

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.07.011

不同植物净化富营养化水体的效果和群落分析

张择瑞¹, 李卫华², 胡淑恒³, 汪家权³

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 环境污染控制与废弃物资源化
利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 合肥工业大学 资源与环境工程学院,
安徽 合肥 230009)

摘要: 为发掘高效净化富营养化水体的新型浮床植物,使生态浮床技术能够更好地服务于污染水体的治理,探究了不同浮床植物处理条件下各水体浮游植物群落和微生物群落的差异。在室外条件下,以绿萝、万年青和皇冠草作为试验植物,对人工配制的富营养化污水进行 48 d 的处理,比较植物生长情况和净化效果,分析浮游植物和微生物群落结构和多样性。结果表明,3 种植物都能存活,万年青根系发达,生物量增加较多。4 个水箱内容溶解性磷(DP)、TN、TOC 的降解趋势一致。试验结束后,万年青组能显著抑制水体中藻类生长,藻密度含量较低,藻的种类单一。万年青组对 DP、TN、TOC 的去除速率较快,效果较好,去除率分别为 95.0%、97.57% 和 92.53%。藻类的吸收利用是对照组各污染指标下降的主要原因。

关键词: 富营养化; 浮床植物; 群落分析; 万年青; 绿萝; 皇冠草

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)07-0078-07

Effect of Different Plants on Purification of Eutrophic Water Bodies and Community Analysis

ZHANG Ze-rui¹, LI Wei-hua², HU Shu-heng³, WANG Jia-quan³

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse,
Hefei 230601, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University
of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: New floating bed plants with high purification efficiency to eutrophic water bodies were explored. The differences of phytoplankton communities and microbial communities in water bodies purified by different floating bed plants were investigated, which aimed to promote the application of ecological floating bed technology in polluted water body treatment. Artificially prepared eutrophic sewage was treated by *Epipremnum aureum*, *Rohdea japonica* and *Echinodorus grisebachii* in an outdoor environment for 48 days. The plant growth and purification efficiency were compared, and the structure and diversity of phytoplankton and microbial communities were analyzed. All the three plants could survive, and the root system of *Rohdea japonica* developed well and its biomass increased obviously. The degradation trends of dissolved phosphate(DP), TN and TOC in four water tanks were identical. At the

end of the experiment, the *Rohdea japonica* group could significantly inhibit the growth of algae in the water body with low algae density and single algae species. In *Rohdea japonica* group, the removal rates of DP, TN, and TOC were relatively fast and the purification performance was better, in which the removal efficiency was 95.0%, 97.57%, and 92.53%, respectively. Pollutants absorption and utilization of algae was the main reason for the decrease of various pollution indicators in the control group.

Key words: eutrophication; floating bed plants; community analysis; *Rohdea japonica*; *Epipremnum aureum*; *Echinodorus grisebachii*

富营养化是水体污染的主要表现之一,我国地表水富营养化状况十分严峻。生态浮床技术是综合了物理、化学、生物方法的富营养化水体原位生态修复技术,它具有无环境风险和二次污染、有经济效益和美化功能、造价较低且维护方便等优点^[1],得到了越来越广泛的应用,取得了一系列让人满意的效果^[2-3]。目前,浮床植物数量有限,寻找高效、有价值的浮床植物是重要的研究方向之一,而利用观赏植物绿萝、万年青和水生植物皇冠草作为浮床植物净化污水,并比较其净化效果的研究鲜有报道。

笔者选取了在我国分布广泛、具有观赏价值和空气净化作用及药用价值的植物绿萝和万年青,以及水体绿化和水族养殖的沉水植物皇冠草用于试验。比较了各植物对富营养化水体的治理效果,结合植物的生长特性和对污水的净化规律,对水中浮游藻类进行定性定量分析^[4]、细菌群落结构和多样性分析^[5],以寻找适用于高效治理富营养化水体的浮床植物新品种,并揭示其净化水体的机理。

1 材料与方法

试验时间为2019年7月13日—8月30日,试验地点位于合肥工业大学纬地楼一楼天井中,采用透明PVC雨棚遮挡试验装置。将160 L原水分别加入4个水箱内,将洗净湿质量均为500 g、预培养10 d的绿萝和万年青均匀种植在水箱内自行设计组装的浮床上,500 g皇冠草直接放入水箱中。原水水质:TN为 (10.42 ± 0.20) mg/L,溶解性磷(DP)为 (1.20 ± 0.02) mg/L,TOC为 (42.08 ± 0.76) mg/L,藻密度为 $(0.47 \pm 0.09) \times 10^6$ cells/L,叶绿素a(Chl-a)为 (1.80 ± 0.51) $\mu\text{g/L}$,电导率为 (315.5 ± 2.7) $\mu\text{S/cm}$ 。其他试验材料、试验用水配制方法、水质检测方法和数据分析方法等参考文献[6]。

2 结果与讨论

2.1 植物生长状况

试验期间平均气温在22.5~33.5℃之间,比较

适合植物和藻类生长。试验前后植物的生长状况表明,整个试验阶段,3种供试植物的存活率都为100%,没有衰败现象,对水面的覆盖率均有所增加。试验后万年青、绿萝、皇冠草的质量分别为1710、910、740 g,质量分别增加了242%、82%、48%。绿萝、万年青、皇冠草初始根长均为5 cm,试验后根长分别为25、20、10 cm。试验前3种植物的株高分别为15、30、18 cm,试验后分别为35、35、20 cm。万年青分蘖较多,增加的质量最多,根系发达,根须旺盛;绿萝是藤本植物,试验结束后藤长增加了20 cm;整个试验阶段皇冠草生长缓慢,质量、株高和根长增加均较少。

2.2 浮游植物情况分析

2.2.1 各水箱内 Chl-a 浓度的变化

各水箱内 Chl-a 浓度的变化如图1所示。可以看出,绿萝组和皇冠草组 Chl-a 浓度呈上升趋势,试验结束后 Chl-a 浓度分别为253.5、272 $\mu\text{g/L}$ 。万年青组 Chl-a 浓度先上升后下降。万年青组和对照组 Chl-a 浓度分别在试验第27、30天达到最大,分别为443、559.8 $\mu\text{g/L}$,此后前者 Chl-a 浓度逐渐下降,至试验结束时为18.1 $\mu\text{g/L}$;对照组在试验第9天后 Chl-a 浓度一直保持在250 $\mu\text{g/L}$ 以上,显著高于各试验组。

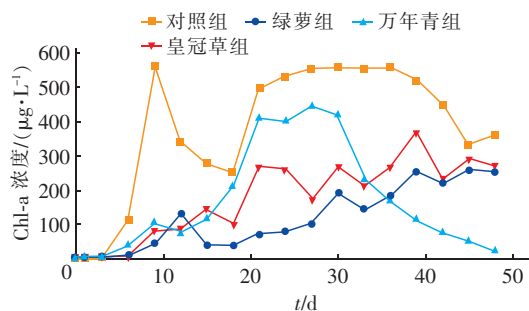


图1 各水箱内 Chl-a 浓度的变化

Fig. 1 Change of Chl-a concentration in each water tank
水体中的 Chl-a 浓度受营养物质、光照、气温、

物种竞争、气候条件等因素的影响^[7]。对照组养分充足、无植物竞争,Chl-a 浓度随着藻类生长-死亡和天气状况有所变化,但一直保持较高水平。绿萝组和皇冠草组受植物生长竞争影响,Chl-a 浓度增加较慢。万年青组生长较快,比绿萝组和皇冠草组对水体中藻类的生长有更强的抑制作用,因此试验结束时该组 Chl-a 浓度最低。

2.2.2 浮游植物定性定量分析

试验结束时对各组进行藻类定性检测和计算,对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组藻密度分别

为 18.6×10^6 、 9.6×10^6 、 1.0×10^6 、 15.2×10^6 cells/L, 各种(属)所占的比例如表 1 所示。可以看出,各水箱内的藻类主要是绿藻门,各种(属)数量所占百分比存在差异。各水箱内丛球韦氏藻均为优势种,其在对照组、万年青组、皇冠草组中的优势度均最高,分别为 0.923、0.542 和 0.614。月牙藻为绿萝组和万年青组的优势种,空星藻、栅藻为绿萝组和皇冠草组的优势种,纤维藻为皇冠草组的优势种。对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组的优势种分别有 2、4、2、4 种。

表 1 浮游植物定性定量分析

Tab. 1 Qualitative and quantitative analysis of phytoplankton

项 目		百分比/%				优势度			
		对照组	绿萝组	万年青组	皇冠草组	对照组	绿萝组	万年青组	皇冠草组
绿藻门	丛球韦氏藻	92.3	21.2	54.2	61.4	0.923	0.208	0.542	0.614
	空星藻	3.4	24.5	2.4	13	0.025	0.245	0.003	0.127
	栅藻	3.5	16.3	1.4	21.4	0.013	0.147	0.001	0.206
	纤维藻	0.3	0.7	1.9	3.1	0	0.001	0.003	0.021
	月牙藻	0.1	37.1	40	0.6	0	0.371	0.392	0.001
	十字藻	0.3	0	0	0.4	0	0	0	0
	单针藻	0.1	0.1	0.2	0	0	0	0	0
	衣藻	0	0.1	0	0	0	0	0	0
硅藻门	等片藻	0	0.1	0	0	0	0	0	0
蓝藻门	伪鱼腥藻属	0	0	0	0.1	0	0	0	0

已有研究表明,影响藻类生物量的主要环境因子为氮磷等营养盐浓度^[8]。万年青根系发达,生物量增加较多,对营养盐吸收较多,而绿萝、皇冠草吸收较少,对照组没有植物,水箱内剩余营养盐被藻类吸收,用于自身的生长繁殖,所以对照组、绿萝组和皇冠草组的藻密度较大。

藻类的生长繁殖具有季节性演替规律。蓝藻门和绿藻门通常在富营养水体、水温较高的夏季成为优势类群,本试验检测出的藻类主要属于绿藻门。试验过程中温度较高、氮磷等营养盐充足,试验水体无流动性^[9],这都为藻类的生长提供了有利条件。

2.3 微生物群落情况分析

2.3.1 OTU 样本分布韦恩图

试验结束后对各组水样进行宏基因组分类测序,结果如图 2 所示。可以看出,共检测到 2 487 个 OTU,其中对照组 807 个、绿萝组 1 117 个、万年青组 649 个、皇冠草组 1 222 个,各组特有属分别有 307、468、315、496 个。绿萝组和皇冠草组共有的 OTU 最多,为 499 个;对照组和万年青组共有的 OTU 最少,

为 161 个。绿萝与皇冠草组相似性强,万年青组与其他组相似性最弱^[10]。

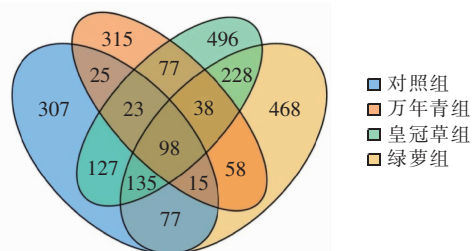


图 2 OTU 样本分布韦恩图

Fig. 2 Venn diagram of OTU sample distribution

2.3.2 微生物群落多样性分析

对照组和各试验组的多样性指数统计结果见表 2。可以看出,除绿萝组外,其他组的覆盖率皆为 100%。绿萝组群落多样性最大(Chao1 指数和 Shannon 指数),万年青组最小,这是水箱内各污染物水平和藻类生长共同作用的结果。一般情况下,群落的多样性与水体的营养水平成正比,但藻类的生长会造成水体细菌多样性的改变^[11]。

表 2 多样性指数统计结果

Tab. 2 Statistical results of diversity index

项 目	序列数目	OTU 数目	覆盖率/%	Shannon 指数	ACE 指数	Chao1 指数	Simpson 指数
对照组	64 941	807	100	3. 59	973. 23	918. 74	0. 10
绿萝组	42 626	1 117	99	4. 71	1 358. 49	1 276. 27	0. 02
万年青组	79 409	649	100	2. 63	763. 28	713. 67	0. 18
皇冠草组	66 748	1 222	100	4. 35	1 412. 12	1 340. 13	0. 03

2. 3. 3 属水平上样本相对丰度和群落结构分析

表 3 为 14 个主要属的序列数目和相对丰度。对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组的序列数分别为 64 941、42 626、79 409、66 748。将 OTU 序列与相应数据库进行比对,默认满足相似度 >90% 且覆盖范围 >90% 的序列被用来进行后续分类,不满足条件的序列则被归为未确定属(unclassified)。从表 3 可以看出,对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组的 unclassified 相对丰度分别为 55. 77%、31. 03%、3. 39% 和 32. 63%,分析原因,这可能是因为微生物群落检测受到藻类的影响。万年青组水质清澈,藻类较少,受影响较小;其他组藻密度较大,受影响较

严重。对照组在属水平上相对丰度较高的属为 *Novosphingobium*、*Rhodobacter*、*Planctopirus*、*Pirellula*;万年青组为 *Pseudomonas*、*Citrobacter*、*Reyranella*、*Brevundimonas*;绿萝组和皇冠草组有 3 个共同属 *Novosphingobium*、*Alsobacter*、*Rhizobium* 相对丰度较高,相似性较强。另外,绿萝组和皇冠草组相对丰度较高的属分别还有 *Pseudomonas*、*Lacibacterium* 和 *Emticicia*、*Vasilyevaea*。各组中优势属与水质有密切联系^[12]。如对照组中藻密度很大,所以光合菌 *Rhodobacter* 和专性好氧菌 *Pirellula* 为优势属;万年青组 TOC 含量较低,因为优势属 *Pseudomonas* 和 *Citrobacter* 都能分解、发酵葡萄糖。

表 3 属水平上各样本主要序列数目和相对丰度

Tab. 3 Major sequence number and relative abundance of each sample at genus level

项 目	对照组		绿萝组		万年青组		皇冠草组	
	序列数目	相对丰度/%	序列数目	相对丰度/%	序列数目	相对丰度/%	序列数目	相对丰度/%
unclassified	36 215	55. 77	13 227	31. 03	2 694	3. 39	21 783	32. 63
<i>Pseudomonas</i>	904	1. 39	1 293	3. 03	40 766	51. 34	2 046	3. 07
<i>Citrobacter</i>	255	0. 39	647	1. 52	17 972	22. 63	472	0. 71
<i>Emticicia</i>	37	0. 06	725	1. 70	76	0. 10	7 132	10. 68
<i>Novosphingobium</i>	1 133	1. 74	1 785	4. 19	100	0. 13	4 716	7. 07
<i>Rhodobacter</i>	6 962	10. 72	253	0. 59	53	0. 07	186	0. 28
<i>Alsobacter</i>	31	0. 05	2 070	4. 86	26	0. 03	2 984	4. 47
<i>Rhizobium</i>	150	0. 23	1 270	2. 98	134	0. 17	2 833	4. 24
<i>Vasilyevaea</i>	16	0. 02	62	0. 15	25	0. 03	4 115	6. 16
<i>Reyranella</i>	60	0. 09	1 104	2. 59	1 460	1. 84	1 175	1. 76
<i>Lacibacterium</i>	21	0. 03	3 650	8. 56	9	0. 01	72	0. 11
<i>Planctopirus</i>	2 628	4. 05	35	0. 08	24	0. 03	929	1. 39
<i>Pirellula</i>	3 134	4. 83	46	0. 11	1	0. 00	282	0. 42
<i>Brevundimonas</i>	270	0. 42	120	0. 28	2 493	3. 14	164	0. 25

2. 4 主要水质指标情况分析

2. 4. 1 对 DP 的净化效果

在整个试验过程中,各组 DP 降解趋势一致(见图 3)。随着植物的生长,藻类的繁殖,微生物、植物根系和水箱内壁的吸附,以及外部条件(温度、天气状况等)的变化,水箱内 DP 总体上呈现迅速降低后趋于稳定的降解规律。试验第 6 天,绿萝组、万年青

组、皇冠草组和对照组的 DP 分别为 0. 46、0. 12、0. 26、0. 32 mg/L,分别下降了 61. 8%、88. 5%、78. 4% 和 72. 3%。试验第 6~12 天,绿萝组 DP 出现略有上升的现象,这可能与磷的解吸和藻类的代谢等因素有关。试验第 18~24 天,对照组 DP 上升的原因与此类似。试验结束时,绿萝组、万年青组和皇冠草组的 DP 下降 95% 左右,而对照组 DP 下降了

76.2%。由图3可以看出,3种浮床植物对DP都有较好的去除作用,其中万年青组最好,皇冠草组次之,绿萝组稍差。

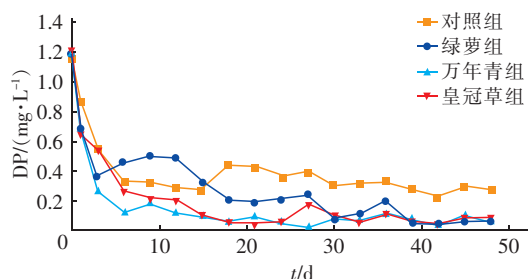


图3 不同植物对DP的去除效果

Fig.3 Removal effect of DP by different plants

浮床系统主要通过植物吸收、吸附、截留、沉淀和合成藻类物质等方式去除磷^[13]。万年青生长较快,根系发达,对DP去除速率较快。皇冠草整个植株都在水中,对DP吸附量较大。绿萝生长稍慢,效果稍差。磷是藻类繁殖必需的营养源,对照组DP主要因藻类暴发而较少^[14]。

由于在测定DP时对水样进行了过滤处理,实际水体的DP浓度不含藻内磷。试验结束后,将对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组含藻污水进行3次冻融-破壁处理,在-20℃以下冷冻,40℃以上解冻,测得DP分别为0.95、0.41、0.11、0.57 mg/L,即藻的吸收对DP去除的贡献率分别为57.76%、28.93%、4.90%和41.32%。

各水箱内浓度-时间的关系采用回归方程 $y = ae^{-bx} + c$ 进行拟合,式中 a 为污染物的初始浓度,mg/L; b 为衰减常数; y 为TOC浓度,mg/L; x 为反应时间,d; c 为降解后的污染物浓度值, c 值越小,说明能达到的效果越好。对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组的回归方程分别为 $y = 0.852e^{-0.472x} + 0.321$ 、 $y = 0.813e^{-0.097x} + 0.087$ 、 $y = 1.115e^{-0.594x} + 0.077$ 和 $y = 1.022e^{-0.314x} + 0.091$,可以看出万年青组净化效果较好。

2.4.2 对TN的净化效果

在整个试验阶段,TN都呈下降趋势(见图4)。试验结束时,对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组的TN浓度分别为1.59、0.31、0.25、0.67 mg/L,分别下降了85.26%、96.99%、97.57%和93.48%。本试验中,皇冠草组TN浓度下降最快,绿萝组下降最慢。试验第21天,万年青组TN浓度与皇冠草组相当,此后基本低于皇冠草组。试验第27天,对照

组TN浓度下降至1.44 mg/L,此后在这一水平上下波动。绿萝组在试验第39天时TN浓度为0.50 mg/L,此后在这一水平上下波动。

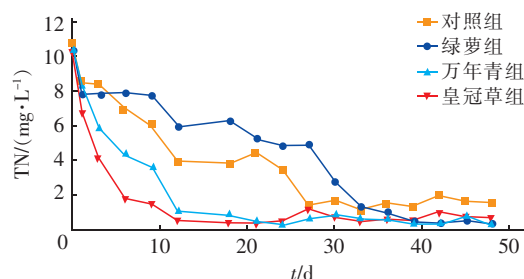


图4 不同植物对TN的去除效果

Fig.4 Removal effect of TN by different plants

试验水体用氯化铵配制,TN主要由无机氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$)构成,通过挥发作用、植物吸收和硝化-反硝化作用去除^[15]。皇冠草为水生植物,根、叶与水体接触面积大,试验开始时对各种形态的氮吸附较多,TN浓度下降速率较快,吸附的氮在此后的自身生长和藻类繁殖过程中逐渐被吸收利用。万年青根系发达,有利于微生物的生长和硝化-反硝化作用的进行^[16],生长较快,对氮吸收较多,故TN下降速率较快,仅次于皇冠草组。对照组藻类很快暴发,并处于较高水平,藻类大量吸收利用TN,以满足自身生长繁殖需要^[17]。对照组藻的数量有限,死亡的藻类又会释放各种形态的氮,所以TN没有降至很低。绿萝生长较慢,所在水箱内藻类增长缓慢,所以TN浓度下降较慢。

测量TN时溶液要经过0.45 μm的微孔滤膜过滤,故测量的只是水中溶解态的氮,不包含藻吸收的氮。试验结束以后,将对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组含藻污水进行冻融-破壁处理,测得TN分别为5.98、2.35、0.52、3.59 mg/L,即藻的吸收对去除TN的贡献率分别为32.99%、19.19%、2.05%和28.75%。

对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组浓度-时间关系的回归方程分别为 $y = 4.054e^{-0.099x} + 3.099$ 、 $y = 2.609e^{-0.065x} + 3.773$ 、 $y = 9.530e^{-0.164x} + 0.443$ 和 $y = 9.419e^{-0.348x} + 0.672$ 。从上述方程可以看出,万年青组和皇冠草组对TN的净化效果相当,且万年青组略好。

2.4.3 对TOC的净化效果

图5为各水箱内TOC的变化。可知,试验前6 d,绿萝组、万年青组、皇冠草组和对照组中TOC浓

度迅速降低,分别降至 10.89、8.50、8.46 和 9.35 mg/L,相应降低了 73.89%、79.98%、80.37% 和 77.23%,随后在这一水平上下浮动。试验结束时,各组 TOC 浓度分别为 5.17、3.17、9.17 和 15.19 mg/L,去除率分别为 87.60%、92.53%、78.72% 和 62.87%。

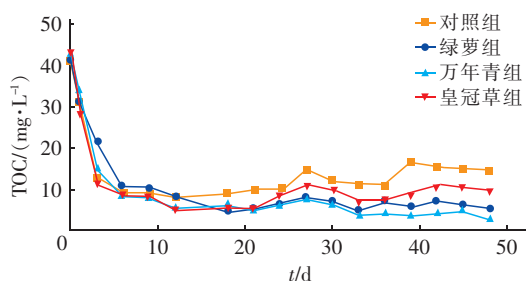


图5 各水箱内 TOC 的变化

Fig. 5 Change of TOC in each water tank

小分子有机物被植物直接吸收利用和微生物对有机物的好氧分解,及其植物根系吸附、截留是浮床技术降解 TOC 的几种主要途径^[18]。绿萝和万年青生长时对小分子有机物有所吸收,且根系发达,为水中微生物提供了良好的生长环境,加速了微生物的生长及对有机物的降解,所以对 TOC 的去除效果明显。皇冠草是水生植物,整个植株都浸没在水体中,与水体接触面积较大,对有机物吸附效果较好。藻类对有机物有很强的吸收利用能力,以满足自身生长繁殖的需要,导致对照组 TOC 浓度迅速降低。从整体上看,3 种植物对 TOC 都有较好的去除能力,万年青效果最好,绿萝次之。第 24~27 天,各组 TOC 浓度又升高可能跟解吸和藻类的生长代谢有关,藻类生长旺盛、吸收利用的有机物较多,死亡后又将部分有机物释放到水体中。

水样经 0.45 μm 滤膜过滤后测定 TOC,藻被过滤在滤膜上,藻内所含有有机物没有包含在所测指标内。试验结束后,将对照组含藻污水进行冻融-破壁处理,测得绿萝组、万年青组、皇冠草组和对照组的 TOC 浓度分别为 11.32、4.08、17.23 和 27.42 mg/L,即藻的吸收对去除 TOC 的贡献率分别为 29.78%、14.74%、2.14% 和 18.71%。

对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组浓度-时间关系的回归方程分别为 $y = 30.533e^{-0.651x} + 11.829$, $y = 4.517e^{-0.117x} + 9.951$, $y = 38.493e^{-0.383x} + 4.896$ 和 $y = 35.424e^{-0.649x} + 8.222$ 。可以看出,万年青组对 TOC 的去除效果较好。

3 结论

① 3 种供试植物的存活率都为 100%,没有衰败现象,对水面的覆盖率均有所增加。万年青分蘖较多,质量增加最多(增加了 242%),根系发达,根须旺盛,对藻类生长有较强的抑制作用。

② 对照组的 Chl-a 浓度一直处于较高水平,试验第 9 天后一直保持在 250 μg/L 以上,显著高于试验组。绿萝和皇冠草组的 Chl-a 浓度持续增加,试验结束后达到较高水平。万年青组的 Chl-a 浓度先增加后降低至较低水平。藻类的生长繁殖是对照组污染物下降的主要原因。

③ 本试验温度较高、氮磷等营养盐充足、水体无流动性,都为藻类的生长提供了有利条件。各水箱内藻的种类相对单一,对照组、绿萝组、万年青组和皇冠草组的优势种分别有 2、4、2、4 种。

④ OTU 样本分布韦恩图和群落多样性分析表明,绿萝组与皇冠草组相似性较强,万年青组与其他组相似性最弱,万年青组群落多样性最小。各组中优势属与水质有密切联系。

⑤ 各水箱内 DP、TN 和 TOC 下降趋势一致,试验前期下降速度较快,之后逐渐变慢并趋于平稳。万年青组对 DP、TN、TOC 的去除速率较快,效果较好,去除率分别为 95.0%、97.57% 和 92.53%。综合考虑,万年青组对各物质的降解速率较快且对藻类有较好的抑制作用,指数模型模拟结果也获得了相同的结论。

参考文献:

- [1] SAMAL K, KAR S, TRIVEDI S. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: design, mechanism and performance [J]. Journal Environmental Management, 2019, 251: 109550.
 - [2] KORBOULEWSKY N, WANG R Y, BALDY V. Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: focus on the role of the substrate and plants on N and P removal [J]. Bioresource Technology, 2012, 105(4): 9-14.
 - [3] 张玲玲, 刘立早, 张玉平. 不同填料强化生态浮床对淡水养殖水体的净化效果[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 18-22.
- ZHANG Lingling, LIU Lizao, ZHANG Yuping. Purification effect of floating treatment wetlands enhanced with different biofilm carriers on aquaculture

- water[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(9): 18–22 (in Chinese).
- [4] LI Q, ZHAO Y, ZHANG X, *et al.* Spatial heterogeneity in a deep artificial lake plankton community revealed by PCR-DGGE fingerprinting [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(3): 624–635.
- [5] ZHAN A B, HULAK M, SYLVESTER F, *et al.* High sensitivity of 454 pyrosequencing for detection of rare species in aquatic communities[J]. Methods in Ecology and Evolution, 2013, 4(6): 558–565.
- [6] 张择瑞, 刘鑫, 胡淑恒, 等. 种植密度对绿萝浮床净化富营养水体效果的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(11): 81–86.
- ZHANG Zerui, LIU Xin, HU Shuheng, *et al.* Effect of planting density on purification of eutrophic water by *Epipremnum aureum* floating bed [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(11): 81–86 (in Chinese).
- [7] HU Z F, LI D S, GUAN D T. Water quality retrieval and algae inhibition from eutrophic freshwaters with iron-rich substrate based ecological floating beds treatment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 135584.
- [8] PAERL H W, HALL N S, PEIERLS B L, *et al.* Hydrologic variability and its control of phytoplankton community structure and function in two shallow, coastal, lagoonal ecosystems: the Neuse and new river estuaries, North Carolina, USA [J]. Estuaries and Coasts, 2014, 37: 31–45.
- [9] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- LIU Defu, HUANG Yuling, JI Daobin, *et al.* Blooms and Ecological Dispatch of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2013 (in Chinese).
- [10] SCHMIEDER R, EDWARDS R. Quality control and preprocessing of metagenomic datasets [J]. Bioinformatics, 2011, 27(6): 863–864.
- [11] PARKS D H, TYSON G W, HUGENHOLTZ P, *et al.* STAMP: statistical analysis of taxonomic and functional profiles [J]. Bioinformatics, 2014, 30(21): 3123–3124.
- [12] WANG Q G, GARRITY M, TIEDJE J M, *et al.* Naïve bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy [J]. Applied Environmental Microbiology, 2007, 73(16): 5261–5267.
- [13] LIU Y, LÜ J J, SINGH R P. Removal of low-concentration phosphorus by efficient phosphorus removal composite-based ecological floating beds [J]. Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA, 2019, 68(8): 782–792.
- [14] CHEN X F, YANG L Y, XIAO L, *et al.* Nitrogen removal by denitrification during cyanobacterial bloom in Lake Taihu [J]. Journal of Freshwater Ecology, 2012, 27(2): 243–258.
- [15] SONG J, LI Q, DZAKPASU M, *et al.* Integrating stereoelectric packing into ecological floating bed for enhanced denitrification in landscape water [J]. Bioresource Technology, 2020, 299: 122601.
- [16] 张惠, 汪鹏合, 张文娟, 等. 利用不同物候期水生植物配置提高浮床人工湿地的除氮效果[J]. 湖泊科学, 2017, 29(3): 575–584.
- ZHANG Hui, WANG Penghe, ZHANG Wenjuan, *et al.* Improving nitrogen removal by phenophase arrangement of aquatic macrophyte species in the floating-bed constructed wetland [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(3): 575–584 (in Chinese).
- [17] 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 等. 生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 809–814.
- ZHAO Zhirui, ZHANG Jiayao, LI Duo, *et al.* Purification characteristics of urban tail water from sewage treatment plant by biofilm ecological floating bed [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 809–814 (in Chinese).
- [18] 陈志远, 种云霄, 程冰冰, 等. 香蒲浮床有机物去除能力及根表微生物群落结构[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 943–952.
- CHEN Zhiyuan, ZHONG Yunxiao, CHENG Bingbing, *et al.* COD_{Cr} removal and rhizoplane bacterial diversity in the cattail aquaculture systems [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(6): 943–952 (in Chinese).

作者简介: 张择瑞(1985–), 男, 安徽利辛人, 博士研究生, 研究方向为环保装备及工程。

E-mail: zrs2020@163.com

收稿日期: 2020–04–28

修回日期: 2020–05–31

(编辑: 任莹莹)