

一种净化水质的复合生物修复系统^{*}

袁亚光¹ 张弛¹ 谢卫平² 赵福庚^{1**} 钦佩¹

(¹南京大学盐生植物实验室, 南京 210093; ²宜兴市环境监测站, 江苏宜兴 214206)

摘要 在实验室内利用人工模拟方法,选择水蕹菜(*Ipomoea aquatica*)、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)为工程物种,构建一套水生经济植物-水生动物-微生物复合生物修复系统进行污水修复,研究该系统中动植物生物量及水质指标的变化。结果表明,在23 d的实验周期中,水体铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)下降96.5%,硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)下降82.2%,总磷(TP)下降53.2%,化学需氧量(COD_{Mn})下降24.5%。水蕹菜平均增重31.2%,泥鳅平均增重6.1%。这种复合的生物修复模式具有较好的经济效益与环境效益。

关键词 水质净化; 生态工程; 复合生物修复系统; 食物链

中图分类号 X171.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)7-1876-06

A composite bioremediation system for water purification. YUAN Ya-guang¹, ZHANG Chi¹, XIE Wei-ping², ZHAO Fu-geng^{1**}, QIN Pei¹ (¹Halophyte Research Laboratory, Nanjing University, Nanjing 210093, China; ²Yixing Environmental Monitoring Station, Yixing 214206, Jiangsu, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(7): 1876–1881.

Abstract: By the method of artificial simulation in laboratory, and with water spinach (*Ipomoea aquatica*), loach (*Misgurnus anguillicaudatus*), and a kind of pseudomonad (*Rhodopseudomonas palustris*) as the engineering species, a composite bioremediation system of aquatic economic plant-aquatic animal-microorganism was constructed to improve the water quality of sewage. The biomass of *I. aquatica* and *M. anguillicaudatus* in the system and the water quality indices were investigated. Within the 23 days experimental period, the nutrient concentrations in the sewage decreased significantly, with the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, TP, and COD_{Mn} being 96.5%, 82.2%, 53.2%, and 24.5%, respectively. Meanwhile, the biomass of *I. aquatica* and *M. anguillicaudatus* was averagely increased by 31.2% and 6.1%, respectively. All the results suggested that this composite bioremediation model had good economic and environmental benefits.

Key words: water purification; ecological engineering; composite bioremediation system; food chain.

水体生物修复是一项去除水体内源性营养物负荷的有效措施,是利用水生生物吸收利用氮、磷元素进行代谢活动以去除水体中氮、磷营养物质的方法。联合修复通过利用水生植物、微生物、水生动物等生态要素的协同作用完成生态修复的功能,其在有限的空间内可集中较大的生物量,达到快速、高效的处理效果(杨清海等,2008;李秀艳等,2009),能实现资源的再利用,有利于建立合理的水生态循环。

生物共生机制、生物多样性及食物链原理是生态工程的重要基本原理(钦佩等,2002),通过人工构筑共生生态机制和食物链的“加环”可以大幅度提高生态效应和生态净化功能。在食物链中引入水生动物,可以提高颗粒性有机物的可溶化、无机化以及可生化性,改善植物吸收以及人工介质单元生物膜中微生物的基质条件,促进微生物的生长和活性,提高水质的净化效果(李先宁等,2007)。

目前在实践中,食物链治理方法主要是放养鲢鱼、鳙鱼、草鱼等常规鱼类,运行中需要增氧设施,不能耐受高浓度的污水,收获不方便,经济效益不高;

^{*} 国家林业公益性行业科研专项(200904001)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: fgzhao@nju.edu.cn

收稿日期: 2011-12-07 接受日期: 2012-03-07

泡沫塑料和聚氯乙烯载体等容易带来二次污染,并且很难维系动物、植物和微生物的协同效应和形成稳定的生态系统(张毅敏等,2010;周文宗和覃凤飞,2011)。为了避免已有食物链治理方法的弊端,本研究选择更耐污的水生动物泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、水生经济植物水葫芦(*Ipomoea aquatica*),并配合沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)(光合细菌)作为主要的生物要素,进行室内水体修复模拟实验,来研究三者联合修复净化水质的作用。在这个复合的生物修复系统中,水葫芦的净化水质能力在前人的研究结果中十分突出,且无需载体便能漂浮在水面上,是水耕蔬菜的典型,具备很好的经济价值;泥鳅生存能力强、易养殖,在水中活动能促进水体交换、改善植物吸收,且泥鳅具有很高的营养价值;沼泽红假单胞菌能很好的促进水体营养物质的吸收。因此,本研究通过研究这种复合生物修复的物种配置,以期取得良好的水体修复效果以及一定的经济价值,旨在为污水处理提供新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试植物:水葫芦属1年生水生草本植物,性喜温暖湿润,耐光、耐肥、耐涝抗高温,适应性广,夏季炎热高温仍能生长。水葫芦不仅可以作为家禽的适口饲料,而且是我国长江流域居民夏季的主要蔬菜品种之一,其营养价值高于番茄和一般蔬菜,应用水葫芦净化水质可以提高水体修复工程的经济效益(陈家长等,2010)。实验用水葫芦采自宜兴太湖种植基地,并置于实验室内水培驯养适应。

供试动物:泥鳅属底层鱼类,生活水温10~30℃,最适水温为25~27℃。对低氧环境适应性强,除了鳃呼吸外,还可以进行皮肤呼吸和肠呼吸,在体长3cm后,主要以肠呼吸为主,经常跳出水面呼吸,是一种“微型增氧机”,能解决养殖增氧的问题。24.5℃测得泥鳅的幼鱼窒息点为 $0.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,成鱼为 $0.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (李秀艳等,2009)。实验用泥鳅购于南京下关水产批发市场。

供试微生物:沼泽红假单胞菌是光合细菌(PSB)的代表菌株之一,目前国内对其研究主要集中在各种废水处理、生物产氢和畜牧业及水产养殖的效果上。固定化光合细菌是将游离的光合细菌利用固定化材料将其固定,用于处理污染水体的一种

方法。通过固定化微生物增加生物膜与水接触面积成为水体生态修复的一个关键技术(吴向华等,2004)。实验用固定化沼泽红假单胞菌由南京晓庄学院生物工程实验室提供。

1.2 实验设计

在通风宽敞的实验室内,将试验动植物、微生物放于500mm×350mm×300mm的玻璃缸内,并在玻璃缸内装入40L实验污水(改良的Hoagland营养液,加入葡萄糖调整COD至 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),每天在7:00—18:00打开模拟自然日照的光源,光源为水面上方30cm处2只28W的T5日光灯,光照度1200lx,以保证各个实验组足够的光照。

为了考察水葫芦、泥鳅、沼泽红假单胞菌三者联合对富营养化污水的净化能力,本实验设置了4个实验小组,每个小组3个重复。各组投放生物设置如下:A组,水葫芦+泥鳅+固定化沼泽红假单胞菌。B组,水葫芦+泥鳅。C组,水葫芦+固定化沼泽红假单胞菌。D组,对照组,不放水葫芦、泥鳅及固定化沼泽红假单胞菌。

动植物投放密度根据野外实验(水葫芦 $2500\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,泥鳅 $750\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)进行相应调整,即每个玻璃缸投放水葫芦100g(湿重),泥鳅30g(湿重)。固定化沼泽红假单胞菌在每一组投放固定化基质100g,基质材料为聚乙烯醇,微生物含量 $5\times 10^6\text{ cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.3 测定项目

实验时间为2011年6月22日—2011年7月15日。隔3~4d补充蒸馏水至原水位线,检测水质,并记录动植物生长情况。水温、pH与DO采用哈希水质多参数测定仪HQ40D测定;水葫芦叶片叶绿素相对含量采用SPAD-502叶绿素检测仪测定;水体铵态氮采用纳氏试剂比色法(GB/T 7479-1987)测定,SPAD-502叶绿素计是通过比较叶片叶绿素对2个不同波长光源吸收的光密度差异,从而快速、简便、无损地测定叶片的叶绿素相对含量(SPAD值)(张日清等,2011)。水体硝态氮采用酚二磺酸分光光度法(GB/T 7480-1987)测定;水体TP采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-1989)测定;水体 COD_{Mn} 采用高锰酸盐指数测定方法(GB/T 11892-1989)测定。

1.4 数据分析

用Excel 2010进行数据统计整理,用SPSS 18.0进行方差分析、t检验,用Origin 7.5进行作图。

表1 供试动植物在各处理组的生长状况

Table 1 Growth status of experimental animal and plants under different treatment groups

处理	空心菜						泥鳅		
	重量			SPAD 值			重量		
	起始(g)	结束(g)	增长(%)	起始(g)	结束(g)	增长(%)	起始(g)	结束(g)	增长(%)
A 组	100.9 a	132.4 a	31.2	43.4 a	30.3 a	-30.2	30.4 a	32.2 a	5.9
B 组	101.2 a	122.5 b	21.0	43.3 a	31.5 a	-27.3	26.7 b	28.4 b	6.3
C 组	101.8 a	117.1 c	15.0	43.4 a	28.3 a	-34.8	-	-	-
D 组	-	-	-	-	-	-	-	-	-

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 动植物生长状况

水薹菜和泥鳅在整个实验期间均能正常生长、生存。由表1可知,A组植株增重31.2%,高于B组21.0%的增重以及C组15.0%的增重;A组、B组、C组其植物SPAD值在实验结束时,较之实验初都有较明显的下降;A组、B组动物增重分别为5.9%、6.3%。

2.2 水质外观变化

各组水温在实验期间维持相对稳定,在23~26℃。水质外观变化情况为:D组水体颜色无太大变化,水体略变浑浊;A、B、C3组水体澄清,呈黄绿色,且A、B组黄绿色较C组深;A、B组缸底碎屑物较多,包括断裂的根系、泥鳅排泄物等。

2.3 各处理组水质指标变化

2.3.1 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由图1A可见,各实验组的铵态氮浓度实验期间普遍呈逐渐下降趋势。对照D组铵态氮减少了22.9%;A、B、C3个实验组铵态氮分别减少了96.5%、96.8%、99.7%(表2),相较于初始浓度来说,均有较高的去除率。将各组铵态氮数据进行配对样本 t 检验,看各组之间的降低过程是否存在差异,可以知道A、B之间无显著差异,其余各组间有显著差异。A、B组之间的组别设置的差别在于是否有沼泽红假单胞菌,而两者铵态氮变化差异不显著,可认为沼泽红假单胞菌的活动在该实验系统对铵态氮的影响不大。A、C组的差异在于A组有泥鳅,而A组铵态氮的降低速度明显慢于C组,判断是由于泥鳅排泄铵态氮造成的。D组与其余各组差异的原因在于D组没有水薹菜,而水薹菜的吸收利用是铵态氮浓度降低的主要原因。

2.3.2 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 由图1B可见,A、B、C3个实验组在实验初期,水体 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度迅速下降,在实验后期维持相对稳定状态,实验结束时,A、B、C3组

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度分别降低了82.2%、59.3%、73.1%(表2),从降低百分比上来看,A组的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除效果最好。将各组 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的数据进行配对样本 t 检验,结果表明3个实验组之间降低趋势无显著差异,与对照组相比,降低过程有极显著差异(表2)。

2.3.3 TP 从净化效果上来看,A组对TP的去除率最理想(图1C)。A、B、C3组的TP浓度分别去除了53.2%、42.2%、27.3%,同时对对照组的TP减少了3.1%;将各组TP数据进行配对样本 t 检验,发现各组之间差异均显著(表2)。说明水薹菜、泥鳅、沼

表2 不同处理组水质指标变化情况

Table 2 Water quality index changes of different treatment groups

项目	组别	C_0 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	C_1 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	V (%)
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	A	0.621	0.022	96.5 a
	B	0.620	0.020	96.8 a
	C	0.610	0.002	99.7 b
	D	0.611	0.471	22.9 c
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	A	4.22	0.75	82.2 a
	B	4.27	1.78	59.3 a
	C	4.27	1.15	73.1 a
	D	4.14	4.25	-2.7 b
TP	A	1.60	0.75	53.2 a
	B	1.58	0.91	42.2 b
	C	1.59	1.15	27.3 c
	D	1.59	1.54	3.1 d
pH	A	7.87	7.72	1.9 a
	B	7.89	7.71	2.3 b
	C	7.86	7.79	0.9 c
	D	7.86	7.85	0.1 d
DO	A	8.41	7.23	14.0 a
	B	8.39	7.18	14.4 a
	C	8.43	7.94	5.8 b
	D	8.41	8.29	1.4 c
COD	A	20.63	15.57	24.5 a
	B	19.94	18.26	8.4 b
	C	19.59	16.17	17.5 a
	D	20.51	19.28	6.0 b

C_0 : 初始浓度, C_1 : 最终浓度, V: 去除率。各指标同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

泽红假单胞菌在一定程度上都会影响到 TP 的浓度。A 组比 B 组浓度下降明显,说明沼泽红假单胞菌有降低 TP 的作用,A 组浓度比 C 组显著降低,说明添加泥鳅的活动同样有利于系统对 TP 的吸收。

2.3.4 COD_{Mn} 由图 1D 可见,各组 COD_{Mn} 波动较大,实验结束时,A、C 组的 COD_{Mn} 去除率分别达到 24.5%、17.5%,B、D 组去除率为 8.4%、6.0%;经过配对样本 t 检验,A、C 组 COD_{Mn} 的变化过程无显著差异,B、D 组 COD_{Mn} 的变化过程无显著差异,A、C 组的 COD_{Mn} 的降低比 B、D 组显著(表 2)。分析 4 个小组间的差异可知,沼泽红假单胞菌在 COD_{Mn} 的降低过程中起着重要作用,而水蕹菜及泥鳅对 COD_{Mn} 的影响不明显。

2.3.5 pH 从影响效果上来说,3 个实验组较之对照组,对 pH 都有极显著的降低作用(图 1E),且酸性程度 $B > A > C > D$ 组,经过差异性检验,各组间

pH 的变化过程都有显著差异(表 2)。影响水体 pH 变化的原因较多,植物根系呼吸、泥鳅呼吸都会起到增加水体酸性的作用,而从实验结果来看,沼泽红假单胞菌的代谢一定程度上提高了水体碱性。

2.3.6 DO 图 1F 显示了不同实验组水体中溶解氧的变化动态。DO 统一使用 14:00 时测量的数值。有泥鳅的 A、B 组,在实验中期,DO 有个明显急速下降的过程,实验后期 DO 浓度有所恢复,分别降低 14.0%、14.4%,经差异性检验,两者 DO 的变化差异不显著;与 C、D 组相比,A、B 组 DO 浓度明显偏低,差异显著(表 2)。A、B 组之间差异在于 A 组有固定化沼泽红假单胞菌,沼泽红假单胞菌作为光合细菌的一类,理论上应该提高水体溶氧,而实验结果并不支持这点,可认为在该系统中提高水体溶氧的作用有限,而泥鳅作为水生动物,其呼吸作用是影响系统溶氧的主要因素。

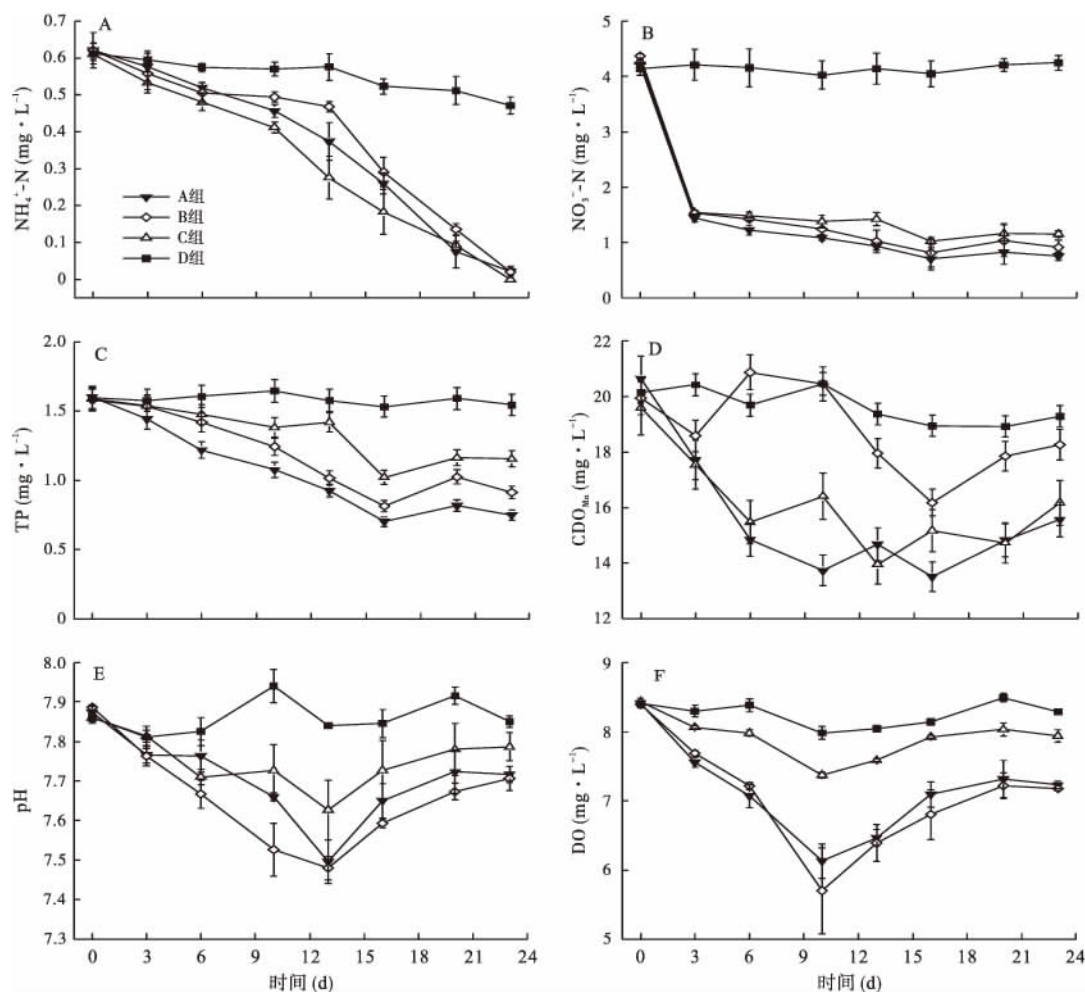


图 1 各处理组水质指标动态

Fig. 1 Dynamics of water quality indexes under different treatment groups

3 讨论

水蓴菜作为水生经济植物,利用其处理富营养化水体,具有良好的经济效益与环境效益。单独的水蓴菜对水质的净化作用,在众多研究中得到证实。由文辉等(2000)在富营养化水体中,利用人工基质无土栽培水蓴菜净化水质的静态试验结果表明,水蓴菜对 TN 和 TP 的去除率可分别达到 81.3% 和 71.3%。陈家长等(2010)研究了浮床栽培水蓴菜对集约化养殖鱼塘的净化作用,结果表明,浮床栽培水蓴菜能够促进水体物质循环,加强水体自净功能,20% 的水覆盖面积时最具实用价值。介子林等(2009)的实验结果表明,水培水蓴菜覆盖面积低于 5%,便不能达到预期净化水质的目的,覆盖面积过大时,遮荫作用对池塘水温、溶解氧产生不利影响,还会增加投资成本;他们的实验后期,水蓴菜因营养不良出现生长停滞状态,这与本实验结果一致。本实验投放水蓴菜的 3 个实验组,结束时 SPAD 值显著下降。SPAD 值与植物叶绿素含量呈极显著相关,可判断植物的营养状况(张日清等,2011),在实验后期,由于 N、P 营养盐已被吸收处于较低浓度水平,没有新的营养盐补充,影响植物叶绿素的合成,导致 SPAD 值分别下降 30.2%、27.3%、34.8%。

沼泽红假单胞菌能利用多种硫化物或有机物作为其光合作用的供氢体和碳源,在厌氧光照、好氧光照、甚至好氧黑暗环境中都能很好地增殖,起到净化水质的作用(吴向华等,2004)。Hisashi 等(2000)用固定化光合菌处理合成废水表现出较高的去除效果,48 h 可有效去除 COD 89.0%、磷 77.0%、硝态氮 99.0%。蔡慧农等(2007)对沼泽红假单胞菌降铵态氮效果进行了研究,结果表明,沼泽红假单胞菌具有很强的综合降铵态氮作用,但其降铵态氮效果受水质的影响而不稳定。本实验结果表明,在联合修复系统中,有沼泽红假单胞菌的存在,会促进系统中 COD_{Mn} 、 NO_3^- -N、TP 浓度的降低,而在对铵态氮的降低上,结果不显著,原因是水蓴菜在铵态氮的吸收上起着主要作用,实验后期铵态氮含量已经很低,并不能从铵态氮残余量来判断沼泽红假单胞菌在联合修复系统中对铵态氮吸收所起的作用。另外,沼泽红假单胞菌对系统 DO 的改善效果也没有达到预期。

目前对泥鳅在净化水质中所起的作用的研究较少。梁明山等(1999)研究发现,泥鳅体表分泌的粘液中含有超氧化物歧化酶(SOD),可以提高生物的活性,与泥鳅较强的环境适应性有关。李秀艳等(2009)的生物栅技术修复景观水体试验结果表明,泥鳅能增加生物栅对 TP 和 NH_4^+ -N 的处理效率,泥鳅的运动方式能够增加生物栅氧恢复速率和 DO 水平。室内模拟实验结果表明,泥鳅排泄物可以增加水体铵态氮,而泥鳅活动可以降低水体 TP、COD 浓度水平。实验时,DO 统一采用 14:00 时测量的数据,因为 DO 含量与空气中氧的分压、水的温度都有密切关系,而在自然情况下,空气中的含氧量变动不大,故水温是主要的因素。在同一天的同一时间段,各组水温基本一致,因此认为,在对 DO 的影响上,泥鳅是主要的影响因子,实验初期 A、B 组 DO 显著降低,而在后期,DO 水平慢慢回升。总体来说,复合生物修复小组的 DO 处于健康水平。

对于泥鳅是否会取食水蓴菜,从而影响水蓴菜的生长以及水体修复效果这个问题,印杰等(2000)通过对泥鳅食性的研究,认为泥鳅是偏动物食性的杂食性鱼类,主要食物有昆虫幼虫、小型甲壳动物、藻类、高等植物,环境中食物的易得性及喜好性是影响泥鳅食物组成。在进行室内模拟实验的时候,水体里没有昆虫幼虫、小型甲壳动物等,所以泥鳅会取食部分水蓴菜根系,但数据显示泥鳅并未明显影响到水蓴菜的增重。当复合生物修复模式推广到野外环境时,由于野外水体有丰富的浮游动植物,泥鳅对水蓴菜的影响则会更少,相反,水蓴菜会给泥鳅栖息提供很好的环境。

参考文献

- 蔡慧农,倪 辉,苏文金. 2007. 沼泽红假单胞菌培养基的优化及降氨氮作用的研究. 集美大学学报, 12(3): 198-203.
- 陈家长,孟顺龙,胡庚东,等. 2010. 空心菜浮床栽培对集约化养殖鱼塘水质的影响. 生态与农村环境学报, 26(2): 155-159.
- 介子林,张 坤,周晓林,等. 2009. 水培空心菜优化比例试验研究. 河南水产, (1): 33-34.
- 李先宁,宋海亮,朱光灿,等. 2007. 组合型生态浮床的动态水质净化特性. 环境科学, 28(11): 2448-2452.
- 李秀艳,杨清海,孟飞琴,等. 2009. 泥鳅在生物栅技术修复景观水体中的作用. 应用与环境生物学报, 15(1): 82-86.

- 梁明山, 刘 煜, 曾 宇, 等. 1999. 泥鳅体表粘液超氧化物歧化酶的发现. 西南农业学报, 12(4): 120 – 122.
- 钦 佩, 安树青, 颜京松, 等. 2002. 生态工程学. 南京: 南京大学出版社.
- 吴向华, 杨启银, 刘五星, 等. 2004. 一株沼泽红假单胞菌的分离与鉴定. 环境与健康杂志, 21(2): 101 – 103.
- 杨清海, 李秀艳, 赵 丹, 等. 2008. 植物-水生动物-填料生态反应器构建和作用机理. 环境工程学报, 2(6): 852 – 857.
- 印 杰, 田 畛, 赵振山. 2000. 泥鳅食性的初步研究. 水利渔业, 20(5): 15 – 16.
- 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 2000. 水生经济植物净化受污染水体研究. 华东师范大学学报(自然科学版), (1): 99 – 102.
- 张日清, 何小燕, 叶 航, 等. 2011. 油茶叶片 SPAD 值差异的初步研究. 中南林业科技大学学报, 31(3): 30 – 33.
- 张毅敏, 高月香, 吴小敏, 等. 2010. 复合立体生物浮床技术对微污染水体氮磷的去除效果. 生态与农村环境学报, 26(增刊): 24 – 29.
- 周文宗, 覃凤飞. 2011. 特种水产养殖. 北京: 化学工业出版社.
- Hisashi N, Tomohiro K, Masanori W, *et al.* 2000. Simultaneous removal of chemical oxygen demand (COD), phosphate, nitrate and H₂S in the synthetic sewage wastewater using porous ceramic immobilized photosynthetic bacteria. *Biotechnology Letters*, 22: 1369 – 1374.
-
- 作者简介** 袁亚光,男,1987 年生,硕士研究生,主要从事湿地生态学的研究。E-mail: yuanyaguang0@126.com
- 责任编辑** 魏中青
-