严少华,王 岩,王 智. 水葫芦治污试验性工程对滇池草海水体修复的效果[J]. 江苏农业学报,2012,28(5):1025-1030.

水葫芦治污试验性工程对滇池草海水体修复的效果

严少华, 王 岩, 王 智, 郭俊尧
(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏 南京 210014)

摘要: 结合历史数据与现场取样监测数据,探讨了2011年滇池草海水葫芦治污试验性工程对草海水体溶氧量和总氮、氨态氮及总磷含量的影响。结果表明,水葫芦试验性工程并没有引起草海水体溶氧量的下降;2011年草海水体总氮、氨态氮及总磷含量显著低于2007~2010年($P<0.05$),说明水葫芦在滇池草海的治理中效果显著。此外,对湖泊水体物质输入-输出平衡估算结果显示,在水葫芦种养期(2011年5月~11月),水葫芦吸收磷量约占草海水体磷总削减量的139.0%,说明水葫芦不仅能有效去除水体中的磷,而且能去除湖泊底泥中可释放态磷。

关键词: 水葫芦; 富营养化; 湖泊; 氮; 磷
中图分类号: S963.22+1.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2012)05-1025-06

Remediation effects of experimental project using water hyacinth for pollution control in the Lake Caohai, Dianchi

YAN Shao-hua, WANG Yan, WANG Zhi, GUO Jun-yao
(*Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: In 2011, an experimental project using water hyacinth for removal of pollutants in Lake Caohai was carried out. The effects of this project on dissolved oxygen, total nitrogen, ammonium-N and total phosphorus in the lake were analyzed through field sampling data and historical data. The results showed that the dissolved oxygen levels in the lake were not decreased after the project was carried out, but compared with the years of 2007-2010, the concentrations of total N, ammonium-N and total P in 2011 were significantly decreased($P<0.05$). These results indicated that the effects of water hyacinths on the water purification in Lake Caohai were remarkable. The results from input-output balance estimation of phosphorus in the lake showed that, the assimilation of phosphorus by water hyacinths accounted for 139.0% of the total phosphorus removal in the lake during the growing season of water hyacinths (2011.05-2011.11), indicating that water hyacinths could not only remove phosphorus in the water, but also remove the soluble phosphorus in the sediment of Lake Caohai, Dianchi.

Key words: water hyacinth; eutrophication; lake; nitrogen; phosphorus

湖泊富营养化是当前湖泊污染所面临的主要问题。湖泊富营养化不仅对湖泊水质有严重影响,而且影响到周边水环境和人文景观,甚至通过给水系统危害到公众的健康。水体富营养化治理是当前世界的热点问题。水生植物修复技术由于具有投资成本低、操作简单、甚至不造成二次污染,且能有效地去除有机物、氮磷等多种元素等优点,已成为世界各国控制水体富营养化的主要措施之一[1-2]。水葫芦,又名凤眼莲,雨久花科凤眼莲属,为多年生漂浮性草本植物。由于其具有极强的氮、磷吸收能力以及重

收稿日期:2012-07-18
作者简介:严少华(1956-),男,江苏滨海人,研究员,主要从事滩涂养殖及富营养化湖泊治理研究。(E-mail)shyan@jaas.ac.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

金属富集能力，采用水葫芦净化水质，不仅可以省去浮床建设费用，也无需曝气或搅拌等能源消耗，并且不需要反复播种或移栽，其繁殖速度快，相对于其他水生植物打捞更容易，因而其被广泛用于水环境污染的治理[3-7]。

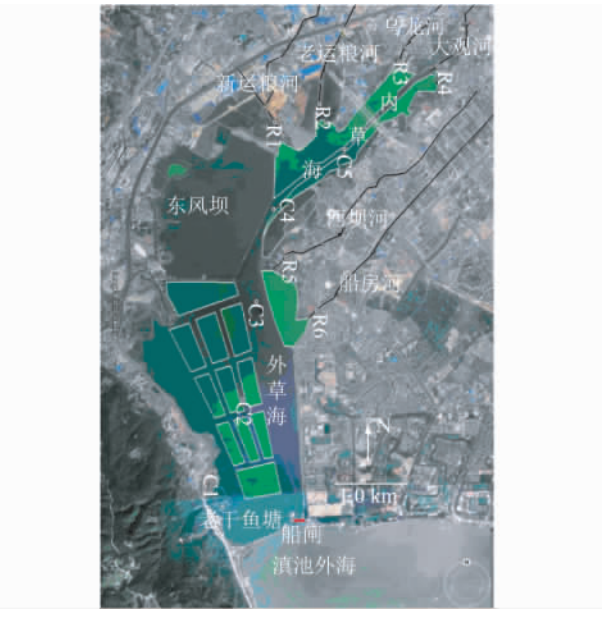
草海，为滇池内湖，是滇池污染最严重的水域。在过去的二十年间，政府实施了多项工程措施（如底泥疏浚、沉水植物恢复、入湖河道的整治等）来降低草海的富营养化程度，然而草海湖体的污染水平并没有显著性的降低。通过昆明市环境监测站的数据分析发现，2007 ~ 2009 年，湖体水质总氮含量 12.00 ~ 20.00 mg/L，总磷含量1.20 ~ 1.60 mg/L，分别为国家地表水 Ⅴ 类水质标准的 6 ~ 10 倍和 6 ~ 8 倍。为了降低水体的污染水平，2011 年，在昆明市市委市政府的关心下，大规模的水葫芦治污试验性工程在滇池草海开展。该试验性工程的基本原则是：控制性种养-机械化采收-资源化利用，即充分利用水葫芦高效富集氮、磷及其他污染物的优势，在湖泊污染严重的区域控制性分围格种养水葫芦，待水葫芦生长至一定生物量时，采用机械化采收上岸，从而带走水体氮、磷等污染物，并且将采收上岸的水葫芦制作有机肥及沼气而实现水葫芦的资源化利用。

先前关于水葫芦对水体修复的研究主要集中在小水体或静水水体中[8-9]，而滇池草海为流动性的开放性湖泊，大规模的生态工程对此类湖泊水体的修复效果还需进一步的监测评估。如此大规模地利用水葫芦治理污染湖泊在国内外未有先例，本试验通过现场原位取样监测，研究连续 5 年滇池草海入湖河道、内草海及外草海水体中溶氧、总氮、氨态氮及总磷含量的变化，探讨水葫芦试验性工程对湖泊水体的修复效果，以期为湖泊的富营养化治理提供指导作用。

1 材料与方法

1.1 样点分布及取样

草海，位于滇池北部（24°59′N；102°38′E），总面积约 10.5 km^2，平均水深约 2.5 m，蓄水量约2.5×10^7 m^3。草海主要由东风坝（约 2.4 km^2）、内草海（约 1.8 km^2）、外草海（约 5.8 km^2）及老干鱼塘（约 0.5 km^2）4 部分组成，其中东风坝和老干鱼塘水体基本与内、外草海隔离。草海有 6 条入湖河道，分别是新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河及船房河（图 1）。东风坝及老干鱼塘为相对封闭水体，因此，本试验中我们仅关注草海入湖河道、内草海及外草海。11 个水样采样点分布如图 1 所示，其中入湖河道有 6 个采样点，分别为新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河及船房河（R1 ~ R6），内草海有 2 个采样点，分别为内草海中心、内草海断桥（国控点位）（C5、C4），外草海有 3 个采样点，分别为外草海靠近内草海处、草海中心（国控点位）、西园隧道出水口（C3、C2、C1）。



R1 ~ R6：分别为新运粮河、老运粮河、乌龙河、大观河、西坝河及船房河；C1：西园隧道出水口；C2：草海中心；C3：外草海靠近内草海处；C4：内草海断桥；C5：内草海中心。

图 1 滇池草海水葫芦控养区域（仅显示内、外草海）及采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites and planting areas of water hyacinth in the Lake Caohai of Lake Dianchi (only Neicaohai and Waicaohai were shown)

水葫芦治污试验性工程于 2011 年 5 月投放水葫芦，至 2011 年 10 月，在滇池草海共控制性种养水葫芦约 533.3 hm^2，其中东风坝约 73.3 hm^2，内草海约 146.7 hm^2，外草海约 280.0 hm^2，老干鱼塘 33.3 hm^2。水样采集于水葫芦投苗后，以每月 1 ~ 3 次的频率对 11 个样点进行采样。采用有机玻璃采水器分层采取水样，每个样点分表层（距水面 0 ~ 0.5 m）、中层（距水面1.0 ~ 1.5 m）、底层（湖底上 0.5 m 处）3 层次进行采集，混合后装于已洗净的 1 L 采样瓶中，带回实验室及时分析各水质指标。同时，监测水葫芦水面覆盖度和生物量，采集植

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

株样品,用于测定植株氮、磷含量。

1.2 测定方法及数据获取

溶氧量采用便携式 DO 仪现场测定。水样在过硫酸钾 121 ℃消解 30 min 后,利用流动分析仪测定水样总氮及总磷含量。水样过孔径 0.45 μm 滤膜直接用流动分析仪测定氨态氮含量。水葫芦生物量采用 GPS 定位及现场称重的方法测定; 干重采用 75 ℃恒温烘干后称重测定。植株中氮、磷含量采用浓 H_2SO_4-H_2O_2 消解法测定,测定方法详见《土壤农化分析》[10]。2011 年 5 月之前水体主要理化数据由昆明市环境监测站提供,西园隧道排水量数据由昆明市滇池西园隧道管理处提供。草海水体对氮(磷)的消减总量可以用如下公式计算: 削减总量 = (入湖总量 - 排出总量) + (初始湖体库存量 - 结束时湖体库存量)。入湖总氮(磷)量根据入湖径流氮(磷)平均浓度与入湖径流总量的乘积计算。由于无法获得入湖径流流量准确、连续监测数据,我们以西园隧道排出水量 + 草海蒸发量 - 草海降雨量来反推入湖径流量。排出总氮(磷)量根据西园隧道排出水量 × 排出水氮(磷)浓度来计算。水葫芦吸收氮(磷)量根据植株氮(磷)浓度 × 水葫芦生物量来计算。湖体库存量根据当月水体总氮(磷)浓度 × 草海水体体积来计算。

1.3 数据处理

统计处理采用统计软件 SPSS 16.0。差异分析采用单因素方差分析(One-way AVONA),利用 Levene's-test 进行不同组间方差齐次性检验,若方差不齐则利用 Mann-Whitney U 检验。

2 结 果

2.1 近 5 年草海水质变化

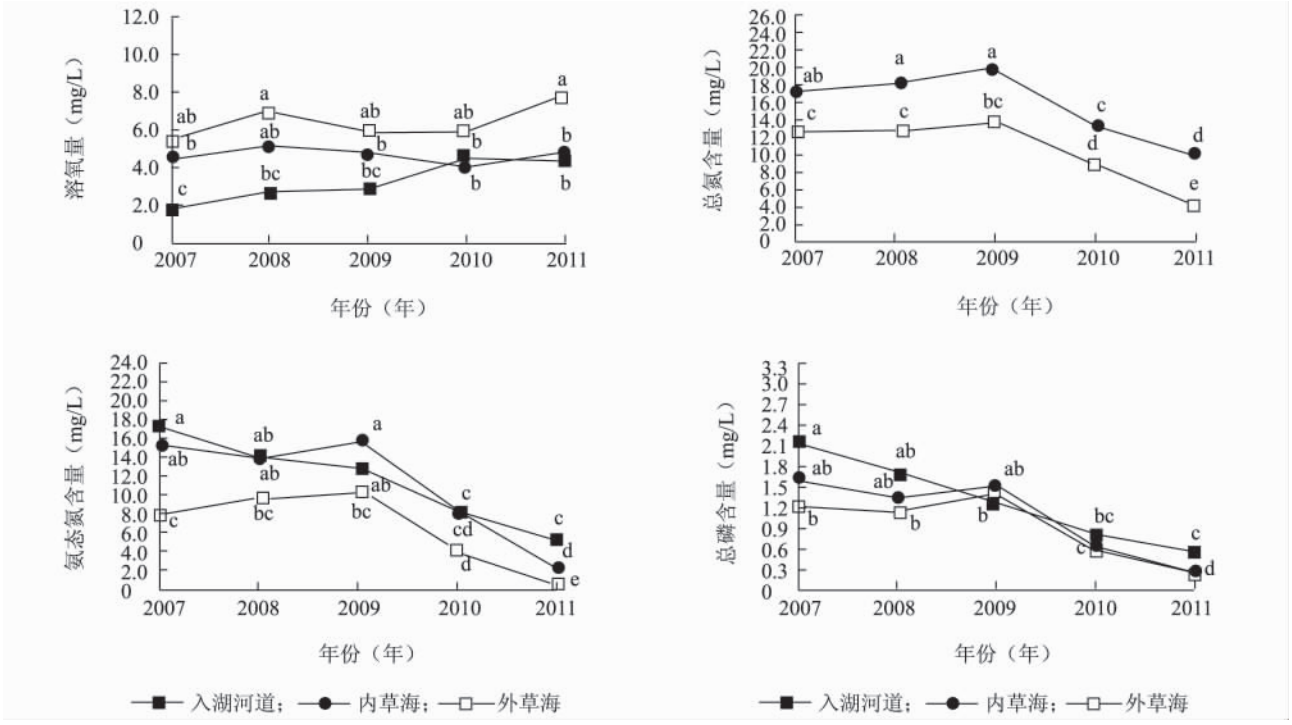
2.1.1 溶氧量的变化 由于昆明市加强对城市河道的整治力度,草海入湖河道水体溶氧量由 2007 年的 1.8 mg/L缓慢增加至 2011 年的 4.5 mg/L; 在内草海,从 2007 年至 2011 年,水体溶氧量基本稳定在 4.1 ~ 5.2 mg/L; 在外草海,从 2007 年至 2011 年,水体溶氧量为 5.5 ~ 7.9 mg/L,其中 2011 年水体溶氧量较 2010 年高 33.3%(图 2)。可见水葫芦种养后(2011 年)并未对水体溶氧量造成明显的不利影响。先前有大量的研究结果表明,水葫芦能降低水体的溶氧量[11-12]。在本研究中,通过对连续 5 年草海水体溶氧量对比发现,水葫芦种养后并未降低草海水体的溶氧量,甚至溶氧量水平略有回升。该现象可能是由于: ①滇池草海属于滇池污染最严重的区域,水体有机污染物严重,从 2007 年至 2009 年,其内、外草海的溶氧量本底值较低(4.0 ~ 6.0 mg/L),在水葫芦种植后,虽然水葫芦一方面消耗水体的溶氧量,但是另一方面它能加速去除水体的污染物,从而减少了水体污染物的分解耗氧; ②昆明市加大了草海入湖河道的整治。

2.1.2 总氮含量的变化 由于缺乏 2007 ~ 2010 年入湖河道总氮含量数据,在此未讨论入湖河道总氮含量浓度的历年变化。2010 年内草海和外草海水体总氮含量浓度(分别为 13.3 mg/L和 9.0 mg/L)较 2007 ~ 2009 年均值(分别为 18.3 mg/L和 13.0 mg/L)分别下降了 27.3% 和 30.8% ($P < 0.05$)(图 2),这可能一方面与 2010 年滇池草海自然生长的 200.0 hm^2 水葫芦吸收大量氮素有关,另一方面与草海周边污水处理厂(昆明市第一和第三污水处理厂)从 2009 年底至 2010 年初的处理效能提升有关。2011 年,由于水葫芦控制性种养工程的实施,在滇池内、外草海共计控养水葫芦 426.7 hm^2,内、外草海水体总氮含量在 2011 年基础上大幅度下降至 9.8 mg/L 和 4.1 mg/L,较 2010 年分别下降了 26.3% 和 54.4% ($P < 0.05$)。

2.1.3 氨态氮含量的变化 2007 ~ 2011 年水体氨态氮含量的变化趋势与总氮含量一致(图 2)。入湖河道氨态氮含量浓度从 2007 年之后逐步下降,2010 年出现明显的拐点,这与昆明市第一、三污水处理厂达标改造及河道整治有关。入湖河道水体 2011 年的氨态氮含量浓度比 2010 年降低了 39.6%,与 2011 年在草海入湖河道放养水葫芦有关。而在内草海及外草海,2011 年氨态氮含量浓度比 2010 年分别降低了 66.7% 和 89.2%。表明水葫芦的放养对草海氮的去除有显著的作用。

2.1.4 总磷含量的变化 2007 ~ 2008 年,入湖河道总磷含量呈现下降的趋势,2009 年入湖河道总磷含量比 2007 年显著降低($P < 0.05$)(图 2)。内草海和外草海 2010 年总磷含量比 2009 年分别下降 58.6% 和 58.3%,2011 年较 2010 年分别下降 60.3% 和 55.2%,其下降幅度均大于入湖河道总磷含量的下降幅度(37.0% 和 28.8%),这可能与 2010 年自然生长的 200.0 hm^2 水葫芦和 2011 年人工控养的 426.7 hm^2 水葫芦有关。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

图2 2007～2011年滇池草海入湖河道、内草海及外草海水体溶氧、总氮、氨态氮及总磷含量

Fig. 2 Dissolved oxygen, total nitrogen, ammonium-N and total phosphorus in the inlets, Neicaohai and Waicaohai of Lake Caohai from 2007 to 2011

2.2 水葫芦对草海水体氮、磷消减贡献分析

草海水体为流动性水体，每年来自入湖河道的水量约1.0×10^8 m^3左右，主要由西园隧道排出。2011年11月，内、外草海水葫芦共计21.1×10^6 kg，含水率为94.4%，干物质中氮含量为4.1%、磷含量为0.3%。

经计算，水葫芦种养后至水葫芦采收前（2011年5月～11月），草海（内、外草海）水体氮的削减总量与水葫芦吸收氮量分别为7.613×10^5 kg和4.856×10^5 kg，水葫芦吸收氮量占氮总消减量的63.8%（表1）。在自然水体中过量的氮主要通过水体或者沉积物中微生物驱动的硝化、反硝化反应转化为气态产物N_2O、N_2进入到大气中[13-14]。在草海水体，由于水葫芦的作用，水体氮素的削减主要受水葫芦的吸收和水体硝化反硝化脱氮两个方面的影响。本研究发现水葫芦吸收氮量占草海水体氮总削减量的63.8%，说明水体硝化反硝化脱氮可能取到了一定的作用。我们的研究也证实了这一点，在草海未种养水葫芦前水体总氮含量由入湖河道的12.3 mg/L降至西园隧道出水口7.5 mg/L，削减率为39.0%。张志勇等[15]在水葫芦对不同程度富营养化水体氮的去除贡献的研究中表明，在总氮含量浓度为6.22～12.08 mg/L的富营养化水体中，水葫芦吸收氮量占水体氮总削减贡献的42.3%～82.7%，并且随着水体总氮含量浓度升高，其吸收量的贡献比例减小。水葫芦对水体氮的去除不仅体现在直接生物吸收上，而且能加速水体的硝化反硝化脱氮。高岩等[16]研究结果表明，水葫芦可以促进富营养化水体的硝化、反硝化过程而加速水体氮素的去除。

由于水体中磷的削减主要由生物体的吸收、沉降等因素引起。而在本研究中发现，水葫芦吸收总磷量占草海湖体磷总削减量的139.0%（表2），说明水葫芦可能吸收了一部分底泥释放的磷。化学物质在底泥-上覆水界面的吸附与释放过程主要是由浓度差支配[17]。当上覆水氮磷营养物浓度降低时，则底泥向上覆水的释放加大。在本研究中，由于水葫芦对水体磷的吸收使上覆水磷浓度降低，而在浓

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度差的支配作用下,草海沉积物中的磷可能会大量释放进入水体而被水葫芦吸收。蒋小欣等[18]的研究结果也证实低浓度营养盐的上覆水有利于底泥营养盐的释放。

表 1 水葫芦生长期(2011 年 5 月~11 月)氮吸收量与草海氮总消减量

Table 1 Nitrogen uptake by water hycinths and nitrogen decrease in Lake Caohai (May to November, 2011)

日期(年-月)	西园隧道排水量 ($\times10^{10}$ kg)	西园隧道排水中总氮含量 (mg/L)	西园隧道排出氮量 ($\times10^{5}$ kg)	蒸发量减降雨量 ($\times10^{9}$ kg)	入湖水量 ($\times10^{10}$ kg)	入湖水中总氮含量 (mg/L)	入湖氮量 ($\times10^{5}$ kg)	5 月份湖体存氮量 ($\times10^{5}$ kg)	11 月份湖体存氮量 ($\times10^{5}$ kg)	氮总削减量 ($\times10^{5}$ kg)	水葫芦吸收氮量 ($\times10^{5}$ kg)	水葫芦吸收氮量/氮总削减量(%)
2011-05	1.210	3.5	0.421	0.315	1.242	12.3	1.526	1.576				
2011-06	1.402	5.2	0.729	0.315	1.433	13.7	1.958					
2011-07	1.114	3.3	0.367	0.315	1.145	11.7	1.342					
2011-08	0.599	2.9	0.176	0.315	0.630	16.7	1.052					
2011-09	1.417	2.0	0.282	0.315	1.448	12.6	1.821					
2011-10	0.607	2.2	0.135	0.315	0.639	13.7	0.875					
2011-11	0.519	2.6	0.135	0.315	0.551	14.3	0.790		1.082			
共计	7.079		2.245	2.205			9.364			7.613	4.856	63.8

表 2 水葫芦生长期(2011 年 5 月~11 月)磷吸收量与草海磷总消减量

Table 2 Phosphorus uptake by water hycinths and phosphorus decrease in Lake Caohai (May to November, 2011)

日期(年-月)	西园隧道排水量 ($\times10^{10}$ kg)	西园隧道排水中总磷含量 (mg/L)	西园隧道排出磷量 ($\times10^{4}$ kg)	蒸发量减降雨量 ($\times10^{9}$ kg)	入湖水量 ($\times10^{10}$ kg)	入湖水中总磷含量 (mg/L)	入湖磷量 ($\times10^{4}$ kg)	5 月份湖体存磷量 ($\times10^{4}$ kg)	11 月份湖体存磷量 ($\times10^{4}$ kg)	磷总削减量 ($\times10^{5}$ kg)	水葫芦吸收磷量 ($\times10^{5}$ kg)	水葫芦吸收磷量/磷总削减量(%)
2011-05	1.210	0.3	0.405	0.315	1.242	0.6	0.719	0.772				
2011-06	1.402	0.7	1.007	0.315	1.433	0.5	0.695					
2011-07	1.114	0.4	0.403	0.315	1.145	0.5	0.585					
2011-08	0.599	0.2	0.128	0.315	0.630	0.5	0.334					
2011-09	1.417	0.1	0.173	0.315	1.448	0.6	0.846					
2011-10	0.607	0.1	0.078	0.315	0.639	0.5	0.337					
2011-11	0.519	0.1	0.043	0.315	0.551	0.9	0.491		0.161			
共计	7.079		2.236	2.205			4.005			0.238	0.331	139.0

3 结 论

种养水葫芦后,水体总氮、总磷、氨态氮含量均显著降低,通过历年的水质测定数据比较结果表明,水葫芦在草海治理实践中效果突出。水葫芦生长季节,水葫芦吸收氮量占草海水体氮总削减量的 63.8%,说明在草海氮削减中水葫芦吸收占主导作用,另外,硝化反硝化作用也是水体氮削减的途径之一; 水葫芦吸收磷量占草海水体磷削减总量的 139.0%,表明水葫芦不仅能有效去除水体的磷,而且能去除湖泊底泥中可释放态磷。

参考文献:

[1] RODRIGUEZ-GALLEGO L, MAZZEO N, GORGA J, et al. The effects of an artificial wetland dominated by free-floating plants on the restoration of a subtropical, hypertrophic lake [J]. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 2004, 9: 203-215.

[2] 成小英,王国祥,濮培民,等. 冬季富营养化湖泊中水生植物的恢复及净化作用 [J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 139-144.

[3] MALIK A. Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth [J]. Environment International, 2007, 33: 122-138.

[4] SKINNER E, WRIGHT N, PORTER-GOFF E. Mercury uptake

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and accumulation by four species of aquatic plants [J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 234-237.

[5] 常志州,郑建初. 水葫芦放养的生态风险及控制对策 [J]. 江苏农业科学, 2008(3): 251-253.

[6] 蒋 磊,白云峰,严少华,等. 水葫芦渣和不同添加物高水分复合青贮的效果研究 [J]. 江苏农业科学,2011,39(6): 337-340.

[7] 朱普平,王子臣,盛 婧,等. 不同覆盖度水葫芦对水体环境的影响 [J]. 江苏农业科学,2011,39(2): 471-472.

[8] JAYAWEERA M, KASTURIARACHCHI J. Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewaters by phytoremediation using water hyacinth [*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms] [J]. Water Sci Technol, 2004, 50: 217-225.

[9] POLOMSKI R F, TAYLOR M D, BIELENBERG D G, et al. Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in greenhouse-based laboratory-scale subsurface constructed wetlands [J]. Water Air Soil Poll, 2009, 197: 223-232.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[11] ROMMENS W, MAES J, DEKEZA N, et al. The impact of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in a eutrophic subtropical impoundment (Lake Chivero, Zimbabwe). I. Water quality [J]. Archiv für Hydrobiologie, 2003, 158(3): 373-388.

[12] VILLAMAGNA A, MURPHY B. Ecological and socio - economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(2): 282-298.

[13] RISGAARD-PETERSEN N, JENSEN K. Nitrification and denitrification in the rhizosphere of the aquatic macrophyte *Lobelia dortmanna* L. [J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(3): 529-537.

[14] ZHAO H W, MAVINIC D S, OLDHAM W K, et al. Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage [J]. Water Research, 1999, 33: 961-970.

[15] 张志勇,郑建初,刘海琴,等. 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究 [J]. 中国生态农业学报,2010,18(1): 152-157.

[16] 高 岩,易 能,张志勇,等. 凤眼莲对富营养化水体硝化,反硝化脱氮释放 N_2O 的影响 [J]. 环境科学学报,2012,32(3): 349-359.

[17] LERMAN A. Migrational processes and chemical reactions in interstitial waters [J]. The Sea, 1977, 6: 695-738.

[18] 蒋小欣,阮晓红,邢雅囡,等. 城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及 DO 水平对底质氮释放的影响 [J]. 环境科学,2007,28(1): 87-91.

(责任编辑: 袁 伟)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net