



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

载体对菌藻共生系统净化农田排水效果的影响

赵志毅, 秦弋丰, 陈明晟, 吴仁铭, 刘书畅, 罗丽洁, 李旭东

引用本文:

赵志毅, 秦弋丰, 陈明晟, 吴仁铭, 刘书畅, 罗丽洁, 李旭东. 载体对菌藻共生系统净化农田排水效果的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1234–1241.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0642>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

典型生态拦截措施水质净化效果研究

段四喜, 张磊, 杨芳, 沈仕洲, 倪喜云, 赵正雄, 于良君

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 493–502 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0026>

增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 李琳秋, 周化斌

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 770–776 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0345>

29种水生植物对农村生活污水净化能力研究

张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 陈明利, 柳俊

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 392–402 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0235>

尼山水库小流域典型面源污染来源及特征分析

王立萍, 娄山崇, 孙秀玲, 尹儿琴, 孙甲玉

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 26–35 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0067>

进料浓度对猪粪混合稻秆厌氧产甲烷特性的影响

桂伦, 陈莎莎, 黄振侠, 吁安, 姚健, 陈柳萌

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 305–316 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0162>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵志毅, 秦弋丰, 陈明晟, 等. 载体对菌藻共生系统净化农田排水效果的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1234–1241.

ZHAO Z Y, QIN Y F, CHEN M S, et al. Effect of carrier on the purification of farmland drainage by bacteria–algal symbiosis system[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(6): 1234–1241.



开放科学 OSID

载体对菌藻共生系统净化农田排水效果的影响

赵志毅, 秦弋丰, 陈明晟, 吴仁铭, 刘书畅, 罗丽洁, 李旭东*

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

摘要:采用软性纤维生物绳(聚烯烃聚酰胺复合材料)、苦草(*Vallisneria natans*(Lour.) Hara)、细叶莎草(*Cyperus rotundus* L.) 3种载体,分别构建了载体型菌藻共生系统,研究其净化低碳高氮农田排水的效果。结果表明,以纤维绳为载体,填充密度在10%~30%范围时,系统内藻类浓度随填充密度的增加而提高,对总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的去除效果提升明显。其中,30%纤维绳系统效果最好,在水力停留时间(HRT)2 d,平均气温25℃,进水化学需氧量(COD)、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度分别为73.69、15.45、0.73、6.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,出水平均浓度分别为19.17、1.76、0.14、1.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到了《地表水环境质量标准》的V类水质标准。细叶莎草系统对COD的处理效果较好,去除率可达77%,苦草系统对各污染物的去除效果一般。此外,系统中叶绿素浓度与出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著的负相关关系,载体的引入会使系统内世代周期长的硝化细菌增殖。研究表明,采用纤维绳为载体,填充密度30%时,最有利于提升菌藻共生系统处理农田排水的效果。

关键词:菌藻共生系统;农田排水;纤维绳;填充密度

中图分类号:X71;X52

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1234-08

doi: 10.13254/j.jare.2021.0642

Effect of carrier on the purification of farmland drainage by bacteria–algal symbiosis system

ZHAO Zhiyi, QIN Yifeng, CHEN Mingsheng, WU Renming, LIU Shuchang, LUO Lijie, LI Xudong*

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To investigate the treatment effect of a bacteria–algal symbiosis system on farmland drainage with low carbon, and high nitrogen soft fiber bio-rope (polyolefin polyamide composite), *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Cyperus rotundus* L. were used to construct a symbiotic carrier system for the bacteria and algae. The results showed that when the fiber rope was used as the carrier and the filling density was in the range of 10%~30%, the concentration of algae in the system increased with the increase in density, and the removal effect of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was significantly improved, with the 30% fiber rope system exhibiting the best effect. When the hydraulic retention time (HRT) was 2 d, the average temperature was 25℃, the average concentrations of influent chemical oxygen demand (COD), TN, TP, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 73.69, 15.45, 0.73 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 6.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The average effluent mass concentrations were 19.17, 1.76, 0.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and 1.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, which reached the class V standard stipulated by the surface water environmental quality standard. The *C. rotundus* L. system showed a good treatment effect on COD, with a removal rate of up to 77%. The removal effect of these pollutants by the *V. natans* (Lour.) Hara system was mediocre. In addition, a significant negative correlation was found between the chlorophyll concentration and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the effluent water. The introduction of carriers, such as nitrifying bacteria, would proliferate bacteria with long generation cycles in the system. The results indicated that when 30% fiber rope was used as the carrier, the effect of the bacteria–algal symbiosis system on farmland drainage was optimally improved.

Keywords: bacteria and algae symbiotic system; farmland drainage; fiber rope; filling density

收稿日期: 2021-09-22 录用日期: 2021-12-21

作者简介: 赵志毅(1996—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事菌藻共生系统污水净化研究。E-mail: 1206903591@sjtu.edu.cn

*通信作者: 李旭东 E-mail: lixudong@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800500)

Project supported: National Key Research and Development Program(2016YFD0800500)

农业面源污染作为水环境恶化的重要原因,近年来已成为国内外关注的热点^[1]。与点源污染相比,农业面源污染具有随机性、不确定性、分散性、隐蔽性、时空异质性等特点^[2]。农田排水作为农业面源污染的主要载体,直接排放易造成水体富营养化^[3],因此,对农田排水进行处理十分必要。但农田排水具有低碳高氮特点,且瞬时流量大^[4],较难处理。

生态沟渠对农田排水中的总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总磷(TP)和悬浮颗粒物(SS)去除效果较好^[5]。潜流人工湿地对农田排水中TP去除效果好,但系统中氧含量不足,抑制了硝化作用,TN和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率较低^[6]。水力停留时间(HRT)为6 d时,膜-菌藻共生系统对农田排水中TN和TP的去除率分别达到90%和96%^[7]。这些技术对农田排水表现出较好去除效果,但存在占地面积大、效果不稳定等问题。

针对上述问题,本研究构建了载体型菌藻共生系统,该系统主要利用细菌和藻之间的生理协同作用净化污水。具体机制为:水体中的藻类通过光合作用释放 O_2 ,细菌利用 O_2 将水中的有机物污染物分解为小分子物质,这些物质提供了藻类生长所需要的营养物质,从而促进藻类进行光合作用;藻类利用空气中的 CO_2 进行光合作用,可部分弥补农田排水中碳源不足的缺陷;水体中 CO_2 的减少会提高pH,促进 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的挥发和磷的沉淀。载体的引入可以为菌、藻提供更多的附着空间,提高单位体积的生物量和污染物去除的稳定性,且更利于藻类的收集^[8]。相比于其他处理工艺,载体型菌藻共生系统占地更少,运行管理更便捷,氮磷去除效果更稳定。海藻酸钙作为载体固定小球藻时, $\text{NH}_4\text{-N}$ 和TP的净化效率比悬浮态藻分别高26.14%和35.91%^[9]。细叶莎草和苦草作为水生植物,不仅可以用作绿化景观植物,同时对氮磷有较好的吸收作用:细叶莎草对TN和TP的吸收量可达 $59.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干质量)和 $8.28\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干质量)^[10];苦草、金鱼藻和狐尾藻这三种沉水植物组配种植时,TN去除率达到了70%,TP去除率达到了50%^[11]。

本研究采用软性纤维生物绳、细叶莎草、苦草作为载体,探究载体型菌藻共生系统处理农田排水的可行性,重点考察不同类型载体及其密度的菌藻共生系统处理农田排水TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、COD的效果,为建立可靠、稳定的农田排水处理工艺提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

试验工艺流程及装置如图1、图2和图3所示,装

置由调节池、蠕动泵、菌藻共生反应器、载体等组成。分别选用细叶莎草(*Cyperus rotundus* L.)、苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) Hara)、软性纤维生物绳(聚烯烃聚酰胺复合材料,以下简称“纤维绳”)作为载体,并以无载体的菌藻共生系统作为空白对照(CK)。其中:细叶莎草采用在两端种植的方法,水面覆盖率控制在30%,超过30%时人工修剪;苦草的种植间距为0.1 m,整个系统内部大约种植40株,若种植太密,遮光作用明显,将会影响系统内的光合作用和处理效果^[12];纤维绳作为载体时设置10%、20%和30%三个填充体积密度,密度超过30%时纤维绳之间相互缠绕,空间拥挤,影响系统光照条件,不利于藻类繁殖。菌藻共生反应器尺寸为 $1.25\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times (0.4\text{ m}/0.7\text{ m})$,由不锈钢板焊接而成,装置底部和顶部均设有钢质框架,纤维绳上下两端分别固定在框架的格点上。在细叶莎草和苦草的系统中,菌藻共生反应器高度为0.7 m,底部铺设0.3 m泥土以种植植株,反应器四角成 45° 倒角,并在中间设长为1.05 m的隔板,使反应器内形成环形廊道,每个反应器有效水深0.36 m,有效容积172.8 L,装置内设有搅拌桨,控制水流速度为 $0.45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,以利于菌藻的生长繁殖和老化的生物膜脱落。各套装置放置于室外阳光充足处运行。

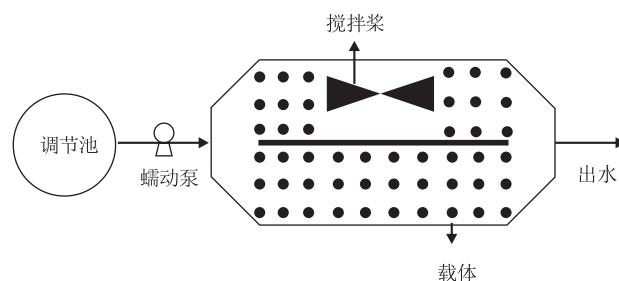


图1 纤维绳-菌藻共生系统工艺流程图

Figure 1 Process flow chart of fiber rope - bacteria and algae symbiosis system

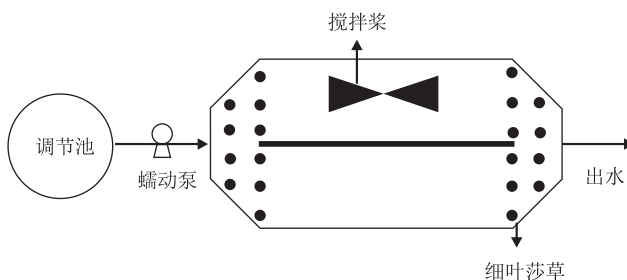


图2 细叶莎草-菌藻共生系统工艺流程图

Figure 2 Process flow chart of *Cyperus rotundus* L. - bacteria and algae symbiosis system



a.10% 纤维绳系统;b. 20% 纤维绳系统;c. 30% 纤维绳系统;d. 细叶莎草系统;e. 苦草系统;f. 空白组
a.10% fiber rope system;b.20% fiber rope system;c.30% fiber rope system;d.Cyperus system;e.Vallisneria system;f. CK

图3 试验装置图

Figure 3 Actual drawing of test device

1.2 试验用水

试验用水为人工配制,在自来水中投加一定比例的尿素、葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾等,模拟农田排水低碳高氮、水质不稳定的特征^[4,13],碳氮磷的比值控制在100:20:1左右,试验用水水质参数如表1所示。

表1 试验用水水质参数

Table 1 Water quality parameters of the test water

参数 Parameter	范围 Range/(mg·L ⁻¹)	平均值 Average value/ (mg·L ⁻¹)	标准差 Standard deviation/ (mg·L ⁻¹)
TN	14.25~17.45	15.45	1.00
TP	0.35~1.67	0.73	0.38
NH ₄ ⁺ -N	4.40~11.16	6.32	1.94
COD	47.65~115.00	73.69	15.46

1.3 试验运行管理

试验装置运行期间平均气温为25℃,试验开始前运行装置5 d,培养藻类,进行挂膜^[14],人工配水存储于调节池(不锈钢储水箱,单个有效容积为1.0 m³,共2个,各组装置共用)中,用蠕动泵抽入菌藻共生系统内,经处理后排入,水力停留时间(HRT)为2 d^[7],24 h连续进水、连续搅拌,系统正常运行后,每2 d取进出水样一次,取样时间固定为上午10:00,采样后于当天进行水质指标分析。

1.4 测试指标与方法

总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法、氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂分光光度法、硝态氮(NO₃⁻-N)采用紫外分光

光度法、化学需氧量(COD)采用快速消解分光光度法测定,叶绿素采用叶绿素测定仪现场测定,pH采用便携式pH测定仪(TM40)测定,溶解氧(DO)采用便携式DO测定仪(DO-6800)测定。

藻类的含量通过叶绿素浓度表征^[15],在系统进水口、池中、出水口附近各测定一次,取平均值作为系统内的叶绿素浓度。

2 结果与讨论

2.1 载体类型对藻类浓度及污染物去除的影响

2.1.1 载体类型与叶绿素浓度

藻类均含有叶绿素,因此藻类浓度可通过叶绿素浓度来间接反映。运行周期内不同载体系统中叶绿素平均浓度如图4所示。

由图4可知,30%纤维绳-菌藻共生系统中的叶

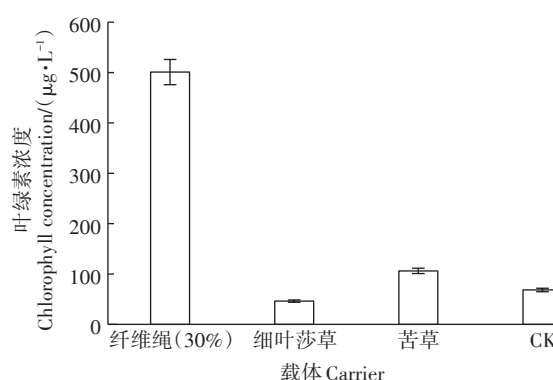


图4 不同载体系统中的叶绿素平均浓度

Figure 4 The average concentration of chlorophyll in the system under different carriers

绿素浓度明显高于其他载体系统,平均达到了 $500\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其次为苦草-菌藻共生系统,平均浓度为 $106\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而在细叶莎草-菌藻共生系统中叶绿素含量最低,平均浓度只有 $46\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,低于空白组菌藻共生系统($68\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),这与高云霓等^[16]研究得到的高等挺水植物细叶莎草的遮阴作用和化感作用对藻类生长具有明显抑制作用的结果一致。苦草因沉于水面以下,与细叶莎草相比,遮阴作用较弱,因此与藻类表现出一定的共生性。

2.1.2 载体类型与磷的去除

运行周期内不同载体系统进出水中TP浓度如图5所示。由图5可知,进水中TP质量浓度在 $0.35\sim 1.67\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.73\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,空白组菌藻共生系统、30%纤维绳-菌藻共生系统、细叶莎草-菌藻共生系统和苦草-菌藻共生系统出水TP平均值分别为 0.24 、 0.14 、 0.25 和 $0.25\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4个系统的TP平均去除率分别为 67.12% 、 81.02% 、 65.75% 和 65.75% 。细叶莎草和苦草作为载体时,系统对TP的去除效果与空白组相当;而当纤维绳作为载体时,系统对TP的去除效果明显提升。

图6为30%纤维绳-菌藻共生系统24h内pH变化情况,夜间pH值稳定在8.0左右,白天随着光合作用的增强,pH值上升,在午后达到峰值(约9.3),高pH值会促进磷的化学沉淀^[14]。纤维绳作为载体时,系统中藻类浓度明显提升,对磷的同化吸收和化学沉淀作用更加明显。

2.1.3 载体类型与氮的去除

运行周期内不同载体系统对TN和 NH_4^+-N 的去除效果如表2所示。由表2可知,空白组菌藻共生系统中TN和 NH_4^+-N 的平均去除率分别为 70.94% 和 35.28% ;引入载体后,TN和 NH_4^+-N 的平均去除率明

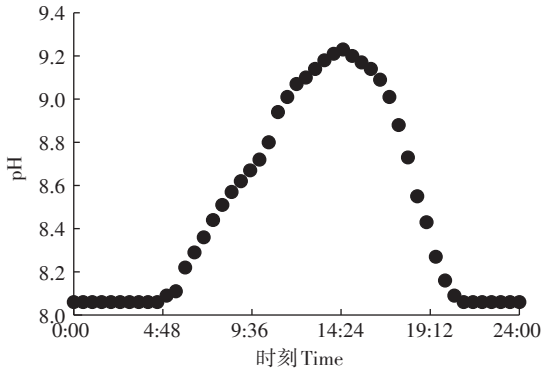


图6 30%纤维绳-菌藻共生系统24h内pH变化图

Figure 6 pH change in 30% fiber rope-bacteria and algae symbiosis system within 24 h

表2 不同载体系统TN、 NH_4^+-N 的平均去除率

Table 2 Average removal rates of TN and NH_4^+-N in different carrier systems

载体 Carrier	TN/%	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\%$
纤维绳(30%)	88.61	76.58
苦草	88.93	76.74
细叶莎草	86.54	71.20
CK	70.94	35.28

显提升,其中30%纤维绳-菌藻共生系统与苦草-菌藻共生系统的去除效果最好,TN和 NH_4^+-N 的平均去除率超过 88% 和 76% 。结合图4可以发现,相比于空白组,引入纤维绳(30%)极大提高了系统内藻类的浓度,使得更多的氮素被藻类同化吸收,且藻类会优先吸收利用 NH_4^+-N ^[17],使得 NH_4^+-N 的平均去除率提高了40多个百分点。苦草和细叶莎草作为水生植物,本身会同化吸收一部分氮素,弥补了藻类浓度不足的缺陷,此外,底泥中的微生物也会去除氮素^[18]。

2.1.4 载体类型与COD的去除

运行周期内不同载体系统进出水中COD浓度如图7所示。由图7可知,进水中COD在 $47.65\sim 115.00\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $73.69\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,空白组菌藻共生系统、30%纤维绳-菌藻共生系统、细叶莎草-菌藻共生系统和苦草-菌藻共生系统出水COD平均值分别为 25.73 、 19.17 、 $16.65\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $26.52\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;4个系统的COD平均去除率分别为 65.08% 、 73.99% 、 77.40% 和 64.00% 。水中的藻类本身是有机质,因此随水流出的藻类越少,COD浓度越低。载体对藻类具有固定作用^[19],因而纤维绳-菌藻共生系统出水中COD浓度较低,平均去除率提高。由于高等水生植物对藻类

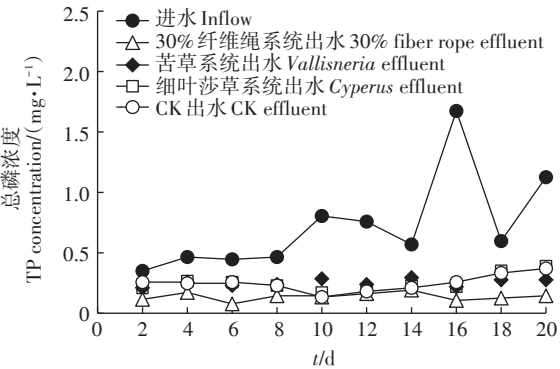


图5 不同载体系统TP的去除效果

Figure 5 TP removal effect under different carriers

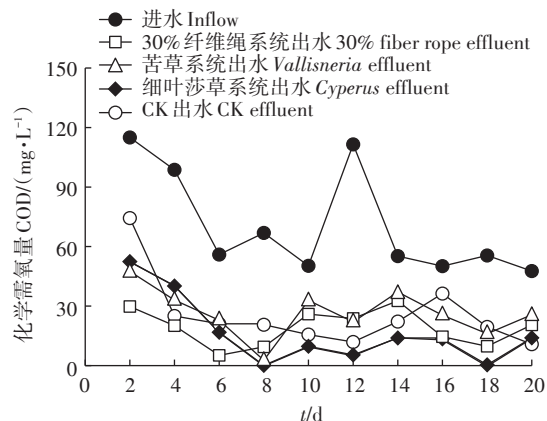


图7 不同载体系统COD去除效果

Figure 7 COD removal effect under different carriers

的生长有抑制作用^[20],细叶莎草会降低出水中的COD水平。

2.2 载体密度对藻类浓度及污染物去除的影响

2.2.1 载体密度与叶绿素含量

运行周期内纤维绳密度与叶绿素平均浓度如图8所示。由图8可知,随着纤维绳密度的增加,系统中叶绿素的平均含量也随之升高,纤维绳的添加为微生物和藻类提供了更多的生长繁殖空间,使得更多种类和数量的微生物得以生长,而微生物释放出的某些物质会促进藻类的增殖^[21]。

2.2.2 载体密度与磷的去除

运行周期内不同载体密度系统对TP的平均去除率如表3所示。由表3可知,空白组TP的去除率为67.12%,在引入纤维绳(10%)作为载体后,TP的去除率达到了76.43%,提升了近10个百分点,当载体密度为20%和30%时,TP的去除率分别为79.56%和80.82%,相比于载体密度为10%时,TP的去除率增长

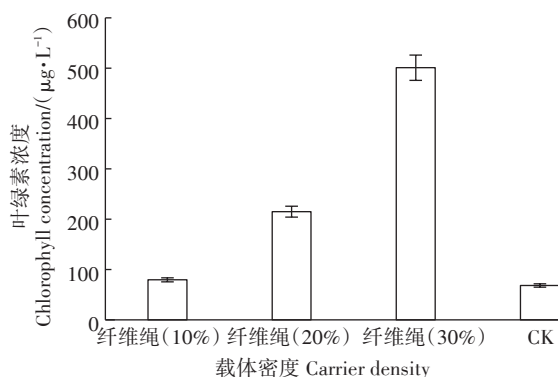


图8 载体密度对叶绿素平均浓度的影响

Figure 8 Effect of carrier density on average concentration of chlorophyll

表3 不同载体密度下TP的平均去除率

Table 3 Average TP removal rate under different carrier density

载体密度 Carrier density	总磷平均去除率 Average removal rate of TP/%
纤维绳(10%)	76.43
纤维绳(20%)	79.56
纤维绳(30%)	80.82
CK	67.12

缓慢,由此可知,在10%~30%填充密度范围内,纤维绳密度的增加对TP的去除效果影响不明显。

2.2.3 载体密度与氮的去除

运行周期内不同载体密度系统进出水中TN浓度如图9所示。由图9可知,进水TN的质量浓度介于14.25~17.45 mg/L之间,平均值为15.45 mg/L,空白组菌藻共生系统、10%纤维绳、20%纤维绳和30%纤维绳菌藻共生系统出水TN平均值分别为4.49、4.26、3.18 mg/L和1.76 mg/L,4个系统的TN平均去除率分别为70.94%、72.43%、79.42%和88.61%。结合图8可以得出,纤维绳密度的增加会提高系统内藻类的浓度,使得藻类对氮素的同化吸收作用增强,因此,TN的去除效果随着纤维绳密度的增加而提升。

运行周期内不同载体密度系统中NO₃-N含量随时间变化如图10所示。由图10可知,随着运行时间的推移,各个系统中NO₃-N含量均有上升的趋势,这表明随着系统运行时间的延长,世代周期较长的硝化细菌会增殖。结合图8可知,纤维绳密度越高,系统内藻类浓度也越高,但NO₃-N浓度越低,说明高密度的载体会产生更多的微厌氧区,而高浓度的藻类同时提供了更多的有机碳,有利于反硝化作用的发生。

运行周期内不同载体密度系统进出水中NH₄-N

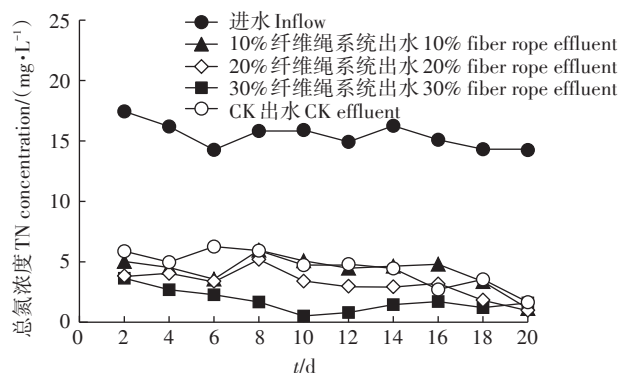


图9 载体密度对TN去除效果的影响

Figure 9 Effect of carrier density on TN removal

浓度变化如图11所示。由图11可知,进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度介于 $4.40\sim 11.16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $6.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,空白组菌藻共生系统、10%纤维绳、20%纤维绳和30%纤维绳菌藻共生系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值分别为 4.09 、 3.96 、 $2.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,4个系统的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别为35.28%、37.34%、54.43%和76.58%。可以发现,整个运行周期内,由于载体密度的增加,藻类浓度提高,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收增强,使得载体密度与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果表现出正相关关系。

图12为不同载体密度系统内叶绿素含量与出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的关系,由图12可知,各系统均表现为叶绿素浓度越高,出水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量越低。以20%纤维绳-菌藻共生系统为例,二者关系方程式为 $y=-0.009x+6.033$, R^2 为0.809,即系统内叶绿素浓度与出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈较显著的负相关关系,这表明,通过强化系统内藻类的浓度可提升氮的去除效果。

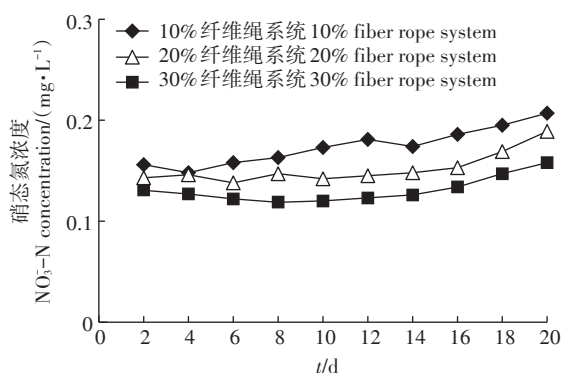


图10 不同载体密度系统中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化

Figure 10 Effect of carrier density on $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration

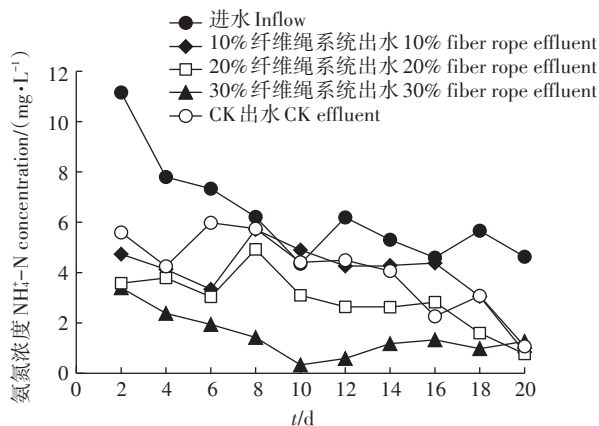


图11 载体密度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果的影响

Figure 11 Effect of carrier density on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal

图13是30%纤维绳-菌藻共生系统内24 h溶解氧变化情况。白天藻类光合作用强,系统处于好氧状态,有利于硝化反应的发生;夜间藻类、细菌及其他微生物的呼吸作用强,系统处于缺氧状态,有利于反硝化反应的发生,硝化作用与反硝化作用如此昼夜交替,会促进氮素的去除。

2.2.4 载体密度与COD的去除

运行周期内不同载体密度系统对COD的平均去除率如表4所示。由表4可知,空白组菌藻共生系统中COD的平均去除率为65.08%,在引入纤维绳(10%)作为载体后,COD的平均去除率达到了83.48%。可见,引入载体后,由于悬浮态藻类被部分固定,出水中藻类含量下降,使得COD平均去除率提升,随着纤维绳密度增加,COD的去除率出现了下降。这是由于增加载体密度使得系统中悬浮态藻类的含量大幅提高,而藻类被固定的增幅却有限,导致COD的去除率反而有所降低^[22]。

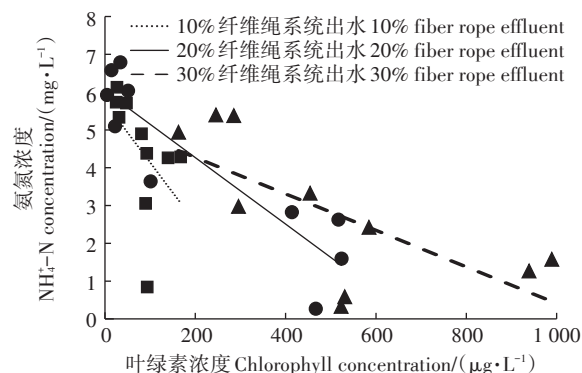


图12 叶绿素浓度与出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的相关性

Figure 12 Correlation between chlorophyll concentration and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in effluent

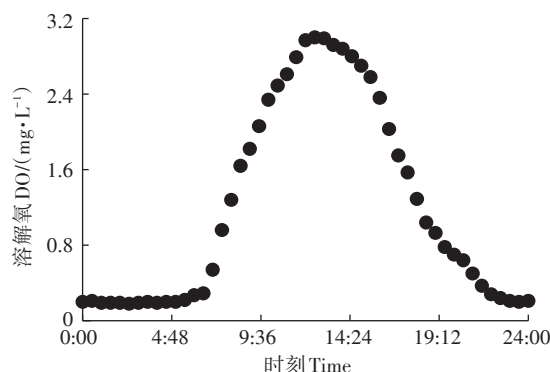


图13 30%纤维绳-菌藻共生系统24 h内溶解氧变化

Figure 13 DO change of 30% fiber rope-bacteria and algae symbiosis system within 24 h

表4 不同载体密度下COD的平均去除率

Table 4 Average COD removal rate under different carrier density

载体密度 Carrier density	COD平均去除率 Average removal rate of COD/%
纤维绳(10%)	83.48
纤维绳(20%)	76.20
纤维绳(30%)	73.99
CK	65.08

3 结论

(1)纤维绳为载体、填充密度为10%~30%时,藻类浓度随密度的增加而提高,系统对TN、TP、 NH_4^+-N 的去除效果明显提升,其中,30%纤维绳系统效果最好。细叶莎草作载体时,系统对COD去除率最高;苦草作为载体时,系统对各污染物去除效果均表现一般。

(2)30%纤维绳-菌藻共生系统中叶绿素浓度在 $500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,系统对农田排水处理效果最好,且具有较好抗冲击负荷能力。在水力停留时间为2 d,进水COD、TN、TP、 NH_4^+-N 的平均质量浓度分别为73.69、15.45、0.73、6.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,各污染物平均出水浓度分别为19.17、1.76、0.14、1.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,整体达到了地表水V类水质标准。

(3)随着运行时间的延长,载体型菌藻共生系统内硝化细菌会增殖,高密度的填料还会产生更多的微厌氧区,有利于反硝化作用的发生;系统内叶绿素浓度与出水中 NH_4^+-N 浓度呈显著的负相关关系,通过强化系统内藻类的浓度可有效提高氮的去除效果。

参考文献:

- [1] 王思如, 杨大文, 孙金华, 等. 我国农业面源污染现状与特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 140-147, 172. WANG S R, YANG D W, SUN J H, et al. Analysis on status and characteristics of agricultural non point source pollution in China[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 140-147, 172.
- [2] 王建兵, 程磊. 农业面源污染现状分析[J]. 江西农业大学学报(社会科学版), 2008(3): 35-39. WANG J B, CHENG L. Analysis of agricultural non point source pollution[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University(Social Science Edition)*, 2008(3): 35-39.
- [3] OWENS M, WOOD G. Some aspects of the eutrophication of water[J]. *Water Research*, 1968, 2(2): 151-159.
- [4] CHEN X M, WO F, CHEN C, et al. Seasonal changes in the concentrations of nitrogen and phosphorus in farmland drainage and groundwater of the Taihu Lake region of China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2010, 169(1/2/3/4): 159-168.
- [5] 刘福兴, 陈桂发, 付子斌, 等. 不同构造生态沟渠的农田面源污染物处理能力与实际应用效果[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 787-794. LIU F X, CHEN G F, FU Z S, et al. Comparison on effects of practical application of ecological ditches with different construction in treating agricultural non-point pollutants[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 787-794.
- [6] 周晓夏, 贾忠华, 康思军, 等. 潜流型人工湿地对农田排水的净化效果[J]. 西北水力发电, 2005(1): 60-63. ZHOU X X, JIA Z H, KANG S J, et al. Purification efficiency of agriculture wastewater by subsurface constructed wetland[J]. *Journal of Northwest Hydroelectric Power*, 2005(1): 60-63.
- [7] 马瑞君, 纪婧, 孙婧玉, 等. HRT对膜-菌藻共生系统处理农田排水影响研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(6): 74-78. MA R J, JI J, SUN J Y, et al. Effects of different HRT on agricultural drainage treatment by membrane and algal-bacteria symbiotic system[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(6): 74-78.
- [8] 王荣昌, 程霞, 曾旭. 污水处理中菌藻共生系统去除污染物机理及其应用进展[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 13-22. WANG R C, CHENG X, ZENG X. Mechanisms and applications of bacterial-algal symbiotic systems for pollutant removal from wastewater[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 13-22.
- [9] 严清, 孙连鹏. 固定化菌藻系统及对污水中氮磷营养盐的净化效果[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2086-2090. YAN Q, SUN L P. Removal of nitrogen and phosphorus by coimmobilized *Chlorella vulgaris* and bacteria system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2086-2090.
- [10] LA M, ROMINA N, GLORIA G, et al. Performance of ornamental plants in monoculture and polyculture horizontal subsurface flow constructed wetlands for treating wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 116-125.
- [11] 方琴. 围控式沉水植物对富营养化水体净化效果研究[D]. 合肥: 合肥学院, 2020: 45-46. FANG Q. Purification effect of submerged plants on eutrophic water[D]. Hefei: Hefei University, 2020: 45-46.
- [12] 陈田. 3种沉水植物对再生水补给的景观水体生态修复效用研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018: 23-25. CHEN T. Study on the ecological restoration effect of three submerged macrophytes for landscape water supplemented by reclaimed water[D]. Kunming: Yunnan University, 2018: 23-25.
- [13] 白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱海流域低污染水类型、污染负荷及分布[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 200-207. BAI X Y, HU X Z, PANG Y. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 200-207.
- [14] 邢丽贞. 固定化藻类去除污水中氮磷及其机理的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005: 38-39. XING L Z. Investigations on methods and mechanism for removal of nitrogen & phosphorus in wastewater by immobilized algae[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005: 38-39.
- [15] 戴荣继, 佟斌, 黄春, 等. HPLC测定饮用水中藻类叶绿素含量[J]. 北京理工大学学报, 2006(1): 87-89. DAI R J, TONG B, HUANG C, et al. Determination of chlorophylls in drinking water by HPLC[J].

- Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006(1):87-89.
- [16] 高云霓, 葛芳杰, 刘碧云, 等. 不同暴露方式下水生植物化感物质抑藻效应的比较研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4):554-560. GAO Y N, GE F J, LIU B Y, et al. Comparative study on antialgal effects of allelochemicals from aquatic plants under different exposure protocols[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4):554-560.
- [17] FERGUSON J F, MCCARTY P L. Effects of carbonate and magnesium on calcium phosphate precipitation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 5(6):534-540.
- [18] 徐秀玲. 水生植物对水体氮磷的吸收特性及其在生态沟渠中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2012:78-80. XU X L. Absorption characteristics of N and P in water by aquatic plants and their application in ecological ditch[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012:78-80.
- [19] 邢丽贞, 张向阳, 张波, 等. 藻菌固定化去除污水中氮磷营养物质的初步研究[J]. 环境科学与技术, 2006(1):33-34, 74. XING L Z, ZHANG X Y, ZHANG B, et al. A preliminary study on eliminating nitrogen and phosphorus from artificial wastewater by immobilized bacteria-algae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006(1):33-34, 74.
- [20] 宋永会, 彭剑峰, 高红杰, 等. 高效藻类塘与水生植物塘联用深度净化受污染河水研究[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(4):317-322. SONG Y H, PENG J F, GAO H J, et al. Deep purification of contaminated river water with high-rate algal and aquatic combined pond[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(4):317-322.
- [21] SCHNURR P J, ALLEN D G. Factors affecting algae biofilm growth and lipid production: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52:418-429.
- [22] 熊云武, 林晓燕, 郭跃华, 等. 菌藻共生系统净化水质的研究进展[J]. 现代农业科技, 2016(4):197-198. XIONG Y W, LIN X Y, GUO Y H, et al. Research progress of bacterial-algal symbiotic system for sewage purification[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(4):197-198.