J. Lake Sci.(湖泊科学),2011,**23**(5):708-718
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2011 by *Journal of Lake Sciences*

人工浮床运用于入湖河流原位净化模拟研究*

景连东[1,2],敖鸿毅[1],刘剑彤[1**],李小平[1]
(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 100049)

摘　要:2009 年 11 月至次年 7 月,在太滆运河滆湖入运河段开展黑麦草与美人蕉、水芹菜分别搭配混种的人工浮床对河流水体原位净化动态模拟研究.结果表明该人工浮床能够持续净化流动水体.人工浮床对 TN 去除率为 5% - 35% ,TP 去除率为 5% - 40% ,COD_{Mn}去除率为 5% - 20% .在温度相对较高、浮床植物迅速生长的情况下浮床去除率较高.试验中水体交换时间对人工浮床去除率的影响有季节性的差异.人工浮床的去除负荷随温度和植物生长的变化趋势与去除率变化趋势基本同步.不过无论在哪个季节去除负荷都随着水体交换时间的变短而增加.人工浮床的净化效果主要表现在无论是冬季还是在春夏季都能够明显去除水体中悬浮物,增加水体透明度,进而去除颗粒态营养物质.浮床在夏季对可溶性磷和溶解性氮中的铵态氮具有明显的去除作用.硝酸盐氮和亚硝酸盐氮受浮床影响较小.人工浮床通过改变水体理化环境作用于营养盐的循环值得关注.
关键词:人工浮床;原位净化;去除率;去除负荷;动态试验

Simulation study on *in situ* purification of lake inlets with artificial floating bed

JING Liandong[1 2], AO Hongyi[1], LIU Jiantong[1] & LI Xiaoping[1]
(1:*Institute of Hydrobiology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan* 430072, *P. R. China*)
(2:*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *P. R. China*)

Abstract: An *in situ* simulation study about river purification was carried out in Taige Canal from November 2009 to July 2010, using artificial floating beds which were planted by plants *Canna generalis*, *Oenanthe clecumbens* and *Lolium perenne*. The research showed that the artificial floating bed can purify the river water uninterruptedly. The removal rates are 5% - 35% , 5% - 40% and 5% - 20% for TN, TP and COD_{Mn}, respectively. The removal effects were better under the conditions of high temperature and the rapid growth of floating plants. Water exchange time in different seasons influenced the removal rates differently. Trend of removal loading with different temperatures and growing stages was similar to removal rates. However, the removal loading would increase with decrease of the water exchange time in any seasons. The main purification effects of artificial floating bed can remove the suspended solid and increase the Secchi depth, so that the particulate nutrient can be removed. In summer, it can removed dissolved phosphorus and ammonia nitrogen significantly. The floating bed had only few effects on the nitrate and nitrite nitrogen. Effects of artificial floating bed on the cycles of nutrients by the changes of physical and chemical environment deserve to pay more attentions.
Keywords: Artificial floating bed; *in situ* purification; removal rate; removal loading; dynamic study

湖泊富营养化问题日趋严重,归根结底是由过量的氮、磷等污染物进入湖泊生态系统造成的[1-2].氮、磷等污染物质按照来源可以分为内源和外源两大类.内源污染物主要指湖泊沉积物的释放[3].外源污染物主要包括工农业废水和生活污水的排放.而外源污染又可以进一步划分为点源污染和面源污染.点源污染便于集中处理,而面源污染由于在其排放时间和空间上的分散性,是湖泊富营养化治理过程中的一个瓶颈[4].

* 淡水生态与生物技术国家重点实验室开放基金项目(009FB20)、国家"863"水专项(2008ZX07101 - 007, 2009ZX07104 - 005 - 03)和国家"973"计划项目(2009CB118705)联合资助.2010 - 10 - 13 收稿;2011 - 04 - 10 收修改稿.景连东,男,1986 年生,硕士研究生;E-mail:schjld@ gmail. com.
** 通讯作者;E-mail:jtliu@ ihb. ac. cn.

入湖河流汇集了流域内点源和面源的各种污染物质,成为外源性污染进入湖泊的主要途径之一[5],因而在湖泊富营养化进程中起到重要作用. 入湖河流的生态环境状况和自净能力在很大程度上决定了湖泊的水质和环境状况. 因此从入湖河流的污染控制入手,切断面源污染物进入湖泊的通道,在一定程度上可遏制富营养化发展.

国内外针对河流污染物在湖泊富营养化进程中的作用、入湖河流污染控制等方面开展了大量的研究. 研究大多致力于河流水质状况的改善和尝试恢复丧失的河岸植被、湿地群落. 由于国内河流和入湖河道水体生态恶化的主要原因是过量的营养和污染负荷,因此国内的工作重心主要是水质状况的改善.

人工浮床将无机浮体填料与湿地景观植物或者水生蔬菜[6-7]有机结合,满足原位削减营养盐和污染负荷,达到水质改善目的的同时,还可创造出景观或直接的经济效益,在工程上得到了广泛的运用[8-9]. 无机填料做为浮床植物生长的稳固物以及浮体的同时还可以为微生物的生长提供基质,从而强化了微生物对污染物的吸收和降解作用;浮床植物能够通过根部从地上部分向水体输送氧气[10],改变根系区域微环境,通过根部吸收水体中的营养物质用于生长.

但是目前人工浮床多应用于池塘等封闭水体,试验研究大多属于静态试验,针对流动水体(如入湖河流)的应用和研究较少[9]. 人工浮床的净化效果、净化机制与流动水体的环境关系还需要数据积累. 太滆运河是太湖外源营养物质输入的主要入湖河流之一[5],太滆运河的整治具有很强的示范性. 国家“十一五”期间针对其在太湖流域中的重要生态作用开展了“太滆运河与湖荡水污染控制技术与工程示范”研究. 人工浮床作为一种生态治理水体污染的有效办法具有很强的地域特异性,比如浮床植物的生长受着当地气候水文以及欲治理水域水质等因素的影响. 因此在当地有针对性的开展模拟研究是有必要的. 本研究期望筛选出适合当地栽种的浮床植物,并研究浮床在流水条件下的净化特征及机制,以此为当地正在建设的一个水体生态处理系统以及将来太滆运河甚至太湖流域内入湖河流的治理提供技术参考.

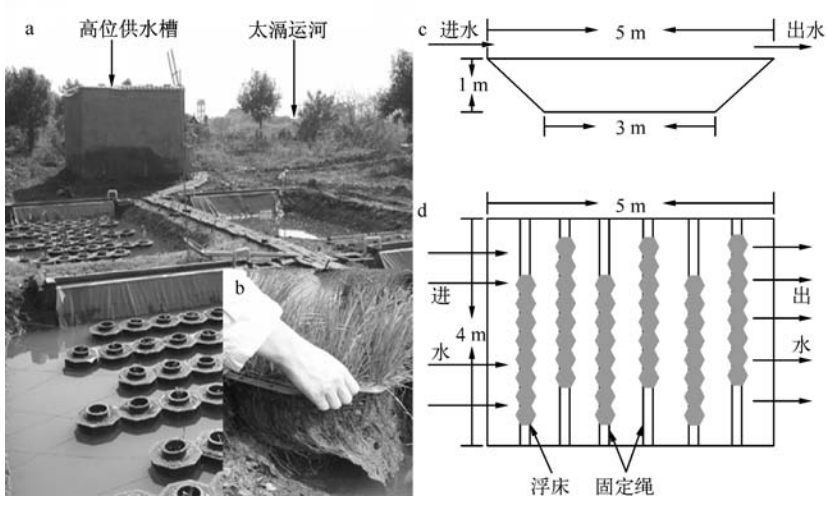


图 1 试验研究现场及实验池参数示意图(a:研究现场(浮床铺设初期);
b:2010 年春季黑麦草地上部分及其根系生长情况;c:试验池剖面示意图;
d:试验池俯视图)

Fig. 1 Study site and experimental pool parameter diagrams

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 模拟试验系统 高位进水池,3 m×3 m×2 m(高),共计 1 个,通过水泵自动控制系统采集太滆运河河水至高位进水池,混匀后经输水管路按照试验要求的水体交换时间布水进入模拟试验池;模拟试验池表面

5 m×4 m,底面 3 m×2 m,深度 1 m,进水口高出出水口约 20 cm,进出水口均匀布水(图 1).

1.1.2 人工浮床构建 研究所用人工浮床利用天然改性轻质陶粒、浮球等作为浮体,填充于浮床外壳载体内(宁波天韵公司提供),浮床浮体具备物理吸附、微生物挂膜基质等特性,同时与种植的植物进行结合,强化植物的根区净化能力以及植物本身对氮磷等营养盐的吸收. 由于浮床综合利用了填料的物理吸附、微生物的降解、植物吸收等手段,形成了立体全方位水体污染负荷削减模式,所以该公司也称该浮床为"漂浮型人工湿地". 单个浮床面积 0.09 m^2,中间部分可栽种较大型植物(如:美人蕉、水芹菜),周边为浮球以及填料放置区,整个浮床都可以作为黑麦草类植物种植区. 按照 6(个)×8(列)规格横向交错布置于试验池内(图 1).

1.1.3 栽培植物选种 研究表明,对植物进行混种后其对氮、磷等物质去除率好于单种[11],同时还能够产生良好的景观效果. 本研究中分别将水芹菜(*Oenanthe javanica*)、美人蕉(*Canna generalis*)与黑麦草(*Lolium perenne*)进行搭配种植. 美人蕉以块茎、水芹菜以根的形式于 2009 年 11 月栽种于浮床反应器正中,并用轻质陶粒做填料固定,周边浮球及陶粒填料区表面播种黑麦草,形成黑麦草包围美人蕉或水芹菜的空间格局.

水芹菜,为伞形科,水芹菜属植物,是众多重要浮床研究物种之一[12]. 在 15 - 20 ℃时生长最快,5 ℃以下停止生长,能耐 - 10℃低温. 以生活在河沟、水田旁,土质松软、土层深厚肥沃、富含有机质保肥保水力强的粘质土壤为宜. 水芹菜是太湖流域冬季重要水生蔬菜. 因此对水芹菜进行栽种,除了其生态环境效益外,还可创造直接的经济效益[13].

美人蕉,为美人蕉科,美人蕉属植物. 在中国南北皆有分布,是重要的园林植物,具有很高的景观效益. 被广泛运用于水体净化研究[11].

黑麦草,禾本科,黑麦草属植物. 黑麦草能够在冬季生根发芽,其根须发达. 黑麦草生长快、分蘖多,可以反复刈割. 黑麦草是太湖流域重要的草食鱼类饲料,因而黑麦草的种植有很大的经济效益. 利用其发达根须和快速的生长可以对水质起到净化的效果,具有很好的生态环境效益.

1.2 方法

太滆运河附近一个水体生态处理系统正在建设当中,该处理系统水体交换的最短时间为 14.8 h;另外,在河道治理当中,构建人造河湾是一项重要措施,在构建了河湾的基础之上可进一步进行生态恢复和水质净化,而河湾的大小形状可以调节进入其内的水体交换时间. 所以结合当前生态处理系统建设的需要,以及太滆运河的整治,分别研究了水体交换时间为 14.8、29.6、57.2 h 情况下该人工浮床的净化效果.

除高位进水池外,试验共设置两个人工浮床铺设试验池(美人蕉/黑麦草和水芹菜/黑麦草)和一个空白对照池(不铺设人工浮床). 2009 年 11 月铺设人工浮床后按照水体交换时间,调整试验池进水速度,保证水体交换一次后,于高位进水池和各试验池出水口采集水样,测定指标包括 pH、溶解氧(DO)、温度(T)、透明度(SD)、总悬浮物(TSS)、总氮(TN)、总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、可溶性活性磷(SRP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、铵态氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)、亚硝酸盐氮(NO_2^--N)等. 另可计算出颗粒态磷(PP) = TP - TDP;可溶解性有机磷(DOP) = TDP - SRP;单位悬浮物磷(SS-P) = PP/TSS.

1.3 数据计算和分析

人工浮床对 TN、TP 和 COD_{Mn}的去除率和去除负荷按以下公式计算:

$$去除率(\%) = (C_c - C_e)/C_0 \times 100\%$$

$$去除负荷(g/(m^2 \cdot d)) = (C_c - C_e) \times V \times 24/(t \cdot S)$$

式中,C_c为空白池出水口浓度;C_e为铺设人工浮床试验池出水口浓度;C_0为进水池出水口浓度;V 为各试验池体积,13 m^3;t 为试验池水体交换时间;S 为试验池铺设人工浮床面积,4.3 m^2.

由于数据非正态分布,因此运用 SPSS 16.0 进行配对样本的非参数检验. 非参数分析保证了检出结果的可靠性,但是其检出效率较低. 使用 Origin 8.0 进行作图.

2 结果与讨论

2.1 植物生长情况

2009 年 11 月到次年 3 月温度较低,植株生长缓慢. 次年 3 月到 6 月植株以及根系生长茂盛,至 7 月试验

结束. 具体说来,美人蕉于 2010 年春天长出新叶,存活率 80%(试验水域较小、流速较低时,水面易结冰导致冻害),至试验结束株高 60 cm 左右;水芹存活率 100%,至试验结束时株高 40 - 50 cm;黑麦草于 2009 年 11 月播种一周后发芽,2009 年底株高和根系均达 10 cm 左右,至 2010 年 5 月株高 40 - 50 cm,根系长 30 cm 左右,并开始开花结穗,2010 年 7 月枯萎死亡. 植物整体生长情况良好,种间生长协调,尤其是黑麦草,生长茂盛,在试验期间完成了整个生活史. 浮床生态系统中蛙类等群落健康繁育,无需人工喷药的情况下能有效避免植物在生长过程中受病虫害的影响.

通过该模拟研究,说明黑麦草及水芹菜可以作为当地冬季浮床植物的选择对象. 而美人蕉在开阔或流动性较强水域免受冻害的情况下,也可以作为浮床种植植物.

2.2 人工浮床对主要污染物的去除率及去除负荷

动态试验结果表明,人工浮床对污染物的去除具有持续性(图 2、图 3 和图 4). TN 去除率为 5% - 35%,TP 为 5% - 40%. COD_{Mn} 去除率相对 TN、TP 较低,为 5% - 20%,有静态试验研究得到类似的结果[14]. 一方面浮床本身会产生大量有机物,另一方面浮床铺设池溶解氧偏低(图 5)也会影响 COD_{Mn} 去除. 所以在实际运用中,要注意浮床铺设密度对水体溶解氧的影响,对于种植植物也要及时采收.

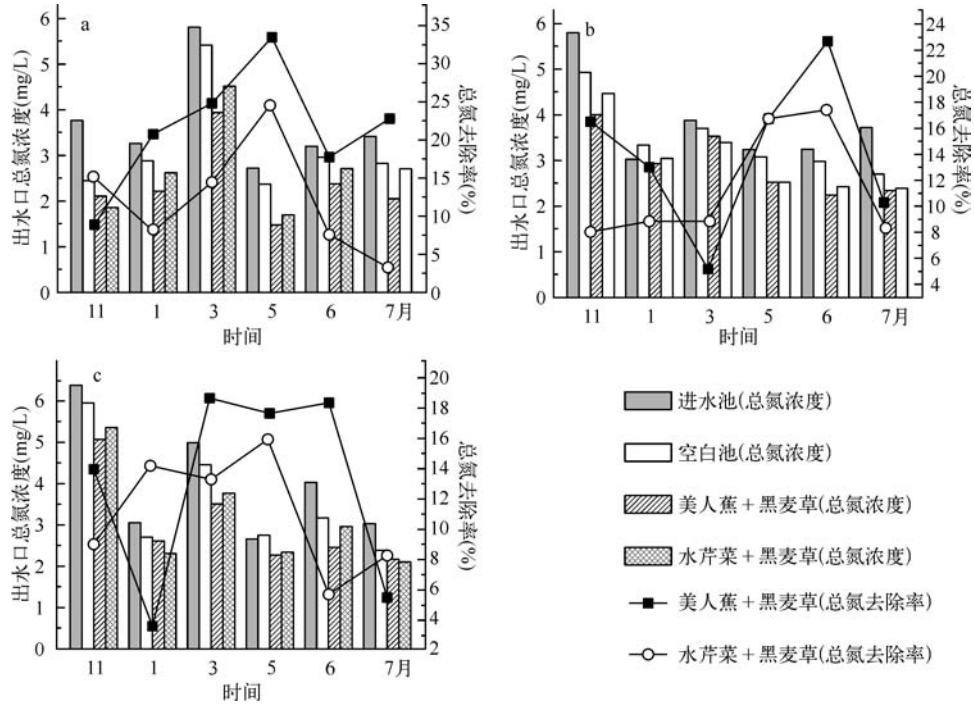


图 2 人工浮床在不同交换时间下(a:59.2 h,b:29.6 h,c:14.8 h)对 TN 的去除效果

Fig. 2 The removal effects of artificial floating beds on TN under different resistant time (a:59.2 h,b:29.6 h,c:14.8 h)

主要污染物去除率一般在 3 - 6 月达到一个峰值,一方面与植株迅速生长、根系相对发达有关,另外一方面温度升高也促进陶粒以及植物根系上微生物的生长. 2009 年 11 月刚铺设的人工浮床的个别指标去除率也达到一个相对较大值,这可能与陶粒最初的短期吸附作用[15]有关. 不同的水体交换时间对去除率影响较大. 冬季,水体交换时间越短浮床对水体物质去除率越低;夏季水体交换时间越短,计算得到的去除率越高. 这是因为,此处研究的是浮床(不包含试验池本身的自净能力)对水体污染物的去除率,因此要排除许多颗粒物质进入系统后自身沉降等因素的影响(设置空白池的原因). 进入春夏季,浮床上黑麦草根系异常发达,水体透明度增大,水体流速降低,浮床本身功效加大,给试验池中水绵以及其他一些水生植物生长提供了有

利条件. 因此在试验所设的各流速条件下,人工浮床湿地试验池均能达到其处理的最高效能,去除了大部分悬浮物,从而达到了净化的最好效果,使得在各流速条件下试验池出水口水质差别较小,水体交换时间并未像在冬季试验中那样明显地影响到铺设人工浮床试验池出水口浓度 C_e. 但是由于空白池没有浮床的铺设,也没有其他水绵或水生植被的生长,仅有水体进入该试验池后的自身沉降,因而和冬季试验一样其出水口浓度 C_e 在短的水体交换时间下相对较大,在较长交换时间下由于沉降较多反而相对较小. 最终造成在较短交换时间 $C_e - C_e$ 更大(见去除率计算公式),出现了夏季在设定的水体交换时间下,交换时间越短浮床去除率越高的表观结果.

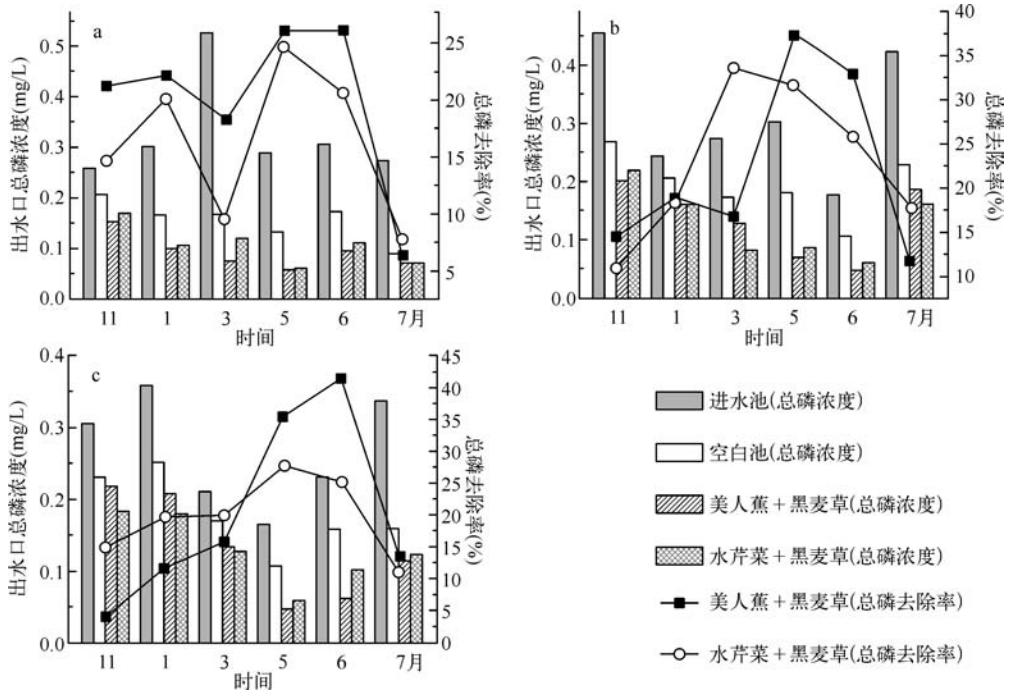


图 3 人工浮床在各交换时间下(a:59.2 h,b:29.6 h,c:14.8 h)对 TP 去除效果

Fig. 3 The removal effects of artificial floating beds on TP under different resistant time (a:5 9.2h,b:29.6 h,c:14.8 h)

从季节变化上看,人工浮床对污染物的去除负荷(表 1 和表 2)与去除率相一致,一般在 3 - 6 月具有一个较高值. 另外,2009 年 11 月个别指标也有一个较高值. 这种趋势变化的原因与去除率的变化原因相同. 但是去除负荷的季节变化并没有去除率变化明显,这是因为去除率还需要考虑进水池浓度 C_0,而 C_0 具有明显的季节性差异.

从水体交换时间上看,无论是在冬季还是春夏季的试验中,水体交换时间越短其去除负荷就越高,这一点同去除率与水体交换时间之间的关系不一样. 主要是因为短的交换时间(t)条件下,在同样的时间内浮床可处理的水体总量增多.

在相同的水体交换时间下,未检测到各物质去除负荷与进水口该物质浓度的显著相关性($P > 0.05$),高浓度污染物质进入人工浮床不能得到比低污染物质浓度进入时更高的去除负荷. 这可能是因为不同的季节人工浮床具有不同的去除率,污染物质浓度相对较低的季节正好可能有较高的去除率(如 2010 年 5、6 月);人工浮床系统可能存在一个饱和阈值,在达到该阈值后污染物浓度的继续升高不会同时增加去除负荷. 对于去除负荷饱和阈值的研究有重要的应用价值,可以作为人工浮床铺设工程的参考指标,因此可以对其做全面研究得到相关模型.

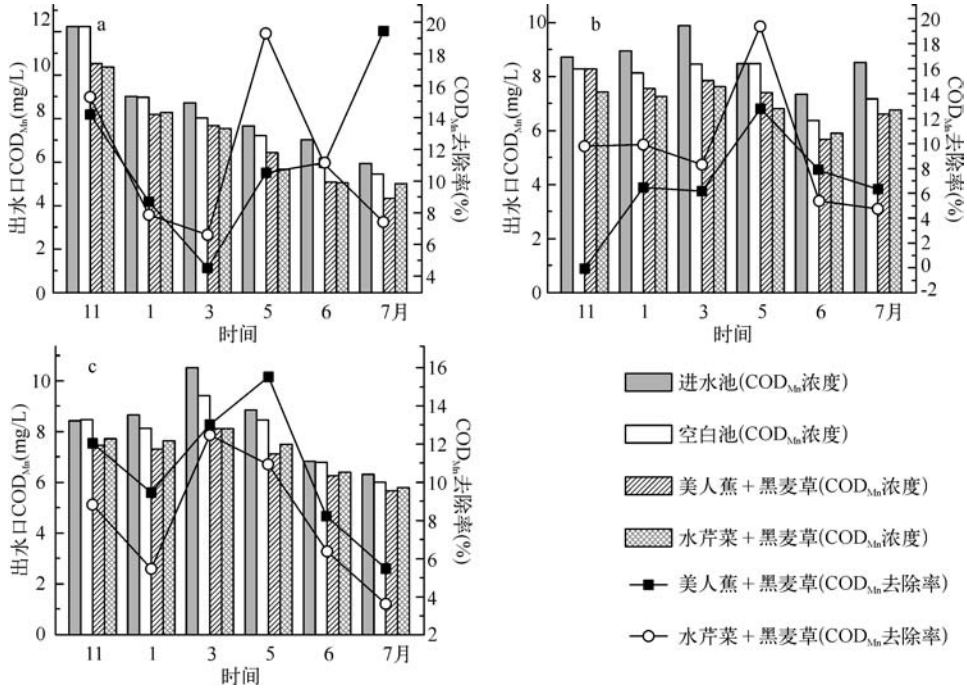


图4 人工浮床在各交换时间下(a:59.2 h,b:29.6 h,c:14.8 h)对 COD_{Mn} 去除效果

Fig. 4 The removal effects of artificial floating beds on COD_{Mn} under different resistant time (a:59.2 h,b:29.6 h,c:14.8 h)

表1 美人蕉/黑麦草混种人工浮床对 TN、TP 及 COD_{Mn} 的去除负荷

Tab. 1 The removal loadings of *Canna generalis-Lolium perenne* floating bed on TN, TP and COD_{Mn}

试验时间	TP 去除负荷(g/(m²·d))			TN 去除负荷(g/(m²·d))			COD_{Mn} 去除负荷(g/(m²·d))		
	14.8 h	29.6 h	59.2 h	14.8 h	29.6 h	59.2 h	14.8 h	29.6 h	59.2 h
2009 年 11 月	0.068	0.182	0.074	4.905	2.654	0.466	5.566	0.000	2.373
2010 年 1 月	0.228	0.125	0.091	0.586	1.086	0.931	4.453	1.590	1.073
2010 年 3 月	0.182	0.125	0.131	5.153	0.559	1.971	7.506	1.648	0.550
2010 年 5 月	0.319	0.307	0.102	2.608	1.490	1.242	7.503	2.999	1.107
2010 年 6 月	0.523	0.159	0.108	4.098	2.018	0.792	3.068	1.610	1.068
2010 年 7 月	0.250	0.137	0.024	0.931	1.055	1.071	1.887	1.449	1.578
平　均	0.262	0.173	0.088	3.047	1.477	1.079	4.997	1.549	1.291

表2 水芹菜/黑麦草混种人工浮床对 TN、TP 及 COD_{Mn} 去除负荷

Tab. 2 The removal loadings of *Oenanthe clecumbens-Lolium perenne* floating bed on TN, TP and COD_{Mn}

试验时间	TP 去除负荷(g/(m²·d))			TN 去除负荷(g/(m²·d))			COD_{Mn} 去除负荷(g/(m²·d))		
	14.8 h	29.6 h	59.2 h	14.8 h	29.6 h	59.2 h	14.8 h	29.6 h	59.2 h
2009 年 11 月	0.250	0.137	0.051	3.166	1.290	0.792	4.020	2.337	2.546
2010 年 1 月	0.387	0.123	0.082	2.387	0.745	0.373	2.597	2.386	0.980
2010 年 3 月	0.228	0.250	0.068	3.663	0.940	1.164	7.193	2.239	0.786
2010 年 5 月	0.250	0.262	0.097	2.359	1.490	0.916	5.296	4.498	2.012
2010 年 6 月	0.319	0.125	0.085	1.242	1.552	0.341	2.405	1.073	1.068
2010 年 7 月	0.205	0.205	0.029	1.366	0.869	0.155	1.258	1.127	0.602
平　均	0.273	0.184	0.069	2.364	1.148	0.623	3.795	2.277	1.332

太滆运河全长 22.5 km、宽 50 m,在保证航运以及泄洪的条件下,可配合人造河湾于模拟所在运河段两岸建成类似的浮床工程. 工程沿运河两岸分段铺设(非连续铺设以保障泄洪)折合后浮床 2000 m^2(各段工程总长 1 km,均宽 5 m). 按照 14.8 h 水体交换时间下去除能力计算,每年可去除 TP 达 0.191 t、TN 为 2.224 t、COD_{Mn}为 3.64 t,而实际的水体交换时间可能比 14.8 h 更短,其去除能力可能更高. 构建该工程还有利于避免过往船只对河道堤岸的冲刷,有利于堤岸生态的恢复和构建,增强河流的自净能力.

2.3 人工浮床对其他水化指标的影响

人工浮床铺设后水体理化指标的改变会影响到水体中营养物的循环特征,所以在研究中除了关注浮床对营养物质的去除效果外,其对水体理化指标的作用也值得关注. 在水芹菜与黑麦草混种人工浮床春夏季试验中观察到溶解氧显著降低($P<0.05$),美人蕉与黑麦草人工浮床虽没有显著性降低,但是也有所减少. 由于采样工作在上午进行,说明在春夏季节的夜间,人工浮床有明显的呼吸耗氧作用. 所以在具体的工程运用中,人工浮床的铺设面积比率有待进一步的研究论证,太高的铺设比容易造成水体缺氧,太低的比率又浪费了工程用地. 溶解氧的消耗或者微生物的呼吸作用可能导致更多酸性物质的排放,例如植物根部 CO_2 的释放[6],所以人工浮床在夏季还检测到 pH 值的降低. 由于在池面上铺设人工浮床,对阳光有一定的遮挡作用,尤其是春夏季植物生长茂盛后,所以夏季人工浮床铺设池温度相对空白池偏低.

本模拟研究与实际运用的一个重大差异在于试验水体经水泵入进水池、分流进试验池,该过程是对试验水体暴气的一个过程. 高溶解氧水体有利于溶解性磷吸附于颗粒物质表面,也有利于硝化作用的进行. 因此本研究中的浮床周边微环境与实际运用中会有所差异.

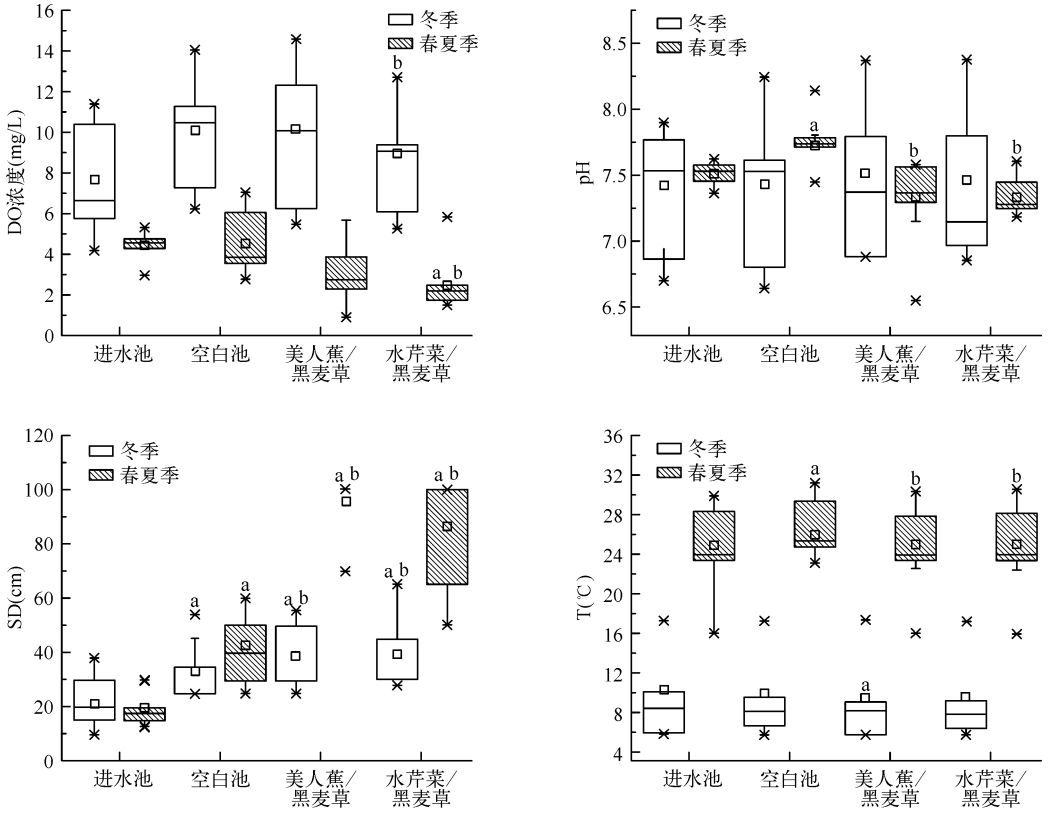


图 5 不同季节 DO、pH、SD、T 箱形图(a:与同期进水池有显著差异; b:与同期空白池有显著差异)

Fig. 5 Box charts of DO, pH, SD and T in different seasons(a: significant difference from the intake pool; b: significant difference from the control pool)

本模拟研究中,人工浮床对水体净化的最直观表现是无论在哪个季节透明度都有显著提高(图5).透明度的升高主要得益于悬浮物的去除(图6).夏季人工浮床铺设池悬浮物的最大值与最小值相差较小,而空白池最大值与最小值相差较大,这一点正好验证了夏季各交换时间下 C_e 区别较小,C_c-C_e 在较短水体交换时间下较大的假设(见2.2).相对于很多静态研究中植物吸收在总去除营养盐中占有的比重,该动态研究中人工浮床对水体的净化主要体现在悬浮颗粒物的去除上.

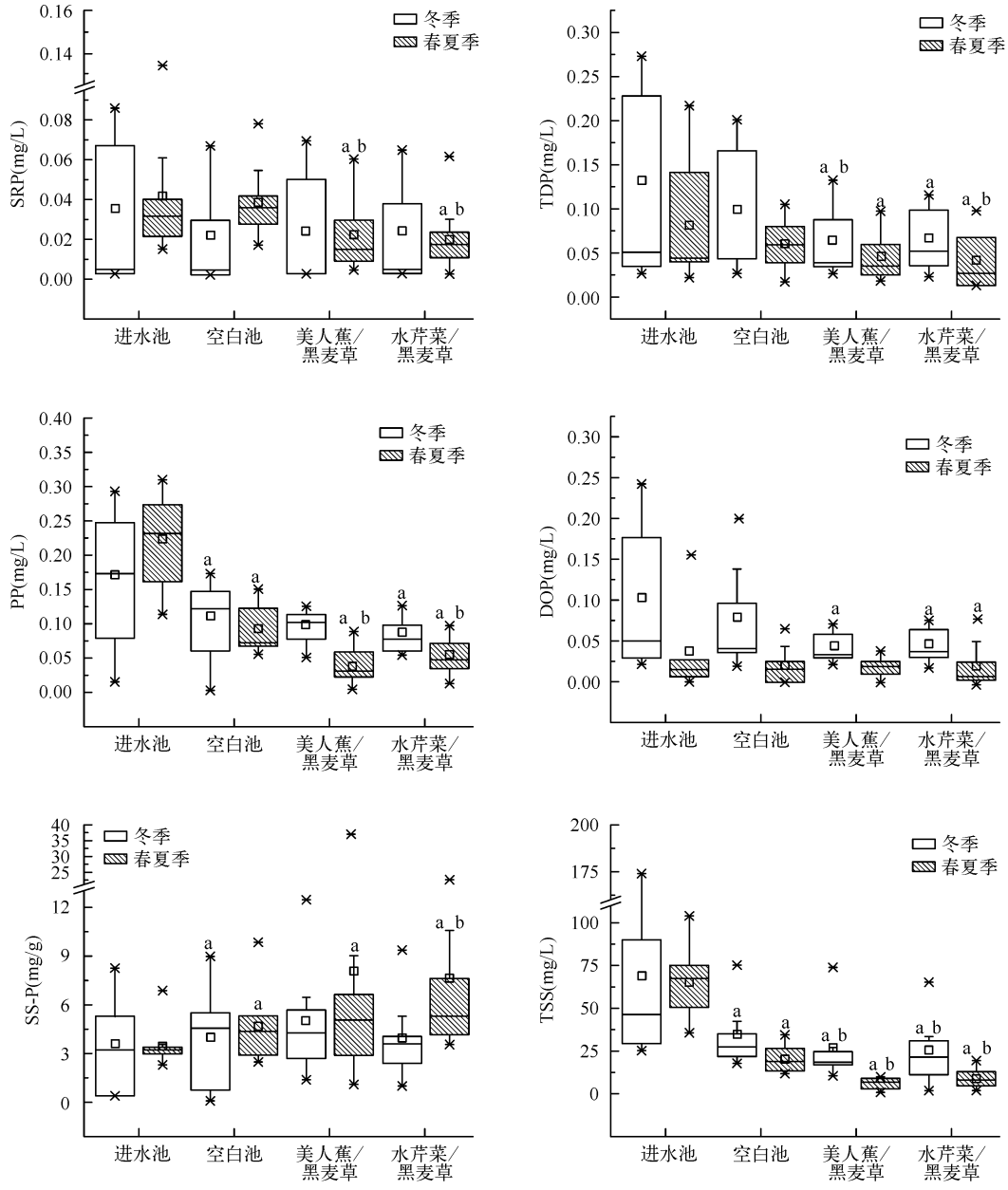


图6 各试验池各形态磷及TSS箱形图(a:与同期进水池有显著差异;b:与同期空白池有显著差异)

Fig. 6 Box charts of different P forms and TSS in different seasons(a: significant difference from the intake pool; b: significant difference from the control pool)

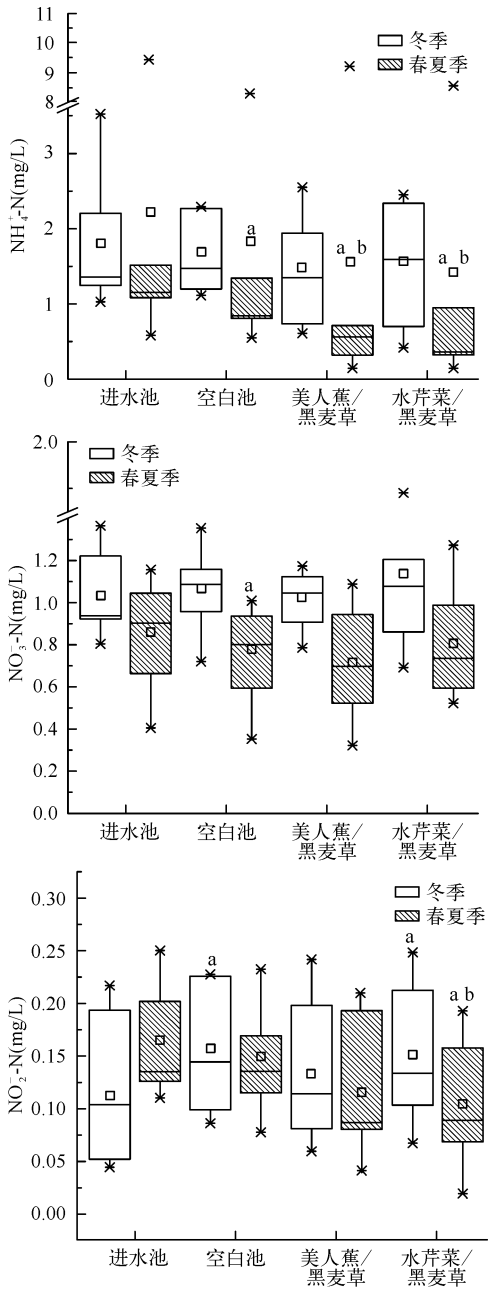


图 7 试验池各形态无机氮箱形图
(a:与同期进水池有显著性差异
b:与同期空白池有显著性差异)

Fig. 7 Box charts of different inorganic N forms in different seasons (a: significant difference from the intake pool; b: significant difference from the control pool)

人工浮床对各形态磷的影响见图 6. 冬季人工浮床主要对 PP、DOP、TDP 有一定的去除作用,但是可能由于试验中每次主要去除的磷形态都不尽相同,再加上非参数分析检出效率较低,所以很少检测到与空白池出水口这几种形态磷的显著性差异. 在夏季,人工浮床主要对 PP、SRP、TDP 有去除功能. 在所有季节中 PP 都是浮床的主要去除磷,而模拟系统自净能力也主要表现在对 PP 的沉降上,尤其是大颗粒悬浮物 PP 的沉降,所以检测到空白池和进水池 PP 和 SS-P 的显著差异. SS-P 出现了升高的现象,主要因为小颗粒悬浮物相对大颗粒悬浮物不易沉降,更易于做远距离迁移[16],而一般单位干重小颗粒沉积物通常含有更高的磷[17-18]. 本研究中空白池 DO 始终高于其它试验池,所以 SRP 降低的原因并非颗粒悬浮物的吸附,甚至 DO 过低时悬浮物可能释放出部分吸附的磷,而且 SRP 的降低出现在夏季,所以该形态磷的降低主要由于种植植物以及微生物的同化吸收作用[19].

人工浮床在春夏季对铵态氮有明显的去除作用. 但是对硝酸盐氮含量几乎没有影响(图 7),李文祥等在空心菜栽培试验中也观察到了类似的现象[6]. 本研究中水体 pH 值均低于 8,氨挥发的现象不显著[19],所以铵态氮的降低主要是因为植物优先利用水体铵态氮[9],或浮床植物通过根部向水中输送氧气[8]以促进铵态氮向硝酸盐氮的转化[20]. 水芹菜与黑麦草混种试验池夏季亚硝酸盐氮含量有明显的降低. 不过在李英杰等利用生态浮床对河口水质净化研究中,观察到了硝酸盐氮和亚硝酸盐氮经浮床处理后显著上升[9]. 这说明氮元素物质循环的复杂性,不同的研究水体理化环境、不同的栽培植物都会影响到微环境,进而影响氨化作用、硝化反硝化作用的发生. 许多生态系统中氮的去除主要依赖于硝化、反硝化作用,植物吸收作用仅仅是很小的一部分[21-22]. 因此将来人工浮床的实际运用中可以考虑通过添加微生物、人工暴气等手段来强化浮床的效率[14].

模拟研究的两种浮床中,黑麦草扮演了主要角色. 所以两种混种人工浮床对水体的净化效果区别不大,或者由于种植密度等原因很难比较. 另外冬季在小实验池水体容易结冰,研究中水芹菜的存活率明显高于美人蕉,水芹菜更有利于过冬,美人蕉受冻害后块茎腐烂发臭一定程度上也会污染水体.

2.4 流动水体中人工浮床可能的净水机制

结合本模拟研究中人工浮床的各项特征、得到的实验结果以及部分前人的研究工作[9,11-13,20],不考虑环境的自净作用,人工浮床可能通过以下几个方面起到对流动水体的持续净化效果:

(1) 通过植物根系的吸收和过滤功能去除污染物.

尤其是黑麦草其须根系非常的发达(图 1b),而且黑麦草的地上部分可以反复刈割,强化了其功能. 因此,本研究中人工浮床对溶解性和颗粒态的营养盐类都有一定的去除作用.

(2) 阻挡水流,增加颗粒物沉降,尤其是大颗粒物的沉降. 将人工漂浮湿地在水面交错布置(图 1a 和图 1d),对水流起到阻挡作用,颗粒物沉降增多.

(3) 发达的植物根系以及陶粒为微生物提供巨大的着生表面,植物体、微生物以及物理介质共同作用,改变水体微环境,从而改变营养盐循环特征,强化了人工浮床对水体净化作用. 夏季的研究中发现人工浮床引起水体 pH 值和 DO 的显著下降是该机制的一个证据.

3 结论

黑麦草、水芹菜适合做为太滆运河冬季到夏季浮床种植植物. 美人蕉在避免冬季冻害的情况下也可做为浮床种植植物.

不考虑周围环境对水体的自净作用,人工浮床仍然能够对流动水体有很好的持续净化效果,主要表现在对 TN、TP、COD_{Mn}具有很好的去除作用,能够显著提高水体透明度,去除水体悬浮物. 在流动水体条件下,人工浮床对 TN、TP、COD_{Mn}的去除率以及去除负荷受季节或植物生长情况以及水体交换时间的影响——在夏季,浮床对污染物去除率以及去除负荷较高;在短的水体交换时间下去除负荷较高. 本研究中人工浮床对各形态磷化合物都有一定的去除作用;但是仅对铵态氮有明显的去除作用,对其他形态氮影响不大.

人工浮床在夏季生长旺盛阶段的夜间也会对其他水体理化指标产生影响,如 pH 值、DO 的显著下降. 人工浮床在夏季有明显的遮光效果,相应的实验水体温度相比未铺设浮床的水体会有显著下降. 在实际工程中要考虑人工浮床的铺设密度.

4 参考文献

[1] Conley DJ, Paerl HW, Howarth RW *et al*. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.

[2] Schindler DW. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1): 356-363.

[3] Sdergaard M, Jensen J, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1): 135-145.

[4] Carpenter S, Caraco N, Correll D *et al*. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, **8**(3): 559-568.

[5] 郑 一, 江耀慈. 环太湖河道水质分析与入湖污染物负荷量估算. 地理学与国土研究, 2001, **17**(1): 40-44.

[6] Li WX, Li ZJ. *In situ* nutrient removal from aquaculture wastewater by aquatic vegetable Ipomoea aquatica on floating wetlands. *Water Science and Technology*, 2009, **59**(10): 1937-1943.

[7] Allen WC, Hook PB, Biederman JA *et al*. Temperature and bed plant species effects on wastewater treatment and root zone oxidation. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(3): 1010-1016.

[8] 屠清瑛, 章永泰, 杨贤智. 北京什刹海生态修复试验工程. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 61-67.

[9] 李英杰, 年跃刚, 胡社荣等. 生态浮床对河口水质的净化效果研究. 中国给水排水, 2008, **24**(11): 60-67.

[10] Moorhead KK, Reddy KR. Oxygen transport through selected aquatic macrophytes. *Journal of Environmental Quality*, 1988, **17**(1): 138-142.

[11] 韩潇源, 宋志文, 李培英. 高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 741-747.

[12] 黄 田, 周振兴, 张 劲等. 富营养化水体的水芹菜浮床栽培试验. 污染防治技术, 2007, **20**(3): 17-19.

[13] 胡绵好, 袁菊红, 杨肖娥. 水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 416-420.

[14] Sun L, Liu Y, Jin H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(1): 135-140.

[15] 金相灿, 贺 凯, 卢少勇等. 4 种填料对氨氮的吸附效果. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 755-760.

[16] Ishii Y, Harigae S, Tanimoto S *et al*. Spatial variation of phosphorus fractions in bottom sediments and the potential contributions to eutrophication in shallow lakes. *Limnology*, 2010, **11**(1): 1-12.

[17] Fytianos K, Kotzakioti A. Sequential fractionation of phosphorus in lake sediments of Northern Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, **100**(1-3): 191-200.

[18] Kaiserli A, Voutsa D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.

[19] 周真明, 叶 青, 沈春花等. 3 种浮床植物系统对富营养化水体净化效果研究. 环境工程学报, 2010, **4**(1): 91-95.

[20] 周小平, 王建国, 薛利红等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷净化特征的初步研究. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2199-2203.

[21] Sooknah RD, Wilkie AC. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecological Engineering*, 2004, **22**(1): 27-42.

[22] Gottschall N, Boutin C, Crolla A *et al*. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural(dairy) wastewater, Ontario, Canada. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(2): 154-163.