

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.02.011

# 人工沉床对 TN 的去除效果及其影响因素

李金中<sup>1,2</sup>, 李学菊<sup>2</sup>, 刘学功<sup>2</sup>, 黄岁樑<sup>1</sup>

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 天津市水利科学研究院, 天津 300061)

**摘要** 建立一种模块化气浮调节式人工沉床, 并应用于重富营养化水体的生态修复, 在天津市外环河进行现场试验。结果表明: 当停留时间为 5.48 d 时, 人工沉床对 TN 的去除率在植物生长期(3—10 月) 可达到 35% ~ 40%, 冬季(11 月至次年 2 月) 可达到 5% ~ 15%。TN 浓度随停留时间的变化符合一级动力学方程, 相关系数  $R^2$  均在 0.9 以上。衰减系数随水温的变化趋势符合 S 形增长曲线, 即在水温过低和水温过高时, 水温的变化对衰减系数的影响并不大, 但在某一适当温度范围内, 水温的上升将导致衰减系数的快速增加。

**关键词** 人工沉床; 水质净化; 生态修复技术; 水生植物

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2011)02-0049-05

## Study on removal efficiency and influence factors of TN for constructed submerged hydrophyte bed

LI Jin-zhong<sup>1, 2</sup>, LI Xue-ju<sup>2</sup>, LIU Xue-gong<sup>2</sup>, HUANG Sui-liang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Hydraulic Research Institution, Tianjin 300061, China)

**Abstract**: A kind of modularized and air-adjustable constructed submerged plant bed (CSPB), which can be used to restore eutrophic water, is introduced. This plant bed overcame the restriction of harmful factors such as blurred water transparency, frequently changing water depth, algal bloom, and duckweed rampant in summer; helped hydrophytes to grow; and enhanced the survival rate in the eutrophic water. The pilot study in the Waihuan River of Tianjin revealed that the reduction of total nitrogen (TN) could reach 35% to 40% in the growing season (from March to October) and 5% to 15% in winter (from November to the following February) when the detention time was 5.48 days. In the pilot fields, the relations between the concentration of TN and the detention time fit the first-order kinetic equation, and the correlation coefficients ( $R^2$ ) were above 0.9. The attenuation coefficients  $K$  of the kinetic equation changed with the water temperature as follows: when the water temperature was too low or too high, the value of  $K$  did not significantly change with the temperature of water, but the increase of water temperature would lead to a rapid increase in the  $K$  value when the temperature was in a suitably moderate range.

**Key words**: constructed submerged plant bed; water purification; eco-restoration techniques; hydrophyte

近年来, 以水生植物为核心的生物生态水体修复技术已成为当前水环境技术领域的研究热点<sup>[1]</sup>。水生植物对水体的净化是一个复杂的物理、化学和生物过程, 既包括植物的吸收<sup>[2-3]</sup>、根部释氧<sup>[4-5]</sup>和微生物降解等作用<sup>[6-8]</sup>, 也包括生物化感和克菌的效

果<sup>[9]</sup>, 部分水生植物对重金属具有较好的去除效果<sup>[10-11]</sup>。但对于大多数城市景观河道, 受硬质护砌、水深变化大、水体透明度低、夏季藻类及浮萍泛滥影响, 水生植物特别是沉水植物极难成活<sup>[12-13]</sup>。

人工沉床技术是以恢复生态学人为设计和自我

修复理论为基础,突出人为干扰在整个修复过程中的主导作用的一种水体原位修复技术。该技术利用沉床载体和基质营造适宜大型水生植物生长的环境条件,并在沉床载体上种植大型水生植物,通过水生植物群落的构建,达到修复受损水体生境,进而恢复水生生态系统的目的。与传统的水底直接种植方法相比,该技术可利用浮力调节系统人为调控植物在水下的深度,从而有效地解决了水深变化大、透明度低、夏季藻类及浮萍泛滥等不利因素对植物生长的制约<sup>[4]</sup>。

该技术目前正处于起步阶段,国内外已报道的文献极少。笔者通过在天津市外环河建立人工沉床示范工程,并通过长达1年的水质监测,对该技术对TN的净化效果及其影响因素进行了系统研究,建立了人工沉床系统对TN的降解模型。

## 1 试验方法

模块化气浮调节式人工沉床床体尺寸为6 m × 6 m,床体结构由以下4部分组成:①受力载体构件;②植物种植箱体及填充基质;③高等水生植物;④浮力调节构件,如图1所示。

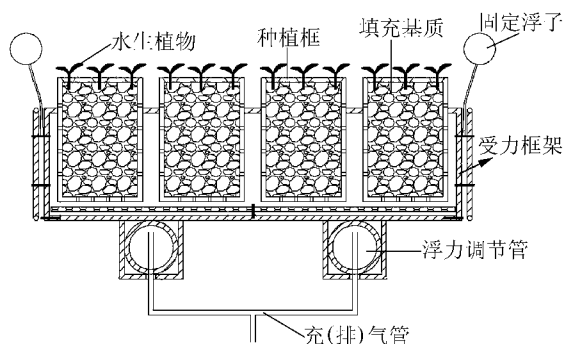


图1 人工沉床结构示意图

受力载体由铁管拼接加工而成,对整体系统起支撑和连接作用,植物种植箱体及填料的主要作用是为植物根系生长提供支撑,同时为微生物附着提供载体,填料为页岩和陶粒,具有孔隙率高、比表面积大,性质稳定易于微生物附膜的特点,填料厚度为25 cm。水生植物可选用多年生的挺水植物、浮叶植物、漂浮植物或沉水植物,水生植物根系释放的氧气为好氧微生物活动提供氧源,在根系周围形成好氧区。浮力调节构件又包括固定浮子和浮力调节管2部分,固定浮子的作用是通过浮力抵消系统的部分重力,确保固定浮力接近并略小于系统的总重力,而浮力调节管可通过改变管内气压来调节浮力大小,从而实现床体在水中的上下移动。

现场试验在天津市外环河河道内进行。外环河是天津市市区的一条重要景观河道,两侧边坡已护

砌,坡降为1:2.5,水面宽度25 m左右,水位季节性变化较大,水深2~3 m。受两岸生活污水及面源影响,河道水质较差,为劣V类水体,主要污染物是COD、N、P,夏季经常暴发藻类和浮萍,水体透明度极低,水生植物极难成活。

本试验共分为2个阶段进行。第1阶段为水深对植物成活率影响试验,植物种植时间为2007年7月15—25日,共设有50个沉床,在实验河段排成一列,床与床间隔3 m,实验河段长度为450 m,床体距岸1 m。种植植物有黑三棱、香蒲、水葱、芦苇和睡莲,其中黑三棱、香蒲和水葱分别在30 cm、50 cm和80 cm水深处各种植4个沉床,芦苇在30 cm、50 cm和80 cm水深处分别种植3个沉床,睡莲分别在30 cm和50 cm水深处种植2个沉床,在80 cm深度种植1个沉床。上述每个沉床内种植株数为225株,种植间距为40 cm × 40 cm(行距 × 株距)。种植1个月后(8月20—25日)统计成活和死亡的植株数量以及成活植株的生长情况,并计算不同沉床植株的成活率。

第2阶段为人工沉床对水质净化效果试验。初期(8月25—30日)首先将示范区内的50个沉床全部调到水面以下30 cm,并对死亡植物进行全部更换,待植物成活后,随着植物生长逐渐加大沉床在水下的深度,最后在水质分析取样开始前将50个沉床全部调到水面以下80 cm。取样时间自2007年10月17日开始,至2008年9月17日结束。取样频率为每周1次样。试验区内水流平缓,流速约为82.05 m/d,水流经试验区的总时间为5.48 d,无明显死水区。本次试验过程按水流方向在试验河段内均匀布设8个取样断面(1号、8号断面分别为进、出水断面),各取样断面与进水断面之间的距离及水流自进水断面开始依次流经8个监测断面所对应的停留时间见表1。

表1 各取样断面对应的停留时间

监测断面	距进水断面的距离/m	停留时间/d	监测断面	距进水断面的距离/m	停留时间/d
1号	0	0	5号	240	2.93
2号	60	0.73	6号	300	3.66
3号	120	1.46	7号	360	4.38
4号	180	2.19	8号	450	5.48

监测时每个断面分别取1个水样,取样深度为水面下0.5 m。TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法进行测定。

## 2 结果讨论

### 2.1 水深条件对植物成活率的影响

试验期间外环河水体透明度为30~50 cm,不同水深条件下植物成活率及其生长状况见表2。

表 2 不同沉水深度下气浮调节式沉床上植物成活率及其生长状况

植物种类	水深/cm	总株数/株	成活数/株	成活率/%	生长状况
黑三棱	30	900	732	81.3	生长旺盛,分枝和新芽较多
	50	900	587	65.2	一般,有分枝和新芽
	80	900	135	15.0	瘦弱
香蒲	30	900	683	75.9	生长旺盛,分枝和新芽较多
	50	900	486	54.0	一般,有分枝和新芽
	80	900	98	10.9	瘦弱 植株发黄
水葱	30	900	704	78.2	生长旺盛,分枝和新芽较多
	50	900	531	59.0	一般,有分枝和新芽
	80	900	104	11.6	瘦弱 无分枝
芦苇	30	675	546	80.9	生长旺盛,分枝和新芽较多
	50	675	345	51.1	一般,有分枝和新芽
	80	675	131	19.4	瘦弱,分枝和新芽较少
睡莲	30	450	312	69.3	生长旺盛,有分枝和新芽
	50	450	178	39.6	一般,未发现分枝
	80	225	35	15.6	瘦弱,未发现分枝和新芽

表 2 表明,种植初期将床体控制在水面以下 30 cm 左右时,植物成活率较高,而且成活后生长状况较好,而床体在水面以下深度达到 50 cm,植物成活率明显降低,而且成活后植物的生长也受到抑制;当床体在水面以下深度达到 80 cm,植物成活率极低,而且成活后植物的生长状况也较差。这主要因为在重富营养化水体中,由于水面经常性暴发藻类及浮萍,水体透明度极低,高等维管束植物极难取得竞争上的优势,可见种植初期水深对植物成活至关重要。

植物成活后,随着植物的生长,可以逐渐增加植物在水中的深度,而且不同的植物所适应的水深条件是不同的。根据试验过程中的观察,对于挺水植物,如芦苇、黑三棱、香蒲、水葱等,适宜水深为植物本身高度的 1/3 ~ 1/2 (即保证植物体在水面以上的高度与水下高度之比为 2:1 ~ 1:1);对于浮叶植物,如睡莲,沉床在水下的深度不宜大于植株本身的高度,以保证植物叶片浮于水面。

## 2.2 沉床系统对 TN 的去除效果

采用去除率参数表示沉床系统对 TN 的去除效果,去除率计算公式如下:

$$E = \frac{\rho_{in} - \rho_{out}}{\rho_{in}} \times 100\%$$

式中:  $E$  为人工沉床对 TN 的去除率,%;  $\rho_{in}$ 、 $\rho_{out}$  分别为进、出水断面的质量浓度,  $\text{mg/L}$ 。

试验区进、出水断面 TN 质量浓度对比及去除

率随时间变化分别见图 2 及图 3。

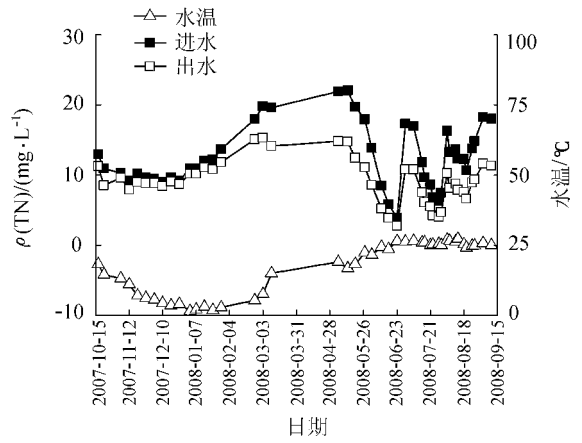


图 2 试验区进、出水断面 TN 质量浓度对比

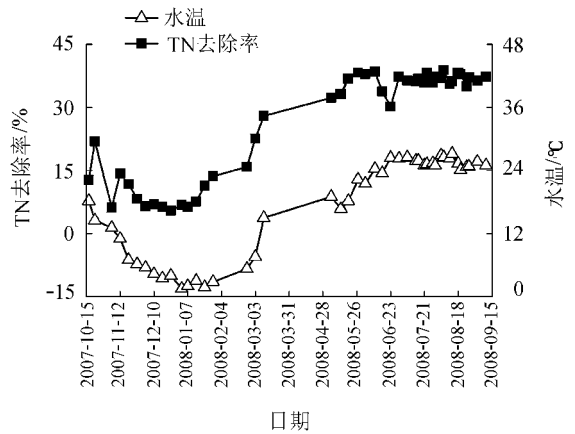


图 3 人工沉床对 TN 的去除率变化

由图 2 及图 3 可见,进水断面 TN 质量浓度在试验期间波动较大,3—5 月较高,其他月份有所下降,主要原因是该期间内降雨产生的雨水径流污染物浓度较高,将大量含氮污染物带入河道所致。出水水质变化与进水水质变化趋势基本一致,但出水中 TN 质量浓度均明显低于进水中 TN 质量浓度。变化趋势基本一致的原因可能是,目前外环河污染负荷较大,已超出人工沉床系统的净化能力,此时进水质量浓度的增加,必然导致系统出水质量浓度的增加。

试验区中 TN 去除率受进水 TN 质量浓度波动和气温变化的影响,有一定的波动现象。总体变化趋势为:10—11 月上旬 TN 去除率均呈上升趋势,而 11 月中下旬以后 TN 去除率开始下降;12 月至次年 2 月 TN 去除率较低,在 5% ~ 15% 左右,而 2—5 月 TN 去除率迅速上升,到 5 月底以后基本达到平稳阶段,去除率在 35% ~ 40% 之间波动。

TN 去除率随季节变化的原因主要是受植物生长和温度变化的影响。10 月份植物处于种植初期,此时植物生物量及密度都较低,对 TN 的去除率较低,而 10—11 月上旬,虽然气温不断下降,但此时仍能适合植物生长,随着植物生物量的增加和植物密

度的增大,人工沉床系统对 TN 的去除率呈上升趋势。进入 11 月下旬后,植物已基本进入休眠期,而且受气温影响微生物活动也明显减弱,表现出对 TN 的去除率明显下降。自 2—5 月份,随着气温的回升,植物进入萌芽和快速生长阶段,微生物活动也迅速加强,表现出系统对 TN 的去除率迅速上升;到 5 月份后,水生植物生长基本达到稳定阶段,而且微生物活动也基本达到最大,因此,系统对 TN 的去除率基本保持稳定。

### 2.3 TN 质量浓度随水力停留时间的变化关系

根据人工沉床试验区内 8 个监测断面的 TN 质量浓度监测结果及其对应的水力停留时间,利用指数方程分析人工沉床试验区内 TN 质量浓度随水力停留时间的变化关系(表 3)指数模拟方程如下:

$$\rho_t = \rho_0 e^{-Kt}$$

式中: $\rho_t$  为水力停留时间为  $t$  时的出水 TN 质量浓度,mg/L; $\rho_0$  为进水 TN 质量浓度,mg/L; $K$  为(一级动力学)衰减系数, $d^{-1}$ ; $t$  为水力停留时间, $d$ 。

由表 3 可见,在人工沉床实验区内,水体中 TN 质量浓度变化与水力停留时间呈现出相当高的相关性,相关系数  $R^2$  均在 0.9 以上。这说明人工沉床试验区内 TN 质量浓度随水力停留时间的变化规律符合一级动力学方程,即 TN 质量浓度均随水力停留时间的增加而成指数衰减。

模型方程中的  $K$  值随季节变化的趋势见图 4。

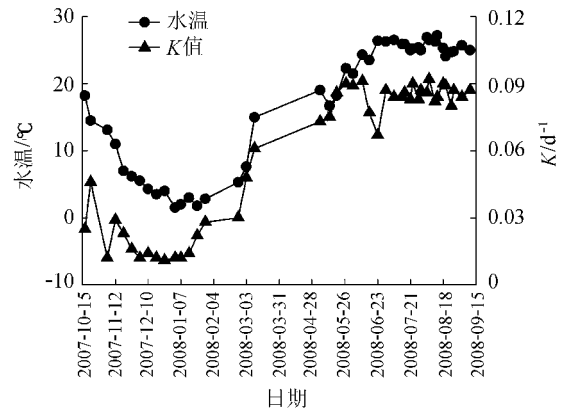


图 4 K 值随时间变化趋势

从图 4 可见,TN 随时间变化的  $K$  值在 10—12 月呈现出下降的趋势,1 月达到最小,2—5 月迅速上升,6—9 月基本保持稳定。除试验初期(2007 年 10 月份)外,其他月份人工沉床系统内 TN 的衰减系数( $K$  值)变化趋势与水温的变化趋势相似,即水温下降时, $K$  值减少,水温上升时, $K$  值增大,说明该模型中的  $K$  值受水温影响较大。2007 年 10 月尽管气温逐渐下降,而  $K$  值仍在增大,其主要原因是 10 月植物处于种植初期,此时植物生物量及密度相对较低(微生物活动相对不是十分活跃),因此对污染物的去除率较低,而且 10 月气温仍适合植物生长。因此,随着植物生物量的增加和植物密度增大,人工沉床系统对 TN 的去除率呈上升趋势。

为进一步分析 TN 的衰减系数随水温的变化关

表 3 TN 质量浓度随停留时间变化回归分析

日期	水温/°C	$\rho_0$ (mg·L <sup>-1</sup> )	$K/d^{-1}$	$R^2$	日期	水温/°C	$\rho_0$ (mg·L <sup>-1</sup> )	$K/d^{-1}$	$R^2$
2007-10-17	18.2	12.9	0.025	0.998	2008-06-10	24.3	8.5	0.091	0.998
2007-10-22	14.5	10.9	0.046	0.998	2008-06-16	23.5	5.8	0.077	0.998
2007-11-05	13.1	10.3	0.012	0.997	2008-06-23	26.4	3.9	0.067	0.998
2007-11-12	11.0	9.2	0.029	0.998	2008-06-30	26.3	17.3	0.087	0.998
2007-11-19	7.0	10.2	0.023	0.998	2008-07-07	26.5	16.9	0.084	0.998
2007-11-26	6.2	9.6	0.016	0.998	2008-07-14	25.9	11.8	0.084	0.998
2007-12-03	5.5	9.4	0.012	0.997	2008-07-16	25.9	9.7	0.086	0.998
2007-12-10	4.3	9.0	0.014	0.998	2008-07-21	25.0	8.6	0.083	0.998
2007-12-17	3.5	9.7	0.012	0.997	2008-07-23	25.2	6.8	0.090	0.998
2007-12-24	4.0	9.2	0.011	0.997	2008-07-28	25.4	6.3	0.083	0.998
2008-01-02	1.5	10.9	0.012	0.959	2008-07-30	25.0	7.5	0.087	0.998
2008-01-07	2.0	10.9	0.012	0.986	2008-08-04	26.9	16.3	0.086	0.998
2008-01-14	3.0	12.0	0.014	0.995	2008-08-06	26.5	13.3	0.092	0.998
2008-01-21	1.8	12.2	0.022	0.920	2008.08.11	26.3	13.6	0.082	0.998
2008-01-28	2.8	13.7	0.028	0.940	2008-08-13	27.2	12.3	0.084	0.998
2008-02-25	5.3	18.0	0.030	0.980	2008-08-18	25.3	12.3	0.090	0.998
2008-03-03	7.6	19.8	0.048	0.999	2008-08-20	24.1	10.7	0.089	0.998
2008-03-10	15.0	19.6	0.061	0.999	2008-08-25	24.7	13.7	0.080	0.998
2008-05-05	19.0	21.9	0.073	0.998	2008-08-27	24.8	14.8	0.087	0.998
2008-05-13	16.7	22.1	0.075	0.998	2008-09-03	25.7	18.2	0.084	0.998
2008-05-19	18.2	19.7	0.086	0.998	2008-09-10	25.0	18.0	0.087	0.998
2008-05-27	22.3	17.9	0.090	0.998	2008-09-17	28.1	23.5	0.088	0.998
2008-06-02	21.5	13.8	0.089	0.998					

系 笔者利用 S 型增长模型( Slogistic 函数)对二者之间的相关性进行了回归分析 结果见图 5。

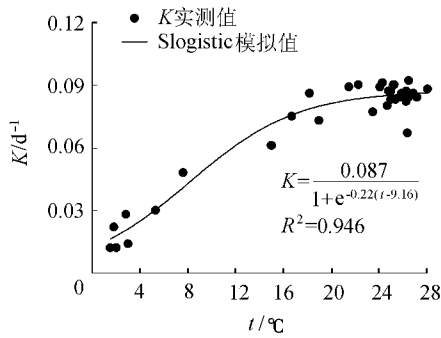


图 5  $K$  值随水温变化曲线

由图 5 可见, TN 的衰减系数随水温的变化趋势符合 S 形增长关系, 相关系数  $R^2$  达到 0.95。S 型增长关系表明, 水温在 5~20℃ 范围内变化时, 水温的上升导致  $K$  值的快速增加, 而当水温低于 5℃ 或高于 20℃ 时, 水温的变化对  $K$  值的影响较小。

总结上述试验, 人工沉床系统中 TN 的衰减系数在不同季节的取值为 3—10 月取 0.048 ~ 0.092d<sup>-1</sup>, 11 月至次年 2 月取 0.011 ~ 0.030, 可为今后试验和工程作参考。

### 3 结 论

a. 在城市富营养化水体中, 由于河道护砌、水深变化大、水体透明度低、藻类及浮萍泛滥等不利因素制约, 水生植物特别是沉水植物的恢复与重建极为困难, 而模块化气浮调节式人工沉床技术可以人为调控植物在水下的深度, 克服了水生植物受以上不利因素制约的技术难题, 大大提高了重富营养化水体植物栽植的成活率, 而且具有透水性好、可剪性强、后期维护管理方便等优点, 为重富营养化水体的生态修复及重建提供了新的思路和方法;

b. 植物生长期(3—10 月)人工沉床对水体中 TN 具有明显的去除效果, 在水力停留时间为 5.48 d 时, 去除率可达到 35% ~ 40%;

c. 在冬季(11 月至次年 2 月), 随着气温下降和植物进入休眠期, 人工沉床对 TN 的去除效果有所下降, 但仍表明出一定的去除效果, 在水力停留时间为 5.48 d 时, 去除率可达到 5% ~ 15%;

d. 水体在人工沉床试验区内, TN 质量浓度的变化均与水力停留时间呈现出极高相关性, 即质量浓度随停留时间的变化规律符合一级动力学方程;

e. 水温是影响 TN 一级动力学衰减系数  $K$  的一个重要参数, 其  $K$  值随水温的变化趋势符合 S 形增长曲线, 即在水温过低和水温过高时, 水温的变化

对  $K$  值的影响并不大, 但在某一适当温度范围内, 水温的上升将导致  $K$  值的快速增加。

### 参考文献:

- [1] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2): 36-40.
- [2] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 沉水植物重建对富营养水体氮磷营养水平的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1351-1353.
- [3] 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.
- [4] 成水平. 水生植物的气体交换与输导代谢[J]. 水生生物学学报, 2003, 27(4): 413-417.
- [5] SORRELL B K, ARMSTRONG W. On the difficulties of measuring oxygen release by root systems of wetland plants[J]. Ecol, 1994, 82: 177-183.
- [6] 万晓红, 李旭东, 王雨春, 等. 不同水生植物对湿地无机氮素去除效果的模拟[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 327-333.
- [7] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 673-676.
- [8] 贺锋, 吴振斌. 水生植物在污水处理和水质改善中的应用[J]. 植物学通报, 2003, 20(6): 641-647.
- [9] 鲜启鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 四种沉水植物的克藻效应[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 75-80.
- [10] MALEVA M G, NEKRASOVA G F, BEZEL V S. The response of hydrophytes to environmental pollution with heavy metals[J]. Russian Journal of Ecology, 2007, 33(4): 230-235.
- [11] KESKINKAN O, GOKSU M Z L, YUCEER A, et al. Comparison of the adsorption capabilities of myriophyllum spicatum and ceratophyllum demersum for zinc, copper and lead[J]. Engineering in Life Sciences, 2007, 7(2): 192-196.
- [12] 程南宁, 朱伟, 张俊. 重污染水体中沉水植物的繁殖及移栽技术探讨[J]. 水资源保护, 2004, 20(6): 8-12.
- [13] 谢田, 朱富寿, 管颖. “网箱养草”净化水质技术初步试验结果[J]. 云南环境科学, 2004, 23(3): 58-62.
- [14] 李金中, 李学菊. 人工沉床技术在水环境改善中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1): 825-830.

(收稿日期 2010-05-29 编辑 徐 娟)