

9种沉水植物的耐盐性比较

王卫红^{1,2}, 季 民²

(1. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要:采用河道底泥直接种植法和无底泥逐渐增加盐度水培法,通过测量沉水植物的相对生长率,比较了生长在天津滨海湿地中的9种沉水植物的耐盐性。结果表明,将植物直接种植在河道底泥中,只有川蔓藻(*Ruppia maritima*)和篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)能够存活。使用逐渐增加盐度的水培养方法发现,不同植物耐盐性有较大差异,菹草(*Potamogeton crispus*)和线叶眼子菜(*Potamogeton pusillus*)能耐受的盐度在 $5.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)在 $7.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*) $10.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,而川蔓藻和篦齿眼子菜的耐盐性最高,达 $10.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上。9种植物耐盐性依次为:川蔓藻>篦齿眼子菜>狐尾藻>金鱼藻>菹草>线叶眼子菜>马来眼子菜(*Potamogeton malainus*)>黑藻(*Hydrilla verticillata*)>苦草(*Vallisneria asiatica*)。这表明,川蔓藻和篦齿眼子菜可以作为滨海高含盐水体沉水植物重建的先锋植物。

关键词:沉水植物; 水培; 耐盐性; 相对生长速率

中图分类号:X173 文献标识码:A 文章编号:1672-2043(2007)04-1259-05

Comparison on Salt Tolerance of Nine Submerged Macrophytes

WANG Wei-hong^{1,2}, JI Min²

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Salt tolerance of nine submerged macrophytes in coastal wetland of Tianjin was compared through measuring relative growth rate of the submerged macrophytes by river sediment culture and hydroponic culture. The results showed that only *Ruppia maritima* and *Potamogeton pectinatus* could survive when grown in river sediments. The nine macrophytes were different in salt tolerance under hydroponic conditions with various salinity of the reclaimed wastewater. *Potamogeton crispus* and *Potamogeton pusillus* tolerated salinity as high as $5.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, while *Ceratophyllum demersum* and *Myriophyllum spicatum* tolerated salinity $7.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $10.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. The salt tolerance of *R. maritima* and *P. pectinatus* were highest, being above $10.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Based on the salt tolerance, the nine plants followed the order: *R. maritima*>*P. pectinatus*>*M. spicatum*>*C. demersum*>*P. crispus*>*P. pusillus*>*Potamogeton malainus*>*Hydrilla verticillata*>*Vallisneria asiatica*. The results indicated that *R. maritima* and *P. pectinatus* could be used as the pioneer plants to reconstruct submerged vegetation in the water body containing high salinity in coastal wetlands.

Keywords: submerged macrophyte; water culture; salt tolerance; relative growth rate

在我国北方滨海缺水城市建立以污水处理厂再生水为水源的景观河道,对于改善生态环境、节约用水有重要意义。但是再生水很容易产生富营养化问题,影响其景观效果。如何控制再生水富营养化,维持良好稳定的水质,是再生水河道管理的重要任务。天

津滨海新区内再生水景观河道的水源为污水处理厂二级出水和新水源一厂连续微滤(CMF)出水,以再生水作为景观河道唯一水源,河道底质为典型的氯化钠型滨海沼泽盐土。在这样高盐的河道水体中重建水生植物生态系统,达到将河道的水质深度净化与生态修复的目的,筛选到既耐盐又去污强的水生植物成为生态修复成败的关键。

耐盐沉水植物主要分布于浅海、滨海沼泽、内陆盐湖和咸水湖^[1]。据国外文献报道^[2],一般沉水植物都

收稿日期:2006-11-17

基金项目:国家863攻关课题“天津市滨海新区水环境质量改善技术与综合示范”(2003AA601030);中国博士后科学基金

作者简介:王卫红(1968—),女,山西太原人,博士后,主要研究方向为景观水体的生态修复。E-mail: red_yangwei@163.com

能够在盐度为 $0 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体中正常生长。对盐度容忍性最强的川蔓藻(*Ruppia maritima*) 在盐度为 $0 \sim 70 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内都能够存活^[3]; 篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*) 的耐盐性低于川蔓藻, 生长在盐度低于 $18 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体中; 狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*) 能容忍的盐度最高值在 $10 \sim 15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 通常分布在低于 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度的水体中; 金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*) 主要分布在淡水和微咸水中, 能容忍的盐度最高值在 $6.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 菹草(*Potamogeton crispus*) 也主要分布在淡水和微咸水中, 能容忍的盐度范围在 $0.5 \sim 2.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 有些盐沼中生长的线叶眼子菜 (*Potamogeton pusillus*) 能耐受 $0 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度的水体; 角果藻(*Zannichellia palustris*) 一般生长在 $0.5 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐度的水体中。

植物的耐盐性与对盐胁迫的反应在陆生植物方面有大量的研究。通常淡土植物在非盐土上生长具有竞争优势, 它们的耐盐性一般在 0.6% 盐浓度以下^[1]。盐生植物与淡土植物之间并无绝对的界限, 往往相互交迭。耐盐植物的鉴定方法较多, 大致分为直接鉴定和间接鉴定两种^[3]。直接鉴定的方法是将品种直接在自然和人工模拟的盐碱环境中进行种植, 测定他们的生长量、长势、最后产量及极限耐盐能力, 从而对品种进行耐盐能力评价。例如美国盐渍化实验室通过控制条件下的小区产量试验来鉴定作物的耐盐性, 采用的鉴定指标一是盐害阈值, 即作物产量开始下降时的临界盐度; 二是超过盐害阈值后作物产量随着土壤盐度递增而下降的速率。间接鉴定是通过在植物在盐碱环境中的一些生理生化指标来评价品种的耐盐能力, 如脂膜透性、酶活性、可溶性蛋白质和多糖含量等^[4]。随着对植物耐盐机理研究的深入, 间接鉴定的方法显示出方便、快捷和可靠的优越性。

目前, 关于沉水植物的耐盐性研究文献较少^[4]。本文选取在天津滨海湿地中采集到的 9 种淡水和咸水沉水植物, 通过测定其不同盐度再生水中的相对生长速率, 比较了它们的耐盐性, 目的在于为再生水景观河道的恢复与重建筛选到耐盐的先锋植物。

1 材料与方法

1.1 实验材料

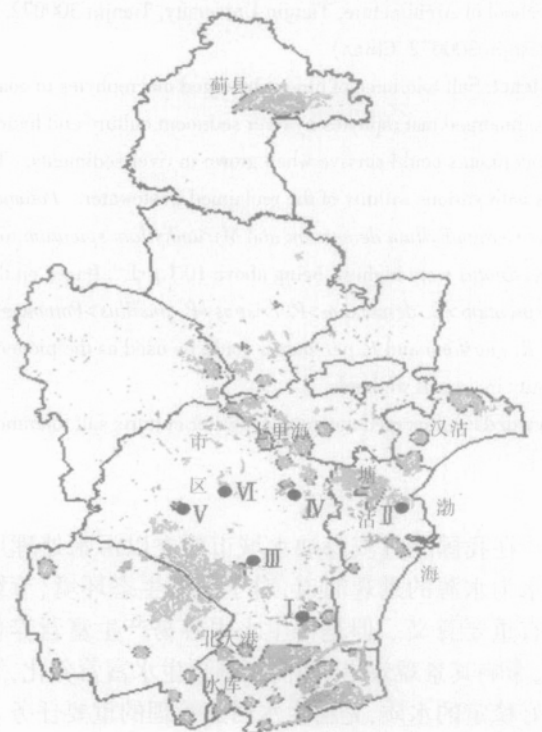
天津地区土壤和水体中盐度从滨海向内陆市区逐渐降低, 2004 年 4 月初至 6 月初, 我们在海滩附近选择了 1 个浅水沟渠和 1 个废弃晒盐池, 北大港水库浅水区以及附近一个池塘, 市内 2 个浅水湖泊共 6 个位点进行了沉水植物采集, 采样位点见图 1。

采样方法: 浅水处直接挖取, 较深水处用“带网铁夹法”^[6]。同时现场测定水温、pH 值、溶解氧 DO、透明度, 并取水下 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 处水样现场加酸固定, 带回实验室测定水体的盐度、TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度^[7]。

实验所用再生水取自天津滨海新区再生水景观河道进水口处, 再生水的全盐量为 $3\,560 \sim 4\,580 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。所用土壤采自天津滨海新区再生水景观河道底质, 为典型的氯化钠型滨海沼泽盐土^[8], 土壤质地粘重, pH 值 8.31, 呈暗棕色, 潜育化明显, 无泥炭, 全剖面以粘质土为主, 并有砂层出现, 碎块或块状结构, 较紧实板结, 土壤的全盐量是 $3.1783 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 实验方法

由于河道底泥盐度含量远远高于再生水, 如果将采集的沉水植物直接种植在底泥上, 可能会因盐度过高导致植物死亡, 既使对于较耐盐的种类, 移植带来的剧烈的盐度波动也可能造成渗透势过高而凋谢。理论上讲, 在河道修复初期, 盐度变化应该是先升高后降低, 底泥盐量的溶出最终会同再生水体的盐度达到一个动态平衡。这样对先锋植物要求不仅耐盐而且还必须能耐受盐度变化的冲击。大量的研究表明^[9-11], 频



I、II...是取样点

图 1 沉水植物采样位点示意图

Figure 1 Locations of lakes sites investigated

(I, II...the sample sites)

繁的盐度波动是造成河口沉水植被衰退的原因之一。因此,在筛选出能在河道盐度变化范围内中存活下来的沉水植物时,需要考虑底泥的影响又要避免其影响。首先应该使移植植物先适应再生水,然后考察底泥的影响,最后使用水培法逐渐提高培养沉水植物的再生水体的盐度,筛选出先锋植物和后续配置的植物。

在 2004 年 4 月到 6 月,我们将野外采集的沉水植物带其生长底泥移植在直径为 8~10 cm 的小花盆中(每盆 1~2 株,每种 5~6 盆),先后置于室外的 3 个 120 L 高 0.6 m 的塑料缸中培养,每缸内加 100 L 取自河道进水口处的再生水(盐度变化范围 2.88~4.27 g·L⁻¹),每日蒸发量用再生水补充。

观察一周后,将一部分生长较好的种类洗去原底泥,称鲜重后移植到底层铺 10 cm 厚的河道土的塑料缸中,连续观察 3 周,存活下来的作为河道沉水植被重建的先锋物种。另外,将另一部分生长较好的种类洗去原底泥,称鲜重后移植到装砾石和细沙的 8~10 cm 的小花盆中,仍置于室外的 3 个塑料缸中培养,但加 NaCl 调节 3 个缸中再生水体盐度到 5 g·L⁻¹ 左右,连续观察 3 周并随时将死亡植株移出。3 周后换河道水,加 NaCl 调节盐度为 7.5 g·L⁻¹ 左右,再连续观察 3 周并随时将死亡植株移出。3 周后换河道水,加 NaCl 调节盐度为 10 g·L⁻¹ 左右,再连续观察 3 周并随时将死亡植株移出。最后将存活下来的植株取出洗净称重。每隔 2 d 测缸内水的盐度并作相应记录,及时补充盐或水保持缸内水体盐度相对稳定。

1.3 数据处理与计算

使用 MS Excel 和软件 SPSS11.5 进行数据处理与

相关性分析检验。

川蔓藻的相对生长速率(Relative growth rates, RGR)使用生物量计算公式^[12]:

$$RGR = \{\ln(B_t) - \ln(B_0)\} / T$$

式中 RGR 表示每天每克沉水植物的生长量, g DW·g⁻¹·d⁻¹; B_t 为实验结束时生物量,以干重计, g DW; B₀ 为实验开始时生物量, g DW; T 为实验周期, d。

2 结果与分析

2.1 调查结果

在 6 个位点共采到沉水植物 9 种。分别是川蔓藻(*R.maritima*)、篦齿眼子菜(*P. pectinatus*)、狐尾藻(*M. spicatum*)、金鱼藻(*C. demersum*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、线叶眼子菜(*P. pusillus*)、菹草(*P. crispus*)、苦草(*Vallisneria asiatica*)、马来眼子菜(*Potamogeton malainus*) (请天津自然博物馆刘家宜研究员鉴定)。

在沿海湿地的咸水水体中(即 、 位点)主要生长着川蔓藻群落,分布在水深 0.3~0.6 m,几乎是单种群落,偶见伴生的篦齿眼子菜,生长繁茂,枝叶错综交织,盖度可达 50% 左右。在北大港库区周边水域(、 位点)主要是狐尾藻+金鱼藻+黑藻群落,一般分布在水深 0.3~0.8 m 浅水区,透明度低,这 3 种植物通常以不同的比例聚生在一起,生长繁茂的地方,植株体镶嵌交织,总盖度可达 85% 以上,伴生种常见的有菹草和篦齿眼子菜,偶见苦草。上世纪 80 年代在此区域还有茨藻(*Najas major*)群落、角果藻(*Z. palustris*)群落^[13],但我们在 2004 年采样调查时未发现这两个种。在市区透明度低的小型浅水湖泊(位点)中主要生长着菹草群落,几乎是单种群落,生长繁茂,盖

表 1 采样的 6 个位点的水质参数和优势沉水植物(2004 年 4 月至 6 月)

Table 1 The water quality parameters and dominant species at 6 sites investigated (from April to June in 2004)

Site	I	II	III	IV	V	VI
温度/℃	20.1	20.3	19.6	20.0	19.9	17.8
pH	7.8	7.61	7.7	8.9	8.8	8.9
盐度/g·L ⁻¹	4.15	8.47	2.58	2.17	0.81	0.55
水深/m	0.5	1.2	1.3	1.7	2.0	1.6
透明度/m	0.5	0.8	0.4	1.0	0.8	0.4
DO/g·L ⁻¹	8.22	8.31	7.58	8.04	7.96	8.14
TN/g·L ⁻¹	2.33	25.2	6.4	5.6	4.9	3.7
NH ₄ -N/g·L ⁻¹	0.41	2.75	1.52	0.6	0.3	0.5
NO ₃ -N/g·L ⁻¹	1.32	15.6	4.6	4.3	4.2	3.0
TP/g·L ⁻¹	0.11	1.7	0.2	0.26	0.28	0.27
PO ₄ -P/g·L ⁻¹	0.09	1.45	0.13	0.22	0.24	0.20
优势种	<i>R.m.</i> *	<i>R.m.</i>	<i>C.d</i> + <i>M.s</i>	<i>M.s</i>	<i>M.s</i> + <i>C.d</i>	<i>P.c</i>

注:*R.m.*(*Ruppia maritima*), *C.d.*(*Ceratophyllum demersum*), *M.s.*(*Myriophyllum spicatum*), *P.c.*(*Potamogeton crispus*)。

度可达 80% 左右; 在水质较好的浅水湖泊(位点) 中主要生长着狐尾藻和金鱼藻群落, 偶见有伴生的线叶眼子菜和马来眼子菜。

调查的 6 个位点水质与底质状况以及优势沉水植物见表 1。由于在水生植物茂密的水体中, pH 值和 DO 的日变化量较大, 测定值大小与时间密切相关, 表中所给值只是采样时的测定值。另外采样时间主要在 4 月初至 6 月初之间, 浮游植物生物量较小, 水体透明度普遍较好。从表 1 可以看出, 川蔓藻群落分布的水体含盐量较高, 而以菹草为主导群落的水体偏碱且盐度较低, 狐尾藻和金鱼藻群落介于两者中间。在营养盐含量较高的和较低的和 位点川蔓藻均能较好生长。从伴生种来看, 篦齿眼子菜能在咸水和淡水中生长。

2.2 综合分析

野外采集的 9 种沉水植物在再生水中适应一周均能生长良好。当移植到底层铺有河道土的塑料缸中后, 只有川蔓藻和篦齿眼子菜存活下来, 其余 7 种沉水植物均未能活过 2 周。苦草、黑藻、马来眼子菜、线叶眼子菜、菹草、金鱼藻均在第 1 周内先后死亡; 狐尾藻则在培养第 11 d 死亡。尽管沉水植物川蔓藻和篦齿眼子菜在植入河道底泥中的三周内存活下来, 但生物量增长较小见图 2。川蔓藻的生物量由初始干重 $5.261 \text{ g} \pm 0.012 \text{ SD}$ 增长为 $7.925 \text{ g} \pm 0.324 \text{ SD}$, 相对生长速率为 $0.015 \text{ g DW} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \pm 0.006 \text{ SD}$; 篦齿眼子菜的生物量由初始干重 $5.733 \text{ g} \pm 0.027 \text{ SD}$ 增长为 $6.941 \text{ g} \pm 0.630 \text{ SD}$, 相对生长速率为 $0.007 \text{ g DW} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1} \pm 0.004 \text{ SD}$ 。其中 SD 为标准差。

使用水培方法耐盐性比较结果见表 2, 当水体电导率调节在盐度为 $5.30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 黑藻、苦草和马来眼子菜在第二周内即死亡。在盐度为 $7.62 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右

表 2 九种沉水植物在不同盐度再生水中的生长状况

Table 2 The growth state of nine submerged macrophytes in reclaimed wastewater with different salinity

植物种类	$5.30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$7.62 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$	$10.09 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
川蔓藻	+++	+++	+++
篦齿眼子菜	+++	+++	+++
狐尾藻	+++	+++	+++
金鱼藻	+++	++	—
菹草	+++	—	—
黑藻	++	—	—
苦草	++	—	—
线叶眼子菜	+++	—	—
马来眼子菜	++	—	—

注: 存活过一周记一个+, 死亡则记为—。一种盐度下观察 3 周。

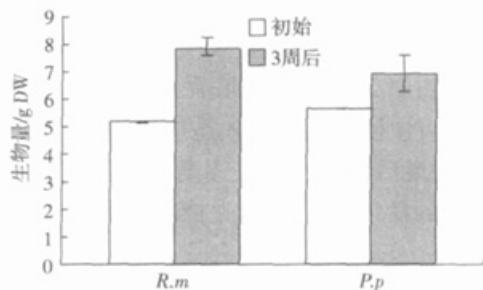


图 2 底泥直接种植法培养前后川蔓藻(*R.m*)和篦齿眼子菜(*P.p*)生物量的变化

Figure 2 Biomass changes of *Ruppia maritime* (*R.m*) and *Potamogeton pectinatus* before and after cultured with river sediment

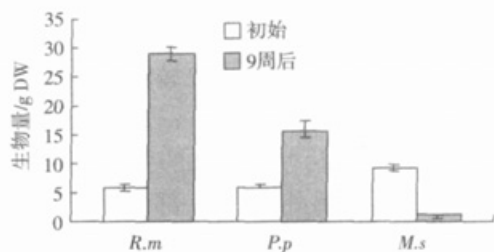


图 3 水培法培养前后川蔓藻(*R.m*)和篦齿眼子菜(*P.p*)生物量的变化

Figure 3 Biomass changes of *Ruppia maritime* (*R.m*) and *Potamogeton pectinatus* before and after cultured with water

时, 菹草、线叶眼子菜、狐尾藻和金鱼藻均在培养一周后出现明显的胁迫症状, 叶子变为褐黄并凋落, 菹草先死亡, 然后是线叶眼子菜。狐尾藻和金鱼藻的叶子逐渐凋落, 但在狐尾藻有些枯萎的老枝上确长出了极小的新枝, 将老叶剔出, 留新枝继续观察。当水体盐度为 $10.09 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 金鱼藻在第一周死亡; 狐尾藻长出的新枝细弱、嫩绿且生长缓慢; 只有川蔓藻和篦齿眼子菜生长良好(图 3)。

使用水培方法, 川蔓藻(*R.m*)和篦齿眼子菜(*P.p*)在实验结束时的生物量增加显著, 但狐尾藻(*M.s*)的生物量下降也极为显著(图 3)。川蔓藻的生物量由初始干重 $5.643 \text{ g} \pm 0.531 \text{ SD}$ 增长为 $29.094 \text{ g} \pm 0.035 \text{ SD}$, 相对生长速率为 $0.026 \text{ g DW} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.034 \text{ SD}$; 篦齿眼子菜的生物量由初始干重 $6.047 \text{ g} \pm 0.439 \text{ SD}$ 增长为 $15.91 \text{ g} \pm 1.274 \text{ SD}$, 相对生长速率为 $0.015 \text{ g FW} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.019 \text{ SD}$ 。狐尾藻的生物量由初始干重的 $9.336 \text{ g} \pm 0.757 \text{ SD}$ 下降为 $0.881 \text{ g} \pm 0.114 \text{ SD}$ 。

比较逐渐增加盐度的水培法与直接植入底泥的方法, 能跨过盐度为 $5.30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 6 种沉水植物在有底泥的水箱中培养一周内就全部死亡, 显然底泥的盐度 ($3.178 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 是许多沉水植物生存的致死因子。

此外,不断溶出的盐分对水体中盐度的频繁改变对植株体地上部分也造成了持续的渗透胁迫,即使对于较耐盐的沉水植物,也明显抑制了其根和茎叶对养分的利用,两种筛选培养试验方法使川蔓藻和篦齿眼子菜的平均比生长速率有了显著差异。可以看出,生长在淡水水域中的沉水植物能耐受一定的盐度,并可以通过水培逐渐增加盐量的方法来提高其耐盐性,但只有狐尾藻能跨过本实验设置的最大盐度。

3 结论

9种沉水植物直接种植在河道底泥上的实验和无底泥水培逐渐增加盐度的实验均表明,川蔓藻最耐盐,其次是篦齿眼子菜。耐盐性依次为:川蔓藻>篦齿眼子菜>狐尾藻>金鱼藻>菹草>线叶眼子菜>马来眼子菜>黑藻>苦草。川蔓藻和篦齿眼子菜可以作为滨海再生水河道沉水植物重建的先锋植物,当河道盐度降低时,可以适当引种狐尾藻。

参考文献:

- [1] 赵可夫,李法曾. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
[2] Den Hartog C. The Sea- Grasses of the World [M]. Amsterdam: North-

Holland Publishing Company, 1970.

- [3] Kantrud H A. Wigeongrass (*Ruppia maritima* L.): A literature Review[J]. Fish and Wildlife Research, 1991, 10:58.
[4] 赵可夫.植物抗盐生理学[M]. 北京: 科学出版社,1993.
[5] 林栖凤.耐盐植物研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
[6] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第 2 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
[7] 国家环境保护局.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.
[8] 刘萍萍,尹澄清,曲久辉,等.滨海地区生态型水源地工程的建设[J]. 中国给水排水, 2004, 20(9): 17- 20.
[9] Adair SE, Moore J L. Distribution and status of submerged vegetation in estuaries of the upper Texas coast[J]. Wetlands, 1994, 14: 110- 116.
[10] Edgar G J, Robertson A I. The influence of seagrass structure on the distribution and abundance of mobile epifauna: pattern and process in a Western Australian Amphibolis bed[J]. Journal of experimental marine biology and ecology, 1992, 160: 13- 31.
[11] Howard R J, Mendelsohn I A. Structure and composition of oligohaline marsh plant communities exposed to salinity pulses[J]. Aquatic Botany, 2000, 68: 143- 164.
[12] Megan K, La Peyre, Sheryl Rowe. Effects of salinity changes on growth of *Ruppia maritima* L[J]. Aquatic Botany, 2003, 77: 235- 241.
[13] 刘家宜.天津湿地植物区系初步分析[G]//天津自然博物馆论文集, 1996. 17- 33.

公益广告

遵守学术道德

共建学术规范