

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2011.01.014

浮床植物对不同污染程度水体中氮、磷的去除效果

李欲如^{1,2}, 陈娟^{1,2}

(1. 浙江省环境保护科学设计研究院, 浙江 杭州 310007 2. 国家环境保护水污染控制技术(浙江)中心, 浙江 杭州 310007)

摘要 研究美人蕉及水葫芦这两种常见浮床植物在低、中、高浓度污水中的生长状况, 以及对氮、磷的净化效果。①低浓度污水中水葫芦对氮磷的去除效果优于美人蕉; 中浓度污水中水葫芦对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果高于美人蕉, 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TP 的去除效果低于美人蕉; 高浓度水样中, 美人蕉对所有指标的净化效果均优于水葫芦。②水葫芦在 TN 质量浓度大于 30 mg/L , TP 质量浓度大于 10 mg/L 的污水中生长受到抑制, 美人蕉则生长良好, 并取得较好净化效果。得出水葫芦对低浓度污水的净化效果较好, 而美人蕉适合于净化高浓度污水的结论。

关键词 浮床植物 污水处理 氮磷去除 美人蕉 水葫芦

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2011)01-0058-05

Removal effect of floating-bed plants on nitrogen and phosphorus in wastewater with different concentrations

LI Yu-ru^{1,2}, CHEN Juan^{1,2}

(1. Zhejiang Environmental Science Research and Design Institute, Hangzhou 310007, China; 2. State Environmental Protection and Water Pollution Control Engineering Technology Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The growth status and purification effect on nitrogen and phosphorous of the two familiar floating-bed plants, Canna generalis and Ipomoea aquatica, were studied in the low, middle and high concentration wastewater. The results showed as follows: (1) in low concentration wastewater, the purification effect on nitrogen and phosphorous of Ipomoea aquatica was higher than that of Canna generalis; in middle concentration wastewater, the purification effect on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ of Ipomoea aquatica was higher than that of Canna generalis, and the purification effect on $\text{NO}_3\text{-N}$ and TP of Ipomoea aquatica was lower than that of Canna generalis; in high concentration wastewater, the purification effect on all pollutants of Canna generalis was higher than that of Ipomoea aquatica; (2) the growth of Ipomoea aquatica was restrained in wastewater of mass concentration of TN higher than 30 mg/L and TP higher than 10 mg/L , while the growth of Canna generalis was good and had better purification effect. It was concluded that Ipomoea aquatica was preferably to purify low concentration wastewater and Canna generalis was suitable to purify high concentration wastewater.

Key words: floating-bed plants; wastewater treatment; removal of nitrogen and phosphorous; Canna generalis; Ipomoea aquatica

植物的生长及去污效果与水体中的 N、P 营养盐浓度有显著的关系。在一定 N、P 浓度范围内, 浓度的增高对植物生长有促进作用; 但当 N、P 浓度过高时, 植物过量吸收水体营养, 有可能对植物生长产生不良后果, 从而抑制植物生长, 降低净化效果^[1]。夏汉平等^[2]利用水葫芦、百喜草、水花生、香根草等

植物对垃圾污水进行植物净化研究, 结果表明水花生对低浓度污水的净化效果总体上好于香根草, 但香根草对高浓度污水的净化效果均优于水花生, 且对低浓度污水中的 P 与 COD 的净化亦优于水花生。王丹等^[3]研究认为, 得出石龙芮对生活污水的净化效果与其生长期及污水浓度呈明显相关性。周耀华

等^[4]通过模拟人工湿地的方法研究了湿地植物群落对不同浓度生活污水的净化能力。

以上研究均为陆生或水生植物在不同浓度污水中的生长状况及净化效果,但对于浮床植物在不同污染程度水体中的生长状况及净化效果的研究仍鲜有报道。因此,为了筛选出在不同污染程度水体中具有较优去污效果的浮床植物,笔者通过试验开展了相关研究。

1 试验材料及方法

1.1 供试植物

所选用的植物为水薹菜(*Ipomoea aquatica*)、美人蕉(*Canna generalis*) 2 种喜温型植物,这 2 种植物在浮床种植净化污染水体以及生态修复工程中应用较为广泛,而且取得了较好的效果^[5-9]。

1.2 供试水样

供试水样采用人工配制污水,按照轻度污染的地表水、中等污染城市河水、重污染城市河水为参照设置低、中、高 3 个浓度梯度。配水所用到的药品有葡萄糖、磷酸氢二钾、氯化铵、硝酸钠等。

配制成的低、中、高浓度污水水质指标如表 1 所示。

表 1 不同污染程度水体中的水质指标数值 mg/L				
指标	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$
低浓度	2.53	1.65	0.78	0.21
中浓度	11.73	7.78	3.25	1.05
高浓度	31.26	20.61	10.03	10.32

1.3 试验方法

将采集来的植物放在装有新鲜污水的塑料盆中,放在室外自然条件下进行预培养驯化,作为试验材料备用。

试验开始时,取若干个试验桶,清洗晾干、编号;向所有试验桶分别加入 100 L 污水,挑选经驯化后生长状态良好的植物,称取经过预培养的水薹菜、美人蕉鲜质量各 100 g,小心用蒸馏水清洗根系(勿损伤根系),移入试验浮床泡沫板载体(图1),分别放置

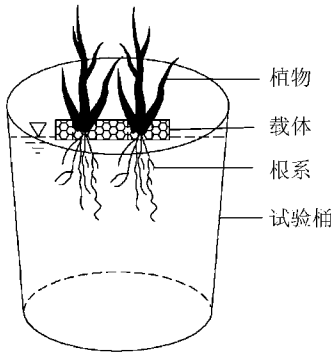


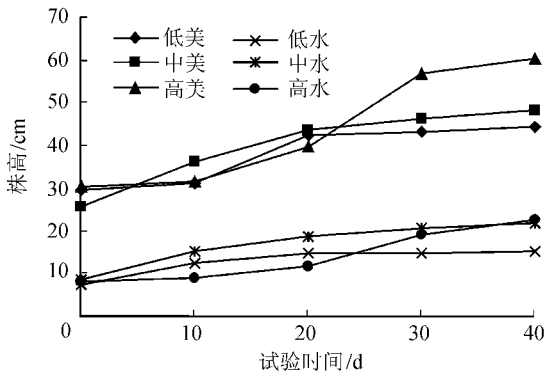
图 1 试验示意图

于配置好的低、中、高浓度污水中,每种植物设一个平行样,同时低、中、高浓度污水分别设置一个不放植物的空白对照样。所有试验桶均放在室外自然光照的地方,避免雨淋。

试验周期为 40 d,试验期间是当地夏季,气温 25.0~35.2℃、水温 26.2~31.4℃,适合供试植物的生长。

2 植物生长状况

水薹菜、美人蕉在不同污染程度水样中均表现出不同的生长状况。试验期间每 10 d 测量 1 次植株高度,结果见图 2。



注 低美、中美、高美分别代表低、中、高浓度水样中的美人蕉;低水、中水、高水分别代表低、中、高浓度水样中的水薹菜

图 2 试验期间植株高度变化

由图 2 可知,美人蕉在低浓度水样中生长较慢;在中浓度水样中初始生长较快,20 d 后生长趋缓;在高浓度中则是初始缓慢,10 d 后则快速生长。美人蕉在中、低浓度水样中试验后期叶片枯黄,表现出缺乏营养的症状,植株略显瘦小;而在高浓度水样中在度过初始阶段的适应期后新陈代谢加快,生长茂盛,叶片宽阔、肥厚,且在试验后期分蘖出新的植株。

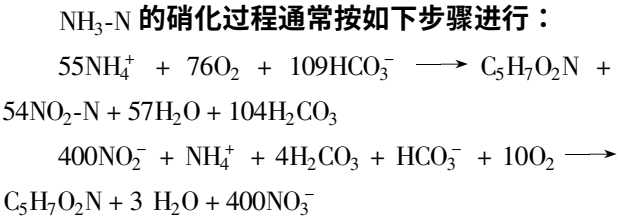
水薹菜在低、中浓度水样中初期生长良好,叶片基本呈绿色,2~3 d 后就有新叶冒出,20 d 后在低浓度水样中生长缓慢,叶片发黄、瘦小;而在中浓度水样中则保持较均匀的生长速度,试验结束时叶片基本保持绿色;而在高浓度水样中 3 d 后就出现叶片枯黄,基本停止生长,移栽前的新叶不能很好生长,后期虽然发出少量匍匐枝和球茎,但总体上呈黄色且枝干瘦小,说明高浓度的 N、P 营养盐对水薹菜的生长具有抑制作用。

3 水质净化效果与分析

3.1 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果与分析

试验中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除作用主要包括根系微生物的硝化与反硝化作用、根系的吸收作用; $\text{NH}_3\text{-N}$ 在

硝化菌(*Nitrobacter*)的作用下转化为无机的 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N,最后通过反硝化菌及根系的吸收作用而从水体中去除。



硝化菌和亚硝化菌(*Nitrosomaonas*)对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进行硝化的同时获得自身所需要的能量。由于对 DO 需求量很高(将 1 g $\text{NH}_3\text{-N}$ 转化为 NO_3^- -N 需要 4.5 g 的 O_2),硝化过程只在 DO 浓度较高的地方才能进行,由于水中的 DO 主要来自植物根系的输氧作用,因此, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除主要取决于植物的供氧能力。

如图 3 所示,低浓度水样中,水蓼菜、美人蕉分别使 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 由 1.65 mg/L 下降到 0.10 mg/L、0.25 mg/L,空白对照样则下降到 0.58 mg/L。2 种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除作用在 15 d 前呈快速下降的趋势,原因

可能为 ① $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 N 元素中的比例较大时,植物优先吸收水样中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ ^[10] ② 部分 $\text{NH}_3\text{-N}$ 通过硝化作用转化为 NO_3^- -N。在 15 d 后则趋缓或有所波动,在 15 d 后 2 种植物水样中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 都降低到了 0.30 mg/L 以下,此时水样中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 比例减少,而 NO_3^- -N 比例下降,植物对 N 元素的吸收以 NO_3^- -N 为主。

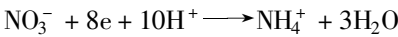
中浓度水样中,水蓼菜、美人蕉分别使 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 由 7.78 mg/L 下降到 0.37 mg/L、0.53 mg/L,空白对照样仅下降到 2.99 mg/L。2 种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除趋势也是在试验初期快速下降,后期趋缓,原因与低浓度水样中相同。

高浓度水样中,水蓼菜、美人蕉分别使 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 由 20.61 mg/L 下降到 3.00 mg/L、1.01 mg/L,降幅较大,空白对照样仅下降到 8.02 mg/L。试验初期水蓼菜水样 $\text{NH}_3\text{-N}$ 下降趋势与空白对照区别不大,试验后期才明显超过对照样,这也是水蓼菜在高浓度水样中初期生长受到抑制造成的。

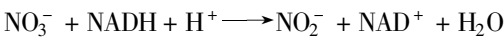
3.2 对 NO_3^- -N 的去除效果分析

植物对 NO_3^- -N 的去除主要靠植物的吸收作用及根系微生物的反硝化作用。

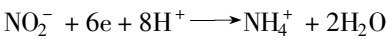
植物吸收 $\text{NH}_3\text{-N}$ 后,可直接利用它去合成氨基酸,但吸收 NO_3^- 必须经过代谢还原才能利用,因为蛋白质的氮呈高度还原状态,而硝酸盐的氮却是呈高度氧化状态。 NO_3^- 还原成 NH_4^+ 的过程需要消耗能量^[11],总反应式如下：



硝酸盐还原成 NH_4^+ 是不同酶催化的 2 个独立过程。首先 NO_3^- 被还原成 NO_2^- ,这个过程由硝酸还原酶(nitrate reductase)催化：

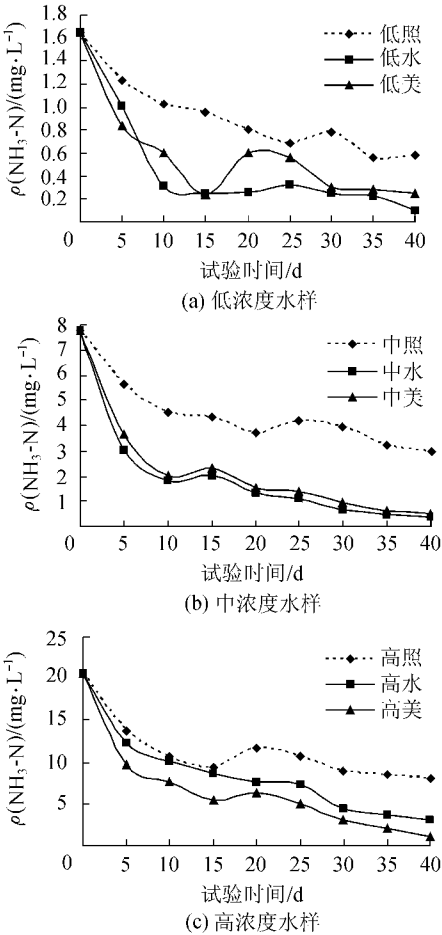


其次 NO_2^- 被还原成 NH_4^+ ,这个过程由亚硝酸还原酶(nitrite reductase)催化：



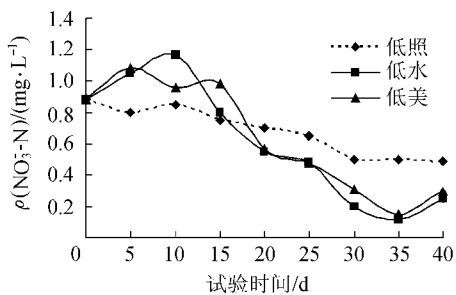
根系微生物对 NO_3^- -N 的反硝化作用可使水体中的氮以 N_2 和 N_2O 的形式从水体逸出,从而将氮从水体中彻底去除。

不同浓度水样中 NO_3^- -N 的变化趋势如图 4 所示。低浓度水样中,水蓼菜和美人蕉分别使 NO_3^- -N 由 0.88 mg/L 下降到 0.25 mg/L、0.30 mg/L,空白对照样下降到 0.48 mg/L。前 15 d 水蓼菜、美人蕉水样中的 NO_3^- -N 上升,且高于空白对照样,后期下降速度加快,20 d 后有植物水样中的 NO_3^- -N 都低于对照样。原因是试验前期水样中 NO_3^- -N 占 N 元素中的小部分,植物对 NO_3^- -N 的吸收需要消耗能量,因此在 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较多时一般不会优先吸收 NO_3^- -N;试验后期

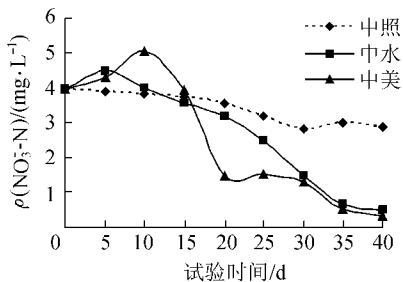


注 低照、低水、低美分别代表低浓度水样空白对照、水蓼菜、美人蕉;中照、中水、中美分别代表中浓度水样空白对照、水蓼菜、美人蕉;高照、高水、高美分别代表高浓度水样空白对照、水蓼菜、美人蕉

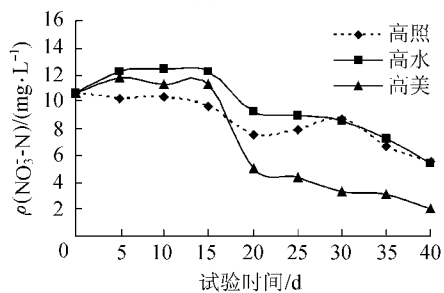
图 3 不同浓度水样中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的变化趋势



(a) 低浓度水样



(b) 中浓度水样



(c) 高浓度水样

图4 不同浓度水样中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的变化趋势

水样中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 减少,植物对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的吸收以及反硝化作用使得植物水样中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 快速下降。

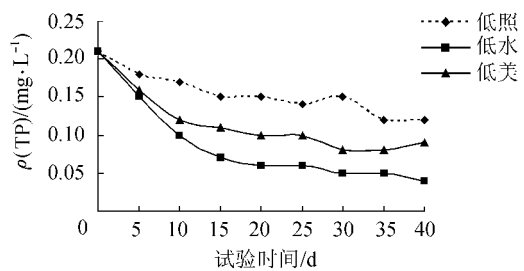
中浓度水样中,水蓼菜、美人蕉分别使 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 由 3.95 mg/L 下降到 0.50 mg/L 、 0.35 mg/L ,而空白对照样仅仅下降到 2.87 mg/L 。2种植物的去除规律与其在低浓度水样中基本一致。

高浓度水样中,美人蕉使 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 由初始的 10.65 mg/L 下降到 2.05 mg/L ,而水蓼菜仅下降到 5.35 mg/L ,空白对照样下降到 5.50 mg/L ,仅比水蓼菜水样高 0.15 mg/L 。这可能是因为水蓼菜试验初期生长受到抑制,但由于植物的存在影响了水体自然状态下的反硝化作用,使试验初期水蓼菜水样的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 高于对照样,试验后期由于水蓼菜生长吸收而使 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的下降趋势赶上对照样。

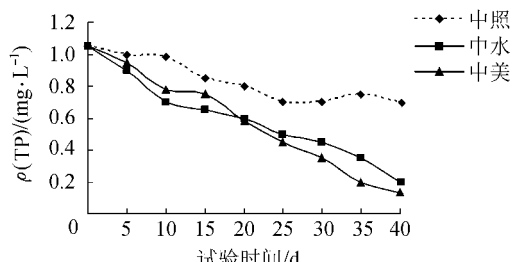
通过比较不同浓度水样中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的净化趋势发现, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除规律及效果差别很大,这主要是由于植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除方式不同以及原水样中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度的不均衡造成的。

3.3 对 TP 的去除效果与分析

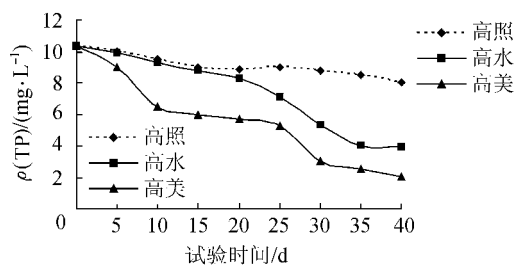
不同浓度水样中的 TP 变化趋势如图 5 所示。



(a) 低浓度水样



(b) 中浓度水样



(c) 高浓度水样

图5 不同浓度水样中 TP 的变化趋势

由图 5 可知,低浓度水样中,40 d 后水蓼菜和美人蕉分别使水样中的 $\rho(\text{TP})$ 由 0.21 mg/L 降低到 0.04 mg/L 和 0.09 mg/L ,空白对照样则下降到 0.12 mg/L 。试验过程中 2 种植物对 TP 的去除效果都较稳定,但是水蓼菜 5 d 后对 TP 的去除趋势明显超过了美人蕉,说明水蓼菜对低浓度中 TP 的净化效果优于美人蕉。

中浓度水样中,试验结束时水蓼菜和美人蕉分别使水样中的 $\rho(\text{TP})$ 由 1.05 mg/L 下降到 0.20 mg/L 、 0.13 mg/L ,空白对照样则仅降低至 0.70 mg/L 。15 d 前,水蓼菜对 TP 的净化效果优于美人蕉,15 d 后,美人蕉对 TP 的净化趋势赶上并超过了水蓼菜,总体上来看,中浓度水样中美人蕉的净化效果较优。

高浓度水样中,水蓼菜、美人蕉分别使水样中的 $\rho(\text{TP})$ 由 10.32 mg/L 下降到 3.95 mg/L 、 2.03 mg/L ,空白对照样则仅下降到 8.02 mg/L 。20 d 前水蓼菜对 TP 的去除趋势几乎与空白对照样一致,20 d 后才超过空白样,其原因是前 20 d 较高 N、P 浓度抑制了水蓼菜的生长,而随着水样自然净化,20 d 后 N、P 浓度降低到了适合水蓼菜生长的范围内,水蓼菜株高在 20 d 后快速增加正好与此原因吻合。

4 结果与讨论

通过试验研究了高、中、低浓度污水对水薹菜、美人蕉 2 种常用浮床植物水质净化效果的影响,主要结论如下:

a. 低浓度水样中水薹菜对 N、P 的去除效果优于美人蕉;中浓度水样中,水薹菜对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果高于美人蕉,对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TP 的去除效果低于美人蕉;高浓度水样中,美人蕉对所有指标的净化效果均优于水薹菜,水薹菜初期生长受抑制是导致去除效果低于美人蕉的主因。

b. 水薹菜在 $\rho(\text{TN}) > 30 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) > 10 \text{ mg/L}$ 的水样中生长会受到抑制,美人蕉则能很好地生长,并能取得较好的净化效果,说明美人蕉能适应较广的浓度范围。

因此,利用植物浮床技术净化低浓度水体(例如轻度污染的地表水)时,推荐使用水薹菜;中度污染水体(如大部分城市污染河道)可采用美人蕉、水薹菜混合种植的方式;高浓度污染水体(如有城市二级污水处理厂尾水排放的河流、有生活污水未经处理直接排放的河流),推荐使用美人蕉。

参考文献:

[1] 李宏文,梁娜,CHIEN P K. 水生植物的生态敏感度研究[J]. 生态学杂志,2001,21(2): 20-22.

[2] 夏汉平,王庆礼,孔国辉. 垃圾污水的植物毒性和植物净化效果之研究[J]. 植物生态学报,1999,23(4): 289-301.

[3] 王丹,张银龙,庞博. 石龙芮对不同浓度污染水体的净化效果研究[J]. 山东林业科技,2009,39(5): 14-16.

[4] 周耀华,李莎莎,杨红梅,等. 湿地植物群落对不同浓度生活污水的净化效果研究[J]. 林业建设,2009(6): 22-24.

[5] 嵇旭文,陈家长. 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,2001,21(3): 29-33.

[6] 戴全裕,蒋兴昌,汪耀斌,等. 太湖入湖河道污染物控制生态工程模拟研究[J]. 应用生态学报,1995,6(2): 201-205.

[7] 陈家长,胡庚东,吴伟. 浮床陆生植物对水体生态环境影响的研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(增刊): 91-94.

[8] 操家顺,李欲如,陈娟. 水薹菜对重污染河道净化及克藻功能[J]. 水资源保护,2006,22(2): 36-38.

[9] 高阳俊,赵振,孙从军. 组合生态浮床在滇池入湖河流治理中的应用[J]. 中国给水排水,2009,25(15): 46-48.

[10] 葛滢,王晓月,常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报,1999,19(6): 690-692.

[11] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社,2004.

(收稿日期: 2010-01-18 编辑: 高渭文)

· 简讯 ·

天津强化水资源统一管理 推进节水型社会建设

作为我国北方最大的沿海开放城市,天津因水而生,却重度缺水。近年来,天津走出了一条以“产业结构调整、多水源价格机制、公众参与体系”为主要特色的节水之路。

2010 年 9 月,天津市顺利通过由水利部和全国节约用水办公室组织的南水北调东中线规划区节水型社会建设试点验收,荣膺“全国节水型社会建设示范市”称号。

天津市水危机自 20 世纪 70 年代就已发生。通过“引滦入津”和“引黄济津”应急调水工程,天津市水危机在一定程度上得到缓解。据统计,目前天津市人均水资源占有量仅 370 m^3 ,远低于世界公认人均占有量 1000 m^3 的缺水警戒线。

近年来天津大力调整工业结构,着力解决结构性浪费水资源问题,逐步淘汰、压缩高耗水行业,纺织、造纸等行业中的一批耗水量大、用水效率低、水污染严重的企业相继在天津“消失”;培育、扶持高附加值优势产业,优先满足工业废水零排放企业的用水需要,对电子信息、现代医药等低耗水、高附加值产业实行优质优供。截至 2008 年,天津万元 GDP 用水量为 35 m^3 ,工业节水总体水平位居全国前列。

从 2000 年至今,天津工业总产值增长近 11 倍,但工业取水量仅增长 30%,实现了工业快速增长而工业用水量保持基本稳定和微增长的目标。

自 1996 年至今,天津根据市场经济规律,多次调整自来水价格,拉开各类用水差价,多水源的价格机制成为撬动节水的杠杆。为抑制地下水超采,天津市大幅度提高地下水资源费标准,逐步缩小与自来水价格的差距,用价格杠杆促使人们减少地下水使用量。天津地下水资源费从 2005 年的 $1.3 \sim 1.9 \text{ 元/m}^3$ 上升至 2008 年的 $1.6 \text{ 元} \sim 2.6 \text{ 元/m}^3$,地下水开采量从 6.98 亿 m^3 降至 6.25 亿 m^3 。据悉,3 年间,天津年用水量维持在 22 ~ 23 亿 m^3 ,用水总量得到了有效控制。

天津市从节水宣传入手,开展节水教育,培育节水文化。编辑学龄前儿童节水读物,把节水知识纳入中小學生课本;开展“节水器具进万家”活动,对全市 27 个居民小区节水型器具进行了改造,1.6 万余户居民从中受益。“一水多用”已经成为许多市民的生活习惯。

(本刊编辑部供稿)