

## 高盐废水人工湿地处理中耐盐植物的筛选

尚克春<sup>1,2</sup>, 刘宪斌<sup>1</sup>, 陈晓英<sup>3</sup>

(1. 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457; 2. 天津市滨海新区塘沽环境保护监测站, 天津 300450; 3. 天津市滨海新区塘沽环保产业服务中心, 天津 300450)

**摘要:**天津塘沽作为滨海新区核心区,是目前天津发展最快的地区之一。由于本区盐碱土壤等自然条件,污水中盐分含量较高,制约了废水的回用。本文通过模拟人工湿地实验,比较了芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、碱蒿(*Artemisia anethifolia*)、黄花鸢尾(*Iris wilsonii*)、盐角草(*Salicornia europaea*)和大米草(*Spartina anglica*)等耐盐植物对轻污染水体中高浓度氯离子的去除能力,筛选出去除能力较强的植物,并确定植物对盐分去除率达到最大时的生态系统条件。结果表明,适合人工湿地的耐盐碱植物对氯离子的去除效果依次为:芦苇>盐地碱蓬>碱蒿>黄花鸢尾>盐角草>大米草,停留时间一般在第4d时可达到平衡。该研究为利用人工湿地处理高盐废水提供了科学依据。

**关键词:**高盐废水;耐盐植物;人工湿地

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2014)01-0074-05 doi: 10.13254/j.jare.2013.0137

### Screening of the Salt Tolerant Plants for High Salinity Wastewater Treatment by the Artificial Wetland

SHANG Ke-chun<sup>1,2</sup>, LIU Xian-bin<sup>1</sup>, CHEN Xiao-ying<sup>3</sup>

(1. Marine Science Engineering College, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tanggu Environmental Protection Monitoring Station, Binhai New Area of Tianjin City, Tianjin 300450, China; 3. Tanggu Environmental Protection Industrial Service Center, Binhai New Area of Tianjin City, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Tanggu, as the core area in Binhai New Area, is currently one of the fastest developing areas in Tianjin City. Because of the saline alkali soil and other natural conditions, wastewater reuse is restricted by high salinity. The removal of high concentration chloride by *Phragmites australis*, *Suaeda salsa*, *Artemisia anethifolia* Weber, *Iris wilsonii*, *Salicornia europaea*, and *Spartina anglica* in light polluted water was compared by the simulation experiment of artificial wetland. The plants with stronger removal ability were selected and the ecosystem condition with maximum removal rate was determined. The results showed that the removal effect of chloride by salt-tolerant plants in artificial wetland was: *Phragmites australis* > *Suaeda salsa* > *Artemisia anethifolia* > *Iris wilsonii* > *Salicornia europaea* > *Spartina anglica*. The removal efficiency reached balance after four days. This study provided a scientific basis for the high salinity wastewater treatment by artificial wetland.

**Keywords:** high salinity wastewater; salt-tolerant plants; artificial wetland

天津塘沽地处华北平原东部,是我国制盐、制碱、造船和海洋石油开发的重要基地。但塘沽因土壤含盐量高,水资源不足,降水偏少,地下水矿化度高难以利用,而成为资源型缺水地区。水资源短缺与利用的矛盾,严重制约着本地经济、社会及农业的快速发展。因此,如何用低成本的方式,降低废水中的盐分,使废水

资源化,成为亟待解决的问题。

人工湿地具有氮磷污染物去除能力强、耐污染冲击负荷和运转维护管理方便等优势,已被应用于各种高含盐量废水的深度处理<sup>[1]</sup>。前人研究结果表明,人工湿地对沿海高盐度地区(含盐量为4 000~8 000 mg·L<sup>-1</sup>)的微咸水中总氮和总磷的最高去除率分别可达50%和37%<sup>[2]</sup>;对城市污水处理厂处理后含盐量较高(含盐量为5 000~7 000 mg·L<sup>-1</sup>)的再生水中有机污染物去除率约为30%<sup>[3-5]</sup>;对含盐量较高的水产养殖废水

收稿日期:2013-09-05

作者简介:尚克春(1984—),女,硕士研究生,工程师,主要从事环境管理和监测工作。E-mail: 641244662@qq.com

中氮、磷也有很好的去除效果<sup>[6-8]</sup>。人工湿地处理系统综合了物理、化学、生物3种作用,能够去除污水或废水中的有机物、氮、磷和重金属等<sup>[9]</sup>,采用此方法实现污水的再生回用不仅适合国情,同时也适合塘沽区情。针对塘沽本地污水中含盐量较高的特点,人工湿地中耐盐植物的筛选显得尤为重要。

本研究构建了高盐度进水条件下人工湿地的实验装置,比较了不同耐盐植物对氯离子的去除效果,并研究植物对盐分的去除率达到最大时的生态系统条件,筛选出耐盐范围较高的植物,为利用人工湿地处理高盐废水提供了科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 人工湿地实验耐盐植物的筛选

所选植物是通过野外调查和室内实验相结合的办法筛选出的,最终选定为6种植物:芦苇、黄花鸢尾、大米草、盐角草、盐地碱蓬和碱蒿。

#### 1.1.1 耐盐植物的耐盐性调查

在天津滨海新区塘沽及周边地区,采取野外调查与资料查阅相结合的办法,对本区的株高在1 m以下的野生耐盐植物的耐盐程度进行了调查,共调查盐碱植物23种、隶属17科。

#### 1.1.2 植物的耐盐性室内实验

结合野外调查结果,初步选定塘沽本地耐盐较高的6种植物和人工湿地常用5种植物作为实验植物,按水生植物和陆生植物分类分别设计实验,测定其耐盐范围。水生植物包括芦苇、香蒲、水葱、水葫芦、黄花鸢尾、美人蕉和小米草,经去土、洗净根后置于高为25 cm、直径为20 cm的烧杯内进行培养。人工基材采用约2 cm厚度的泡沫板,并在板上打孔,以固定植物。每个烧杯种植1棵植物,每种植物各重复3次。陆生植物包括盐角草、枸杞、盐地碱蓬、碱蒿,种在高为20 cm、直径为70 cm的塑料大盆中,采用花园土作为栽培基质。植物上盆后,盆中盛有相同体积的污水,并要求水面高度接近盆弦,水量7 L。同时设置未种植物的空白对照。每盆栽植植物的初始数量与其原生条件下单位面积内植物数量相同。实验室温度控制在20~25℃,进行20 d的驯养,观察植物在盐度为0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%情况下的生长变化情况。

#### 1.2 实验废水

实验水样取自北排河,污水的水质如表1所示。

#### 1.3 人工湿地实验装置

实验装置长为800 mm,宽为600 mm,高为700

表1 北排河水质(mg·L<sup>-1</sup>)  
Table 1 Water quality in North Pai River(mg·L<sup>-1</sup>)

指标	最小值	最大值	平均值
pH(无量纲)	7.24	8.86	7.68
氯化物	435	9 690	4 582.92
COD <sub>Cr</sub>	160	950	443.5
BOD <sub>5</sub>	15.60	104	69.34
氨氮	23.77	87.06	43.29

mm,板厚为100 mm,由聚乙烯板构建,容器外侧由角钢焊接加固。进水管设在宽度方向中心一侧,并设置1个,进水管距离池顶300 mm。出水管设在宽度方向中心另一侧,并设置3个,其中最顶端的出水管距离底端400 mm,3个出水管间距200 mm。取样管设置在容器池底中心位置,垂直方向上布置3支取样管,3个取样管间距200 mm,均匀分布在容器的中间位置。实验装置如图1所示。

本实验所用材料主要包括植物、实验废水和基质。所需基质采用2种:沸石和鹅卵石,二者孔隙度分别为55.0%和50.4%,其粒径均分别为1~8 mm和1~10 cm。其中,沸石是沸石族矿物的总称,由硅氧和铝氧四面体组成,是一种含水的碱金属或碱土金属的铝硅酸盐矿物,沸石按矿物特征可分为片状、架状、纤维状及沫粉类4种;按孔道体系特征沸石分为一维、二维和三维体系。而鹅卵石的主要化学成分是二氧化硅,其次是少量氧化铁和微量的锰、铜、铝、镁等元素及化合物。

#### 1.4 人工湿地的运行与测试方法

进水源为采集的北排河水,每周采水1次,并采用连续运行方式向实验装置内进水,进水依靠重力作用缓缓流入,停留时间为7 d。每种植物的栽植数量与其原生条件下单位面积内植物数量相同,每种植物各重复3次,同时设置未种植物的空白对照。实验过程中,湿地水样取样频率为每日1次,氯离子测量方法采用硝酸银滴定法,按照参考文献[10]进行。

氯离子去除率=3次重复试验的去除率平均值-对照试验去除率。

## 2 结果与分析

对天津塘沽及周边地区,共调查盐碱植物23种,隶属17科,结果如表2所示。

根据表2得出:最耐盐碱的是禾本科的芦苇、大米草,耐盐度达3%以上,其次是碱蒿、盐角草、盐地碱蓬、枸杞,耐盐度都在2%以上。可选芦苇、大米草、碱蒿、

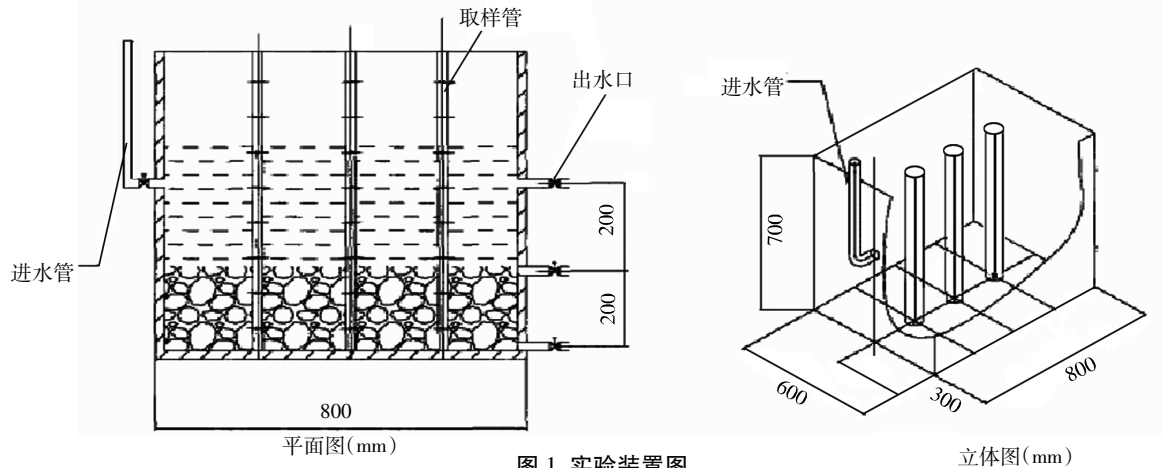


图 1 实验装置图

Figure 1 Experimental device

表 2 本地耐盐植物种类及耐盐范围<sup>[11]</sup>

Table 2 The local salt tolerant plant species and their salt tolerance range<sup>[11]</sup>

名称	科名	株高/cm	耐盐范围/%	生理类型
芦苇( <i>Phragmites australis</i> )	禾本科	>100	3.0~4.0	拒盐植物
枸杞( <i>Lycium barbarum</i> )	茄科	>100	2.65~3.0	专性聚盐植物
盐角草( <i>Salicornia europaea</i> )	藜科	10~100	2.5~3.0	聚盐植物
盐地碱蓬( <i>Suaeda salsa</i> )	藜科	20~80	2.5~3.6	专性聚盐肉质植物
碱蒿( <i>Artemisia anethifolia</i> )	藜科	30~100	1.5~3.02	专性聚盐肉质植物
单叶蔓荆( <i>Vitex trifolia</i> )	马鞭草科	<20	0.6~0.8	专性盐生植物
大米草( <i>Spartina anglica</i> Hubb)	禾本科	40~130	3.0~4.0	专性泌盐植物
藜( <i>Chenopodium album</i> )	藜科	60~120	0.1~2.0	专性泌盐植物
碱地蒲公英( <i>Herba Taraxaci</i> )	菊科	5~20	0.6~0.8	专性盐生植物
凤尾兰( <i>Yucca Gloriosa</i> L)	百合科	<20	1.0 左右	专性盐生植物
金叶女贞( <i>Ligustrum vicaryi</i> L)	木犀科	50~150	0.4 左右	兼性耐盐植物
曼陀罗( <i>Datura stramonium</i> )	茄科	<20	0.3~0.6	耐盐性能强
马莲( <i>Iris lacteal</i> Pall)	鸢尾科	<20	0.3~0.4	耐盐性能强
大花马齿苋( <i>Portulaca grandiflora</i> )	马齿苋科	2.5	0.30	兼性耐盐植物
费菜( <i>Sedum aizoon</i> )	景天科	20~50	0.30	兼性耐盐植物
五叶地锦( <i>P.thomsoni</i> L)	葡萄科	3~10	0.3~0.4	兼性耐盐植物
紫花苜蓿( <i>Medicago sativa</i> L)	豆科	30~100	0.3~0.6	兼性耐盐植物
地黄( <i>Rehmannia</i> )	玄参科	5~30	0.3~0.6	兼性耐盐植物
一串红( <i>Salviasplendens</i> Ker-Gawler)	唇形科	<20	0.30	兼性耐盐植物
鸡冠花( <i>Cockscomb Flower</i> )	苋科	<20	0.30	轻盐碱植物
野菊花( <i>Dendranthema indicum</i> )	菊科	50~120	0.30	轻盐碱植物
芙蓉葵( <i>Hibiscus moscheutos</i> )	锦葵科	100~150	0.30	兼性耐盐植物
牵牛( <i>Pharbitis nil</i> (Linn.)Choisy)	旋花科	<20	0.30	兼性耐盐植物

盐地碱蓬、盐角草、枸杞进行下一步室内实验。

对选定的塘沽本地 6 种植物和人工湿地常用 5 种植物进行室内实验,测定其耐盐范围,实验结果如表 3 所示。

由表 3 可知,芦苇、黄花鸢尾、大米草、盐角草、盐地碱蓬和碱蒿这 6 种植物可归为重度耐盐植物;枸杞

这 1 种植物可归为中度耐盐植物;香蒲、水葱、水葫芦、美人蕉这 4 种植物可归为轻度耐盐植物。选择芦苇、黄花鸢尾、大米草、盐角草、盐地碱蓬、碱蒿这 6 种重度耐盐植物进行下一步的人工湿地模拟实验。

测量植物耐盐范围的室内实验,经过 20 d 的培养,盐度为 0.4%时,12 种植物正常生长,都具有良好

表3 不同盐度对植株的影响  
Table 3 Effect growing of different salinity

植物名称	盐 度				
	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%	1.2%
芦苇	生长良好	生长良好	生长良好	没有新叶萌发	存活 7 d
黄花鸢尾	生长良好	生长良好	叶片枯萎	没有新叶萌发	存活 7 d
大米草	生长良好	生长良好	生长良好	叶片脱落	叶片变黄,根部发黑
盐角草	生长良好	生长良好	叶片枯萎	叶片枯黄	叶片变黄,根部发黑
碱蒿	生长良好	生长良好	生长良好	无新叶萌发	叶片变黄,根部发黑
盐地碱蓬	生长良好	生长良好	生长良好	无新叶萌发	存活 7 d
香蒲	生长良好	叶片脱落	植株死亡		
水葱	生长良好	叶片脱落	植株死亡		
美人蕉	生长良好	叶片枯萎	叶片脱落	植株死亡	
水葫芦	生长良好	叶片枯萎	叶片脱落	植株死亡	
枸杞	生长良好	叶片枯萎	叶片枯萎	叶片脱落	

的适应性,且株高、平均湿重都有所增加,其中芦苇、黄花鸢尾有新芽萌出;盐度为0.6%时,芦苇、黄花鸢尾、大米草、盐角草、盐地碱蓬、碱蒿生长良好,平均湿重都有所增加,但香蒲、水葫芦、水葱和美人蕉生长缓慢,枸杞继续生长伴有叶片枯萎;盐度为0.8%时,芦苇、大米草、盐地碱蓬、碱蒿生长良好,湿重和株高都在增加,盐角草、黄花鸢尾仍可以继续生长,但长势略缓,枸杞叶片枯萎;盐度为1.0%时,芦苇、黄花鸢尾、盐地碱蓬和碱蒿没有新叶萌发,叶片枯萎脱落,湿重减少;盐度达到1.2%时,碱蒿老叶枯萎,根部变黑。香蒲、水葱、美人蕉和黄花鸢尾的耐盐范围研究结果与郭焕晓等<sup>[2]</sup>研究相一致。相比之下,芦苇、盐地碱蓬、碱蒿、黄花鸢尾、盐角草、大米草耐盐性较好,适于作为高盐度地区废水人工湿地的植物。

由图2可以看出,芦苇、盐地碱蓬、碱蒿、黄花鸢尾、盐角草和 大米草 6种植物对高盐废水中氯离子的

去除,停留时间一般在第4d时可达到平衡,去除效果依次为:芦苇>盐地碱蓬>碱蒿>黄花鸢尾>盐角草>大米草,芦苇、盐地碱蓬、碱蒿这3种植物去除氯离子情况相一致,且其去除效果明显好于黄花鸢尾、盐角草、大米草。

人工湿地实验结果表明,6种植物对高含盐量Cl<sup>-</sup>的去除率是先逐渐增强,到第4d时可达到平衡。鲁敏等<sup>[12]</sup>研究发现:对芦苇、香蒲、美人蕉等植物进行人工湿地实验,停留时间1d各种植物对COD<sub>C</sub>、TN、TP和浊度就有明显去除,并且出水已基本达到国家一级排放标准。本研究耐盐植物第4d时达到去除平衡,这是因为高盐量废水对植物具有离子毒害和渗透胁迫等作用<sup>[13-14]</sup>,随着废水盐度的增加,植物的渗透胁迫升高,导致植物叶片面积和气孔度减少,蒸腾作用减弱等形态学和生理学特征的改变<sup>[15-16]</sup>,从而影响废水中氯离子等其他物质的去除时间。

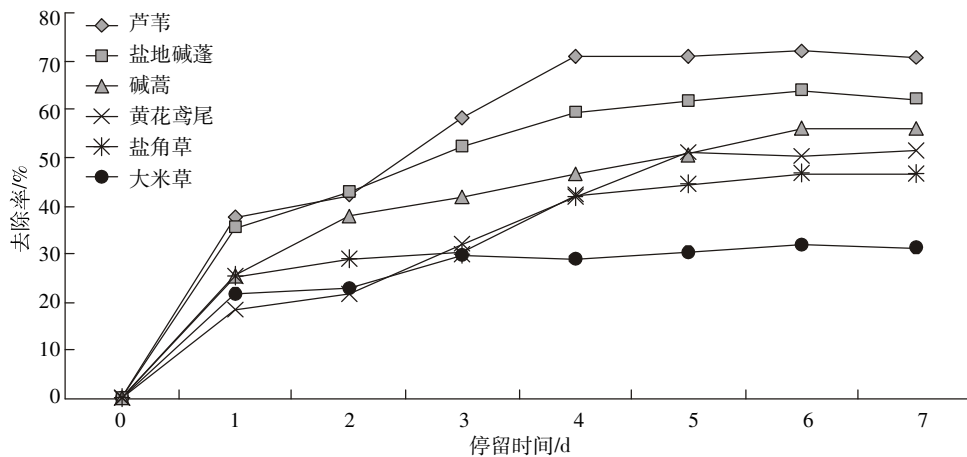


图2 不同停留时间植物对氯离子的去除率

Figure 2 Removal rate for plants to remove chloride ion at different dwell time

### 3 结论

(1)通过野外调查与资料查阅相结合的办法,调查塘沽及周边地区盐碱土绿化植物 23 种,隶属 17 科,其中最耐盐碱的是禾本科的芦苇、大米草等,耐盐度达 3%以上,其次是碱蒿、盐角草、枸杞,耐盐度都在 2%以上。

(2)通过选用 11 种植物作为实验植物,进行室内实验,测定其耐盐范围,结果表明:芦苇、黄花鸢尾、大米草、盐角草、盐地碱蓬、碱蒿这 6 种植物可归为重度耐盐植物;枸杞这 1 种植物可归为中度耐盐植物;香蒲、水葱、水葫芦、美人蕉这 4 种植物可归为轻度耐盐植物。因此,选定以上 6 种重度耐盐植物进行人工湿地小试实验,测定其对氯离子的去除效果。

(3)通过人工湿地小试实验,得出结论如下:芦苇、盐地碱蓬、碱蒿、黄花鸢尾、盐角草、大米草 6 种植物对高盐废水中氯离子的去除,停留时间一般在第 4 d 时可达到平衡,植物对氯离子的去除效果为:芦苇>盐地碱蓬>碱蒿>黄花鸢尾>盐角草>大米草。芦苇、盐地碱蓬、碱蒿这 3 种植物去除氯离子效果明显好于黄花鸢尾、盐角草、大米草。

#### 参考文献:

[1] 王 琴,张海涛,瞿 贤,等.高盐工业废水人工湿地处理中植物的筛选[J].环境工程学报,2012,1(6):227-231.  
WANG Qin,ZHANG Hai-tao,QU Xian,et al. Purification efficiency of different aquatic macrophytes wetland in high-salinity industrial wastewater [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 1 (6):227-231.(in Chinese)

[2] 郭焕晓,马牧源,孙红文.中国北部沿海高盐度地区人工湿地植物研究[J].铁道工程学报,2006(9):7-9.  
GUO Huan-xiao,MA Mu-yuan,SUN Hong-wen. Research on plants of constructed wetland in salty seashore area at the north of China[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2006(9):7-9. (in Chinese)

[3] 付春平,唐运平,闫玉荣,等.水葱对高盐再生水的净化效果[J].中国给水排水,2006,22(5):40-42.  
FU Chun-ping,TANG Yun-ping,YAN Yu-rong,et al. Study on effect of *scirpus tabernaemontani* on purification of reclaimed water with high salt[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(5):40-42.(in Chinese)

[4] 付春平,唐运平,张志扬,等.美人蕉对泰达高含盐再生水景观河道水体净化效果研究[J].灌溉排水学报,2005,24(5):70-73.  
FU Chun-ping,TANG Yun-ping,ZHANG Zhi-yang,et al. Study on the removal efficiencies of salt water by *canna indica linn* in TEDA landscape river[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(5):70-73. (in Chinese)

[5] 付春平,唐运平,陈锡剑,等.3种植物对泰达高盐再生水景观河道

水质的净化[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(10):118-120.  
FU Chun-ping,TANG Yun-ping,CHEN Xi-jian,et al. Effects of purification highly salty reuse water quality by three plants in TEDA landscape river [J]. *Journal of Chongqing University :Natural Science Edition*, 2006, 29(10):118-120. (in Chinese)

[6] Pantip Klomjek. Constructed treatment wetland: A study of eight plant species under saline conditions[J]. *Chemosphere*, 2005(58):585-593.

[7] Alan J Lymbery, Robert G Doupe, Thomas Bennett, et al. Efficiency of a subsurface-flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(1):1-7.

[8] Brown J J, Glenn E P, Fitzsimmons K M, et al. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent[J]. *Aquaculture Engineering*, 1999, 175(3-4):255-268.

[9] 李向心,武周虎,孔德玉,等.人工湿地污水处理研究与进展[J].青岛建筑工程学院学报,2004(4):56-61.  
LI Xiang-xin,WU Zhou-hu,KONG De-yu,et al. Study and progress of constructed wetland wastewater treatment[J]. *Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering*, 2004(4):56-61.(in Chinese)

[10] 中华人民共和国环境保护部.水和废水监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Monitoring and analysis method of water and waste water(4th Edition)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.(in Chinese)

[11] 天津滨海新区管理委员会.天津滨海耐盐植物[M].北京:中国林业出版社,2008.

[12] 鲁 敏,曾庆福,谭远友,等.七种湿地植物处理污水的比较研究[J].武汉科技学院学报,2007(9):26-30.  
LU Min,ZENG Qing-fu, TAN Yuan-you, et al. Study on treatment of domestic sewage by constructed wetland planted with seven wetland plants[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Engineering*, 2007(9):26-30.(in Chinese)

[13] 渠晓霞,黄振英.盐生植物种子萌发对环境的适应策略[J].生态学报,2005,25(9):2389-2398.  
QU Xiao-xia,HUANG Zhen-ying. The adaptive strategies of halophyte seed germination[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9):2389-2398. (in Chinese)

[14] 张海燕,范哲峰.运城盐湖十种耐盐植物体内无机及有机溶质含量的比较研究[J].生态学报,2002,22(3):352-358.  
ZHANG Hai-yan,FAN Zhe-feng. Comparative study on the content of inorganic and organic solutes in ten salt-tolerant plants in Yuncheng Saltlake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3):352-358.(in Chinese)

[15] Sanchez Blanco M J, Morales M A, Torrecillas A, et al. Diurnal and seasonal osmotic potential changes in lotus creticus plants grown under saline stress[J]. *Plant Science*, 1998, 136(1):1-10.

[16] Romero-Aranda R, Soria T, Cuartero J. Tomato plantwater uptake and plant-water relationships under saline growth conditions[J]. *Plant Science*, 2001, 160(2):265-272.