

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.002

外源硫输入对城市水体黑臭化的诱导效应

齐梓璇¹, 常素云², 向阳¹, 王松庆², 孙井梅¹

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市水利科学研究院, 天津 300061)

摘要: 基于雨水管网实际污染情况,分别向水中输入 S^{2-} 及 SO_4^{2-} 进行模拟实验,通过分析上覆水和底泥中氮、硫等污染物赋存及变化,探究外源硫及其与有机碳源耦合对水体黑臭化的诱导效应。结果表明,输入 S^{2-} (1~10 mg/L)后第12天,各组上覆水的 NH_3-N 、 S^{2-} 和底泥酸性挥发性硫(AVS)均有积累并出现黑臭,且输入的 S^{2-} 量越大,积累越多,黑臭越重。 S^{2-} 耦合有机碳源(TOC为100 mg/L)通过迅速消耗DO显著增加水中 S^{2-} 和底泥AVS,加速、加重水体黑臭。输入 SO_4^{2-} (50~300 mg/L)后水中未出现黑色物质,但 $SO_4^{2-} \geq 100$ mg/L时会诱导底泥释放 NH_3-N ,引发富营养化并间接导致黑臭。 SO_4^{2-} 耦合有机碳源可诱导间隙水 SO_4^{2-} 积累并转化为 S^{2-} 向上覆水释放,同时诱导底泥AVS向其他形态硫转化,增加水体返黑返臭隐患。以上结果可为华北某市含有大量有机污染物的管网水排入 SO_4^{2-} 背景值较高水体的返黑返臭防治提供参考。

关键词: 黑臭水体; 外源硫; 有机碳源; 诱导效应

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0006-07

Induced Effect of Exogenous Sulfur Input on Blackening and Odorization of Urban River

QI Zi-xuan¹, CHANG Su-yun², XIANG Yang¹, WANG Song-qing², SUN Jing-mei¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Water Conservancy Science Research Institute, Tianjin 300061, China)

Abstract: Based on the actual pollution of the stormwater drainage, S^{2-} and SO_4^{2-} were input into the water for simulation experiments. Through the occurrence and change of nitrogen, sulfur and other pollutants in the overlying water and sediment, the induced effect of exogenous sulfur and its coupling with organic carbon on blackening and odorization of river was explored. The results showed that the NH_3-N , S^{2-} in the overlying water and AVS in the sediment of each group accumulated and appeared black and odorous on the 12 d after the input of S^{2-} (1~10 mg/L). And the higher the dosage, the more accumulation and the heavier the black and odorous. S^{2-} coupling organic carbon (TOC=100 mg/L) significantly increased S^{2-} in the overlying water and AVS in the sediment by rapidly consuming DO, accelerating and aggravating the black and odorous. After SO_4^{2-} (50~300 mg/L) was input, there was no black matter in the water, but when it was greater than or equal to 100 mg/L, it would induce the sediment to release NH_3-N , cause eutrophication and indirectly lead to black and odorous. The SO_4^{2-} coupling organic carbon could induce the accumulation of SO_4^{2-} in interstitial water and convert it into S^{2-} to release to the overlying

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52270162); 住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-166)

通信作者: 孙井梅 E-mail: jmsun@tju.edu.cn

water. In addition, it could induce the conversion of AVS in sediment to other forms of sulfur, and increased the hidden danger of repeated black and odorous. The above results can provide a reference for the prevention and control of repeated black and odorous, when the stormwater drainage water containing a large amount of organic pollutants discharged into the river with a high background value of SO_4^{2-} .

Key words: black and odorous river; exogenous sulfur; organic carbon; induced effect

水体黑臭已成为亟需解决的水环境问题。虽然截至2022年9月国家地表水评价考核断面的劣V类水体比例仅为0.9%,地级及以上城市的黑臭水体基本得到了消除,但泵站雨季排放至水体引发的返黑返臭问题不容忽视^[1]。

目前公认的黑色物质包括硫铁化物和有色溶解性有机物(CDOM),现还不能确定CDOM在何种程度上导致水体变黑,但有研究表明CDOM致黑的影响不如前者显著^[2-3]。臭味物质主要由藻类及硫化物降解产生^[2],雨水管道雨季排放的污染以后者为主。以上说明硫化物是导致水体变黑变臭的关键因素^[4]。从黑臭河流金川河的微生物群落及理化指标的冗余分析可以发现,TN和 S^{2-} 是影响硫循环微生物群落最显著的相关因子^[5]。Zhang等^[6]基于系统发育零模型并在考虑随机性、确定性过程后,发现 $\text{NH}_3\text{-N}$ 可驱动黑臭水体中细菌群落聚集,悬浮的微生物絮体被硫铁化物染色可促使水体发黑^[3]。当存在 SO_4^{2-} 时,挥发性脂肪酸(VFAs)可作为硫酸盐还原微生物的电子供体产生恶臭的硫化物^[7]。

有机物也是诱导水体黑臭的重要因素之一。输入有机物为1 g/L时,无论是否输入含硫物质,均发现水体的黑度上升^[8]。Liang等^[9]外加污染物模拟水体变黑变臭过程,发现有机碳源是驱动微生物过度繁殖并产生黑臭现象的关键因素。有机碳源可作为电子供体为硫酸盐还原菌(SRB)提供营养,促进硫酸盐还原反应并生成 H_2S ^[10]。因此,探究外源硫(S^{2-} 和 SO_4^{2-})及其与有机碳源耦合输入对城市水体黑臭化的影响,有助于黑臭水体防治。

目前,有关水体黑臭化诱导的研究主要针对碳、氮等单因素展开^[9, 11],而实际调研发现管网排放物中含有碳、硫等多种污染物,大部分多因素的研究采用相关性分析等统计学方法^[12-13],缺乏有效的证据证实。此外,研究对水的关注更多,而实际水体包含上覆水和底泥,管网中碳和硫的输入量对实际水体黑臭产生的影响仍需进一步研究。

笔者以华北某市中心城区雨水管道水质调研结果为外源硫输入浓度的基础,采用雨水管道排入水体即FX河的底泥为实验对象,研究不同浓度 S^{2-} 、 SO_4^{2-} 及有机碳源耦合作用下水体污染指标的变化,通过元素核算分析硫的转化,讨论外源硫输入对水体黑臭的影响,以期为黑臭水体防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择华北某市FX河上覆水及底泥作为实验材料,该河流是前期调研的雨水管道所对应的受纳水体。采样点位于雨水泵站排放口下游,将采集到的2个点位的上覆水、底泥分别混匀稳定后作为实验材料。采用采水器获取上覆水,测得COD为19.71 mg/L, TN为3.74 mg/L, S^{2-} 为15.03 $\mu\text{g/L}$, SO_4^{2-} 为114.50 mg/L。采用抓斗式采样器采集底泥,随后密封样品并立即运送至实验室,测得有机质(TOM)为117.2 mg/g, TN为5.19 mg/g, 酸性挥发性硫(AVS)为0.59 mg/g。雨水管道及水体的采样点信息见图1。其中,箭头指向为雨水管道流向,▲为雨水管道采样点(共8个),●代表受纳水体采样点(共2个)。

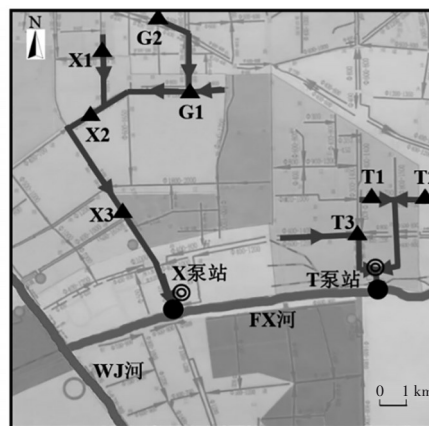


图1 典型雨水管道系统及受纳水体采样点

Fig.1 Sampling points of stormwater pipes and river

1.2 实验设计

课题组基于2016年—2018年对该市中心城区

24个雨水泵站的径流雨水及泵站排水水质的系统调研分析,在2019年—2022年选择典型区域内8个点的雨水管道开展雨季前、雨季中、雨季后管网底泥及上覆水的调研,以雨季(7月、9月)管网上覆水的 S^{2-} 、 SO_4^{2-} 浓度范围(分别为0.01~8.35、25.37~261.21 mg/L)为基础确定 S^{2-} 和 SO_4^{2-} 的浓度梯度。

降雨后对该区域排口附近的受纳水体水质进行调研,COD为14.40~82.00 mg/L。前期实验通过向模拟装置中输入10~100 mg/L的可溶性淀粉,探究有机污染物入河的环境诱导效应,发现糖类负荷达到100 mg/L会导致水体迅速进入厌氧状态,但未产生黑臭。因此,向上覆水引入100 mg/L的有机碳源负荷,以此作为有机碳源与硫耦合实验的基础。选择硫酸钠(Na_2SO_4)和硫化钠(Na_2S)作为外源物质进行实验,选择可溶性淀粉作为输入的有机碳源。实验组A、B分别探究不同 S^{2-} 、 SO_4^{2-} 浓度对水体黑臭化的诱导,实验组A'、B'探究有机碳源与 S^{2-} 、 SO_4^{2-} 耦合对水体黑臭化的诱导。具体实验设置见表1。

表1 硫及其与有机碳源耦合对水体黑臭化诱导效应实验设置

Tab.1 Experimental scheme of the induced effect of sulfur and its coupling with organic carbon on blackening and odorization of river

项目	外源物质	梯度/ (mg·L ⁻¹)	有机碳源	
			不输入	输入
对照组	蒸馏水	0	CK	CK'
实验组A	S^{2-}	1	A-1	A'-1
		3	A-2	A'-2
		5	A-3	A'-3
		10	A-4	A'-4
实验组B	SO_4^{2-}	50	B-1	B'-1
		100	B-2	B'-2
		200	B-3	B'-3
		300	B-4	B'-4

不考虑水流扰动及鱼等生物的影响,采用模拟实验分析外源硫输入对体系水质及底泥的影响,综合分析外源硫排放至水体的黑臭化诱导效应。实验前,将采集的底泥筛除石子、树枝等杂物后搅拌均匀,取300 mL铺设于1 L透明血清瓶中,利用虹吸法加入700 mL河水作为上覆水,密封静置培养,待表面形成微生物群落且各指标稳定后进行后续实验。

实验温度为25℃,整个过程保持模拟装置密闭

以减弱上覆水复氧作用,减少与实际水体复氧差异。为模拟黑臭出现,实验组A、B周期为18 d, A'、B'组周期为10 d。反应前期各指标变化较快,故每天取水样,后期变化相对缓慢,因而2~3 d取水样。反应前后对底泥取样测定。碳、氮、硫是调查城市水体黑臭形成的首要分析目标^[7],参照《城市黑臭水体整治工作指南》中黑臭水体评价水质指标及华北某市雨水泵站外排时导致水体黑臭的主要影响指标^[14-15],选择水体TOC、TN、 NH_3-N 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 及底泥TOM、TN、AVS进行测定。

1.3 分析测定方法

水样的TOC、TN、 NH_3-N 、 SO_4^{2-} 、 S^{2-} 分别采用燃烧氧化-非分散红外吸收法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、离子色谱法、亚甲基蓝分光光度法测定。

底泥的TOM采用重铬酸钾法(NY/T 1121.6—2006)测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(CJ/T 221—2005)测定。底泥硫主要包括酸性挥发性硫、间隙水中可交换态硫,可交换态硫又包括水溶态硫酸盐(W-S)和吸附态硫酸盐(A-S)。利用亚甲基蓝分光光度法测定AVS(HJ 1226—2001)。加去离子水在摇床上于25℃、240 r/min振荡提取,过0.22 μm滤膜后测 SO_4^{2-} 浓度得W-S;将测定W-S所得残渣用20 mmol/L磷酸二氢钾溶液振荡提取,收集的溶液过0.22 μm滤膜后测 SO_4^{2-} 浓度得A-S。

2 结果与讨论

2.1 硫化物对水体黑臭化的诱导效应

输入 S^{2-} 后,反应前后实验组A的DO从4.36~5.12 mg/L降至0.16~0.22 mg/L,ORP从200.5~222.7 mV降至-308.9~-275.5 mV,反应结束后A组呈厌氧还原状态。李文超等^[16]的研究表明,低DO条件下,底泥有机物矿化速率相比好氧条件更慢,底泥中的氮会以 NH_3-N 形式溶出并释放到上覆水中。在此次研究中出现了类似的结果,在第5~17天,水中TN、 NH_3-N 均呈上升趋势, NH_3-N 最高上升了约8 mg/L, NH_3-N 占TN比例由5.56%~12.22%上升至82.67%~97.93%(见图2)。在 S^{2-} 投加量为0、1、3、5、10 mg/L条件下,反应结束后实验组A底泥TN的变化量(反应前与反应后的差值)分别为0.98、1.73、1.36、1.17、0.57 mg/g,即相较于反应前均有削减,进一步证明底泥中氮的释放是导致上覆

水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 升高的重要原因。

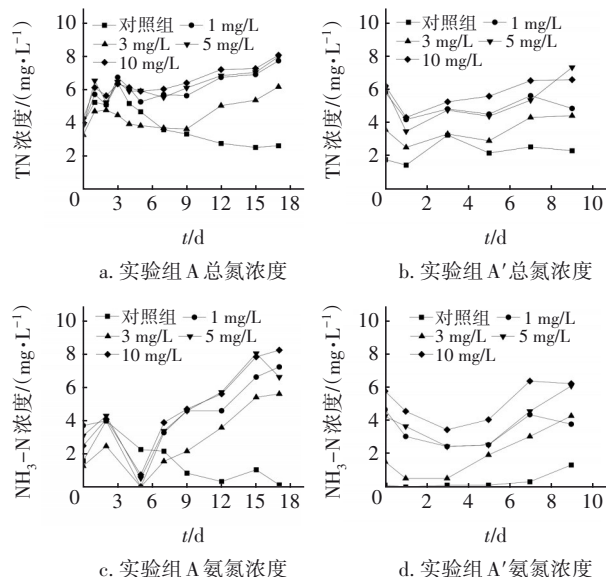


图2 输入外源 S^{2-} 及其耦合有机碳源对体系中氮的影响

Fig.2 Effect of S^{2-} and its coupling with organic carbon on nitrogen change in the system

由图2可知,实验组A'在5 d后水中的氮浓度略低于A组。研究发现有机碳源是黑臭水体中微生物群落聚集的主要驱动力,会诱导微生物大量繁殖并快速降低 $\text{DO}^{[9]}$ 。A'组反应过程中形成的厌氧环境及存在的有机碳源为反硝化反应提供了条件,从而导致TN浓度相比A组略低。反应前后底泥TN削减量分别为1.05、0.71、0.73、0.68、0.56 mg/g,相比A组要少。Xu等^[17]研究发现体系中引入5 mg/L的 S^{2-} 会对微生物产生毒害作用,从而降低氮的转化效率。反应过程中A'组产生的 S^{2-} 浓度相比A组更高(见图3),这会抑制底泥中氮的转化效率,从而导致底泥TN削减量减少。

由图3可知,实验组A从第12天开始 S^{2-} 浓度迅速增加,而 SO_4^{2-} 浓度整体呈下降-升高-下降的趋势,实验前后对照组底泥AVS削减了0.08 mg/g,实验组A随 S^{2-} 输入浓度增高,AVS削减量减少甚至积累(S^{2-} 浓度为1、3、5、10 mg/L时,AVS削减量分别为0.07、0.01、0.01、-0.01 mg/g)。这是因为实验前期底泥的吸附作用会使 SO_4^{2-} 浓度迅速下降。第5~7天水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在TN中的占比较低, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的存在会抑制 SO_4^{2-} 的还原,导致水中 SO_4^{2-} 不断积累^[16]。随后 SO_4^{2-} 浓度的下降和TOC由10.30~12.50 mg/L降至7.54~8.08 mg/L,说明可能发生了硫酸盐还原反应。伴随硫酸盐还原过程会出现DO、ORP的下降,

而实验过程中测得实验组A反应前后的DO、ORP下降明显,进一步证明了该过程的发生。最终硫酸盐还原生成的 S^{2-} 、外源输入的 S^{2-} 会与 Fe^{2+} 反应生成黑色的硫铁化物悬浮在水中。实验过程中,对照组的上覆水颜色及味道未发生明显变化,而仅输入 S^{2-} 的A组在第12天出现黑色悬浮颗粒和恶臭味道,这与上述 S^{2-} 、 SO_4^{2-} 浓度变化相对应。

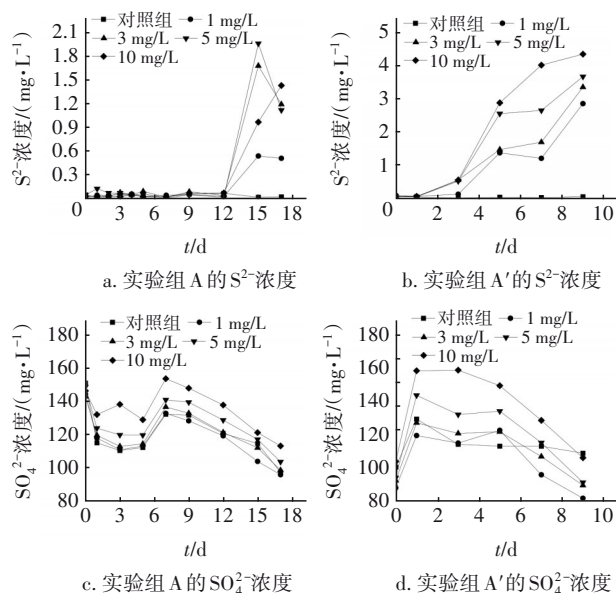


图3 输入的外源 S^{2-} 及其耦合碳源对体系中硫的影响

Fig.3 Effect of S^{2-} and its coupling with organic carbon on sulfur change in the system

输入有机碳源后,整个过程A'组DO从2.66~4.02 mg/L降至0.17~0.23 mg/L,ORP从188.6~202.4 mV变为-350.3~-311.1 mV,各组反应结束时已达《城市黑臭水体整治工作指南》的重度黑臭级别。图3显示,实验组A'在0~1 d的 $\text{DO} > 2 \text{ mg/L}$ 会促进水中 S^{2-} 向 SO_4^{2-} 转化,1~3 d水中 S^{2-} 浓度迅速增加, SO_4^{2-} 浓度下降。分析其原因,水中充足的碳源及丰富的 SO_4^{2-} 为SRB将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} 提供了充足的物质条件。反应前后A'组DO下降速率为A组的1.23倍且达到厌氧条件,pH由8.39~8.47的碱性环境变化至6.93~7.02的中性环境,发生硫酸盐还原过程产生的 S^{2-} 与底泥释放的 Fe^{2+} 结合生成硫铁化物是主要的致黑物质。Li等人^[3]的研究表明,厌氧及偏中性环境更有利于硫铁化物等致黑物质的产生,与本实验结果类似。对硫原子质量进行衡算,发现A'-2、A'-3、A'-4组底泥AVS分别增加40.98、86.39、132.16 mg,通过分析外源投量及W-S、A-S

和TOM变化量,推测可能存在底泥有机质异化硫化作用使 S^0 还原为 S^{2-} 。在第3天,A'-2、A'-3、A'-4组上覆水出现浑浊并散发恶臭味道,3 d后上覆水中出现大量黑色颗粒,取出的水样过滤后仍为黑色,且底泥表面相比空白组更黑,这与体系中硫的变化趋势一致。

2.2 硫酸盐对水体黑臭化的诱导效应

输入的外源 SO_4^{2-} 及其耦合有机碳源对体系中氮的影响如图4所示。除B-1组外,其他各组的TN、 NH_3-N 变化趋势与A组相近,在第15天B-3组和B-4组的TN浓度较对照组分别高148.35%、165.73%,但 NH_3-N 增长更慢。这是由于输入浓度升高,反应前后TN削减量增大会导致底泥中的 NH_3-N 被释放。实验过程中B-1组DO由5.1 mg/L降至1.02 mg/L,其余B组的DO由4.87~5.03 mg/L下降至0.15~0.18 mg/L。有研究发现,利用 SO_4^{2-} 浓度为90 mg/L的废水进行连续流实验,厌氧程度越高,氮转化速率越慢^[18]。同时,缺少 S^{2-} 无法抑制厌氧氨氧化过程,也会导致 NH_3-N 增长速度变慢。

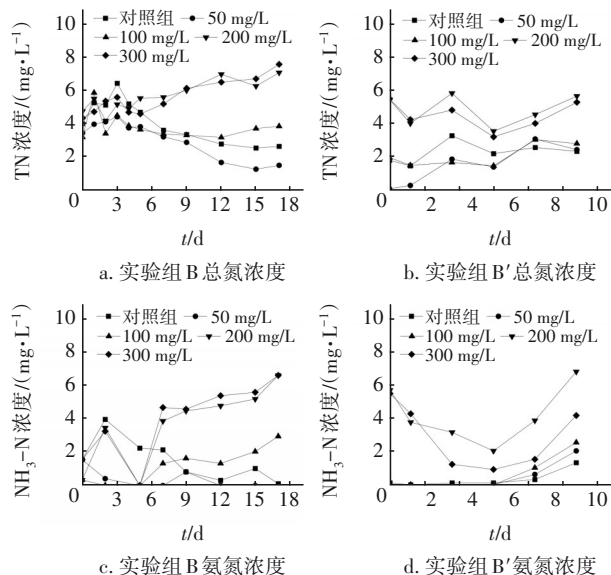


图4 外源 SO_4^{2-} 及其耦合有机碳源对体系中氮的影响

Fig.4 Effect of SO_4^{2-} and its coupling with organic carbon on nitrogen change in the system

实验组B'水中TN浓度小于B组,而反应结束时 NH_3-N 占TN的平均比例高达94.00%,远高于B组的57.11%。同时,B'组水中TOC含量、TOM削减量高于B组,且随 SO_4^{2-} 投量增加,底泥TN削减量下降,与B组呈相反趋势(SO_4^{2-} 投量为0、50、100、200、300 mg/L时,实验组B、B'的底泥总氮变化量分别为

0.98、1.27、1.19、1.54、1.87 mg/g 和 1.05、0.85、1.02、0.64、0.46 mg/g)。这表明有机碳源会加速水中DO消耗,导致水中的氮以 NH_3-N 为主要存在形式,并可能促进SRB利用有机质进行硫酸盐还原作用生成 S^{2-} ,抑制 SO_4^{2-} 与底泥中 NH_4^+ 的同步脱氮除硫反应^[18]。

实验组B、B'中 S^{2-} 和 SO_4^{2-} 浓度随时间的变化见图5。实验组B中 S^{2-} 浓度变化较小,这与上覆水中未出现黑色颗粒及臭味的现象相对应。反应结束时体系处于还原状态(ORP<0 mV),说明存在一定的潜在风险。除B-4组外,实验组B的底泥AVS整体呈减少趋势且变化量与对照组相近(SO_4^{2-} 投量为0、50、100、200、300 mg/L时,底泥AVS变化量分别为0.08、0.06、0.07、0.07、0.01 mg/g),这说明实验后期厌氧会导致被底泥吸附的 SO_4^{2-} 进一步转化为硫代硫酸盐、黄铁矿等其他形式的硫。

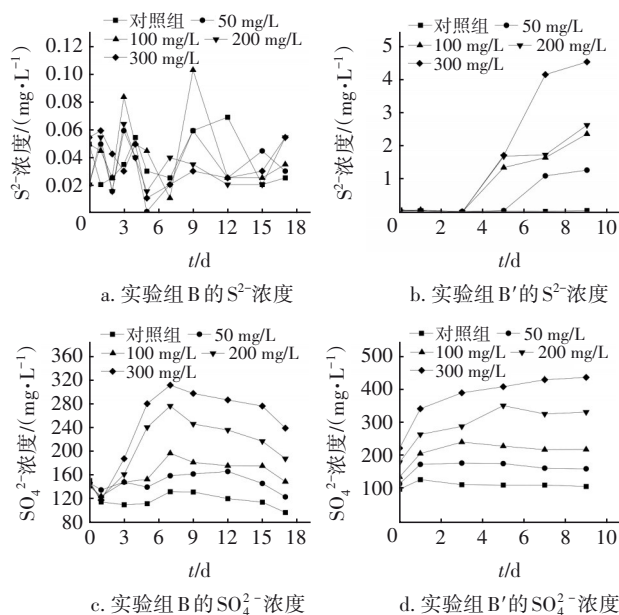


图5 外源 SO_4^{2-} 及其耦合有机碳源对体系中硫的影响

Fig.5 Effect of SO_4^{2-} and its coupling with organic carbon on sulfur change in the system

由图5可知,实验组B'的 S^{2-} 浓度在3~5 d明显增长,反应后期 S^{2-} 浓度远高于B组而低于A'组。这是因为反应前后B'组的DO由3.56~4.87 mg/L降至0.13~0.54 mg/L,ORP由180.3~240.4 mV降至-324.9~-128.9 mV,pH由8.18~8.38降至6.85~6.96,这有利于硫酸盐还原过程的发生。同时,有机碳源的输入既加速厌氧环境的形成,又可为硫酸盐还原提供电子供体,还可降解产生小分子酸并有

利于臭味的产生,这会进一步导致水质恶化。以上实验指标的变化与实验组 B' 的上覆水在第 5 天出现浑浊并有臭味,随后出现少量黑色悬浮物但数量远少于实验组 A',且过膜后水样基本无色的现象一致。对比 B 组与 B' 组的 NH₃-N 及 S²⁻ 浓度发现,仅 NH₃-N 浓度较高难以出现明显的黑臭,S²⁻ 含量的增加是导致水体黑臭的关键。如表 2 所示,B'-1 组体系中减少的硫元素量小于底泥 AVS 减少量,说明此

时底泥 AVS 向其他形态硫转化,结合底泥 TOM 变化推测 S²⁻ 与底泥中的有机质结合生成了有机硫。随着 SO₄²⁻ 输入的増加,间隙水中 SO₄²⁻ 赋存量上升,结合底泥 AVS 削减量占据体系削减量的主体以及水中转化的 S²⁻ 相对较少,说明 SO₄²⁻ 的输入使 SO₄²⁻ 逐渐在间隙水中积累并为底泥 SRB 等微生物利用,但也可能存在 SO₄²⁻ 促进底泥 AVS 转化为黄铁矿的过程。

表 2 外加碳源(A'、B'组)体系中硫元素衡算
Tab.2 Sulfur balance of reactor with external carbon (group A' and B')

组别	外源硫输入	上覆水硫元素		底泥硫元素			总变化量 ΔS
		ΔS ²⁻	ΔSO ₄ ²⁻	ΔW-S	ΔA-S	ΔAVS	
对照组	0.00	0.01	-1.95	-1.47	-1.56	23.63	18.66
A'-1	0.70	-1.93	1.46	0.75	1.82	3.09	5.19
A'-2	2.10	-2.30	0.67	2.08	2.44	-40.98	-38.09
A'-3	3.50	-2.52	0.67	2.80	2.59	-86.39	-82.85
A'-4	7.00	-3.00	-0.53	-0.57	0.51	-132.16	-135.75
B'-1	11.67	-0.83	-10.56	-2.81	1.25	69.20	56.25
B'-2	23.33	-1.60	-19.23	-3.18	3.31	47.10	26.40
B'-3	46.67	-1.80	-35.24	-7.33	3.33	25.83	-15.22
B'-4	70.00	-3.11	-49.60	-14.40	5.20	46.27	-15.64

注：变化量为实验前数据减实验后数据,正数为体系削减量,负数为增加量。

3 结论

① 输入 1 mg/L 的 S²⁻, 无论是否加入碳源, 均对水体有致黑致臭作用。S²⁻ 输入量浓度越高, 水中 NH₃-N、S²⁻ 含量越大, 底泥 AVS 积累越高, 导致水体黑臭污染加剧。有机碳源(100 mg/L)耦合会迅速消耗水中 DO 并使水中 S²⁻ 和底泥 AVS 增加更显著, 加速、加重水体黑臭。

② 水中 S²⁻ 含量增加是水体致黑致臭的主要原因, NH₃-N 通过引起富营养化间接影响水体黑臭。水中 DO 浓度相对较高(4.87~5.10 mg/L), 输入 SO₄²⁻ ≥100 mg/L 时, 水中 NH₃-N 上升并间接导致黑臭。输入 SO₄²⁻ ≥50 mg/L 时, 有机碳源耦合会诱导间隙水 SO₄²⁻ 积累并促进底泥中微生物对 S²⁻ 的转化及 S²⁻ 向上覆水的释放, 同时诱导底泥 AVS 向其他形态硫转化并形成内源污染, 增加水体返黑返臭风险。

参考文献:

[1] 孙巍,赵红兵. 武汉市黄孝河合流制溢流强化处理设施工艺设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 101-105.
SUN Wei, ZHAO Hongbing. Design of Wuhan

Huangxiao River combined sewer overflow enhanced treatment facility[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10):101-105(in Chinese).
[2] CAO J, SUN Q, ZHAO D, et al. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 1-8.
[3] LI P, YE J, ZHANG W, et al. The blackening process of black-odor water: substance types determination and crucial roles analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 443: 1-10.
[4] 马君妍,吴比,朱南文,等. 硝酸钙辅助生物膜法用于污染河道原位修复[J]. 中国给水排水,2018,34(21): 31-36.
MA Junyan, WU Bi, ZHU Nanwen, et al. In situ remediation of polluted river using combination of calcium nitrate and biofilm carrier[J]. China Water & Wastewater, 2018,34(21):31-36 (in Chinese).
[5] CAI W, LI Y, SHEN Y, et al. Vertical distribution and assemblages of microbial communities and their potential effects on sulfur metabolism in a black-odor urban river [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 235: 368-376.

- [6] ZHANG W, LEI M, LI Y, *et al.* Determination of vertical and horizontal assemblage drivers of bacterial community in a heavily polluted urban river [J]. *Water Research*, 2019, 161: 98–107.
- [7] LIANG Z, SIEGERT M, FANG W, *et al.* Blackening and odorization of urban rivers: a bio-geochemical process [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2018, 94 (3): 1–12.
- [8] 卢信,冯紫艳,商景阁,等. 不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSCs)产生机制研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(9): 3152–3159.
- LU Xin, FENG Ziyang, SHANG Jingge, *et al.* Black water bloom induced by different types of organic matters and forming mechanisms of major odorous compounds [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 3152–3159 (in Chinese).
- [9] LIANG Z, FANG W, LUO Y, *et al.* Mechanistic insights into organic carbon-driven water blackening and odorization of urban rivers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405: 1–10.
- [10] 肖利萍,栾雪菲,汪兵兵,等. 新型碳源驯化SRB生长特性及处理酸性矿山废水研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 40–44.
- XIAO Liping, LUAN Xuefei, WANG Bingbing, *et al.* Growth characteristics of SRB domesticated with new organic carbon sources and its application in AMD treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(9): 40–44 (in Chinese).
- [11] 谢雨衡. 黑臭水体形成过程及致臭物质产生条件的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- XIE Yuheng. Study on the Formation Process of Black-odor Water and Producing Conditions of Odorous Substances [D]. Nanning: Guangxi University, 2020 (in Chinese).
- [12] 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.
- SUN Shaoling, SHENG Yanqing, SUN Ruichuan, *et al.* Study on evolution and mechanism of river water black-odor and malodorous sulfide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(3): 15–22 (in Chinese).
- [13] SHI F, LIU Z, LI J, *et al.* Alterations in microbial community during the remediation of a black-odorous stream by acclimated composite microorganisms [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 118: 181–193.
- [14] 刘晓玲,徐瑶瑶,宋晨,等. 城市黑臭水体治理技术及措施分析[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(3): 519–529.
- LIU Xiaoling, XU Yaoyao, SONG Chen, *et al.* Analysis of treatment technologies and measures for the urban black-stinking water body [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13 (3): 519–529 (in Chinese).
- [15] 周国华,张蓓,王刚,等. 中新天津生态城青坨子雨水泵站泵池及雨水管网臭味源分析[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 30–35, 127.
- ZHOU Guohua, ZHANG Bei, WANG Gang, *et al.* Analysis of odor sources in stormwater pump pool and stormwater pipe of a stormwater pump station in the Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39 (4): 30–35, 127 (in Chinese).
- [16] 李文超,王文浩,何岩,等. 黑臭河道沉积物中硫铁行为与氮磷循环的耦合机制[J]. *华东师范大学学报*, 2015(2): 1–8.
- LI Wenchao, WANG Wenhao, HE Yan, *et al.* Coupling of sulfur and iron with nitrogen and phosphorus in sediments of malodorous river: a review [J]. *Journal of East China Normal University*, 2015 (2): 1–8 (in Chinese).
- [17] XU L Z, ZHANG Q, FU J J, *et al.* Deciphering the microbial community and functional genes response of anammox sludge to sulfide stress [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 1–8.
- [18] 朱森,袁林江,牛泽栋,等. 升流式污泥床对无机废水中氮硫转化及相互影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42 (9): 4174–4182.
- ZHU Miao, YUAN Linjiang, NIU Zedong, *et al.* Mechanisms of biological conversion and removal of nitrogen and sulfur from the inorganic influent in upflow sludge bed reactor [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4174–4182 (in Chinese).

作者简介: 齐梓漩(1999–), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为受污染水体修复理论与技术。

E-mail: 1369327913@qq.com

收稿日期: 2023-09-12

修回日期: 2023-10-17

(编辑: 李德强)