



光合细菌挂膜碳纤维生态草净化微污染缓流河水

张正红¹, 向天勇¹, 何文辉¹, 陆惠明²

(1. 嘉兴职业技术学院现代农业学院, 浙江嘉兴 314036; 2. 嘉善县姚庄镇农业农村办, 浙江嘉兴 314117)

[摘要] 在模拟河道反应池中装填光合细菌挂膜碳纤维生态草, 对微污染缓流河水进行净化处理, 研究了挂膜碳纤维生态草装填密度、水力停留时间、溶解氧和光照对污染物去除效果的影响, 并与河水中土著微生物挂膜碳纤维生态草进行了对比实验。结果表明, 提高光合细菌挂膜碳纤维生态草装填密度会改善污染物的去除效率, 增加水力停留时间会降低水流速度和剪切速率, 使生物膜的生长更加稳定, 溶解氧浓度和光照条件的变化对河水中污染物的去除效果影响较小。挂膜碳纤维生态草装填密度为 180 g/m^3 , 水力停留时间为 24 h, 无曝气和外加光照, 通过光合细菌挂膜碳纤维生态草的作用, 能明显改善对河水中污染物的去除效果, 出水 COD_{Mn} 、 NH_4^+-N 、TN、TP 分别低于 4.52、0.68、1.00、0.17 mg/L, 达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的Ⅲ类水标准。反应系统抗冲击负荷能力强, 适应贫营养环境, 能有效净化微污染缓流河水。

[关键词] 光合细菌; 碳纤维生态草; 挂膜; 缓流水体; 净化

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)05-0092-09

Purification of slightly polluted slow-flow river water by carbon fiber ecological grass covered with photosynthetic bacteria biofilm

ZHANG Zhenghong¹, XIANG Tianyong¹, HE Wenhui¹, LU Huiming²

(1. Modern Agricultural College, Jiaxing Vocational Technical College, Jiaxing 314036, China;

2. Agricultural and Rural Office of Yaozhuang Town, Jiaxing 314117, China)

Abstract: The carbon fiber ecological grass covered with photosynthetic bacteria biofilm was filled in the simulated river reaction tank to purify the slightly polluted slow-flow water. The effects of filling density of carbon fiber ecological grass, hydraulic retention time, dissolved oxygen concentration and light intensity on the removal of pollutants were studied. Comparative experiment was carried out between the carbon fiber ecological grass covered with photosynthetic bacteria biofilm and the carbon fiber ecological grass covered with the indigenous microorganism biofilm. The results showed that the increase of the filling density of carbon fiber ecological grass covered with photosynthetic bacteria biofilm will improve the removal efficiency of pollutants. With the increasing of hydraulic retention time, the water flow velocity and shear rate reduced, and the growth of biofilm was more stable. The changes of dissolved oxygen concentration and light conditions had little effect on the removal of pollutants in river water. When the filling density of carbon fiber ecological grass was 180 g/m^3 , hydraulic retention time was 24 h, without aeration and lighting, the removal effect of pollutants in river water could be obviously improved by the carbon fiber ecological grass covered with photosynthetic bacteria biofilm. The concentrations of COD_{Mn} , NH_4^+-N , TN and TP in the effluent were below 4.52 mg/L, 0.68 mg/L, 1.00 mg/L and 0.17 mg/L respectively. All the effluent met the class Ⅲ water quality specified in the environmental quality standard for surface water (GB 3838—2002). The reaction system had strong anti-shock loading capability and adapt to poor nutritional environment, which could effectively purify slightly polluted slow-flow river water.

Key words: photosynthetic bacteria; carbon fiber ecological grass; covered with biofilm; slow-flow river water; purification

[基金项目] 嘉兴市公益性研究计划项目(2019AY11016); 嘉善县科技计划项目(2019D01)

嘉兴市地势平坦,河网密布,湖荡众多,大小河、湖纵横相联,形成了一个平原水网,水力坡度小,水流平缓,属于典型的缓流水体,由于堤岸大都采取了硬化措施,影响了周丛生物对水体中污染物的去除作用,自净能力较弱,部分河段氮、磷等污染物浓度高于GB 3838—2002地表水Ⅲ类水体标准,水体呈现微污染状态。为了实现地表水达到或优于Ⅲ类水质的目标,需要进一步修复提升水质。

微污染河道修复有生态浮床、生物接触氧化、投加微生物菌剂等方法,生态浮床易产生二次污染,生物接触氧化法需曝气充氧,投加微生物菌剂效果较好,但容易流失。生物膜修复技术适应能力强,治理后水质稳定,在污染水体修复和治理中日益受到人们的关注,其核心是形成具有良好性能的生物膜,而生物膜载体直接关系着生物膜的形成与处理效率^[1-3]。碳纤维生态草密度低、柔性好、比表面积大、生物亲和性强,有利于微生物附着生长,作为生物膜的载体材料可实现吸附及生物膜双重修复功能^[4-9]。采用碳纤维生态草修复微污染河水时,河水中缺少碳源等营养物质,对微生物新陈代谢有一定的抑制作用,土著微生物含量少,导致生物膜不易生长和较易脱落,会影响碳纤维生态草对微污染河水的修复作用。如何在贫营养环境中保持微生物代谢活性,改善挂膜效果,提高水质净化能力,是碳纤维生态草修复微污染河水时需要解决的关键问题,有必要研究在外加微生物的强化作用下挂膜碳纤维生态草对微污染河水的修复效果。

光合细菌可以利用光能进行高效的能量代谢,即使微弱的光照也能进行,也可以在有氧条件下分解有机物,通过氧化磷酸获得能量,对水质适应性强,能有效地利用水体中有机物、氮、磷进行新陈代谢活动,作为有益微生物可用于水体净化^[10-15],在碳纤维生态草上挂膜后可提高对低浓度污染物的去除效率。本研究以嘉兴市某段内河原水为研究对象,采用自制的推流式模拟河道反应池,以碳纤维生态草为生物膜载体,投加光合细菌强化挂膜,考察光合细菌在碳纤维生态草上形成生物膜后对微污染缓流水体净化效果,分析碳纤维生态草装填密度、水力停留时间(HRT)、溶解氧(DO)和光照强度等因素对污染物去除效果的影响,对比研究光合细菌强化挂膜

碳纤维生态草与河水中土著微生物挂膜生态草的净化效果,以期为微污染缓流河水的原位修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用水:取自嘉兴市区某段内河,水体基本不流动,微浊,实验期间水质情况如表1所示。

表1 实验用水水质

水质指标	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	DO	pH
最大值	9.65	1.52	3.62	0.25	5.8	8.08
最小值	4.47	0.46	1.24	0.13	1.2	7.96
GB 3838—2002 Ⅲ类水标准	≤6	≤1	≤1	≤0.2	≥5	6~9

注:除pH外,其余水质指标单位均为mg/L。

光合细菌:购自上海光语生物科技有限公司,为红假单胞菌(*Rhodopseudomonas*)。

光合细菌培养基:乙酸钠3.3 g/L、氯化铵0.6 g/L、磷酸二氢钾0.9 g/L、硫酸镁0.5 g/L、酵母膏1.5 g/L, pH 7.0~7.2。

碳纤维生态草:购自海宁市安捷复合材料有限责任公司,选用六边形环状碳纤维生态草。每串碳纤维生态草由10个六角环沿纤维绳的长度依次间隔布置,六角环圆环直径为70 mm,每个六角环上共有6束长20 cm、直径7 μm的1 200根碳纤维丝集合而成,每根环碳纤维质量为2 g。

1.2 实验装置

微污染河水处理工艺如图1所示。

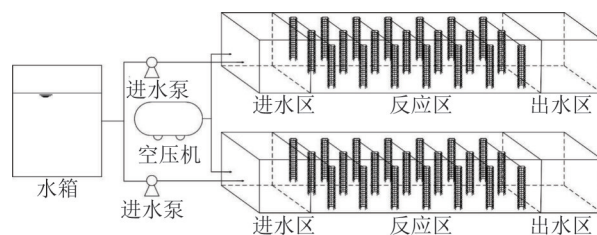


图1 微污染河水处理工艺

Fig. 1 Process of slightly polluted river water treatment

实验采用2套自制的模拟河道反应池,长4 000 mm、宽1 000 mm、高1 200 mm,有效水深1 000 mm,推流式运行。反应池由玻璃钢材料制成,分为进水区、反应区、出水区3部分,进水区长500 mm,为了保持实验期间进水中DO在2 mg/L以上,防止曝气导致反应区生物

膜脱落,在进水区设置膜片微孔曝气器,通过PLC控制曝气器运行;反应区长3 000 mm,池中均匀布置碳纤维生态草,反应区上方30 cm高度每平方米设置1个40 W白炽灯光源,光照强度范围2 500~3 000 lx;出水区长500 mm,兼具沉淀池作用,溢流出水,适量养殖田螺等水生动物,滤食脱落的生物膜和微生物颗粒。

1.3 实验方法

1.3.1 光合细菌培养

将光合细菌菌种(OD_{660} 为1.20)以1:10接种量接入灭菌后的培养基中,在光照强度为2 500~3 000 lx,温度为30 °C的条件下培养3 d,即可进入对数增殖期(OD_{660} 为1.68)。

1.3.2 碳纤维生态草挂膜

模拟河道反应池在室内条件下运行,碳纤维生态草悬挂放置,位于液面下2~3 cm,碳纤维生态草装填量为180 g/m²(9串)。河水由潜水泵泵入水箱,含有少量底泥,采用连续进水方式,使用计量泵作为进水泵调节进水流量,分配至2套反应池中,反应池中水流速度为0.125 m/h。进水区HRT为4 h,反应区HRT为24 h,出水区HRT为4 h,无回流。反应池进水区每3天以泼洒的方式加入体积分数为0.3%的处于对数增殖期的光合细菌,为了减少光合细菌培养液中氮磷和有机碳源对水质的影响,光合细菌挂膜和水质净化分别在2个反应池中进行。当水中DO低于2.0 mg/L时,曝气装置开启,达到所需的DO时曝气装置停止,不固定曝气时间间隔。反应区白天自然光照,晚上光照强度为2 500~3 000 lx。经过30 d培养后,碳纤维生态草上生物膜厚度明显增加,生物膜表层有红色絮状覆盖物,表明碳纤维生态草挂膜成功,反应池进入稳定运行状态,水体中会有部分光合细菌悬浮在水中,包括部分脱落下来的生物膜。此后,一套反应池作为实验用反应池;另一套反应池继续用于碳纤维生态草挂膜,补充后续实验所需挂膜碳纤维生态草。为了保证实验中碳纤维上生物膜中光合细菌量在单位质量生态草上的一致性,挂膜时候各种条件应尽量保持一致。

1.3.3 挂膜碳纤维生态草装填密度的影响

碳纤维生态草挂膜成功后,固定HRT为24 h,保持DO在2 mg/L以上,无外加光照,设置反应池中

挂膜碳纤维生态草(以碳纤维量计)的装填密度分别为100、140、180、240 g/m³,分别运行10 d,每2天采样分析,根据不同装填密度的挂膜碳纤维生态草对河水中污染物的去除效率,研究挂膜碳纤维生态草装填密度对污染物去除的影响。

1.3.4 HRT的影响

确定碳纤维装填量后,固定其他条件,通过计量泵控制进水流速,调节HRT分别为8、16、24、32 h,分别运行10 d,每2天采样分析,根据不同HRT下河水中污染物的去除效率,确定最佳HRT。

1.3.5 DO的影响

为了解DO对污染物去除效果的影响,设置了曝气装置。在确定最佳HRT后,固定其他条件,控制曝气量使反应池中DO为1.2、2.4、3.6、4.8 mg/L,分别运行10 d,每2天采样分析,根据不同DO条件下污染物的去除效率,选择合适的DO。

1.3.6 光照的影响

光照会对光合细菌的代谢产生一定影响,固定其他条件,在无外加光照(白天室内光照强度为200~2 000 lx、夜晚无光照)、光暗比12:12(白天光照强度为2 500~3 000 lx、夜晚无光照)、全光照(全天光照强度为2 500~3 000 lx)的条件下分别运行10 d,每2天采样分析,根据不同光照条件下污染物的去除效率选择优化光照条件。

1.3.7 光合细菌挂膜碳纤维生态草净化效果对比

根据实验确定的最佳工作条件,在碳纤维生态草装填密度、HRT、DO、光照等条件完全相同的情况下,一个反应池(R1)中装填碳纤维生态草,以河水和底泥中原有的土著微生物菌群为种源完成挂膜;另一个反应池(R2)中装填光合细菌强化挂膜碳纤维生态草,平行运行30 d,对比分析光合细菌强化挂膜碳纤维生态草对微污染缓流河水的净化效果。

1.4 分析测试方法

DO采用DZB-718L水质分析仪(上海雷磁)现场检测;COD_{Mn}采用高锰酸盐指数法测定;NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP采用钼酸铵分光光度法测定;光合细菌浓度采用分光光度法分析。

2 结果与讨论

2.1 挂膜碳纤维生态草装填密度的影响

对微生物而言,微污染缓流河水是一种贫营养的生活环境。光合细菌对碳源的利用方式可以分为光能自养型、光能异养型和兼性营养型,能同化二氧化碳或其他有机物,适应性强,可以利用低浓度的营养物质。碳纤维生态草上由土著微生物和光合细菌等形成的生物膜对环境适应能力强,在水中营养物质不足的情况下也能保持较好的活性。随着挂膜碳纤维生态草装填密度的增加,反应池中生物膜量不断增加,净化作用增强,对营养物质的需求量也不断增加,有研究表明,光合细菌生物膜能够在适宜的条件下将 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TP 和 COD_{Mn} 同步去除^[16]。挂膜碳纤维生态草装填密度对河水中污染物去除效果的影响如图2所示。

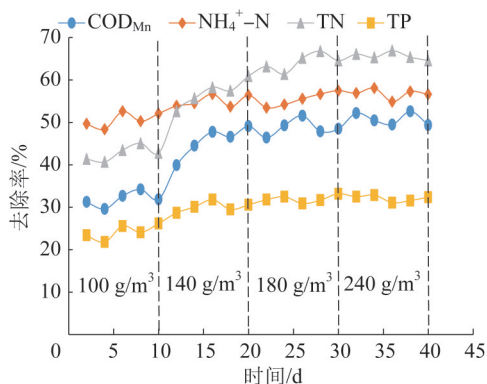


图2 碳纤维生态草装填密度对污染物去除效果的影响

Fig. 2 Effect of filling density of carbon fiber ecological grass on pollutant removal

由图2可知,挂膜碳纤维生态草密度分别为100、140、180、240 g/m^3 时, COD_{Mn} 平均去除率分别为31.94%、45.58%、48.74%、50.84%,当碳纤维生态草密度从100 g/m^3 增加到140 g/m^3 时, COD_{Mn} 去除效率明显增加,随着装填密度的提高,微生物量也随之增加,有机物持续被光合细菌和土著微生物等代谢活动所消耗,增加了 COD_{Mn} 的去除效果。然而,碳纤维生态草密度的增加会减缓反应池中的传质与扩散作用,生物膜中微生物对营养物质的竞争吸收也会导致部分微生物的活性受到抑制,降低反应池的净化效率,当挂膜碳纤维生态草密度由180 g/m^3 增加到240 g/m^3 , COD_{Mn} 去除率增加幅度不大。相对来说,随着碳纤

维生态草密度的增加, NH_4^+-N 去除率增幅较小, NH_4^+-N 平均去除率分别为50.62%、55.04%、55.50%、56.76%,说明在河水中 NH_4^+-N 浓度较低的情况下,较低密度的碳纤维生态草就能够取得较好的去除效果,这可能是因为光合细菌不仅可以有效利用废水中的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N ,而且可以将 NH_4^+-N 直接氧化为 $\text{N}_2/\text{N}_2\text{O}$ ^[17],通过生物膜中光合细菌和硝化细菌的共同作用,加上碳纤维生态草的吸附作用,能有效降低 NH_4^+-N 。当碳纤维密度从100 g/m^3 增加到140 g/m^3 时, NH_4^+-N 平均去除率从50.62%增加到55.04%,此后,继续增加碳纤维生态草密度, NH_4^+-N 去除率基本保持稳定。当碳纤维生态草密度变化时,TN去除率变化趋势和 COD_{Mn} 类似,TN平均去除率分别为42.70%、57.00%、64.24%、65.66%,当碳纤维生态草密度从100 g/m^3 增加到140 g/m^3 时,TN去除率增加最为显著。由于传质作用等因素的限制,尽管光合细菌生物膜有好氧和厌氧反硝化除亚硝态氮的能力^[15],进一步增加碳纤维生态草密度并不能显著提高TN去除效果,当碳纤维生态草密度从180 g/m^3 增加到240 g/m^3 时,TN平均去除率仅从64.24%增加到65.66%。对TP而言,一部分会随着悬浮物附着在碳纤维表面,另一部分会被微生物代谢所吸收利用,在碳纤维生态草密度较低(100 g/m^3)的情况下,TP去除率也受到一定限制(TP平均去除率24.22%)。由于实验期间河水中TP普遍较低,在持续增加碳纤维生态草密度情况下,即使有光合细菌和聚磷菌的共同作用,河水中TP降低幅度依然不大,碳纤维生态草密度分别为140、180、240 g/m^3 时,TP去除率基本稳定,分别为30.14%、32.02%、32.10%。为了保证微污染河水的净化效果,选择挂膜碳纤维生态草装填密度为180 g/m^3 (9串)。

2.2 HRT的影响

HRT决定了碳纤维生态草上的生物膜和水中污染物的接触反应时间。增加HRT,流速减缓,降低了反应池中水流对碳纤维生态草和生物膜的剪切作用,改善了水中污染物和生物膜的混合与接触,增加了河水在反应池内的反应时间,提高了贫营养环境中生化作用的效果。不同HRT对河水中污染物去除效果的影响如图3所示。

由图3可知,随着HRT的增加, COD_{Mn} 去除率呈

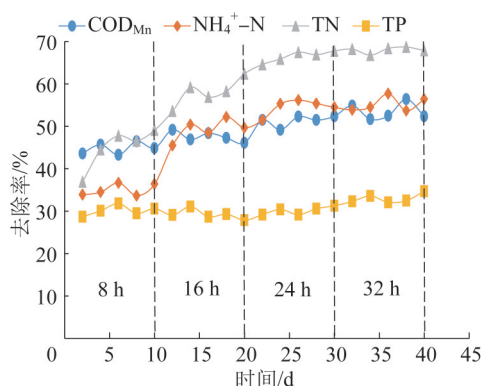


图3 HRT对污染物去除效果的影响

Fig. 3 Effect of HRT on pollutant removal

现持续小幅增加的趋势, HRT分别为8、16、24、36 h时, COD_{Mn}平均去除率分别为44.80%、47.58%、51.38%、53.58%,说明较高的水流速度会使反应池内生物膜中光合细菌等微生物接触反应时间变少, COD_{Mn}得不到及时的去除, 而较低的水流速度虽然可能会增大传质阻力, 使得COD_{Mn}不能快速扩散至生物膜中, 但是增加了河水在反应池内的停留时间, COD_{Mn}消耗量比在较高流速下的COD_{Mn}消耗量要高。HRT为24 h以上时, COD_{Mn}去除率保持相对稳定, 表明水力负荷在一定范围内的波动不会显著影响反应装置的性能。相比而言, HRT对NH₄⁺-N去除率的影响较为明显, 当HRT为8 h时, NH₄⁺-N在生物膜内的扩散作用、光合细菌和硝化细菌等微生物对NH₄⁺-N的代谢作用受到一定的影响, NH₄⁺-N平均去除率仅为35.04%。增加HRT会降低水流速度和剪切速率, 增加生物反应时间, 使生物膜的生长更加稳定, HRT分别增加至16、24、36 h时, NH₄⁺-N平均去除率分别达到49.26%、54.58%、55.24%。同样, TN去除效率变化情况和HRT也存在较为明显的相关性, TN平均去除率随HRT增加而变化, 分别为45.58%、58.08%、66.54%、68.00%。实验条件下TP去除效率与HRT的关系并不明显, 尽管在HRT较高的情况下(36 h), TP的去除效果最好, 但改变HRT并不会导致TP平均去除率产生明显变化, TP平均去除率分别为30.14%、29.22%、30.14%、33.04%, 这可能是因为水中的TP会随着悬浮物在较短的时间内吸附在碳纤维生态草和生物膜中, 浓度迅速下降, 去除效果较为稳定。综合各种污染因子的去除效果, 选择HRT为24 h。

2.3 DO的影响

DO不仅影响硝化细菌、聚磷菌和好氧微生物的代谢活动, 也会对光合细菌的生长产生影响。光合细菌在厌氧光照或好氧黑暗条件下能进行完全自养性或光能异养性生长, 适应厌氧、微氧、好氧等不同的环境条件。有学者研究了DO对光合细菌处理废水过程中关键酶活性的影响, 发现有氧条件下呼吸酶活性增加, 有利于污染物的降解, 而无氧条件下光合酶活性增加, 促进光合细菌生长^[18]。不同DO对污染物去除效果的影响如图4所示。

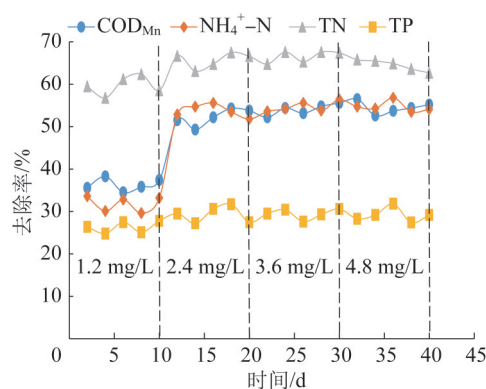


图4 DO对污染物去除效果的影响

Fig. 4 Effect of DO on pollutant removal

由图4可知, DO对光合细菌挂膜碳纤维生态草去除COD_{Mn}有着较为明显的作用。DO为1.2 mg/L时, 反应池中处于微氧状态, COD_{Mn}平均去除率为36.32%, 当DO分别为2.4、3.6、4.8 mg/L时, 反应池处于常规生物处理中的典型好氧状态, COD_{Mn}平均去除率保持在较高水平, 分别达到52.22%、54.04%、54.48%, 这说明较高的DO更有利于光合细菌对COD_{Mn}的降解与去除。由于光合细菌对pH、温度、DO等环境条件的适应能力强, 即使DO较低的情况下(1.2 mg/L), 氨氮平均去除效率也能达到31.68%, 而充足的DO也可以保证较高的NH₄⁺-N去除效率, 随着DO的增加, 在光合细菌和硝化细菌等土著微生物的共同作用下, NH₄⁺-N平均去除率达到了53.70%、54.72%、54.68%。当DO在1.2~4.8 mg/L范围内变化时, TN去除率呈现先升高后平稳的趋势, 波动情况不大, TN平均去除率分别为59.70%、65.74%、66.54%、64.50%, 这可能是因为光合细菌能够有效地利用NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N等各种形态的氮源, 当DO较低时, 光合细菌和反硝化细菌的共

同作用能够实现较高的氨氮去除效果,而在 DO 较高的情况下,不通过反硝化作用也能有较高的 TN 去除率。尽管 DO 的增加会增强聚磷菌的代谢活性,但 DO 的变化对 TP 去除率的影响并不大,DO 依次增加时 TP 平均去除率分别为 26.32%、29.30%、29.48%、29.18%,说明在河水中 TP 较低的情况下,反应池中主要通过光合细菌的氧化磷酸化和光磷酸化作用来降低 TP。图 4 表明,当 DO 为 2.4 mg/L 时,各种污染物就能够得到有效的降解和去除。由于生物膜中微生物的生长增殖、分解污染物需要一个相对稳定的环境,而曝气使水体处于一种搅动状态,容易导致部分生物膜冲散、脱落,影响反应池的处理效果,加之实验条件下河水中的 DO 大多超过 2.4 mg/L,因此本实验选择在不曝气的情况下进行反应池的运行操作。

2.4 光照影响

光氧条件是影响光合细菌代谢的重要环境因素。厌氧环境中,光照强度会对光合细菌的光代谢产生影响;好氧环境中,光合细菌无需光照即可进行正常氧代谢;微氧环境中,光合细菌可以在无外加光照的条件下通过光代谢和氧代谢 2 种途径降解污染物。由于光合细菌挂膜碳纤维生态草反应池中有填料、生物膜和一定量的悬浮物,影响光线的透过,加之实验期间反应池基本处于微氧或好氧状态,光照的变化对反应池的整体运行效果有一定的影响,不同光照条件对污染物去除效果的影响如图 5 所示。

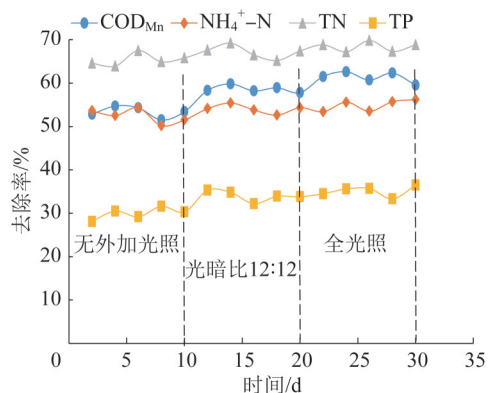


图 5 光照对污染物去除效果的影响

Fig. 5 Effect of light intensity on pollutant removal

由图 5 可知,在无外加光照的条件下,COD_{Mn}也能得到较为有效的降解和利用,COD_{Mn}平均去除率可达到 53.34%,光暗比改变为 12:12 时,COD_{Mn}平均

去除率升高至 58.60%,在全光照的条件下,COD_{Mn}平均去除率达到 61.32%。总体来看,COD_{Mn}的去除率随光照的增强而有所提高,说明在微氧或者好氧条件下,增加光照强度会促进光合细菌、藻类和河水中土著微生物的代谢活动,改善 COD_{Mn}的净化效果。在 3 种不同的光照条件下,NH₄⁺-N 的去除率基本维持在稳定的水平,分别为 52.42%、54.04%、54.88%,表明光照强度的变化对 NH₄⁺-N 的去除效果影响不大,在河水 NH₄⁺-N 较低的情况下,无需外加光照就可以实现 NH₄⁺-N 的有效去除。相对而言,河水中 TN 明显高于 NH₄⁺-N,TN 去除率随光照强度的变化趋势和 NH₄⁺-N 相近,在无外加光照条件下基本达到了最佳净化效果,TN 平均去除率为 65.34%,而有外加光照的情况下(光暗比 12:12、全光照)TN 平均去除率分别为 67.18%、68.38%,增幅不大,说明光氧共存的环境条件下,改变光照强度并不会显著影响光合细菌等微生物对 TN 的吸收利用效果。与无外加光照条件相比,光暗比为 12:12 时 TP 的平均去除率有一定的增加,从 29.94% 增加到 34.00%,而全光照条件下 TP 去除率仅增加至 35.15%,说明改变光照条件会对光合细菌的光磷酸化作用产生一定的影响,但在光合细菌的氧化磷酸化作用和聚磷菌等微生物的作用下,反应池中低浓度 TP 去除效果稳定。本实验选择在无外加光照的条件下进行水质净化。

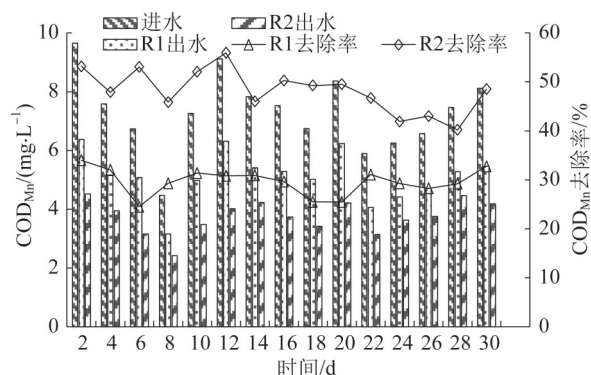
2.5 光合细菌挂膜碳纤维生态草净化效果对比

利用水体自身存在的土著微生物来修复微污染水体,难度大且所需要消耗的时间长,无法有效恢复水质。和 R1 反应池相比,R2 反应池中加入了光合细菌,丰富了微生物类型,增加了微生物数量,改善了生物膜活性,能够有效净化水质。由于嘉兴市内河水水质超标情况多发生在 6 月—10 月期间,水温适宜微生物生长,实验在 9 月 15 日—10 月 14 日之间进行。

2.5.1 COD_{Mn}的净化效果

COD_{Mn}会影响异养微生物的生长繁殖,而光合细菌在不同的光氧条件下能够适应 COD_{Mn}的变化,COD_{Mn}的净化效果如图 6 所示。

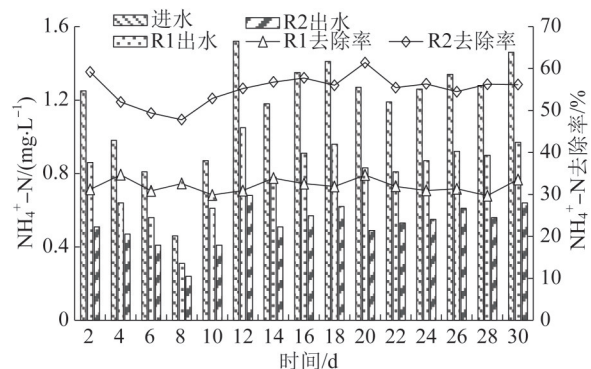
由图 6 可知,进水 COD_{Mn}为 4.47~9.65 mg/L 时,R2 反应池比 R1 反应池能更好地适应水质变化,在 COD_{Mn}较低的情况下也有较为明显的净化效果。经

图6 COD_{Mn} 去除效果Fig. 6 Removal efficiencies of COD_{Mn}

过R1反应池处理后,出水 COD_{Mn} 为3.16~6.37 mg/L,部分情况超过6 mg/L, COD_{Mn} 去除率达到24.52%~33.99%, COD_{Mn} 平均去除率为29.62%,说明自然挂膜碳纤维生态草中各种微生物对 COD_{Mn} 有一定的去除作用。在光合细菌挂膜碳纤维生态草的作用下,R2反应池中 COD_{Mn} 去除效果明显提高,出水 COD_{Mn} 为2.42~4.52 mg/L, COD_{Mn} 去除率达到40.21%~55.92%, COD_{Mn} 平均去除率为48.22%,说明在白天自然光照和晚上黑暗的变化过程中,河水中的 COD_{Mn} 通过多种代谢途径得到了降解。

2.5.2 NH_4^+-N 的净化效果

水体中的 NH_4^+-N 可以通过硝化细菌的作用来降解, NH_4^+-N 的增加会促进硝化细菌的增长,而光合细菌也能有效地利用水中的 NH_4^+-N , NH_4^+-N 的净化效果如图7所示。

图7 NH_4^+-N 去除效果Fig. 7 Removal efficiencies of NH_4^+-N

由图7可知,实验期间河水 NH_4^+-N 较低,进水 NH_4^+-N 在0.46~1.52 mg/L之间波动,R2反应池中 NH_4^+-N 的去除效果较为稳定。经过R1反应池处理

后,出水 NH_4^+-N 为0.31~1.05 mg/L,个别情况超过1 mg/L, NH_4^+-N 去除率达到29.69%~34.69%, NH_4^+-N 平均去除率为32.04%,由此可见,自然挂膜碳纤维生态草上的硝化细菌,能够去除微污染河水中部分的 NH_4^+-N 。而光合细菌能显著改善微污染河水中的 NH_4^+-N 的去除作用,R2反应池出水 NH_4^+-N 为0.24~0.68 mg/L, NH_4^+-N 去除率随着进水 NH_4^+-N 的变化在47.83%~61.42%范围内有所波动, NH_4^+-N 平均去除率为55.15%。实验过程中,R2反应池中微生物凝聚力强,比较易于挂膜生长。

2.5.3 TN 的净化效果

实验条件下反应池基本处于好氧状态,会影响到反硝化作用的进行,而光合细菌可以有效地利用水中的 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N ,TN的净化效果如图8所示。

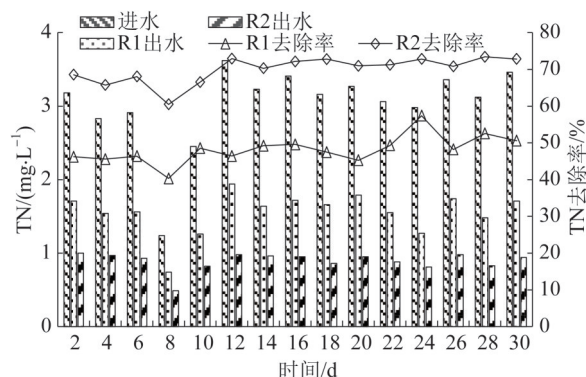


图8 TN 去除效果

Fig. 8 Removal efficiencies of TN

由图8可知,进水TN为1.24~3.62 mg/L时,经过R1反应池处理后,出水中TN为0.74~1.94 mg/L,绝大部分超过1.5 mg/L,TN去除率为40.32%~57.38%,TN平均去除率为48.21%,需要进一步采取措施改善TN的去除效果。在光合细菌的强化作用下,R2反应池中TN去除率明显提高,实验期间出水TN为0.49~1.00 mg/L,TN去除率达到60.48%~73.40%,TN平均去除率为69.97%,说明光合细菌能有效地降低出水中的TN浓度。

2.5.4 TP 的净化效果

吸附和聚磷菌等微生物的作用是自然挂膜碳纤维生态草去除TP的主要途径,光合细菌通过氧化磷酸化和光磷酸化作用可降低河水中的TP,TP的净化效果如图9所示。

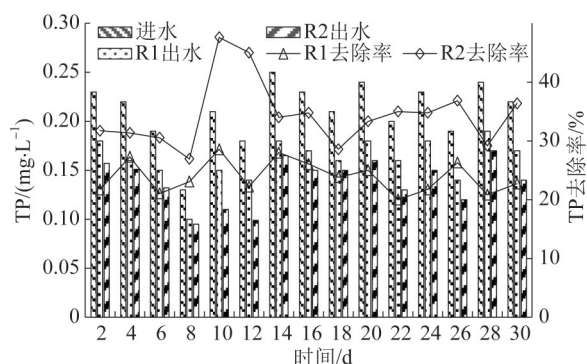


图9 TP去除效果

Fig. 9 Removal efficiencies of TP

由图9可知,实验河水中TP较低,波动范围为0.13~0.25 mg/L, R1、R2反应池中TP去除效果均比较稳定。R1反应池出水中TP为0.10~0.19 mg/L,全部低于0.2 mg/L, TP去除率为20.00%~28.57%, TP平均去除率为22.73%,部分聚磷菌存在于悬浮污泥中,会随着出水流出。在光合细菌等微生物的共同作用下, R2反应池中TP去除效果进一步提高,出水TP为0.10~0.17 mg/L, TP去除率达到26.92%~47.62%, TP平均去除率为36.36%,说明光合细菌能适应贫营养的环境,可以有效改善微污染水体中的TP净化效果。

以上结果表明,在不曝气、无外加光照的情况下,光合细菌挂膜碳纤维生态草可有效地改善对微污染河水 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除效果。实验期间,尽管河水中污染物浓度有一定波动,但处理后出水水质全部达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水标准,为微污染缓流水体原位净化提供了参考依据。该方法可灵活调整处理规模,比较适合嘉兴等江南水乡的内河修复。

3 结论

(1)随着光合细菌挂膜碳纤维生态草装填密度的提高,污染物的去除率有一定增加,但增加碳纤维生态草密度会减缓反应池中的传质与扩散作用,生物膜中微生物对营养物质的竞争吸收也会导致部分微生物的活性受到抑制,降低反应池的净化效率。当光合细菌挂膜碳纤维生态草密度为 180 g/m^3 (9根/ m^3)时,即可有效处理微污染河水。

(2)增加HRT会降低水流速度和剪切速率,增加生物反应时间,使生物膜的生长更加稳定,当HRT为24 h时,生物反应系统运行稳定,污染物综合去除率高。

(3)在光合细菌的强化作用下,河水中污染物去除率受DO变化影响较小,加之实验条件下河水中DO较为充足,本实验中反应池在不曝气的情况下正常运行。

(4)改变光照条件会对光合细菌的光磷酸化作用产生一定的影响,但通过光合细菌的氧化磷酸化作用和其他土著微生物的作用,反应池中低浓度污染物去除效果较为稳定。本实验选择在没有外加光照的条件下进行水质净化。

(5)在无曝气、无外加光照的情况下,光合细菌挂膜碳纤维生态草能有效净化微污染缓流河水,可作为微污染缓流水体原位净化的参考依据。

参考文献

- [1] 李驰昊,施永生,赵璇,等. 阿科曼介质生物接触氧化法预处理微污染原水[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2317-2323.
LI Chihao, SHI Yongsheng, ZHAO Xuan, et al. Pretreatment of micro-polluted raw water by biological contact oxidation with Aqua Mats medium[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2317-2323.
- [2] 吕学研,季铁梅,阮晓红. 生物接触氧化法净化供水原水现场试验[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 6-10.
LÜ Xueyan, JI Tiemei, RUAN Xiaohong. Field experiment on treatment of source water supply by biological contact oxidation process[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(2): 6-10.
- [3] 吴雷祥,刘玲花,周怀东,等. 生物接触氧化法处理农村河道受污染水体中试研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 162-167.
WU Leixiang, LIU Linghua, ZHOU Huaidong, et al. The pilot-test study on purifying contaminated stream water of the rural area in China based on biological contact oxidation process[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(29): 162-167.
- [4] MATSUMOTO S, OHTAKI A, HORI K. Carbon fiber as an excellent support material for wastewater treatment biofilms[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(18): 10175-10181.
- [5] 王凤芹,杨乐,侯淑芬,等. 活性炭纤维生态草对水体氨氮脱除的影响[J]. 江西农业学报, 2013, 25(6): 116-118.

- WANG Fengqin, YANG Le, HOU Shufen, et al. Effect of activated carbon fiber ecological grass on removal of ammoniac nitrogen in water body[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(6): 116-118.
- [6] 李思敏, 黄帅, 徐明. 碳纤维人工水草技术处理湖泊水的试验研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(1): 81-85.
- LI Simin, HUANG Shuai, XU Ming. The research on the treatment of polluted pool by the technology of carbon fiber artificial plants[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2016, 33(1): 81-85.
- [7] 樊开青, 徐炎华, 章子昂, 等. 碳纤维生态草技术协同曝气对黑臭水体的修复[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(13): 331-336.
- FAN Kaiqing, XU Yanhua, ZHANG Ziang, et al. Restoration of black-odor water body by using carbon fiber ecological grass technology combined with aeration[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(13): 331-336.
- [8] 张博, 王敏, 李玲, 等. 挂膜碳素纤维对雨水排口区域水体的净化试验研究[J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(6): 617-622.
- ZHANG Bo, WANG Min, LI Ling, et al. Research on water purification in rainwater outlet area by bacterial-loaded carbon fiber[J]. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 2020, 42(6): 617-622.
- [9] 高月香, 杜聪, 张毅敏, 等. 碳素纤维生态草协同微生物菌剂净化黑臭水体研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(12): 188-194.
- GAO Yuexiang, DU Cong, ZHANG Yimin, et al. Study on purification of black and odorous water with carbon-fiber ecological grass synergized with microbial agent[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(12): 188-194.
- [10] 万田英, 尹亚琳, 华玉妹, 等. 光合细菌投加量对湖泊污染修复的作用效应[J]. *环境工程*, 2014, 32(8): 29-32.
- WAN Tianying, YIN Yalin, HUA Yumei, et al. Effect of psb dosage on lake pollution remediation[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(8): 29-32.
- [11] HÜLSEN T, BARRY E M, LU Yang, et al. Domestic wastewater treatment with purple phototrophic bacteria using a novel continuous photo anaerobic membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2016, 100: 486-495.
- [12] 丁海涛, 曹开银, 钟伦锁, 等. 光合细菌处理黑臭水体影响因素的研究[J]. *合肥学院学报(综合版)*, 2019, 36(5): 51-56.
- DING Haitao, CAO Kaiyin, ZHONG Lunsuo, et al. Research on the influencing factors of photosynthetic bacteria treat black and odor water[J]. *Journal of Hefei University (Comprehensive Ed)*, 2019, 36(5): 51-56.
- [13] LU Haifeng, HAN Ting, ZHANG Guangming, et al. Natural light-micro aerobic condition for PSB wastewater treatment: A flexible, simple, and effective resource recovery wastewater treatment process[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(1): 74-82.
- [14] PENG Meng, XU Hongzhang, YANG Guang, et al. Purifying heavily polluted river water using immobilized native photosynthetic bacteria[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2021(8): 147.
- [15] 孙仕勇, 樊胜兰, 董发勤, 等. 固定化光合细菌在水污染综合治理中的应用[J]. *工业水处理*, 2016, 36(7): 1-4.
- SUN Shiyong, FAN Shenglan, DONG Faqin, et al. Application of immobilized photosynthetic bacteria to the comprehensive treatment of water pollution[J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, 36(7): 1-4.
- [16] 李勤生, 王若雪, 王业勤. 光合细菌 RP-1 人造生物膜处理污水脱氮除磷效果[J]. *净水技术*, 2021, 40(11): 79-83.
- LI Qinsheng, WANG Ruoxue, WANG Yeqin. Performance of artificial biofilm with RP-1 strain of PSB for nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(11): 79-83.
- [17] YANG Anqi, ZHANG Guangming, MENG Fan, et al. Nitrogen metabolism in photosynthetic bacteria wastewater treatment: A novel nitrogen transformation pathway[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122162.
- [18] MENG Fan, YANG Anqi, ZHANG Guangming, et al. Effects of dissolved oxygen on key enzyme activities during photosynthetic bacteria wastewater treatment[J]. *Process Biochemistry*, 2019, 76: 165-170.
-
- [作者简介] 张正红(1969—), 博士, 教授。E-mail: 523290991@qq.com。
- [收稿日期] 2023-02-28(修改稿)