^[49].



生物释磷则主要影响与释磷过程有关的微生物: MSR 过程导致沉积物中氧化还原电位 (Eh) 降低, 造成了更有利于释磷的厌氧条件, 增强了厌氧菌的活性, 加速了有机磷的分解; 释磷菌也会在厌氧条件下将储存的多聚磷酸盐转化为磷酸盐释放; 浮游生物也可产生磷酸酶以水解有机磷并释放无机磷酸盐^[33].

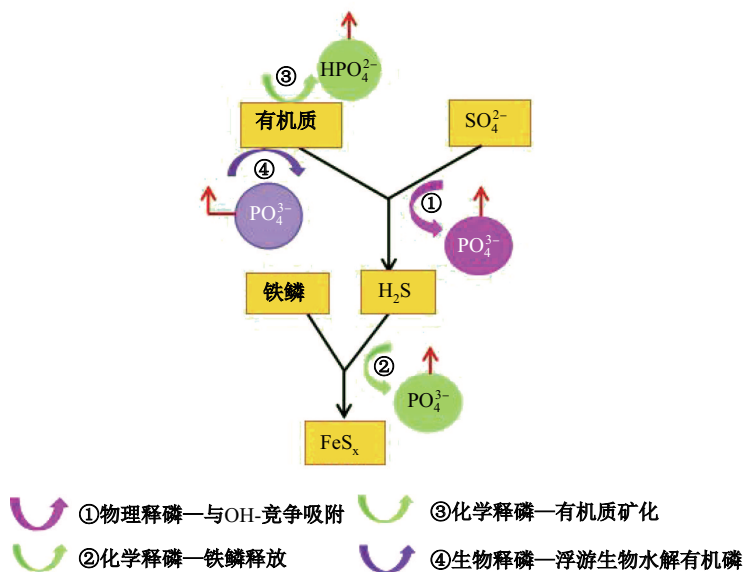


图2 污染河湖中内源硫与磷可能的耦合关系图

Fig. 2 Possible coupling of endogenous sulfur and phosphorus in polluted rivers and lake

还原态硫化物的存在形式与 pH 值有密切关系, 随着 pH 值的升高, 硫化物依次以 H₂S, HS⁻, S²⁻ 的形态存在, 但都能与活性铁发生氧化还原反应, 游离的 S²⁻ 易与铁氧化物结合生成更稳定的黄铁矿, 这一过程会使 FePO₄ 和 FeOOH-PO₄ 等金属结合态磷释放, 并使结晶态金属向无机态转变(如 FeS_x), 形成内源污染。但当硫化物含量大于 1 700 mg/kg 时, 过量的硫化物会使沉积物环境基本处于无生物状态, 减少了因生物扰动而产生的水流或空气流, 更促进了磷的解析^[50]。因此, 硫驱动的磷释放是一个复杂的生化过程, 且磷的释放形式不单一, 一般是以 HPO₄²⁻、H₂PO₄⁻ 和 PO₄³⁻ 络合物的形式释放。为了实现污染河湖治理中磷的有效控制, 就必须考虑硫对其的影响作用。

4 结论与展望

硫是控制沉积物中氧化还原体系的重要元素之一, 不同形态硫之间的相互转化过程与沉积物中磷的环境行为密切相关, 并在一定程度上影响其生物有效性和活性。因此, 探究内源硫对磷营养盐的影响机制可以为治理水体富营养化提供新的视角和思路。

在硫循环的 3 个生化过程中, MSR 过程与磷的释放密切相关。多数污染严重的河湖沉积物—水界面都存在缺氧微区, Eh 较低, 适于 SRB 的增殖, SRB 增强了 MSR 和有机质的矿化过程, 促进磷的释放, 同时, 微生物的增殖又进一步加强了沉积物的厌氧条件, 形成恶性循环。目前相关研究仅仅从引起上覆水磷含量增加来分析硫驱动的磷释放过程, 二者之间的交互作用机制尚不明确, 而且释放的这部分磷是否可以促进藻类的生长还需进一步探究。另外, 硫与磷的耦合不是孤立的交互影响, 还与其他关键生源要素的循环密不可分(如碳、氮和铁循环等), 在今后的相关研究中都应该给予重视。

[参 考 文 献]

- [1] 尹洪斌. 太湖沉积物形态硫赋存及其与重金属和营养盐关系研究 [D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2008.
- [2] BALDWIN D S, MITCHELL A. Impact of sulfate pollution on anaerobic biogeochemical cycles in a wetland sediment [J]. *Water Research*, 2012, 46(4): 965-974.
- [3] CARACO N F, COLE J J, LIKENS G E. Sulfate control of phosphorus availability in lakes: A test and re-evaluation of Hasler and Einsele's model [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 253(1/2/3): 275-280.
- [4] ROZAN T F, TAILLEFERT M, TROUWBORST R E, et al. Iron-sulfur-phosphorus cycling in the sediments of a shallow coastal bay: Implications for sediment nutrient release and benthic macroalgal blooms [J]. *Limnol Oceanogr*, 2002, 47(5): 1346-1354.
- [5] 杨海全, 陈敬安, 刘文, 等. 草海沉积物营养元素分布特征与控制因素 [J]. *地球与环境*, 2016, 44(3): 297-303.
- [6] 张璐. 胶州湾沉积物中硫酸盐还原和铁异化还原的影响因素研究 [D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [7] MYRBO A, SWAIN E B, ENGSTROM D R, et al. Sulfide generated by sulfate reduction is a primary controller of the occurrence of wild rice (*Zizania palustris*) in shallow aquatic ecosystems [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(11): 2736-2753 [2018-05-13]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JG003787>.
- [8] POLLMAN C D, SWAIN E B, BAEL D, et al. The evolution of sulfide in shallow aquatic ecosystem sediments—An analysis of the roles of sulfate, organic carbon, iron and feedback constraints using structural equation modeling[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(11): 2719-2735 [2018-05-13]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JG003785>.
- [9] STAGG C L, SCHOOLMASTER D R, KRAUSS K W, et al. Causal mechanisms of soil organic matter decomposition: Deconstructing salinity and flooding impacts in coastal wetlands [J]. *Ecology*, 2017, 98(8): 2003-2018.
- [10] JOHNSON N W, MITCHELL C P, ENGSTROM D R, et al. Methylmercury production in a chronically sulfate-impacted sub-boreal wetland [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, 18(6): 725-734.
- [11] COLEMAN WASIK J K, ENGSTROM D R, MITCHELL C P J, et al. The effects of hydrologic fluctuation and sulfate regeneration on mercury cycling in an experimental peatland [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(9): 1697-1715.
- [12] REN L, SONG X Y, JEPPESEN E, et al. Contrasting patterns of freshwater microbial metabolic potentials and functional gene interactions between an acidic mining lake and a weakly alkaline lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63: S354-S366.
- [13] WANG P, BENOIT G. Modeling the biogeochemical role of photosynthetic sulfur bacteria in phosphorus cycling in a managed eutrophic lake [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 361: 66-73.
- [14] ZHANG W, JIN X, LIU D, et al. Assessment of the sediment quality of freshwater ecosystems in eastern China based on spatial and temporal variation of nutrients [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, 24(23): 1-10.
- [15] ZHU M X, HAO X C, SHI X N, et al. Speciation and spatial distribution of solid-phase iron in surface sediments of the East China Sea continental shelf [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(4): 892-905.
- [16] YU F, ZOU J, HUA Y, et al. Transformation of external sulphate and its effect on phosphorus mobilization in Lake Moshui, Wuhan, China [J]. *Chemosphere*, 2015(138): 398-404.
- [17] 安文超. 南四湖及主要入湖河口沉积物的污染特征及磷吸附释放研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [18] 朱瑾灿, 吴雨琛, 尹洪斌. 太湖蓝藻聚集区沉积物硫形态的时空变异特征 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(12): 4690-4700.
- [19] 叶焰焰. 罗源湾滨海湿地沉积物中还原性无机硫的分布特征及影响研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- [20] 段勋, 罗敏, 黄佳芳, 等. 闽江河口潮滩沼泽湿地沉积物铁的形态和空间分布 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3780-3791.
- [21] JULIAN P, CHAMBERS R, RUSSELL T. Iron and pyritization in wetland soils of the Florida Coastal Everglades [J]. *Estuaries and Coasts*, 2017, 40(3): 822-831.
- [22] ZHU J, HE Y, ZHU Y S, et al. Biogeochemical sulfur cycling coupling with dissimilatory nitrate reduction processes in freshwater sediments [J]. *Environmental Reviews*, 2018, 26(2): 121-132.
- [23] 孙韶玲, 盛彦清, 孙瑞川, 等. 河流水体黑臭演化过程及恶臭硫化物的产生机制 [J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(3): 15-22.
- [24] BAO P, LI G X, SUN G X. The role of sulfate-reducing prokaryotes in the coupling of element biogeochemical cycling [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 613/614: 398-408.
- [25] ELLER G, KANEL L K, KRUGER M. Cooccurrence of aerobic and anaerobic methane oxidation in the water column of Lake Plusssee [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(12): 8925-8928.
- [26] LOY A, DULLER S, BARANYI C, et al. Reverse dissimilatory sulfite reductase as phylogenetic marker for a subgroup of sulfur-oxidizing prokaryotes [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 11(2): 289-299.
- [27] 郭晨辉, 李和祥, 方芳, 等. 钼钨抗分光光度法对黄河表层沉积物中磷的形态分布及其吸附-解吸特征研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(1): 218-223.
- [28] ZHU J, HE Y, WANG J H, et al. Impact of aeration disturbances on endogenous phosphorus fractions and their algae growth potential from malodorous river sediment [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24: 8062-8070.
- [29] 王敬富, 陈敬安, 罗婧, 等. 红枫湖沉积物内源磷释放通量估算方法的对比研究 [J]. *地球与环境*, 2018, 46(1): 1-6.

- [30] DING S, YAN W, DAN W, et al. In situ, high-resolution evidence for iron-coupled mobilization of phosphorus in sediments [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 24341.
- [31] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [32] JING L, LIU X, BAI S, et al. Effects of sediment dredging on internal phosphorus: A comparative field study focused on iron and phosphorus forms in sediments [J]. *Ecological Engineering*, 2015(82): 267-271.
- [33] HANSEL C M, LENTINI C J, TANG Y, et al. Dominance of sulfur-fueled iron oxide reduction in low-sulfate freshwater sediments [J]. *Isme Journal*, 2015, 9(11): 2400.
- [34] CESBRON F, METZGER E, LAUNEAU P, et al. Simultaneous 2D imaging of dissolved iron and reactive phosphorus in sediment porewaters by thin-film and hyperspectral methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(5): 2816-2826.
- [35] 杨宏伟, 杨小红, 韩明梅. 黄河表层沉积物中磷形态分布与释放风险 [J]. *环境化学*, 2016, 35(2): 403-410.
- [36] XIANG S, NIE F, WU D, et al. Nitrogen distribution and diffusive fluxes in sediment interstitial water of Poyang Lake [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2609-2615.
- [37] 杨斌, 王婷, 王坤, 等. 一种改进的磷形态连续提取方法 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(9): 90-97.
- [38] WANG J, CHEN J, DING S, et al. Effects of seasonal hypoxia on the release of phosphorus from sediments in deep-water ecosystem: a case study in Hongfeng lake, Southwest China [J]. *Environ Pollut*, 2016, 219: 258-265.
- [39] HUANG L, FANG H, HE G, et al. Effects of internal loading on phosphorus distribution in the Taihu Lake driven by wind waves and lake currents [J]. *Environ Pollut*, 2016, 219: 760-773.
- [40] JIAN L, JUNYI Y, JINGCHUN L, et al. The effects of sulfur amendments on the geochemistry of sulfur, phosphorus and iron in the mangrove plant (*Kandelia obovata* (S. L.)) rhizosphere [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 114(2): 733.
- [41] MYRBO A, SWAIN E B, JOHNSON N W, et al. Increase in Nutrients, Mercury, and Methylmercury as a Consequence of Elevated Sulfate Reduction to Sulfide in Experimental Wetland Mesocosms [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(11): 2769-2785 [2018-05-15]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JG003788>.
- [42] GEURTS J J M, SARNEEL J M, WILLERS B J C, et al. Interacting effects of sulphate pollution, sulphide toxicity and eutrophication on vegetation development in fens: A mesocosm experiment [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 2072-2081.
- [43] LAMERS L P M, FALLA S J, SAMBORSKA E M, et al. Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47: 585-593.
- [44] WELLE M, SMOLDERS A, CAMP H, et al. Biogeochemical interactions between iron and sulphate in freshwater wetlands and their implications for interspecific competition between aquatic macrophytes [J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52, 434-447.
- [45] WESTON N B, VILE M A, NEUBAUER S C, et al. Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils [J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102: 135-151.
- [46] 龚梦丹, 金增锋, 王燕, 等. 长江中下游典型浅水湖泊沉积物水界面磷与铁的耦合关系 [J]. *湖泊科学*, 2017, 29(5): 1103-1111.
- [47] WANG J F, CHEN J A, GUO J Y, et al. Combined Fe/P and Fe/S ratios as a practicable index for estimating the release potential of internal-P in freshwater sediment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 10740-10751.
- [48] HOFFMANN C C, HEIBERG L, AUDET J, et al. Low phosphorus release but high nitrogen removal in two restored riparian wetlands inundated with agricultural drainage water [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 75-87.
- [49] JIN X D, HE Y L, KIRUMBA G, et al. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics of the sediment in the Yangtze River estuary reservoir [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 55: 62-66.
- [50] KENNETT D M, HARGRAVES P E. Benthic diatoms and sulfide fluctuations: Upper basin of Pettaquamscutt River, Rhode Island [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 21(4): 577-586.

(责任编辑: 林 磊)