

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.005

营造光照环境控制污水管道中有害气体的研究

李亚芹, 杨 静, 张志强, 卢金锁

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 预防管道腐蚀和安全事故的发生是排水系统提质增效的重要方向,而管道通风不畅及黑暗环境中产生的硫化氢(H_2S)和一氧化碳(CO)等有害气体是事故发生的主要诱因。针对管道内有害气体产生的问题,提出了在管道内营造近污水明渠输送环境控制有害气体产生的新方法,建立了模拟污水管道实验模型,探究了管道内增加光照对有害气体的控制效果及对污水水质的影响。结果表明,与黑暗环境的污水管道相比,增加光照可使 H_2S 气体浓度降低47.2%、硫化物浓度降低36.7%、CO浓度降低59.8%,可有效抑制管道内有害气体的产生;同时COD和TN浓度分别可降低12.0%和5.0%,污水碳氮比变化较小;生物膜镜检发现,增加光照改变了管道内的微生物群落,促进了管道内藻类的生长,形成菌藻聚生体;分析表明,藻类生长释放氧气,改变管道内的厌氧环境,抑制产气厌氧菌是营造光照环境控制有害气体的主要作用机制。营造光照环境可为控制污水管道中的有害气体提供技术选择,为城市排水系统规划和建设提供新思路。

关键词: 污水管道; 光照; 硫化氢; 硫酸盐还原菌; 菌藻聚生体

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0028-08

Control of Harmful Gas in Sewage Pipeline through Creating Light Environment

LI Ya-qin, YANG Jing, ZHANG Zhi-qiang, LU Jin-suo

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Prevention of pipeline corrosion and safety accident is an important direction to improve the quality and efficiency of drainage system, and harmful gases such as hydrogen sulfide (H_2S) and carbon monoxide (CO) produced in pipelines with poor ventilation and dark environment are the main causes of accidents. Aiming at the problem of harmful gases generation in sewage pipelines, a new method to control harmful gas generation by creating similar open sewer transport environment in sewage pipelines was proposed, and an experimental model of simulated sewage pipelines was established to investigate the effect of light on harmful gas control and sewage quality. Compared with sewage pipelines in dark environment, concentrations of H_2S , sulfide and CO were reduced by 47.2%, 36.7% and 59.8% by illumination, indicating that the generation of harmful gas was effectively inhibited in the pipelines. Meanwhile, concentrations of COD and TN decreased by 12.0% and 5.0%, respectively, and the carbon to nitrogen ratio of sewage did not change significantly. Biofilm microscopy indicated that

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-04); 国家自然科学基金资助项目(51778523)
通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@xauat.edu.cn

illumination altered the microbial community and promoted the growth of algae to form bacterial-algal aggregates in the pipelines. Algae growth would release oxygen, change the anaerobic environment and inhibit aerogenic anaerobes in the pipelines, which was the main mechanism of controlling harmful gas generation by illumination. The light environment can provide technical choice for controlling harmful gas in sewage pipelines and new ideas for urban drainage system planning and construction.

Key words: sewage pipeline; illumination; hydrogen sulfide; sulfate reducing bacteria; bacterial-algal aggregate

在厌氧条件下,污水管道系统中产生的硫化物是管道腐蚀的原因,也是臭味的主要来源^[1]。硫酸盐还原菌(SRB)可将污水中的 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,最终在管道内产生 H_2S 、 CO 等有害气体。这些气体会产生恶臭并腐蚀管道,且对人体也有一定的危害,近年来 H_2S 致人死伤事件时有发生,由于 H_2S 气体造成的腐蚀及对健康的严重影响,排水管网内 H_2S 气体的控制对城市的发展来说尤为重要。

针对 H_2S 气体的危害已有许多控制方法。Gutierrez等^[2-3]提出通过注入氧气和提高pH值来控制硫化物的产生,Zhang等^[4]通过投加铁盐抑制生物膜的厌氧菌活性,Bentzen等^[5]提出了使用硝酸盐来控制污水管道内 H_2S 的产生,还有研究^[6-7]通过控制硝酸盐的投加方式和投加位置来控制 H_2S 的产生,这些措施虽然对 H_2S 的控制有一定效果,但是都不同程度地对下游污染物的去除产生不利影响,而且化学品消耗成本和操作成本很高^[8]。因此,找到一种能够有效抑制有害气体且操作简单、对下游管段影响小的方法至关重要。

明渠作为一种输水方式,在半敞开式环境下可以充分与外界空气和阳光接触,从而避免出现管道中的厌氧环境。在此环境下输送的水体中微生物种类丰富,存在微藻、菌胶团和微型动物等,其中微藻可以通过光合作用产生氧气,细菌可用于硝化作用和降解有机物质,反过来,细菌产生的二氧化碳被用于微藻生长^[9],这为生物膜的更新换代创造了有利条件,从而保证明渠良好的供氧状况。鉴于明渠具有充分光照环境的特点,笔者所在课题组提出了在污水管道中营造近明渠环境的新方法,以此达到对污水管道内有害气体控制的目的。在本研究中,为了营造近明渠环境,通过在管道顶部敷设蓝光灯带,促进污水中原有的藻细胞生长,形成菌藻聚生体,藻类通过光合产氧营造有氧条件,抑制产气厌氧菌的活性,使得 H_2S 等有害气体减少。之所以选择蓝光

作为光源,是因为之前有研究^[10]表明,蓝光可以促进藻类的生长和光合产氧量,强化有机物的去除。目前,有关光照对污水管道内有害气体控制的研究很少,因此,探究光照对有害气体的控制效果具有重要意义。笔者为了模拟光照环境下的污水管道系统,搭建带有蓝光灯带的反应器系统,主要目的是研究在污水管道中营造光照环境来抑制有害气体的可行性,并评估光照对污水中污染物变化的影响。另外,通过对生物膜结构的分析,探讨了光照抑制有害气体产生的机制。

1 材料与方法

1.1 试验装置

由于污水管道内水量变化较大,会存在厌氧区域,厌氧菌主要存在于管道底部及管壁,硫化氢等有害气体释放到管道顶部气相空间。为模拟污水管道环境,建立了如图1所示的反应器装置。反应器材质为有机玻璃,总体积为1 L,有效体积为0.75 L,呈圆柱状,直径为80 mm,高度为200 mm。为探究光照环境下不同接触面积对污水管道内有害气体的影响,将不同数量的圆柱状填料放置在各反应器内,填料表面为多孔结构,比表面积为 $900 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

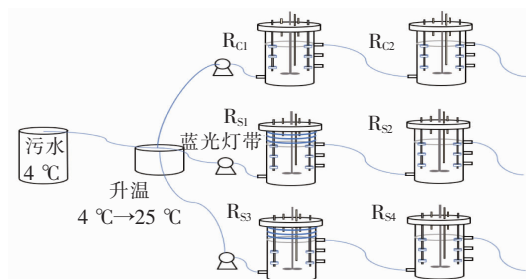


图1 试验装置

Fig.1 Schematics of experimental setup

1.2 试验条件及进水水质

试验设有6个反应器,分别形成3条管线,如图1所示。其中 R_{C1} 、 R_{C2} 反应器作为对照组,设置条件

为黑暗条件,模拟城市污水管道的黑暗环境; R_{S1} 和 R_{S2} 作为试验组, R_{S1} 设置条件为蓝光照射且表层大面积填料挂膜(含两个比表面积为 $900\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的填料),用来模拟光照且大接触面积对污水管道的影响, R_{S2} 设置条件为黑暗条件,用来模拟不受蓝光照射的污水管道; R_{S3} 和 R_{S4} 作为试验组, R_{S3} 设置条件为蓝光照射且表层无填料挂膜,用来模拟蓝光且小接触面积对污水管道的影响, R_{S4} 设置条件为黑暗条件,用来模拟不受蓝光照射的污水管道。

生活污水进入反应器前放置在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中以确保水质稳定,进水通过蠕动泵控制,进行连续性进水;反应器通过机械搅拌桨搅拌,转速为 200 r/min ,模拟管道内 0.6 m/s 的流速;温度控制在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,水力停留时间为 1 h ,流量为 12.5 mL/min ,试验周期为 70 d ,蓝光光照强度为 $1\text{ }800\text{ lx}$ 。

在初始生物膜培养阶段,各反应器设置条件如图1所示。生物膜培养所用污水取自学校南院检查井,并储存在冰箱中以防止其降解,然后将污水泵入每个反应器,运行 3 d 后,用配制生活污水进行连续进水,测定各项指标。人工配制生活污水的 COD 、 TN 、 NH_4^+-N 、 TP 浓度分别为 (360 ± 15) 、 (45 ± 5) 、 (20 ± 2) 、 $(7.0\pm 0.5)\text{ mg/L}$, pH 值为 7.5 ± 0.5 ,组分如下:葡萄糖为 200 mg/L , NH_4Cl 为 60 mg/L , $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 为 25 mg/L , $\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 为 25 mg/L , KHCO_3 为 50 mg/L , NaHCO_3 为 130 mg/L , $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 50 mg/L , $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ 为 2 mg/L , $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 为 2 mg/L ,无水 CaCl_2 为 3 mg/L ,酵母为 30 mg/L ,尿素为 30 mg/L ,蛋白胨为 20 mg/L ,大豆蛋白胨为 20 mg/L ,胰蛋白胨为 20 mg/L ,酪蛋白胨为 20 mg/L 。

1.3 分析方法

在测定水质参数之前,先用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 硝酸纤维素膜过滤器对水样进行过滤^[11],硫化物、硫酸盐、氨氮、硝酸盐氮、总氮和可溶性 COD 等均采用国家标准方法测定,每隔 24 h 检测一次。气相参数采用M40气相组分仪测定,每 24 h 检测一次 H_2S 和 CO 浓度。

通过扫描电子显微镜和光学显微镜观察生物膜的形态结构。生物膜结构分析预处理:将附着生物膜的载片置于玻璃培养皿中,将生物膜全部浸泡于4%的多聚甲醛中固定 6 h 以上;把固定好的生物膜于30%、50%、70%、80%、90%、100%的酒精溶液

中梯度洗脱,每个浓度溶液洗脱时间为 15 min ;将脱水的生物膜放于酒精:乙酸异戊酯 $=1:1$ 的溶液中置换 5 min ,再在100%乙酸异戊酯溶液中置换 5 min ;把置换好的生物膜去掉上清液,转移到干净的培养皿中并在通风橱中风干,风干的生物膜采用JSM-6510LV型扫描电子显微镜进行观察^[12]。

2 结果分析与讨论

2.1 光照对 H_2S 和 CO 气体的影响

对照组 R_C 和试验组 R_S 反应器出水中 H_2S 的变化如图2所示。由图2可以看出,在反应器稳定运行初期,各反应器的 H_2S 浓度均较低,且前期试验组 R_{S1} 的 H_2S 浓度略高于 R_{S3} ,这可能是由于初期反应器环境正在形成过程中,厌氧菌等微生物以及藻细胞的适应性不足所致。 H_2S 浓度呈现先升高后降低然后逐渐稳定的趋势,在 16 d 后各反应器的 H_2S 浓度趋于稳定,且 R_S 组均低于 R_C 组。对照组 R_{C1} 的 H_2S 平均浓度为 0.36 mg/L ,试验组 R_{S1} 和 R_{S3} 的平均浓度分别为 0.19 和 0.25 mg/L ,与对照组 R_{C1} 相比,试验组 R_{S1} 、 R_{S3} 的 H_2S 浓度分别降低了47.2%和30.6%。为探究光照对下游污水管道中有害气体的影响,检测了下游 R_{C2} 、 R_{S2} 和 R_{S4} 的 H_2S 和 CO 浓度,如图2(b)所示,下游试验组 R_{S2} 和 R_{S4} 的 H_2S 浓度均低于对照组 R_{C2} 。

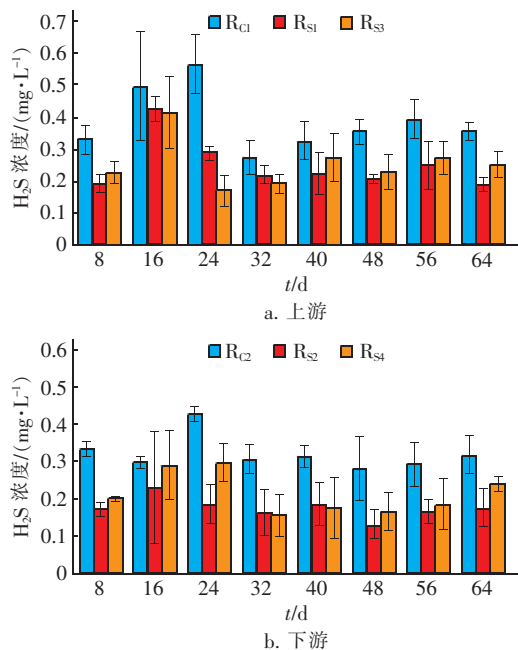


图2 反应器中 H_2S 气体的变化

Fig. 2 Change of H_2S gas in reactors

反应器中 CO 气体的变化如图3所示。 CO 气

体浓度的变化趋势与 H_2S 气体相似, R_{Cl} 的 CO 平均浓度为 0.18 mg/L , 与 R_{Cl} 相比, R_{S1} 、 R_{S3} 的 CO 浓度分别降低了 59.8% 和 52.3% , R_{S1} 的 CO 浓度比 R_{S3} 低 7.5% 。受到上游光照环境的影响, 下游试验组 R_{S2} 和 R_{S4} 的 CO 浓度均低于对照组 R_{C2} 。

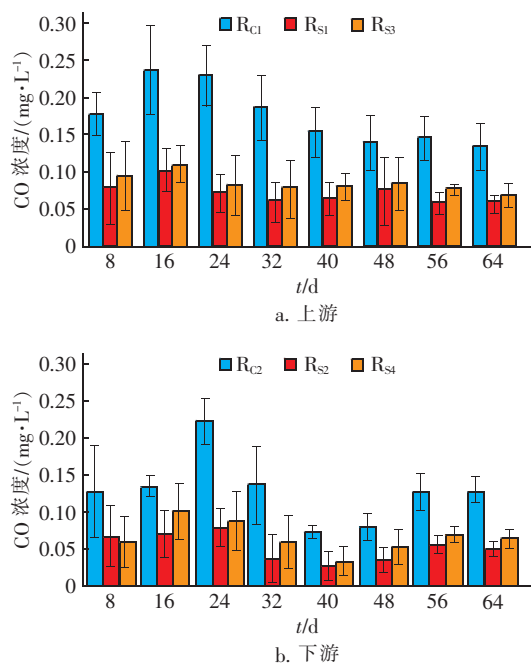


图3 反应器中 CO 气体的变化

Fig. 3 Change of CO gas in reactors

由以上结果发现, 反应器进入稳定期后, 光照条件下污水管道中有害气体的浓度低于黑暗环境中的, 由此表明在管道中营造光照环境可以降低有害气体的释放, 并且上游管段的光照效果可以影响下游管段。此外, 不同的接触面积是重要的影响因素, 接触面积较大则控制效果更好。

2.2 光照对 S^{2-} 和 SO_4^{2-} 的影响

R_{C} 和 R_{S} 组反应器出水中 S^{2-} 的变化如图 4 所示。在反应器稳定运行 20 d 时, R_{S} 组的 S^{2-} 平均浓度达到 1.5 mg/L 左右并趋于稳定, 而且 R_{S} 组的 S^{2-} 浓度均低于 R_{C} 组。对照组 R_{Cl} 的 S^{2-} 平均浓度为 3.0 mg/L , 试验组 R_{S1} 和 R_{S3} 的 S^{2-} 平均浓度分别为 1.9 和 2.0 mg/L , 与 R_{Cl} 相比, R_{S1} 、 R_{S3} 的 S^{2-} 浓度分别降低了 36.7% 和 33.3% , 而且 R_{S1} 的 S^{2-} 浓度低于 R_{S3} , 这说明不同的接触面积是重要的影响因素。为探究光照对下游污水管道中 S^{2-} 的影响, 检测了下游 R_{C2} 、 R_{S2} 和 R_{S4} 的 S^{2-} 浓度, 结果显示, 下游试验组 R_{S2} 和 R_{S4} 的 S^{2-} 浓度均低于对照组 R_{C2} 。

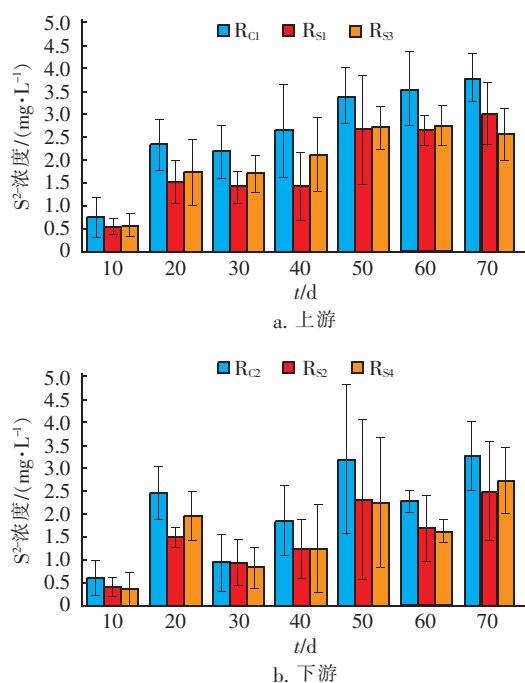


图4 反应器中 S^{2-} 的变化

Fig. 4 Change of S^{2-} in reactors

R_{C} 和 R_{S} 组反应器出水中 SO_4^{2-} 的变化见图 5。

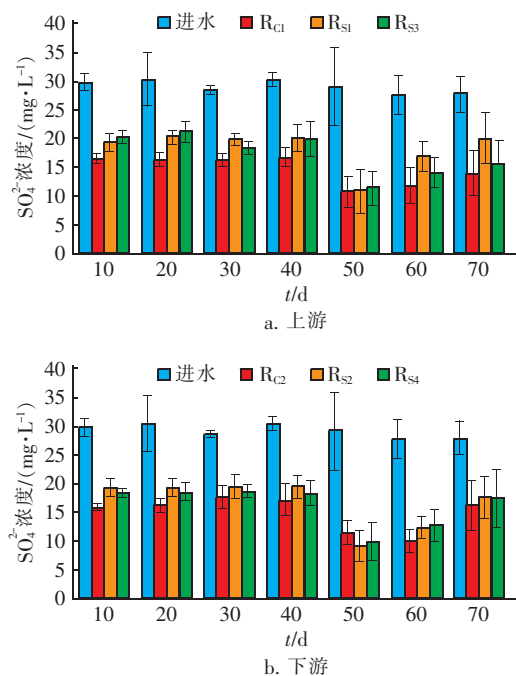


图5 反应器中 SO_4^{2-} 的变化

Fig. 5 Change of SO_4^{2-} in reactors

上游进水 SO_4^{2-} 平均浓度为 29.0 mg/L , R_{C1} 、 R_{S1} 和 R_{S3} 的出水 SO_4^{2-} 平均浓度分别为 14.9 、 18.0 和 17.6 mg/L , 对照组 R_{C1} 的 SO_4^{2-} 消耗量为 48.6% , 与

R_{C1} 相比,试验组 R_{S1} 、 R_{S3} 的 SO_4^{2-} 消耗量分别降低了 10.7% 和 9.3%。而且受到上游光照环境的影响,下游 R_{S2} 和 R_{S4} 的 SO_4^{2-} 浓度均高于对照组 R_{C2} 。

以上研究结果表明,光照环境可以降低污水管道中的 S^{2-} 浓度,其中微藻光合作用产生的氧气,可能抑制了 SRB 的活动,从而抑制了 SO_4^{2-} 的还原过程,进而使得 S^{2-} 浓度降低,间接影响了 H_2S 气体的释放。

2.3 光照对水中污染物的影响

2.3.1 光照对 COD 的影响

三组反应器对 COD 的去除效果如图 6 所示。

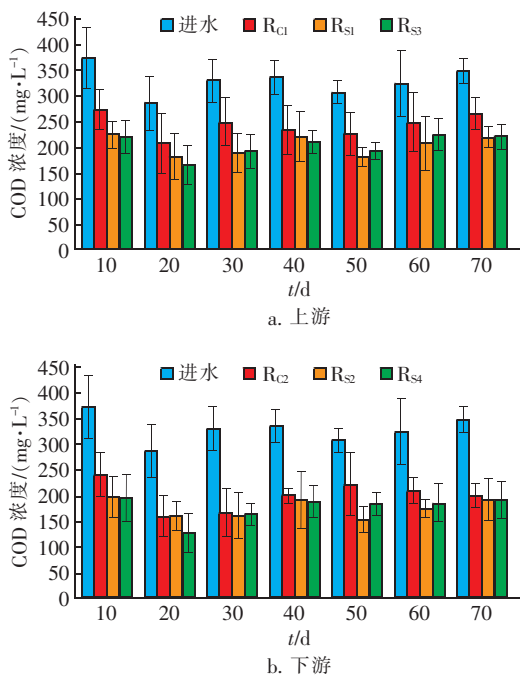


图6 反应器中 COD 的变化

Fig. 6 Change of COD in reactors

在稳定运行期间,各反应器 COD 浓度保持稳定,且 R_S 组的 COD 浓度低于 R_C 组, R_{C1} 和 R_{C2} 的 COD 去除率分别为 26.0% 和 39.0%,与 R_{C1} 相比, R_{S1} 和 R_{S3} 的 COD 去除率增加了 12.0% 左右,与 R_{C2} 相比, R_{S2} 和 R_{S4} 的 COD 去除率增加了 8.0% 左右。以上结果表明,在厌氧环境条件下, R_S 组与 R_C 组相比,在 COD 去除方面具有潜在优势。这与 Tang 等人^[13]的研究结果一致,其研究发现,在光照条件下,菌藻聚生体中的微藻提供了溶解氧(0.1~0.3 mg/L),特别是在较低的氧气环境中,微藻产生的多余氧气可显著补充细菌对氧气的需求,进而提高有机物的去除率。Guieysse 等人^[14]发现,藻类的生长也

吸收了一些有机物,这也有助于 COD 的去除。以上研究表明,在污水管道中营造光照环境可以促进污水中有机污染物的去除。

2.3.2 光照对氮类污染物去除的影响

每个反应器进、出水中含氮化合物的变化如图 7~9 所示。在 R_S 反应器中,污水的 TN 去除率以及 $NO_3^- - N$ 的积累量均得到提高(见图 7 和图 9),其中, R_S 组的 TN 去除率达到 17.0% 左右,比 R_C 组反应器高 5.0%。图 8 为各反应器中 $NH_4^+ - N$ 浓度的变化,与 R_C 组反应器相比, R_S 组出水 $NH_4^+ - N$ 浓度降低了 10.0% 左右,且 R_{S1} 和 R_{S2} 的 $NH_4^+ - N$ 浓度要分别低于 R_{S3} 和 R_{S4} 。可以发现,与 R_C 组相比, R_S 组的 $NH_4^+ - N$ 浓度明显降低, TN 去除率升高。这与 Tang 等人^[13]的研究结果一致,其研究发现, R_S 组出水 $NH_4^+ - N$ 值相对较低的原因主要是微藻的吸收作用。如图 9 所示, R_S 组出水的 $NO_3^- - N$ 浓度高于 R_C 组, Markou 等^[15]研究表明,微藻可优先利用 $NH_4^+ - N$ 和有机氮,然后在 $NH_4^+ - N$ 耗尽后再利用 $NO_3^- - N$,从而促进 $NH_4^+ - N$ 的去除和 $NO_3^- - N$ 的累积。并且, R_{S1} 和 R_{S2} 的 $NO_3^- - N$ 积累量要分别高于 R_{S3} 和 R_{S4} ,说明在相同光照条件下,不同的接触面积是重要的影响因素。综上所述,光照会促进污水管道中氮类污染物的去除,且不同的接触面积为其中的影响因素。

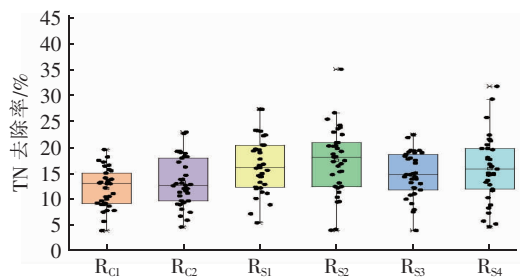
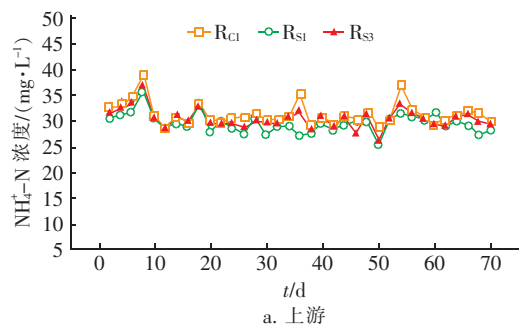
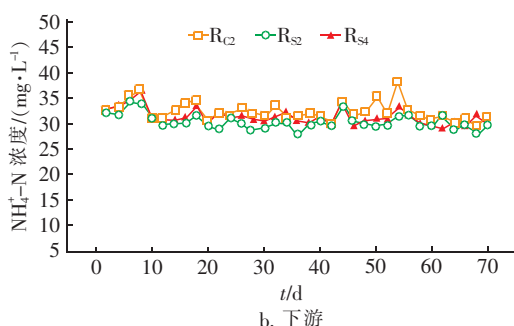
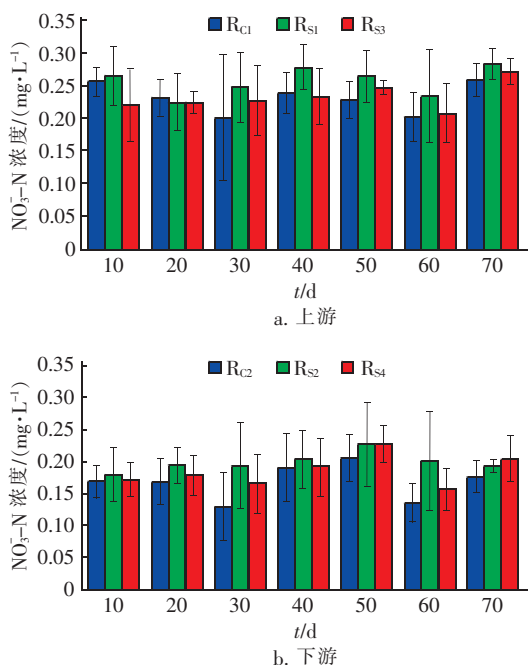


图7 各反应器中 TN 去除率的变化

Fig. 7 Change of TN removal rate in each reactor



图8 反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化Fig. 8 Change of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in reactors图9 反应器中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化Fig. 9 Change of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in reactors

光照促进了污水中 COD 和 TN 的去除,且对后续污水处理厂中污水的脱氮除磷处理影响较小。反应器 $\text{R}_{\text{S}1}$ 和 $\text{R}_{\text{S}3}$ 中污水的碳氮比 (C/N) 分别为 5.62 和 5.51,略低于反应器 $\text{R}_{\text{C}1}$ 的 C/N 值(6.36); $\text{R}_{\text{S}2}$ 和 $\text{R}_{\text{S}4}$ 中污水的 C/N 值(4.86 和 4.81)也略低于 $\text{R}_{\text{C}2}$ (5.26)的 C/N 值。这表明,光照环境对污水管道出水的 C/N 值影响较小,不会影响后续污水处理中反硝化过程的进行。

2.4 光照对生物膜结构的影响

将取自 $\text{R}_{\text{S}1}$ 反应器气液交界处载体的生物膜分别置于光学显微镜和扫描电镜下观察。在 400 倍光学显微镜下观察生物膜形态,发现载体上的藻细胞粘附在生物膜上成团生长,而且数量较多,形成了菌

藻聚生体。在扫描电镜下[见图 10(a)]观察发现,成熟的藻类-细菌颗粒聚集生长,而且表面有许多菌群突起,细菌群嵌入胞外聚合物基质中,同时,在细胞团之间有许多空腔,之前有研究表明,这些空腔的存在可以促进代谢产物和氧气在颗粒中的进出转移^[16],更有利于有害气体的去除。

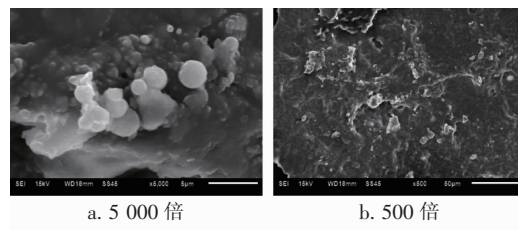


图10 生物膜结构

Fig. 10 Structure diagram of biofilm

如图 10(b) 所示,生物膜表面存在一些深入内部的孔洞或者沟渠的粗糙结构,可以保证流体在生物膜内的空隙通道形成对流,从而增大局部传质系数。粗糙的生物膜结构增大了生物膜的比表面积,深层的生物膜除了依靠扩散作用得到基质外,还可以从液相直接获得营养^[17],使得生物膜内部的细胞与表层细胞一样处于有氧状态,保持一定活性,并得到充分营养,这种结构有利于生物膜的生长发育,从而能有效去除水中的污染物质。以上结果表明,通过营造光照环境影响了生物膜的结构和组成,对管道有害气体的控制和污染物的转化去除起到了积极的影响。

2.5 光照抑制有害气体产生的机制

光照抑制污水管道内有害气体产生的可能机制如图 11 所示。污水中含有大量的硫酸盐及少量的有机硫化物,在厌氧条件下,硫酸根在沉积物和管壁污泥以及生物膜内硫酸盐还原菌(SRB)的作用下转化为硫化物^[18],其中,溶解性的硫化氢从液体逸散到气体中转换成气体状态,散发到空气中形成恶臭并腐蚀管道。通过在管道顶部敷设蓝光灯带,并由路面太阳能板供电,以此在管道中营造近明渠环境,促进污水中原有的藻细胞生长,在管道侧壁和水表面形成菌藻聚生体,其中微藻具有较高的光合活性,检测发现悬浮液中叶绿素 a 平均浓度在 50 $\mu\text{g/L}$ 左右,在 DO 值较低的环境中,微藻光合作用产生的氧气可以对厌氧环境造成一定的缓冲作用,从而影响 SRB 等厌氧菌的生长,降低硫化物含量,进而降低从水中逸散的硫化氢气体。

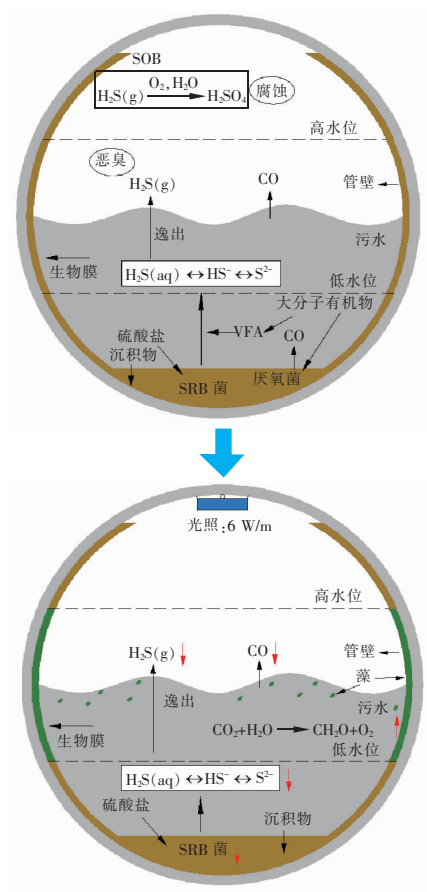


图11 光照抑制有害气体产生的机制

Fig. 11 Mechanisms of inhibiting harmful gas production by illumination

3 结论

① 通过在污水管道顶部敷设蓝光灯带营造光照环境,可以改善管道中的厌氧条件,抑制有害气体的产生。与黑暗环境的污水管道相比,在光照环境中管道中的 H_2S 气体浓度降低了 47.2%, CO 浓度降低了 59.8%。

② 光照环境下污水管道中生长的微藻具有较高的光合活性,在 DO 值较低的环境中,微藻光合作用产生的氧气可以对厌氧环境造成一定的缓冲作用,影响污水管道环境中厌氧菌的活性。

③ 营造光照环境可以改变污水管道的生态系统,增强污水中有机物的降解和氮类污染物的去除。在稳定阶段,光照环境下污水的 COD 和 TN 去除率分别达到 38.0% 和 17.0% 左右。

④ 营造光照环境可以改变生物膜结构,微藻与细菌聚集生长,形成表面有孔洞且粗糙的生物膜结构,促进氧气和代谢废物的转移,对有害气体的去除起到积极作用。

参考文献:

- [1] GANIGUE R, YUAN Z G. Impact of oxygen injection on CH_4 and N_2O emissions from rising main sewers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144: 279 – 285.
- [2] GUTIERREZ O, MOHANAKRISHNAN J, SHARMA K R, *et al.* Evaluation of oxygen injection as a means of controlling sulfide production in a sewer system [J]. *Water Research*, 2008, 42(17): 4549 – 4561.
- [3] GUTIERREZ O, SUDARJANTO G, REN G, *et al.* Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems [J]. *Water Research*, 2014, 48: 569 – 578.
- [4] ZHANG L S, KELLER J, YUAN Z G. Inhibition of sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms by ferric iron dosing [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4123 – 4132.
- [5] BENTZEN G, SMIT A T, BENNETT D, *et al.* Controlled dosing of nitrate for prevention of H_2S in a sewer network and the effects on the subsequent treatment processes [J]. *Water Science & Technology*, 1995, 31(7): 293 – 302.
- [6] JIANG G, KEATING A, CORRIE S, *et al.* Dosing free nitrous acid for sulfide control in sewers: results of field trials in Australia [J]. *Water Research*, 2013, 47(13): 4331 – 4339.
- [7] AUGUET O, PIJUAN M, GUASCH-BALCELLS H, *et al.* Implications of downstream nitrate dosage in anaerobic sewers to control sulfide and methane emissions [J]. *Water Research*, 2015, 68: 522 – 532.
- [8] JACOBSEN T H, VOLLERTSEN J, NIELSEN A H. *Sewer Processes: Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [9] SANTIAGO A F, CALIJURI M L, ASSEMANI P P, *et al.* Algal biomass production and wastewater treatment in high rate algal ponds receiving disinfected effluent [J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(13/14): 1877 – 1885.
- [10] DAS P, LEI W, AZIZ S S, *et al.* Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(4): 3883 – 3887.
- [11] SU Y, MENNERICH A, URBAN B. Municipal wastewater treatment and biomass accumulation with a wastewater-born and settleable algal-bacterial culture [J]. *Water Research*, 2011, 45(11): 3351 – 3358.

- [12] 金鹏康,焦丁,王宝宝,等. 城市污水管网内生物菌群演替规律[J]. 环境科学学报,2014,34(11):2785-2791.
JIN Pengkang, JIAO Ding, WANG Baobao, *et al.* Variation of microbial population in sewer networks[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(11):2785-2791 (in Chinese).
- [13] TANG C C, ZUO W, TIAN Y. Effect of aeration rate on performance and stability of algal-bacterial symbiosis system to treat domestic wastewater in sequencing batch reactors[J]. Bioresource Technology, 2016, 222:156-164.
- [14] GUEYSSE B, BORDE X, MUNOZ R, *et al.* Influence of the initial composition of algal bacterial microcosms on the degradation of salicylate in fed batch culture[J]. Biotechnology Letters, 2002, 24:531-538.
- [15] MARKOU G, VANDAMME D, MUYLAERT K. Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients[J]. Water Research, 2014, 65:186-202.
- [16] ZHANG B, LENS P N L, SHI W X, *et al.* Enhancement of aerobic granulation and nutrient removal by an algal-bacterial consortium in a lab-scale photobioreactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334:2373-2382.
- [17] 于鑫,李旭东,杨俊仕,等. 微污染原水生物预处理工艺中生物膜的形态和活性[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1):37-39.
YU Xin, LI Xudong, YANG Junshi, *et al.* Biofilm morphology and activity in biopretreatment for polluted raw water[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2003, 16(1):37-39 (in Chinese).
- [18] 张二飞. 建筑排水吸入气流改善污水管网通风状态的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
ZHANG Erfei. Research on Enhancing the Ventilation of the Sewer by the Inhaled Airflow Because of Building Drainage[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017 (in Chinese).

作者简介:李亚芹(1995-),女,山东潍坊人,硕士研究生,从事水处理理论与技术研究。

E-mail:15109289278@163.com

收稿日期:2020-09-23

修回日期:2020-11-19

(编辑:刘贵春)

(上接第27页)

- XU Hao, LI Jie, LUO Fan, *et al.* Characteristics and microbial populations distribution of shortcut nitrification with low C/N ratio urban sewage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3):1477-1481 (in Chinese).
- [4] 王翠. 不同 C/N 比低浓度污水的 A/O/N 脱氮研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
WANG Cui. Research on Nitrogen Removal of Wastewater with Low Concentration and Different C/N by A/O/N Process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006 (in Chinese).
- [5] ZHANG X L, WANG Z Y. Short-cut nitrification in a biological turbulent bed reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(1):28-30.
- [6] 王敏,汪建根,王琴,等. 有机碳源和 DO 对短程硝化的影响[J]. 水处理技术, 2010, 36(8):56-58.
WANG Min, WANG Jiagen, WANG Qin, *et al.* Influence of organic carbon and DO on partial nitrosification[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(8):56-58 (in Chinese).
- [7] 卞伟,李军,赵白航,等. 硝化污泥中 AOB/NOB 对硝化特性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8):2395-2401.
BIAN Wei, LI Jun, ZHAO Baihang, *et al.* The effect of AOB/NOB in nitrifying sludge on nitrification characteristics[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8):2395-2401 (in Chinese).
- [8] 曾薇,张悦,李磊,等. 生活污水常温处理系统中 AOB 与 NOB 竞争优势的调控[J]. 环境科学, 2009, 30(5):1430-1436.
ZENG Wei, ZHANG Yue, LI Lei, *et al.* Competition and optimization of AOB and NOB for domestic wastewater treatment at normal temperatures[J]. Environmental Science, 2009, 30(5):1430-1436 (in Chinese).

作者简介:徐浩(1986-),男,山东滨州人,硕士,工程师,研究方向为污水处理。

E-mail:xuhaoemail@163.com

收稿日期:2020-01-03

修回日期:2020-03-05

(编辑:刘贵春)