DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.05.007

挺水植物与沉水植物组配对北大港水库水质的影响

常素云[1],赵静静[2],刘小川[1],罗 莎[1],刘 波[1]

(1.天津市水利科学研究院,天津 300061;2.天津大学环境科学与工程学院,天津 300072)

摘要:选取北大港水库当地优势种挺水植物香蒲和广盐性沉水植物篦齿眼子菜、金鱼藻、狐尾藻为研究对象,研究香蒲与不同沉水植物的组配试验对水体净化效果的影响。结果表明:香蒲与篦齿眼子菜组配对水体 NH_3-N、TP 的去除效果最好,去除率分别为 62.1%、83.9%;香蒲与金鱼藻组配对 TN、COD 的去除效果最佳,去除率分别为 93.3%、30.4%。利用 Matlab 软件平台对试验结束时的水质进行分析,发现香蒲与金鱼藻组配方式对水体的净化能力最强。

关键词:挺水植物;沉水植物;组配试验;水质;北大港水库

中图分类号:X503.33 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2014)05-0038-06

Effects of hybrid planting of emergent and submerged macrophytes on water quality of Beidagang Reservoir

CHANG Suyun[1], **ZHAO Jingjing**[2], **LIU Xiaochuan**[1], **LUO Sha**[1], **LIU Bo**[1]

(1. *Tianjin Hydraulic Research Institute*, *Tianjin* 300061, *China*;
2. *School of Environment Science and Engineering*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*)

Abstract: As local dominant species in the Beidagang Reservoir, the emergent macrophytes, *Typha*, and the euryhaline submerged macrophytes, including *Labyrinth potamogetonaceae*, *Ceratophyllum*, and *Myriophyllum* were selected to study the effects of hybrid planting of *Typha* and various submerged plants on water purification. The results show that the best removal effect on NH_3-N and TP can be achieved by hybrid planting of *Typha* and *Labyrinth potamogetonaceae*, with the removal rates being 62.1% and 83.9%, respectively. The best removal effect on TN and COD can be achieved by hybrid planting of *Typha* and *Ceratophyllum*, with the removal rates being 93.3% and 30.4%, respectively. Matlab software was used to analyze the water quality after experiments. The results show that hybrid planting of *Typha* and *Ceratophyllum* can improve the water purification capability to the greatest extent.

Key words: emergent macrophytes; submerged macrophytes; hybrid experiment; water quality; Beidagang Reservoir

植物修复是利用绿色植物将受污水体中的污染物移除、分解或利用的原位修复技术,相比传统的水质处理技术,植物修复操作简便、投资和维护成本低,而且还可以通过资源化利用取得一定的经济效益[1-2]。水生植物在生长过程中,可以吸收水体中的氮、磷等营养物质,分解和利用水体有机物,富集重金属,抑制藻类的生长等[3],而且在冬季保留一定量的水生植物还可以避免水体水质恶化[4],所以在水库、大型湖泊等水体的修复实践工程中,利用水生植物改善水体水质具有较广阔的应用前景[5]。

水生植物在水生态系统中占有重要的地位,但是如何选择和配置水生植物是研究重点[6]。挺水植物与其他植物类型的组合种植对水质的净化效果好于单种挺水植物的配置,特别是对 NH_3-N 和 TN

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201101060);天津市水务局科研项目(KY2012-03)

作者简介:常素云(1982—),女,副研究员,博士,主要从事水环境治理研究。E-mail:csy@tjhri.com

有较强的去除，并能长期维持此净化效果，说明水生植物的协同净化对营养物有较好的去除效果[7-10]。北大港水库由于连年干涸、水库咸化等原因，水生植物种类较少：①挺水植物主要有香蒲和芦苇，是盐碱池塘的优势种，可以在含盐量和碱度较大的水体中正常生长[11]，其生长和繁殖受到水位的显著影响，当高水位持续时间超过 30 d 时，物种存活率会显著降低[12-13]。香蒲的适应水位范围较广[14]，对受污水体中的 COD、NH_3-N 及 TP 均具有一定的去除效果，但对 TN 的去除能力较低[15-17]。②沉水植物指金鱼藻和狐尾藻、篦齿眼子菜。在北大港水库，香蒲的生长水深为 0.8 ~ 1.2 m 之间，此水深同时也较适宜沉水植物的生长。因此，笔者探讨了在北大港水库当地原有挺水植物的基础上引入沉水植物，研究其对水质净化效果的影响，最终优选出水质净化效果的水生植物配置。

1 材料与方法

试验中使用的挺水植物香蒲，沉水植物篦齿眼子菜、金鱼藻和狐尾藻均采自天津滨海新区。将采集到的沉水植物用洁净自来水冲洗干净，去除杂质，用滤纸吸干，称重。

试验用水采自北大港水库（原水水质见表 1）。试验装置采用 5 个玻璃水槽（600 mm×300 mm×360 mm，容积约 60 L），分别编组为 A、B、C、D、E 组。玻璃水槽底部铺设约 5 cm 的细砂，以固定水生植物，并为水生植物提供扎根的基质。

表 1 原水水质指标 mg/L

ρ(COD)	ρ(TP)	ρ(TN)	ρ(NH_3-N)	全盐量*
41.430	0.260	2.330	1.445	3 000

注：全盐量指原水中的含盐量。

每个玻璃水槽中蓄水 52 L，栽种总质量为 260 g 的水生植物，试验设计组配如下：A 组（香蒲+篦齿眼子菜），B 组（香蒲+金鱼藻），C 组（香蒲+狐尾藻），D 组（单种香蒲），E 组（空白对照组），见图 1 所示。

试验开始后，每隔一定时间取 1 次水样进行分析，分别监测 TN、TP、NH_3-N、COD 和 DO 的质量浓度，以及监测挺水植物与不同的沉水植物组配对水体水质的影响。水中 pH 值、NH_3-N、TN、TP、COD 按照《水和废水监测分析方法》中提供的方法进行测定。

2 结果与讨论

由试验结果可知，单独种植香蒲有利于水体中 COD、TP、TN、NH_3-N 浓度的降低，并增加水体 DO 浓度。而香蒲与沉水植物组配时，由于沉水植物全部生长在水体中，形成生物膜的比表面积较大，因此有利于水体中有机物降解和营养物质的吸收转化。特别是香蒲与狐尾藻、香蒲与金鱼藻组配，可以大幅度提高 COD 去除率。然而，由于不同沉水植物形态及利用 N、P 的能力不同，香蒲与不同沉水植物组配时对 COD、N、P 的去除效果不同。

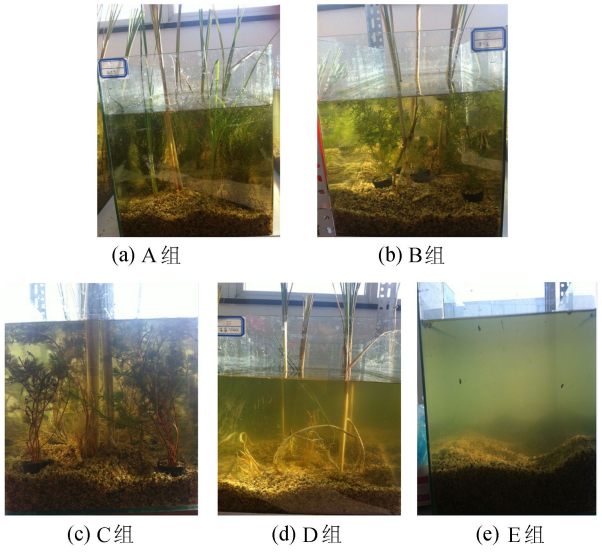


图 1 挺水植物与沉水植物组配试验

2.1 对水体 COD 的去除效果

COD 浓度是表征水体有机物多少的指标，其浓度值越大，说明水体被有机污染物污染的程度越深，不同水生植物组配对水体 COD 浓度的影响结果如图 2 所示。试验结束时，空白组 COD 浓度高于初始值；相比于空白组，D 组中的 COD 浓度有所降低，说明单一种植香蒲对 COD 具有一定的去除能力，但去除率仅为 2.84%；而香蒲与沉水植物组配时，水体中的 COD 浓度值大幅度降低。A 组、B 组、C 组的去除率分别为 5.68%、30.4%、24.1%，比 D 组分别提高了 2.84%、27.6%、21.3%，由此看出沉水植物的加入对水体有机物有明显的去除作用，香蒲与沉水植物组配可以提高对水体净化的能力，在增加水

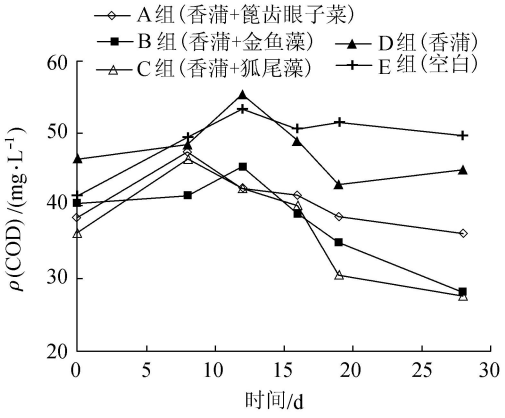
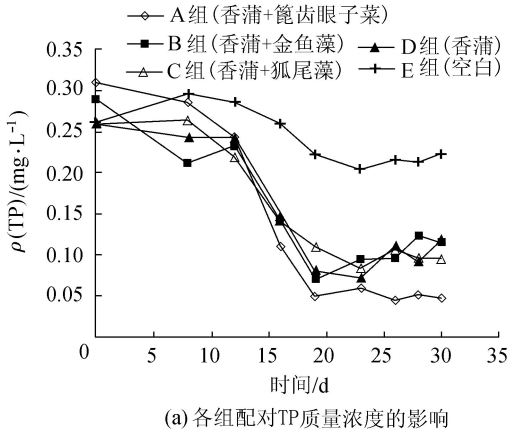


图 2 挺水植物与沉水植物各种组配对水体 COD 的影响

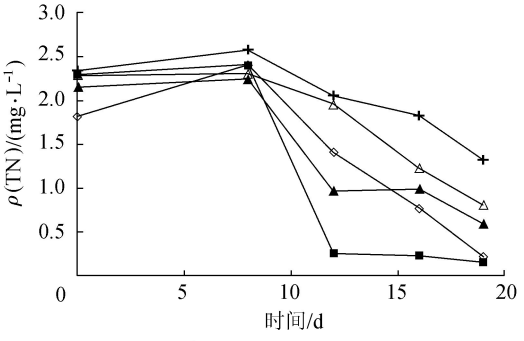
生态环境多样性的同时改善水体的水质状况。由于狐尾藻、金鱼藻和篦齿眼子菜的生长特征和形态不一样,对有机物的降解能力也不一样,所以对水体有机物的去除效果不同,与香蒲组配时,对水体 COD 值有不同程度的影响,其中 B 组是去除 COD 的最佳组配方式。

2.2 对水体 TP、TN、NH_3-N 的去除效果

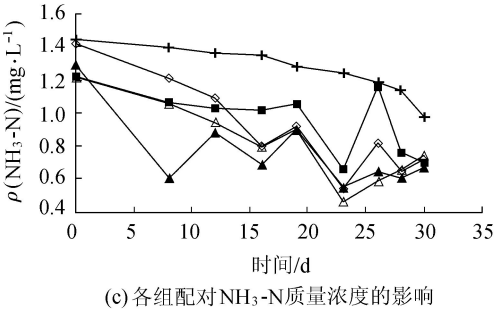
试验水体中 TP、TN、NH_3-N 的质量浓度变化如图 3 所示,除了空白组 N、P 浓度变化幅度较小外,其他 4 组水体中 N、P 质量浓度均明显降低。



(a) 各组配对TP质量浓度的影响



(b) 各组配对TN质量浓度的影响



(c) 各组配对NH_3-N质量浓度的影响

图 3 挺水植物与沉水植物组配对水体 TN、TP 以及 NH_3-N 质量浓度的影响

a. 对 TP 的影响如图 3(a)所示。有水生植物反应器中的 TP 浓度明显低于空白组,且去除率均在 60% 以上。说明各组配所选对水体 TP 的影响很大,能够有效吸收、利用或转化 TP,降低浓度。有水生植物存在的反应器中,TP 的去除率分别为:A 组(83.9%)>B 组(65.7%)>D 组(63.4%)>C 组(62.1%),即香蒲和篦齿眼子菜组配对 TP 的去除效果最好,相对于香蒲单独作用于水体时,去除率提高了 20%,A 组是提高水体 TP 去除能力的最佳组配方式。

b. 对 TN 的影响如图 3(b)所示。有水生植物的反应器中的 TN 浓度均低于空白组,TN 的去除率分别为:B 组(93.3%)>A 组(87.9%)>D 组(72.5%)>C 组(64.4%)。试验结果表明,香蒲与篦齿眼子菜或金鱼藻组配时,对水体中 TN 的去除效果有不同程度的提高,尤其是香蒲与金鱼藻组配,相比于香蒲单独作用与水体时,水体中 TN 去除率提高了近 21%。

c. 对 NH_3-N 的影响如图 3(c)所示。各组配水体中的 NH_3-N 浓度均比空白组的浓度低。A 组、C 组对 NH_3-N 的去除效果相对较好,去除率分别为 62.1%、61.9%,比空白组(32.5%)、B 组(46.3%)、D 组(57.5%)的去除率都要高。

从各组配对水体中 TN、NH_3-N 的影响分析可以看出,香蒲分别与狐尾藻、金鱼藻、篦齿眼子菜组配时对水体 TN 的去除效果更好。由于水生植物对氮元素的吸收利用情况与氮存在的形态有关,所以同一试验组配对 TN 和 NH_3-N 的影响程度不一定呈正相关,如香蒲与金鱼藻组配(B 组)对 TN 的去除效果是最好的,但对 NH_3-N 的去除率远低于其他组配。

2.3 对水体 DO 的影响

挺水植物和沉水植物对水体 DO 浓度的影响是通过新陈代谢完成的。植物通过光合作用和呼吸作用共同完成对水体理化性质的影响。香蒲与狐尾藻、金鱼藻、篦齿眼子菜的组配种植通过光合作用对水体产氧,另外植物的呼吸作用和残体的分解又消耗水体中的 DO。在适宜植物生长的水体中,产氧量大于耗氧量。试验期间,有水生植物种植的反应器中 DO 浓度均高于空白组(图 4)。由于挺水植物和沉水植物的光合作用受到光照强度的影响,呼吸作用受到植物体新陈代谢和外界环境因子如温度等

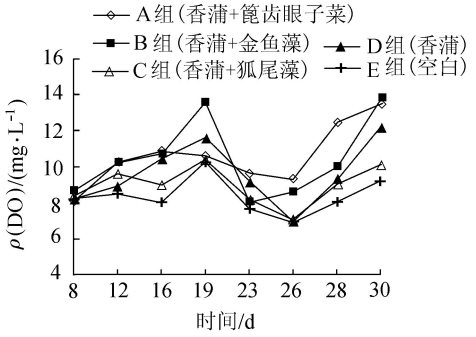


图 4 挺水植物和沉水植物组配对水体 DO 质量浓度的影响

的影响,当光照充足时,光合作用大于呼吸作用,即水体富氧,当光照较弱时,耗氧量大于产氧量,水体亏氧,所以水体中的 DO 浓度并不持续增加。另外,不同温度下水体中 DO 浓度的饱和值不同,当 DO 浓度达到当时温度的饱和值后会降低,所以水体中的 DO 浓度并不处于一个稳定值,而只是一种稳定平衡状态。

表征水体 DO 的恢复能力可以通过 DO 浓度的增加量来分析。从图 4 中可以看出,水体中 DO 浓度呈周期变化现象,初期逐渐上升,之后略有下降,然后再次呈现上升趋势,这与前面的分析相一致。试验期间各实验组的平均 DO 值依次为:B 组(10.6 mg/L)>D 组(10.4 mg/L)>A 组(9.0 mg/L)>C 组(9.6 mg/L)>E 组(8.4 mg/L),说明香蒲与金鱼藻组配的 DO 恢复能力最强。由于水体 DO 浓度存在一定的周期性,所以可以用试验期间所测 DO 值的平均值来表征各组配对水体 DO 的影响状况。由于植物的光合作用,增加沉水植物水体中的 DO 将会增加,但是由于沉水植物表面会附着大量的微生物,这些微生物可以较好地提高水体净化效果,但与此同时也会消耗一部分 DO,因此,本试验中香蒲与其他沉水植物组配时,DO 并无明显提高。

2.4 对水体 pH 值的影响

水生植物改变水体 pH 值主要是由植物的生命活动实现的。香蒲和狐尾藻、金鱼藻、篦齿眼子菜组配种植,通过光合作用促进水体碳循环,使水体 pH 值增大。由图 5 可知,短时间内空白组水体 pH 值基本稳定,A 组、B 组、C 组在短时间内使水体 pH 值上升,而只有 D 组其 pH 值下降,说明单一种植香蒲的光合作用较弱,而沉水植物篦齿眼子菜、金鱼藻、狐尾藻等植株体全部没在水中,恢复较快,光合作用强于呼吸作用,对水体 pH 值影响较大。但在试验后期,各试验组水体的 pH 值均有一定幅度的上升,仍是空白组最低,可以发现,水体 pH 值可能还受到其他外界条件的影响。pH 值的变化规律与 DO 值的变化趋势具有一定的相关性,均与植物的生命活动息息相关。

有研究表明,水体 pH 值上升可以促进沉水植物对 TN、NH_3-N 的去除效果[18],与图 3(b)(c)结合,可以验证这一结论。由此看出,水体的水质状况并不是与各影响因子之间的简单线性复合关系,各影响因子之间还存在着相互关联和耦合,所以需要对水质进行综合评价。

2.5 对水质综合影响的评价

2.5.1 不同组配下的水质演化模拟

水体是一个多元的复杂系统,影响水质评价的

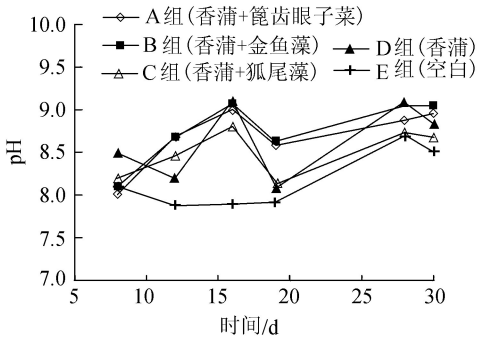


图 5 挺水植物和沉水植物组配对水体 pH 值的影响

因素具有很多不确定性,水质与评价因子及各评价因子之间存在着复杂的非线性关系,所以笔者以最大流原理[19-20]为基础,借鉴已有的水质评价动力学模型[21],并借助 Matlab 平台利用 SOM 网络实现模拟,揭示水质在各影响因子干扰下的自组织变化规律。

选取 COD、DO、pH、TP、TN、NH_3-N 这 6 个指标为水质评价因子,即共 6 个组元,对原始数据进行处理并归一化,得到如表 2 所示结果。

表 2 水质评价指标归一化数据

组配方式	归一化数据					
	COD	DO	pH	TP	TN	NH_3-N
A 组(香蒲+篦齿眼子菜)	0.974	1.104	1.017	1.799	1.545	1.138
B 组(香蒲+金鱼藻)	1.255	1.083	1.028	0.908	2.207	0.936
C 组(香蒲+狐尾藻)	1.278	0.938	0.986	0.918	0.418	1.319
D 组(香蒲)	0.782	1.000	1.004	0.957	0.573	1.115
E 组(空白)	0.710	0.875	0.965	0.418	0.258	0.493

借助 Matlab 平台,将归一化数据代入 SOM 网络中进行分析,采取 3×2 竞争网格数,400 步人工神经网络训练,可得到不同组配植物水体的水质特征 ξ 值,水质演化模拟结果如图 6。

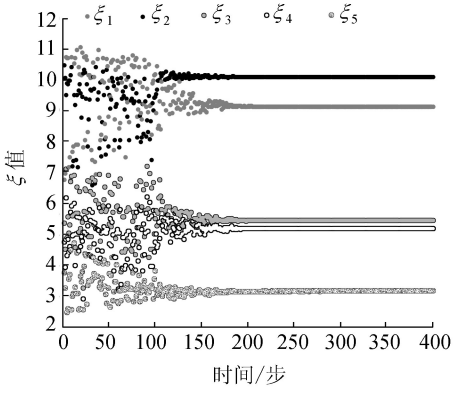


图 6 不同植物组配下水体水质演化模拟

2.5.2 模拟演化分析

图 6 是水体系统内部各组元之间不断地进行竞争、协作和自组织的模拟演化过程,是各组元(指标)相互作用的结果。演化前期 ξ 值波动较大,说明水体可呈现出来的水质模式有多种,随着步数的增

加,ξ 值基本稳定,系统呈现的模式逐渐稳定,最终在内外环境约束下保持了客观反映水质状况的主导模式,这表明水体的各组元相互作用中遵循最大流原理达到了基本稳定的状态。所以,稳定后的 ξ 值是水体水质在各组元相互耦合的作用和关联下最终呈现出来的水质结构表现值,可以代表试验水体的水质情况,$\xi_1 \sim \xi_5$ 依次表征 A、B、C、D、E 组配组水体的水质表现值,案例中 ξ 值越大,说明水质情况越好。

表征挺水植物香蒲与不同沉水植物组配的试验水体水质情况的 ξ 值分别如下:$\xi_1 = 9.145$,$\xi_2 = 10.109$,$\xi_3 = 5.457$,$\xi_4 = 5.197$,$\xi_5 = 3.171$。

可以看出,ξ_1、ξ_2 值较大,说明 A 组、B 组组配时,对水体的水质影响较大,水质改善效果较好。ξ_2 值最大,说明香蒲和金鱼藻组配的水质综合情况最好。从单因子分析的结果来看,A 组对 NH_3-N、TP 的去除效果最明显,B 组对 TN、COD 的去除更有效,所以选择适合北大港水库水体环境生长和繁殖,并能提高北大港水库水质的沉水植物,还要根据水体污染情况而定。若区域内磷含量较高,可引进篦齿眼子菜与香蒲组配,若有机物污染严重,则可引进金鱼藻与香蒲组配。

3 结 论

挺水植物和沉水植物组配可以不同程度上改善水体的水质状况,增强水体的自我净化能力,改善水生态环境。其中,香蒲与篦齿眼子菜组配对 NH_3-N、TP 的去除效果最为明显,香蒲与金鱼藻组配对 TN、COD 的去除最有效,两种组配方式对水体水质的影响较为明显,能一定程度上改善水体的水质情况。香蒲是北大港水库当地的优势种,在正常生长的水位范围内比芦苇种植相对较广泛,沉水植物篦齿眼子菜和金鱼藻是耐盐性植物,所以在北大港水库香蒲生长区域,可以考虑人为恢复篦齿眼子菜或金鱼藻,以提高水库的自我净化能力,改善水库的水生态环境。

参考文献:

[1] MKANDAWIRE M, TAUBERT B, DUDEL E G. Capacity of Lemna gibba L. (Duckweed) for uranium and arsenic phytoremediation in mine tailing waters[J]. International Journal of Phytoremediation, 2004, 6(4): 347-362.

[2] CARVALHO F P, OLIVEIRA J M, MALTA M. Radionuclides in plants growing on sludge and water from uranium mine water treatment [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(7): 1058-1063.

[3] 王红强,刘建华,张列宇,等. 香蒲中挥发油对铜绿微囊藻的化感抑制作用[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(7): 19-21. (WANG Hongqiang, LIU Jianhua, ZHANG Lieyu, et al. Allelopathic inhibitory effect of the volatile oil from typhalatifolia on microcystin aeruginosa [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(7): 19-21. (in Chinese))

[4] 潘慧云,徐小花,高士祥. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 64-68. (PAN Huiyun, XU Xiaohua, GAO Shixiang. Study on process of nutrition release during the decay of submerged macrophytes [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 64-68. (in Chinese))

[5] 关代宇,贾海瀛. 天津泰达再生水景观水体构建技术及工程示范[J]. 中国给水排水, 2013, 29(3): 33-37. (GUAN Daiyu, JIA Haiying. Construction technology and project demonstration of reclaimed landscape water body in TEDA[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3): 33-37. (in Chinese))

[6] 黄蕾,翟建平,聂荣,等. 5 种水生植物去污抗逆能力的试验研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 33-38. (HUANG Lei, ZHAI Jianping, NIE Rong, et al. Experimental study of decontamination and resistance ability of five hydrophytes[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 33-38. (in Chinese))

[7] 李睿华,管运涛,何苗,等. 河岸混合植物带处理受污染河水中试研究[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 651-654. (LI Ruihua, GUAN Yuntao, HE Miao, et al. Pilot-scale study on riparian mixed plant zones treating polluted river water[J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 651-654. (in Chinese))

[8] 郭萧,熊飞,赵安娜,等. 植物配置对表层流湿地净化效果的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2010(5): 57-60. (GUO Xiao, XIONG Fei, ZHAO Anna, et al. Effect of plant disposition on purification efficiency of surface flow wetlands [J]. Environmental Pollution & Control, 2010(5): 57-60. (in Chinese))

[9] 李淑英,周元清,胡承,等. 水生植物组合后根际微生物及水净化研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 148-153. (LI Shuying, ZHOU Yuanqing, HU Cheng, et al. Water purification of rhizosphere microorgaism in mosaic community of macrophytes[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(3): 148-153. (in Chinese))

[10] 张敏,郭彬,傅庆林,等. 高效去除水体中氮、磷的植物及组合植物研究[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(6): 1210-1215. (ZHANG Min, GUO Bin, FU Qinglin, et al. Screening of hydrophyte plant species with high uptake of N and P potential for remediation of polluted water[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(6): 1210-1215. (in Chinese))

[11] 赵文,董双林,申屠青春,等. 盐碱池塘水生大型植物的研究[J]. 植物研究, 2001, 21(1): 140-146. (ZHAO Wen, DONG Shuanglin, SHENTU Qingchun, et al. Studies

of aquatic macrophytes in saline-alkaline ponds [J]. Bulletin of Botanical Research, 2001, 21(1): 140-146. (in Chinese))

[12] 王海洋,陈家宽,周进. 水位梯度对湿地植物生长,繁殖和生物量分配的影响[J]. 植物生态学报, 1999, 23(3): 269-274. (WANG Haiyang, CHEN Jiakuan, ZHOU Jin. Influence of water level gradient on plant growth, reproduction and biomass allocation of wetland plant species[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1999, 23(3): 269-274. (in Chinese))

[13] LOWE B J, WATTS R J, ROBERTS J, et al. The effect of experimental inundation and sediment deposition on the survival and growth of two herbaceous riverbank plant species[J]. Plant Ecology, 2010, 209(1): 57-69.

[14] 袁桂香,吴爱平,葛大兵,等. 不同水深梯度对 4 种挺水植物生长繁殖的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(12): 2690-2697. (YUAN Guixiang, WU Aiping, GE Dabing, et al. Effects of water depth on the growth of four emergent macrophytes[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(12): 2690-2697. (in Chinese))

[15] 李睿华,管运涛,何苗,等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 493-497. (LI Ruihua, GUAN Yuntao, HE Miao, et al. Pilot-scale study on riparian phragmites communis, zizania latifolia and typha angustifolia L. zones treating polluted river water[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 493-497. (in Chinese))

[16] 高军侠,刘蕾,李庆召. 香蒲修复城市污染缓流水体研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(11): 64-67. (GAO Junxia, LIU Lei, LI Qingzhao. Study on remediation of contaminated subcritical flow water by typha [J]. Environmental Pollution & Control, 2012, 34(11): 64-67. (in Chinese))

[17] 郑洁敏,牛天新,陈煜初,等. 三十九种观赏挺水植物应用于人工浮岛水质净化潜力的比较[J]. 北方园艺, 2013(6): 72-76. (ZHENG Jiemin, NIU Tianxin, CHEN Yuchu, et al. Comparison of the potential water purification by 39 usually used ornamental emerged plants in the artificial floating island[J]. Northern Horticulture, 2013(6): 72-76. (in Chinese))

[18] 赵联芳,朱伟,莫妙兴. 沉水植物对水体 pH 值的影响及其脱氮作用[J]. 水资源保护, 2008, 24(6): 64-67. (ZHAO Lianfang, ZHU Wei, MO Miaoxing. Effects of submerged macrophytes on pH values and nitrogen removal[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(6): 64-67. (in Chinese))

[19] MARTYUSHEV L M, SELEZNEV V D. Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology [J]. Physics Reports, 2006, 426(1): 1-45.

[20] CHAI L H, SHOJI M. Self-organization and self-similarity in boiling systems [J]. ASME Journal Heat Transfer, 2002, 124(3): 507-515.

[21] 赵帅,柴立和. 流域水资源丰富度评价的 MFP 模型及应用[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 698-704. (ZHAO Shuai, CHAI Lihe. A MFP model on basin water resources abundance assessment [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(6): 698-704. (in Chinese))

(收稿日期:2013-12-27　编辑:高渭文)

(上接第 13 页)

[29] ZHANG S, CHEN J, QIAO X, et al. Quantum chemical investigation and experimental verification on the aquatic photochemistry of the sunscreen 2-phenylbenzimidazole-5-sulfonic acid[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(19): 7484-7490.

[30] YAMAJI M, KIDA M. Photothermal tautomerization of a UV sunscreen (4-tert-Butyl-4-methoxydibenzoylmethane) in acetonitrile studied by steady-state and laser flash photolysis [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2013, 117(9): 1946-1951.

[31] KIKUCHI A, HATA Y, KUMASAKA R, et al. Photoexcited singlet and triplet states of a UV absorber ethylhexyl methoxycrylene [J]. Photochemistry and Photobiology, 2013, 89(3): 523-528.

[32] BUSER H R, MULLER M D, BALMER M E, et al. Stereoisomer composition of the chiral UV filter 4-methylbenzylidene camphor in environmental samples[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(9): 3013-3019.

[33] MANOVA E, VON GOETZ N, HAURI U, et al. Organic UV filters in personal care products in Switzerland: a survey of occurrence and concentrations[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2012, 216(4): 508-514.

[34] HUONG S P, ROCHER E, FOURNERON J D, et al. Photoreactivity of the sunscreen butylmethoxydibenzoylmethane (DBM) under various experimental conditions[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2008, 196(1): 106-112.

[35] DONDI D, ALBINI A, SERPONE N. Interactions between different solar UVB/UVA filters contained in commercial suncreams and consequent loss of UV protection [J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2006, 5(9): 835-843.

(收稿日期:2013-10-08　编辑:高渭文)