

李文祥, 李为, 林明利, 等. 2011. 浮床水蔬菜对养殖水体中营养物的去除效果研究[J]. 环境科学学报, 31(8): 1670-1675

Li W X, Li W, Lin M L, et al. 2011. *In situ* nutrient removal from aquaculture wastewater by the aquatic vegetable *Ipomoea aquatica* on floating beds [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(8): 1670-1675

## 浮床水蔬菜对养殖水体中营养物的去除效果研究

李文祥<sup>1</sup>, 李为<sup>1,2</sup>, 林明利<sup>1,2</sup>, 王英雄<sup>3</sup>, 刘家寿<sup>1</sup>, 李钟杰<sup>1,\*</sup>

1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 洪湖市水产技术推广站, 洪湖 433200

收稿日期: 2010-10-26 修回日期: 2010-11-25 录用日期: 2010-12-06

**摘要:** 为研究浮床水蔬菜对池塘养殖水质的改善效果, 于 2007 年 6 月至 11 月, 在 6 个 2000 m<sup>2</sup> 的标准养殖池塘进行了中试研究. 3 个池塘放养常规鱼类和部分名贵鱼类, 并利用浮床技术在水面上种植 200 m<sup>2</sup> 的水蔬菜 (*Ipomoea aquatica*), 另外 3 个池塘放养相同重量的常规鱼类作为对照塘. 实验结果显示, 种植塘的渔产量为 1467 kg, 显著高于对照塘 1203 kg 的渔产量 ( $p < 0.05$ ). 对照塘中 TN 去除率为 25.17%, TP 为 15.27%; 种植塘中 TN 去除率为 30.02%, TP 为 21.68%; 种植塘收获水蔬菜鲜重 (4000 ± 350) kg, TN 去除率为 8.41%, TP 为 4.85%. 在养殖实验的中后期, 种植塘水体的 TN、TP、COD 和 Chl a 都显著低于对照塘, 而透明度显著高于对照塘, 溶解氧保持在 5 mg·L<sup>-1</sup> 以上. 这种综合养殖模式不仅能有效改善水质, 减少养殖废水对环境的污染, 还可提高养殖的经济效益.

**关键词:** 浮床; 水蔬菜; 养殖废水; 营养去除

文章编号: 0253-2468(2011)08-1670-06 中图分类号: X703.1 文献标识码: A

## *In situ* nutrient removal from aquaculture wastewater by the aquatic vegetable *Ipomoea aquatica* on floating beds

LI Wenxiang<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, LIN Mingli<sup>1,2</sup>, WANG Yingxiong<sup>3</sup>, LIU Jiashou<sup>1</sup>, LI Zhongjie<sup>1,\*</sup>

1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

3. Honghu Fishery Technical Extension Station, Honghu 433200

Received 26 October 2010; received in revised form 25 November 2010; accepted 6 December 2010

**Abstract:** To investigate the nutrient removal in an aquaponic system, pilot scale tests were carried out in six earthen ponds of area 2000 m<sup>2</sup> from June to November in 2007. The aquatic vegetable *Ipomoea aquatica* (200 m<sup>2</sup> area) was planted on floating beds in three ponds. The other three ponds without the vegetable were considered controls. The same fish weight was stocked in the planted and control ponds, but with different fish species. At the end of experiment, the fish production in planted ponds (1467 kg) was significantly higher than in control ponds (1203 kg) ( $p < 0.05$ ). Percentage removal of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) by harvested fish in the control ponds was 25.17% and 15.27%, respectively. Percentage removal of TN and TP by harvested fish in the planted ponds was 30.02% and 21.68%, respectively. The fresh weight of harvested vegetable was (4000 ± 350) kg; and the percentage removal of TN and TP was 8.41% and 4.85%, respectively. In the middle and late period of the experiment, the contents of chemical oxygen demand (COD) and chlorophyll a (Chl a) in the planted ponds were significantly lower than in the control ponds, and the transparency was significantly higher than in the control ponds. The concentration of dissolved oxygen (DO) in planted ponds was higher than 5 mg·L<sup>-1</sup> during the experiment, whereas the concentration of DO in the control ponds decreased sharply in the last month. The results suggested that the water quality could be improved effectively and a higher fish density could be stocked in the aquaponic system.

**Keywords:** floating beds; *Ipomoea aquatica*; aquaculture wastewater; nutrient removal

基金项目: 湖北省科技攻关项目 (No. 2006AA203A01); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助 (No. NYCYT-49-15)

Supported by the Technology Project of Hubei Province (No. 2006AA203A01) and the Earmarked Fund for Modern Agro-industry Technology Research System (No. NYCYT-49-15)

作者简介: 李文祥 (1973—), 男, 博士, E-mail: liwx@ihb.ac.cn; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: zhongjie@ihb.ac.cn

Biography: LI Wenxiang (1973—), male, Ph. D., E-mail: liwx@ihb.ac.cn; \* Corresponding author, E-mail: zhongjie@ihb.ac.cn

## 1 引言( Introduction)

含有大量营养物的养殖废水带来的富营养化问题引起广泛的关注( Carpenter *et al.*, 1998; Ruenglertpanyakul *et al.*, 2004), 中国的池塘养殖大多在开放或半开放的土池中进行, 靠投喂大量的人工配合饲料提高产量, 通常饲料中只有 20% ~ 50% 的氮和 15% ~ 65% 的磷被鱼体吸收( Schneider *et al.*, 2005), 大量的残饵和鱼类代谢产物都留在池塘内, 破坏水质, 甚至引发蓝藻水华( Van Rijn, 1996). 为了保持良好的水质, 富含营养物的养殖废水通过换水被排放到湖泊、河流, 从而促进了水环境的富营养化.

养殖废水的生物处理是综合养殖的重要组成部分( Siddiqui, 2003; Troell *et al.*, 2005), 在循环水养殖系统中, 构建人工湿地是主要的处理方法, 能有效移除养殖废水中的营养物( Lin *et al.*, 2002; Naylor *et al.*, 2003; Schulz *et al.*, 2003), 但人工湿地需要在养殖单元外建造, 在养殖单元内的原位处理技术应该更适合中国的开放或半开放池塘养殖, 如利用浮床技术在养殖池塘上种植水生蔬菜, 即种菜养鱼系统( Aquaponic system), 该模式在循环水养殖系统中是可行的( 丁永良等, 1997; Diver, 2006). 在水泥池的养殖试验中对养殖水质也有明显改善效果( Li *et al.*, 2009).

水生蔬菜水蓼菜( *Ipomoea aquatica*) 在浮床上生长迅速, 产量高, 能有效去除水体中的营养物质( 戴全裕等, 1996; 刘淑媛等, 1999; Sooknah *et al.*, 2004). 本实验将研究浮床水蓼菜对养殖池塘中营养物质去除效果, 以及对水质的净化作用.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 鱼种放养和水蓼菜种植

实验在水泥板护坡、土底的标准池塘中进行, 每个池塘面积 2000 m<sup>2</sup> (3 亩), 深 2 m, 共有 6 个 3 个种植水生蔬菜( 种植塘), 另外 3 个不种植水生蔬菜( 对照塘). 种植塘中主要养殖异育银鲫( *Carassius auratus*), 还放养了部分名特鱼类如斑点叉尾鮰( *Ictalurus punctatus*) 和鳊( *Siniperca chuatsi*), 定期投放小规格的鲢( *Hypophthalmichthys molitrix*) 作为鳊的饵料鱼, 考虑到对照塘在养殖后期的水体溶氧会较低, 没有投放名特鱼类, 只放养了异育银鲫和大规模鲢鱼种, 放养鱼种的数量和重量见表 1.

按照池塘的长宽, 将浮床设计成 5 m × 40 m 的长方形, 四周和中间用竹竿固定, 上面铺上网目为 2 cm 的聚乙烯网片. 实验前, 用生石灰清塘并灌水至 1.5 m 深, 将长方形浮床放入池塘的一边, 用绳子固定, 把生长良好的水蓼菜按照 40 cm × 40 cm (行距 × 株距) 插入网眼中.

养殖实验从 2007 年的 6 月到 11 月, 每天早晨和下午打开投饵机, 投喂配合饲料各 1 次, 日投喂量为鱼体重的 2% ~ 5%, 每半个月调查鱼的体重, 具体投喂量根据天气和水温, 阴雨天和低温天气少投喂, 晴天多投喂. 养殖实验过程中不换水, 只补充水, 养殖用水是经过网片过滤的湖泊天然水. 在养殖中后期, 为防止鱼“泛塘”, 每天早晨 5 点开增氧机 1 h.

### 2.2 样品采集和测试分析

每个月采集每个池塘的水样 1 次, 水体透明度用萨氏圆盘测定, 溶氧和酸碱度分别用便携式溶氧仪( YSI, 550A) 和 pH 计( HANNA, HI 98127) 测定. 水样在 24 h 内送到实验室, 用 GF/C 滤膜过滤, 滤膜上的过滤物用丙酮抽提后, 用于叶绿素 a( Chl a) 的测定, 滤液中的总氨氮( TAN)、硝酸盐氮( NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝酸盐氮( NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N), 以及水样中的 TP、TN 和化学耗氧( COD) 的测定参考国外方法( Clesceri *et al.*, 1998).

实验结束后, 称量水蓼菜和各种鱼的体重, 并测量饲料、鱼体和蔬菜中 TP 和 TN 含量( 黄祥飞等, 1999).

### 2.3 统计分析

水蓼菜和鱼对 TN、TP 的去除率用收获与初始的 TN、TP 含量的差值除以总的输入量. 输入的营养物包括初始种植的水蓼菜、放养鱼、投喂饲料中的 TN、TP, 养殖用水的营养物含量忽略不计.

种植塘中渔产量和水质参数与对照塘之间的显著差异采用 Student's t-test.

## 3 结果( Results)

### 3.1 养殖结果

实验结束后, 排干水捕捞池塘中的鱼, 并称量体重( 表 1), 种植塘的平均渔产量为 1467 kg; 对照塘的平均渔产量为 1203 kg, 由于在养殖后期发生蓝藻水华, 导致近 100 kg 鲢死亡, 影响了总产量. 统计分析显示种植塘的渔产量显著高于对照塘(  $p < 0.05$ ).

表 1 种植塘和对照塘中放养和收获鱼的数量、重量和水蔬菜的重量

Table 1 Stocked and harvested individuals and weight of fish and vegetable in planted and control ponds

鱼和水生蔬菜	种植水蔬菜池塘			对照塘		
	放养数量/尾	重量/kg	收获重量/kg	放养数量/尾	重量/kg	收获重量/kg
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	200	0.5	73 ± 8			
异育银鲫 <i>Carassius auratus</i>	4000	200	710 ± 25	4000	200	870 ± 32
斑点叉尾鮰 <i>Ictalurus punctatus</i>	640	40	250 ± 14			
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	60000	60	434 ± 54	500	100	332 ± 23
水蔬菜 <i>Ipomoea aquatica</i>		10	4000 ± 350			

### 3.2 水生蔬菜和鱼的 TN、TP 去除率

根据鱼和水蔬菜的初始和收获重量,以及其中氮、磷的含量比率,计算 TN、TP 的去除率.对照组中鱼对 TN 去除率为 25.17%,TP 去除率为 15.27%;实验组中鱼对 TN 去除率为 30.02%,TP 为 21.68%.每个池塘收获水蔬菜(4000 ± 350) kg,对 TN 去除率为 8.41%,TP 去除率为 4.85%(表 2).饲料中大部分氮、磷营养物质溶解在水中和沉淀在底泥中.

表 2 放养鱼类、种植水生蔬菜和投喂饲料输入的 TN、TP,以及收获蔬菜和鱼输出的 TN、TP

Table 2 Nutrient inputs of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) by planted vegetables, stocked fish and formula feed, and removal of TN and TP by harvested vegetable and fish in planted and control ponds

	TP/g		TN/g	
	种植塘 Mean ± SD	对照塘 Mean ± SD	种植塘 Mean ± SD	对照塘 Mean ± SD
输入营养	31830 ± 923	29622 ± 859	93015 ± 2697	86734 ± 2515
水生蔬菜	4.0 ± 0.2		20 ± 1	
鱼类	1585 ± 57	1542 ± 56	7316 ± 263	7174 ± 258
饲料	30240 ± 786	28080 ± 730	85680 ± 2228	79560 ± 2068
输出营养				
水生蔬菜	1543 ± 62		7820 ± 313	
鱼类	8485 ± 305	6064 ± 218	35237 ± 1269	29004 ± 1044

### 3.3 养殖水质变化情况

在 6~9 月种植塘和对照塘水中的 TN、TP 含量维持在较低的水平,TN 低于 3.0 mg·L<sup>-1</sup>,TP 低于 0.4 mg·L<sup>-1</sup>.在 10、11 月,随着水中营养物的积累,水体的 TN、TP 含量呈上升趋势,对照塘的升高更快,而且显著高于种植塘的( $p < 0.05$ ).TAN 的变化没有规律,种植塘的与对照塘的也没有显著差异.对照塘水体中的 COD 含量呈上升趋势,而种植塘的呈下降趋势,并且在 9、10 月对照塘的 COD 含量显著高于种植塘的.对照塘和种植塘的 Chl a 含量一

直在升高.在 10 月种植塘的显著低于对照塘.对照塘的水体透明度保持在 30 cm 以下,种植塘的一直在升高,在 9、10、11 月显著高于对照塘.DO 和 pH 都保持在正常水平,而对照塘的 DO 在 11 月显著降低(图 1).从上述水质参数变化情况来看,种植水生蔬菜后,水体中的营养物、有机物和藻类含量明显降低,水质得到明显改善.

## 4 讨论(Discussion)

在 2 种养殖模式下,放养鱼种类不同,总重量几乎相等,但是种植了水蔬菜池塘的渔产量显著高于对照塘.主要原因是在养殖中期,对照塘水质明显富营养化,整个池塘覆盖蓝藻水华,每个池塘死亡约 100 kg.在整个养殖实验过程没有换水,鱼类代谢产物和残饵在水体和底泥中积累,并释放出大量的氮、磷,促进了有害蓝藻的生长,大量的蓝藻覆盖水面,释放蓝藻毒素,降低水体溶氧,从而影响鲢的生长,并引起死亡.因此,这种养殖模式必须定期排出富含营养物的养殖废水,加注新鲜的养殖用水,一些对溶氧要求高的名特鱼类不适合这种养殖模式.种植塘的水体透明度一直较高,也没有发生蓝藻水华,养殖鱼类生长比较正常,对溶氧要求较高的鳊也没有出现浮头死亡,而且这种养殖模式的经济效益更高.

通过收获水蔬菜输出的 TN 为 8.41%,TP 为 4.85%,水蔬菜对氮、磷的去除率明显低于 2006 年的水泥池养殖实验(TN、TP 去除率分别为 18.2%和 30.6%)(Li *et al.*, 2009).与其他综合养殖研究相比,营养去除率也明显偏低,在人工养殖生态系统中,饲料中大约 28% 的氮被种植的西红柿吸收(Quilleré *et al.*, 1995),浮萍(*lemna minor*)能吸收饲料中 15% 的氮和 17% 的磷(Schneider *et al.*, 2005).本实验种植的水生蔬菜面积较小,仅占养殖水面的 1/10,吸收的营养物也比较有限.

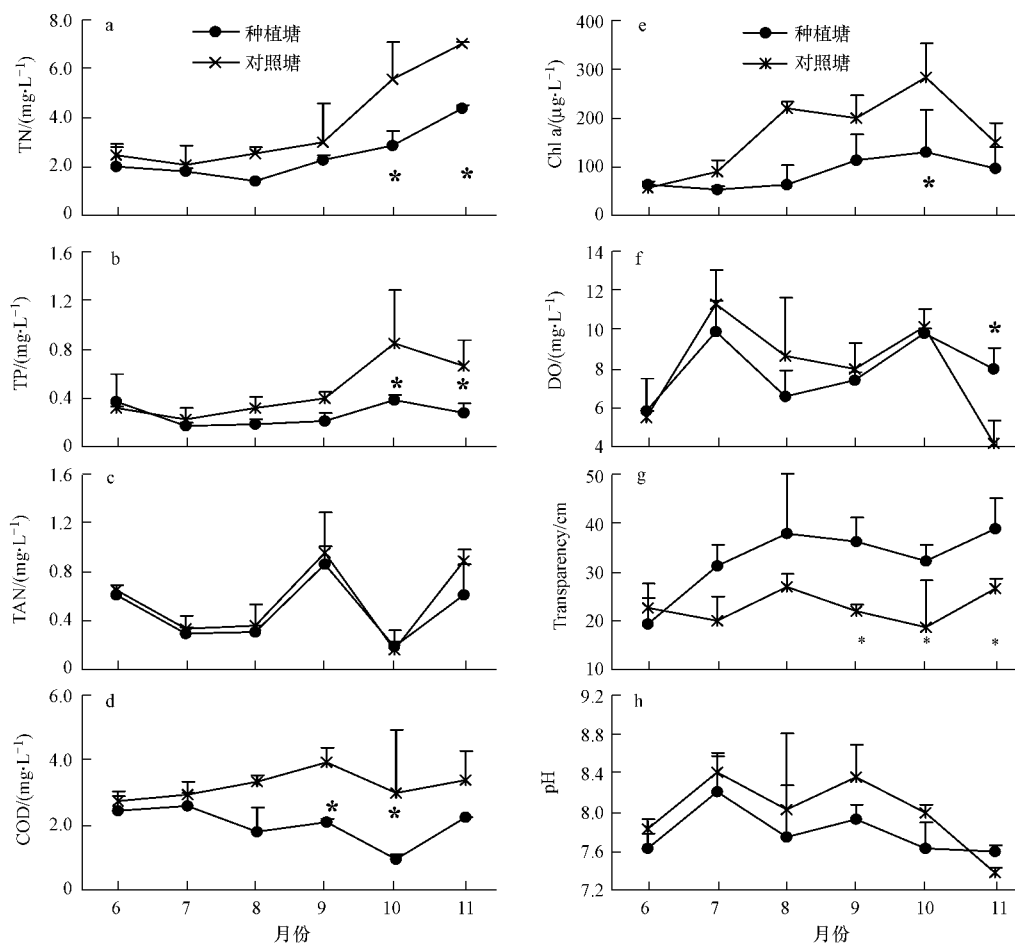


图1 种植塘和对照塘水体中 TN (a)、TP (b)、总氮氨 (c)、化学耗氧 (d)、叶绿素 a (e)、溶氧含量 (f) 和水体透明度 (g)、酸碱度 (h) 的变化情况 (星号 (\*) 表示种植塘和对照塘的水质参数有显著性差异 ( $p < 0.05$ ))

Fig. 1 Mean ( $\pm$  SD) concentrations of total nitrogen (a), total phosphorus (b), total ammonia nitrogen (c), chemical oxygen demand (d), chlorophyll a (e), dissolved oxygen (f), and water transparency (g) and value of alkalinity (h) in planted and control ponds (The symbol (\*) represents significant difference between planted and control ponds on the same day ( $p < 0.05$ ))

养殖鱼类输出的营养物也比较低,对照塘中鱼带出的 TN 为 25.17%, TP 为 15.27%, 种植塘中鱼输出的 TN 为 30.02%, TP 为 21.68%。可见,水蕹菜和养殖鱼类只吸收了小部分 TN 和 TP,说明饲料投喂过剩,导致部分饲料未被鱼类摄食而沉积到池底。其他养殖实验也显示相当一部分氮、磷沉积在底泥。在综合养殖模式下,29% 的氮和 51% 的磷沉积在底泥中 (Nhan *et al.*, 2008),而在半集约化养殖池塘中,输入营养中 66% ~ 70% 的氮和 35% ~ 86% 的磷沉积在底泥 (Green *et al.*, 1995)。另外,种植塘中鱼输出的 TN、TP 都高于对照塘,说明种植塘中的鱼生长更好。

尽管水蕹菜只吸收了小部分氮、磷营养物,但是在养殖后期,种植塘的 TN、TP 和 COD 含量都显著低于对照塘。一方面,可能与水生蔬菜的生长有

关。通常,水中氮和有机物的去除与植物的生物量相关 (Naylor *et al.*, 2003),而植物的生物量又受温度影响,因此营养去除高峰一般发生在植物的生长季节 (Spieles *et al.*, 2000; Picard *et al.*, 2005)。水蕹菜在春季和秋季生长旺盛,而在炎热的夏季生长缓慢。在养殖中后期水蕹菜吸收营养物的效果最好,使得水体中的 TN、TP 和 COD 明显低于对照塘。另一方面,种植塘中的水质较好,促进了鱼类的生长,对饲料的利用率更高。

水蕹菜的生长除了吸收水体中的营养物外,对其他水质参数也有影响,如叶绿素含量和水体透明度。种植塘中 Chl a 的含量在养殖后期显著低于对照塘,除了与水蕹菜吸收水体营养有关外,可能水生蔬菜也有抑制了藻类生长的作用,在整个养殖实验过程中没有发生蓝藻水华。由于水蕹菜对水体中

有机物的吸收,以及对藻类生长的抑制,种植塘的水体透明度也显著高于对照塘的.水蕹菜吸收氮氮的效果不明显,对 DO 和 pH 没有显著影响.在水泥池实验中,种植水蕹菜池塘与对照塘中的氨氮也没有明显差异,但是 DO 和 pH 在实验后期明显降低(Li *et al.*, 2009).可能水面上水生蔬菜的面积较小,没有影响水体的 DO 和 pH.

通常植物的面积越大,吸收营养物的效果越好,但是面积太大会影响其他水质参数,影响渔产量.到底种植多大面积的水生蔬菜最好?浮床水稻覆盖面积为 60% 对氮、磷去除率最高,而 20% 覆盖面积的特定移除率最高(宋祥甫等, 1998). 25% 的浮萍养殖密度对氮、磷的特定去除率最高(Ruenglerpanyakul, 2004).浮床无土栽培美人蕉的覆盖面积与养殖池塘中氮、磷的移除率显著正相关,但面积过大会降低水体溶氧,造成养殖鱼类缺氧. 20% 的池塘覆盖率比较适宜(邢旭文等, 2001).种植塘 1/6 面积的水蕹菜对营养物有较好的移除效果,但是影响水体的 DO 和 pH(Li *et al.*, 2009).本实验中,种植塘 1/10 面积的水蕹菜虽然对营养物的移除率有限,但是能抑制蓝藻水华的发生,保持水体较高的透明度,不影响水体的 DO 和 pH. 上述研究表明,种植鱼塘 10% ~ 20% 面积的水生蔬菜比较合适.

## 5 结论(Conclusions)

在养殖池塘上种植 1/10 面积的水蕹菜,虽然水生蔬菜本身去除的营养物质并不多,但是在养殖中后期对水体的 TN、TP 和有机物有较好的去除效果,可以抑制蓝藻水华的发生,有效改善养殖水质,在种植塘中通过收获鱼类带出的 TN、TP 更多.因此,这种养殖模式对营养物的利用效率更高,可适当提高养殖鱼类的密度.另外,整个养殖过程没有排放养殖废水,可减少对环境的污染.

责任作者简介:李钟杰(1957—),男,中国科学院水生生物研究所研究员,博士生导师.研究方向为渔业生态学、水产增养殖学. E-mail: zhongjie@ihb.ac.cn.

## 参考文献(References):

邢旭文,陈家长. 2001. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J]. 湛江海洋大学学报, 21(3): 29-33  
Bing X W, Chen J C. 2001. The control of eutrophic water in ponds by floating-bed soilless culture of plants [J]. Journal of Zhanjiang

Ocean University, 21(3): 29-33 (in Chinese)  
Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, *et al.* 1998. Nonpoint pollution of surface waters with nitrogen and phosphorus [J]. Ecological Applications, 8: 559-568  
Clesceri L S, Greenberg A E, Eaton A D. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th Edition) [M]. Washington DC: American Public Health Association /American Water Works Association/Water Environment Federation  
戴全裕,蒋兴昌,张珩等. 1996. 水蕹菜对啤酒及饮食废水净化与资源化研究 [J]. 环境科学学报, 16(2): 249-250  
Dai Q Y, Jiang X C, Zhang H, *et al.* 1996. Purification wastewater from brewery and diet processing by *Ipomoea aquatic* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 16(2): 249-250 (in Chinese)  
丁永良,张明华,张建华等. 1997. 鱼菜共生系统的研究 [J]. 中国水产科学, 4(5): 70-75  
Ding Y L, Zhang M H, Zhang J H, *et al.* 1997. Researches on fish and vegetable co-existaing system [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 4(5): 70-75 (in Chinese)  
Diver S. 2006. Aquaponics-Integration of Hydroponics with Aquaculture [EB/OL]. 2010-12-20. <http://www.attra.org/attra-pub/aquaponic.html>  
Green B W, Boyd C E. 1995. Chemical budgets for organically fertilized fishponds in the dry tropics [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 26: 284-296  
黄婧,林惠凤,朱联东等. 2008. 浮床水培蕹菜的生物学特征及水质净化效果 [J]. 环境科学与管理, 33(12): 92-94  
Huang J, Lin H F, Zhu L D, *et al.* 2008. Biological features and water purification efficiency of *Ipomoea aquatica* Forskal planted on the floating-bed [J]. Environmental Science and Management, 33(12): 92-94 (in Chinese)  
黄祥飞,陈伟民,蔡启铭. 1999. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社  
Huang X F, Chen W M, Cai Q M. 1999. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology [M]. Beijing: China Standard Press (in Chinese)  
Li W X, Li Z J. 2009. *In situ* nutrient removal from aquaculture wastewater by aquatic vegetable *Ipomoea aquatica* on floating beds [J]. Water Science and Technology, 59(10): 1937-1943  
刘淑媛,任久长,由文辉. 1999. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 35(4): 518-522  
Liu S Y, Ren J C, You W H. 1999. A study on purification of the eutrophic water body with economical plants soillessly cultivated on artificial substratum [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 35(4): 518-522 (in Chinese)  
Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, *et al.* 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system [J]. Aquaculture, 209: 169-184  
Naylor S, Brisson J, Labelle M A, *et al.* 2003. Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: the role of plants and substrate [J]. Water Science and Technology, 48: 215-222  
Nhan D K, Verdegem M C J, Milstein A, *et al.* 2008. Water and

- nutrient budgets of ponds in integrated agriculture-aquaculture systems in the Mekong Delta, Vietnam [J]. *Aquaculture Research*, 39: 1216-1228
- Picard C R, Fraser L H, Steer D. 2005. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms [J]. *Bioresource Technology*, 96: 1039-1047
- Quilleré I, Roux L, Mari D, *et al.* 1995. An artificial productive ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. 2. Performance [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 53: 19-30
- Ruenglerpanyakul W, Attasat S, Wanichpongpan P. 2004. Nutrient removal from shrimp farm effluent by aquatic plants [J]. *Water Science and Technology*, 50: 321-330
- Schneider O, Seret V, Edin E H, *et al.* 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 32: 379-401
- Schulz C, Gelbrecht J, Rennert B. 2003. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow [J]. *Aquaculture*, 217: 207-221
- Siddiqui S A. 2003. Wastewater treatment technology in aquaculture [J]. *World Aquaculture*, 34: 49-52
- 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 1998. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究 [J]. *环境科学学报*, 18(5): 489-494
- Song X F, Zou G Y, Wu W M, *et al.* 1998. Study on the removal effects and regulation of rice plants on floating beds to main nutrient N and P in eutrophicated water bodies [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 18(5): 489-494 (in Chinese)
- Spieles D J, Mitsch W J. 2000. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: a comparison of low and high nutrient riverine system [J]. *Ecological Engineering*, 14: 77-91
- Troell M, Neori A, Chopin T, *et al.* 2005. Biological wastewater treatment in aquaculture—More than just bacteria [J]. *World Aquaculture*, 36: 27-29
- Van Rijn J. 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review [J]. *Aquaculture*, 139: 181-201