

# 高盐污水处理人工湿地中耐盐植物的筛选\*

李芊芊<sup>1</sup> 罗柳青<sup>1</sup> 陈洋芳<sup>1</sup> 王文卿<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>厦门大学环境与生态学院 厦门 361102

<sup>2</sup>福建省滨海湿地保护与生态恢复工程技术研究中心 厦门 361102

**摘要** 人工湿地作为一种新兴污水处理工艺,具有高效、低成本等优点,但因缺乏能够在高盐环境中生存的湿地植物,因此应用于高盐污水处理还存在诸多难题.基于对我国南方海岸及海岛的大量野外调查及文献调研,依据生理指标、形态指标、经济成本和应用潜力等,筛选出耐盐、耐水湿、耐污、净化能力强、生长快、生物量大、栽培简单、分布广泛并具有景观效果的南方滨海耐盐植物23种,进一步对每一种植物的耐盐能力进行分级,其中耐盐能力最强的种类为扁秆荆三棱(*Bolboschoenus planiculmis*)、海雀稗(*Paspalum vaginatum*)、川蔓藻(*Ruppia maritima*)、海马齿(*Sesuvium portulacastrum*)和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*).本研究结果可为人工湿地的构建提供更多植物种类选择,并促进人工湿地可持续的净化功能与景观功能的有机结合.(图1 表1 参31)

**关键词** 人工湿地;高盐污水;耐盐植物;耐污植物;植物筛选

CLC X173 : X52

## Selection of salt-tolerant plants for high-salinity wastewater treatment by constructed wetlands\*

LI Qianqian<sup>1</sup>, LUO Liuqing<sup>1</sup>, CHEN Yangfang<sup>1</sup> & WANG Wenqing<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>College of Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

<sup>2</sup>Engineering Research Center of Fujian Province for Coastal Wetland Protection and Ecological Restoration, Xiamen 361102, China

**Abstract** Currently, efficient technology for combining wastewater treatment and water reuse is urgently required to cope with water shortage and increased high-salinity wastewater. As an emerging technique for wastewater treatment, constructed wetlands have the advantages of high efficiency, low cost, and so on. However, owing to the scarcity of wetland plants that can survive in environments with high salt concentrations, constructed wetlands encounter huge obstacles in the treatment of high-salinity wastewater. In this study, based on extensive field investigations and literature review, 23 salt-tolerant coastal plants with characteristics of salt tolerance, waterlogging resistance, pollution tolerance, high purification ability, rapid growth, large biomass, simple cultivation, wide distribution and landscape effect were selected, and salt tolerance of each species was rated. The species with the highest salt tolerance were *Bolboschoenus planiculmis*, *Paspalum vaginatum*, *Ruppia maritima*, *Sesuvium portulacastrum*, and *Suaeda salsa*. The result can provide more choices of plants for constructing artificial wetlands, and contribute to integration of sustainable purification function and landscape service.

**Keywords** constructed wetland; wastewater with high salinity; salt-tolerant plant; pollution-resistant plant; plant selection

高盐污水是指水体中总含盐量(以NaCl含量计)大于1%的污水,这类污水大多含有无机盐、难降解有机物等<sup>[1]</sup>,主要来源于工业污水、大型船舰污水、异常地区地下水和海水直接利用产生的污水<sup>[2]</sup>.当前高盐污水的处理方法主要有生物法、物理法、物理化学法及电化学法,其中生物处理是首选方法<sup>[3]</sup>.但生物处理法筛选和驯化的耐盐微生物适应高盐环境是暂时生理调整,不具遗传性,这对污水处理工程的实施很不利<sup>[4]</sup>.可生物降解的临界盐度也不固定,其范围与污水

种类、处理工艺、运行参数和生物种群有关<sup>[5]</sup>.此外,高盐污水对生物处理系统本身也会产生一系列的不利影响,如降解动力缓慢、污泥流失严重等.随着水资源紧缺,沿海城市普遍把海水直接利用作为节约淡水资源、缓解水资源供求矛盾的有效途径<sup>[5]</sup>.随之增加的高盐污水急需寻求一种高效、低成本的新兴处理方法.

人工湿地是模拟自然湿地生态系统中物理、化学、生化反应的协同作用来处理污水,由于总体投资较低,管理方便,易维护,同时又可实现污水的资源化,近年来逐渐成为人们关注的热点.统计表明,人工湿地处理系统的投资和运行费用仅为二级污水处理厂的1/10-1/2<sup>[6]</sup>.但由于高盐污水处理中,土壤和水中的盐分会对植物产生胁迫作用,普通植物难以存活.要构建一个有效且有恢复力的人工湿地系统,必须

收稿日期 Received: 2016-10-28 接受日期 Accepted: 2016-12-01

\*国家重点研发计划(2016YFC0502904)和海洋公益性行业专项子课题(200905009-1)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFC0502904) and the Nonprofit and Specific Subproject of Marine Scientific Research of China (200905009-1)

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: mangroves@xmu.edu.cn)

进行植物的耐盐筛选<sup>[7]</sup>。目前人工湿地的应用领域主要集中在利用海滨芦苇沼泽湿地、红树林湿地、大型海藻进行有机污染治理、重金属吸附以及海水养殖区富营养化水体的修复等<sup>[8]</sup>。如香港城市大学和中山大学研究发现,红树林人工湿地对生活污水悬浮物、有机物、重金属污染物等均有较好的去除效果,具有净化污水的潜力<sup>[9]</sup>。但常规系统中的植物种类单一,景观价值较低,人工湿地在景观方面所具有的优势未能得到充分发挥,从而影响其进一步的推广使用<sup>[10]</sup>。

人工湿地的污水净化性能依赖于植物种类的选择。荷兰学者研究发现,不同植物在高盐人工湿地中的营养盐去除能力存在差异,而植物对人工湿地的适应性又取决于当地盐度和水文状况<sup>[11]</sup>。

针对高盐污水含盐量高的特点,人工湿地中耐盐植物的筛选显得尤为重要。多年来我们对中国南方海岸及海岛耐盐植物资源进行了大量野外调查,构建了一个滨海耐盐植物资源库,涉及植物种类600余种;本文进一步从中筛选出适用于构建人工湿地处理高盐污水的耐盐植物,以期进一步发掘利用耐盐植物资源,也将不同景观植物引入人工湿地,实现人工湿地可持续净化功能与景观功能的有机结合。

## 1 材料与方 法

### 1.1 野外调查方法

调查时间从1996年至2016年。

野外调查地点包括浙江、福建、广东、广西和海南的部分海岸和海岛,对于资料比较完整的西沙群岛、南沙群岛、珠江口(包括香港和澳门)和台湾则以文献调研为主。

具体样地根据Google Earth卫星地图,选择位于海边且植被分布多的地点,并结合文献查阅确定调查样地。调查方法主要采用路线调查法,根据滨海岸线和植被分布情况,设计踏查路线,调查沿途植物。调查内容包括植物种类、分布地点、物种数量、生境特征、生长状况和盐害程度,并进行评价。详细记录调查区主要植物种类(包括采集日期、采集号、植物名、采集地点、海拔、盖度、植物学特征等),并拍照和采集部分植物标本。同时采集水样和土壤,用DDS-307型电导率仪测定含盐量,判断湿地植物重要种的生境质量,结合文献调研以确定植物的耐盐能力和耐水湿能力。

### 1.2 筛选原则与指标

筛选野外生境中的原生湿地植物,筛选原则主要有耐盐、耐水湿、耐污、净化能力强、根系发达、生长快与生物量大、分布广泛、具有景观效果等。

植物耐盐能力的划分:在综合现有文献的基础上,结合大量野外调查得出。通过对植物生长状况的评估、土壤及植物体内盐分及营养元素含量的分析,并结合该物种国内外相关文献资料,对植物的耐盐性进行定性甚至定量描述。将耐盐植物的耐盐能力划分为A+、A、A-、B+、B、B-<sup>[12]</sup>。A级:强耐盐植物;野外环境下,在含盐量大于1%的土壤中正常生长;或正常生长于水体含盐量2.1%-3.5%的海岸滩涂。用A+或A-表示耐盐能力浮动于A级上下。B级:中度耐盐植物;野外环境下,在含盐量0.3%-1%的土壤中正常生长;或正常生长于水体含盐量1.4%-2.5%的海岸滩涂。用B+或B-表示耐盐能力浮

动于B级上下。

植物的耐水湿性:实地调查,结合文献调研综合评定。

耐污能力及净化能力:实地调查,结合文献调研综合评定。

其他指标:主要包括具备根系发达、生长快与生物量大这3个特征。

形态指标:具有花、叶、枝干、果、株型、色彩或季相的观赏价值。

最终根据以上筛选指标并结合植物的应用潜力如分布状况,经济成本如繁殖速度、养护难易等方面综合考虑,筛选出23种耐盐抗污湿地植物。

## 2 结果与分析

23种耐盐抗污植物列于表1,包括乔木5种,灌木2种,草本16种;其中耐盐能力为A的植物的生境和形态见图1。

### 2.1 扁秆荆三棱 *Bolboschoenus planiculmis* (F. Schmidt)

T. V. Egorova

耐盐能力: A。

莎草科多年生挺水草本,高0.3-0.8 m;花期5-6月,果期7-9月。

产福建、广东、广西和台湾。典型盐生植物,常见于淤泥质或泥沙质海岸滩涂,中潮带是其集中分布区。

喜光不耐阴;生长速度快,扩散能力强。有一定的污水净化能力,但不适宜应用于污染严重的人工湿地水体景观中<sup>[13]</sup>。

### 2.2 海雀稗 *Paspalum vaginatum* Swartz

耐盐能力: A。

禾本科多年生草本,直立部分高0.2-0.4 m;花果期6-9月。

产江苏、浙江、福建、广东、广西、海南、香港和台湾。多生于滨海湿地、堤岸、水沟、沙地等。

喜光不耐阴,连续淹水1周不会对其生长造成任何影响;根状茎和匍匐茎发达,节节生根,具有很强的侵占性和快速扩展能力。其根部对重金属镉具有较强的富集能力<sup>[14]</sup>。

### 2.3 川蔓藻 *Ruppia maritima* Linn.

耐盐能力: A。

眼子菜科沉水草本,茎多分枝,呈丛生状。

广泛分布于全球温带、亚热带和热带海岸湿地及盐湖。

具广盐性,在盐度为0-7%的水域中都能存活<sup>[15]</sup>。能显著改变水体溶解氧含量,对污水中的氮磷有较高的去除率,可在富营养化水体中快速生长,是滨海地区高盐水体沉水植物重建的先锋植物<sup>[16]</sup>。

### 2.4 海马齿 *Sesuvium portulacastrum* (Linn.) Linn.

耐盐能力: A。

番杏科多年生匍匐草本,花期夏季。

产福建、广东、广西、海南、香港和台湾。典型海岸植物,多生长于沿海地区的鱼塘堤岸、海岸流动沙丘、泥滩或岩砾地。

喜光不耐阴,耐旱亦耐湿,耐瘠;生命力超强,可不断蔓延成地毯状地被,冬季全株转红。具广盐性。海马齿除对富营养化水体的氮、磷等有较好净化效果外,其生态浮床可有效清除水体悬浮颗粒物,减小清淤面积,提高水体透明度<sup>[17]</sup>。

## 2.5 盐地碱蓬 *Suaeda salsa* (Linn.) Pall.

耐盐能力: A.

藜科一年生草本, 高0.2-0.8 m; 花果期7-10月。

产山东、江苏、浙江和福建<sup>[18]</sup>。生于盐碱土, 在海滩及湖边常形成单种群落。

喜光不耐阴, 耐水湿; 适应性广, 易栽培繁殖, 常成片生长。在淹水环境下, 盐地碱蓬对重金属铜和锌具有相对较强的富集能力, 对砷有较强的转移能力<sup>[18]</sup>。

## 2.6 黄槿 *Hibiscus tiliaceus* Linn.

耐盐能力: A-.

锦葵科常绿乔木, 高达15 m; 花果期几乎全年。

产福建、广东、广西、海南、香港和台湾。典型海岸植物, 多生于红树林林缘、高潮线上缘等地。

喜光不耐阴, 抗风, 耐旱亦耐水湿; 适应性强, 不择土壤, 树冠浓密, 花大色艳, 已广泛应用于滨海城镇绿化。黄槿能把重金属污染物贮存于沉积物中而起到污水净化作用<sup>[19]</sup>。

## 2.7 杨叶肖槿 *Thespesia populnea* (Linn.) Soland. ex Corr.

耐盐能力: A-.

锦葵科常绿乔木, 高达10 m; 全年开花, 春季尤盛。

产广东、广西、海南、香港和台湾, 福建厦门有引种。典型海岸植物、半红树植物, 常生长于红树林林缘、海堤及海岸林中。

喜光不耐阴, 抗风; 性强健, 易栽培, 生长速度快, 花大色艳, 尤其适合作为滨海水景植物。对一定浓度的污水具有适应性和耐受性<sup>[20]</sup>, 具有净化污水的潜力。

## 2.8 锈鳞飘拂草 *Fimbristylis sieboldii* Miquel ex Franchet & Savatier Enum.

耐盐能力: A-.

莎草科多年生草本, 高0.2-0.7 m; 花果期6-8月。

产福建、广东、广西、海南、香港和台湾。典型海岸植物, 多生长于鱼塘堤岸、红树林林缘及潮水可淹及的高潮带泥滩等地。

喜光不耐阴; 性强健, 生长快, 适应性强, 是滨海湿地公园水岸绿化优良植物。

## 2.9 双穗雀稗 *Paspalum distichum* Linn.

耐盐能力: A-.

禾本科多年生草本, 株高(叶尖)0.3-0.5 m; 秋季果实成熟。

我国亚热带地区广布。常见于咸淡水交替的高潮带滩涂、鱼塘堤岸及路边。

喜光不耐阴, 耐贫脊, 耐践踏; 病虫害少, 生命力超强, 在沼泽或湿地发展性更为强势, 几乎无其他类杂草共存。对污染物(尤其是重金属)富集能力强。

## 2.10 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.

耐盐能力: A-.

禾本科多年生草本, 茎直立, 高0.3-2.5 m。

中国各省区均有分布。广域耐盐型植物, 多生于有淡水输入的海岸高潮带滩涂、鱼塘和海堤边。

喜光不耐阴; 适应性强, 对气候、土壤要求不严。生物量大, 具有较深的茎和根系, 且具有一定的抗盐耐污能力。室内实验发现其在盐度1%的1倍人工污水中生长良好<sup>[21]</sup>, 是优

良的水体净化植物。

## 2.11 榕树 *Ficus microcarpa* Linn. f.

耐盐能力: B+.

桑科常绿大乔木, 高达25 m, 有发达的气生根和支柱根; 花果期5-12月。

产浙江、福建、广东、广西、海南、香港和台湾。

喜光不耐阴, 耐水湿, 耐瘠; 性强健, 生长快, 耐修剪, 寿命长, 冠形优美。具有一定的抗污染能力, 其净光合速率随污水浓度的升高而升高<sup>[22]</sup>。

## 2.12 白千层 *Melaleuca cajuputi* subsp. *cumingiana* (Turczaninow) Barlow

耐盐能力: B+.

桃金娘科常绿大乔木, 高达20 m; 花期每年多次。

原产澳大利亚。我国福建、广东、广西、海南、香港和台湾有栽培。在原产地, 多生于海岸沼泽、海岸沙地及内陆盐湖的边缘。

性喜高温、湿润环境, 抗强风、极耐水湿, 可以长期浸泡于浅水中; 生长迅速, 树型优美, 花期长, 广泛应用于园林绿化。

## 2.13 假马齿苋 *Bacopa monnieri* (Linn.) Pennell

耐盐能力: B+.

玄参科一年生肉质草本; 花期4-7月, 果期7-12月。

产福建、广东、广西、海南、香港和台湾。常见于海岸湿地。

喜光亦耐阴, 耐瘠; 生长速度快, 耐污能力强, 叶色翠绿, 是滨海地区良好的水景植物。可被应用于人工湿地、人工浮床等重金属废水处理系统中, 效果良好<sup>[23]</sup>。

## 2.14 白花鬼针草 *Bidens pilosa* Linn. var. *radiata* Sch. -Bip.

耐盐能力: B+.

菊科一年生直立草本, 高0.3-1 m; 花果期全年。

原产美洲, 我国浙江、福建、广东、广西、海南、香港和台湾广泛分布。常见于海岸沙荒地、虾池鱼塘堤岸及防浪堤岸。

喜光亦耐阴, 耐瘠; 适应性强, 生长速度快, 对土壤和水体有害物质有较强的吸收能力, 在污水处理方面有较大的应用前景。

## 2.15 田菁 *Sesbania cannabina* (Retz.) Poir.

耐盐能力: B+.

豆科一年生草本或亚灌木, 高1-3 m; 花期6-9月, 果期9-10月。

我国大部分地区都有分布, 沿海各省区常见。多生于海堤、鱼塘堤岸、半固定及固定沙丘和大潮可淹及的高潮带滩涂。

喜光不耐阴, 耐瘠; 性强健, 抗逆性强, 不择土壤, 速生, 根系发达, 根瘤多, 固氮能力强。

## 2.16 水烛 *Typha angustifolia* Linn.

耐盐能力: B+.

香蒲科多年生宿根性沼泽草本; 花期6-7月, 果期7-8月。

广泛分布于我国东北、华北、华东、华中、西南及西北。生于池塘、废晒盐田等潮湿多水处, 常成丛、成片生长。

生长速度快, 可快速形成景观。对污水中的有机物、氮

氮、总氮、总磷<sup>[24]</sup>及重金属铜、铅、镉<sup>[25]</sup>均有较强的富集能力。全株均有经济价值,是观赏高等植物综合利用价值较高的水生植物。

### 2.17 构树 *Broussonetia papyrifera* (Linn.) L'Hér. ex Vent.

耐盐能力: B.

桑科落叶乔木,高达20 m。

全国除新疆、西藏外,大部分地区有分布。

喜光不耐阴,耐瘠,不抗风;适应性强,生长快,萌芽力和分蘖力强,耐修剪。构树根系庞大且吸收作用巨大,对多种重金属有较强的富集与转移能力<sup>[26]</sup>。

### 2.18 桐花树 *Aegiceras corniculatum* (Linn.) Blanco

耐盐能力: B.

紫金牛科灌木或小乔木,高1-2 m;花期10-3月,果期12-4月。

产福建、广东、广西、海南和香港,福建泉州是其天然分布北界。典型红树植物,多分布于有淡水输入的海湾河口中潮带滩涂。

喜光稍耐阴,耐寒能力仅次于秋茄 (*Kandelia obovata* Sheue *et al.*);对盐度和潮位适应性广,根系发达,易栽培。自身具有较强的耐污能力,且对污水中的营养物质及重金属元素如铜、铅、锌、锰、镉具有较强的富集能力<sup>[27]</sup>。

### 2.19 夹竹桃 *Nerium oleander* Linn.

耐盐能力: B.

夹竹桃科常绿灌木,高达6 m,全株有白色乳汁;花期几乎全年,夏秋为盛花期。

原产印度与伊朗。作为观赏植物在我国热带、亚热带地区广泛栽培。

喜光稍耐阴,抗风,耐水淹能力强;性强健,病虫害少。有研究将其作为人工湿地的净化植物,对污水悬浮物、氨氮等均有较好的去除效率<sup>[28]</sup>。

### 2.20 卤蕨 *Acrostichum aureum* Linn.

耐盐能力: B.

卤蕨科多年生草本,高达2 m。

产福建(已灭绝)、广东、广西、海南、香港和台湾。典型海岸湿地植物。

喜光亦耐阴、耐水淹;易栽培繁殖,生长迅速,耐粗放管理,植株形态奇特,幼叶红色。对污染物有很强的吸收能力,是滨海地区优良的水景造景植物。

### 2.21 短叶茛苳 *Cyperus malaccensis* subsp. *monophyllus* (Vahl) T. Koyama

耐盐能力: B.

莎草科多年生水生草本,高0.8-1 m;花期4-8月,9月种子成熟。

产江苏、浙江、福建、广东、广西、海南和台湾等地。多生长于有淡水注入的海岸潮间带淤泥质滩涂。

耐水淹;生长速度快,是海湾河口滩涂绿化的优良植物。对污水中氨氮、总氮、总磷均有较好的净化效果<sup>[29]</sup>。

### 2.22 羊蹄 *Rumex japonicus* Houtt.

耐盐能力: B.

蓼科多年生草本,高达1 m;花期5-6月,果期6-7月。

产浙江、福建、广东、广西、香港和台湾。生长于海岸湿

地以及内陆湿润地。

喜光稍耐阴;适应性强,无病虫害,生长迅速,再生能力强。不仅可在水中生长,且对污染物有较强的吸收能力,是净化水体和滨海湿地绿化的优良植物。

### 2.23 水葱 *Schoenoplectus tabernaemontani* (C. C. Gmelin) Palla

耐盐能力: B.

莎草科多年生宿根挺水草本,茎高1-2 m;花果期6-9月。

产浙江、福建、广东、广西、海南、香港和台湾。多生长于滨海河道两岸、鱼塘边水沟、排水渠及红树林林缘。

性强健,病虫害少,植株挺立,生长葱郁。有很强的净化高盐污水能力<sup>[30]</sup>,是优良的水景及净化植物,已经广泛应用于人工湿地。

表1 人工湿地耐盐植物筛选名录

Table 1 List of salt-tolerant plant species used in the constructed wetlands

耐盐能力 Salt tolerance	种名 Species	拉丁学名 Latin name	生活型 Life form
A	扁秆荆三棱	<i>Bolboschoenus planiculmis</i> (F. Schmidt) T. V. Egorova	草本 Herb
A	海雀稗	<i>Paspalum vaginatum</i> Swartz	草本 Herb
A	川蔓藻	<i>Ruppia maritima</i> Linn.	草本 Herb
A	海马齿	<i>Sesuvium portulacastrum</i> (Linn.) Linn.	草本 Herb
A	盐地碱蓬	<i>Suaeda salsa</i> (Linn.) Pall.	草本 Herb
A-	黄槿	<i>Hibiscus tiliaceus</i> Linn.	乔木 Arbor
A-	杨叶肖槿	<i>Thespesia populnea</i> (Linn.) Soland. ex Corr.	乔木 Arbor
A-	锈鳞飘拂草	<i>Fimbristylis sieboldii</i> Miquel ex Franchet & Savatier Enum.	草本 Herb
A-	双穗雀稗	<i>Paspalum distichum</i> Linn.	草本 Herb
A-	芦苇	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	草本 Herb
B+	榕树	<i>Ficus microcarpa</i> Linn. f.	乔木 Arbor
B+	白千层	<i>Melaleuca cajuputi</i> subsp. <i>cumingiana</i> (Turczaninow) Barlow	乔木 Arbor
B+	假马齿苋	<i>Bacopa monnieri</i> (Linn.) Pennell	草本 Herb
B+	白花鬼针草	<i>Bidens pilosa</i> Linn. var. <i>radiata</i> Sch. -Bip.	草本 Herb
B+	田菁	<i>Sesbania cannabina</i> (Retz.) Poir.	草本或亚灌木 Herb or subshrub
B+	水烛	<i>Typha angustifolia</i> Linn.	草本 Herb
B	构树	<i>Broussonetia papyrifera</i> (Linn.) L'Hér. ex Vent.	乔木 Arbor
B	桐花树	<i>Aegiceras corniculatum</i> (Linn.) Blanco	灌木或小乔木 Shrub or small arbor
B	夹竹桃	<i>Nerium oleander</i> Linn.	灌木 Shrub
B	卤蕨	<i>Acrostichum aureum</i> Linn.	草本 Herb
B	短叶茛苳	<i>Cyperus malaccensis</i> subsp. <i>monophyllus</i> (Vahl) T. Koyama	草本 Herb
B	羊蹄	<i>Rumex japonicus</i> Houtt.	草本 Herb
B	水葱	<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> (C. C. Gmelin) Palla	草本 Herb

A: 强耐盐; A+或A-: 耐盐能力浮动于A级上下; B: 中度耐盐; B+或B-: 耐盐能力浮动于B级上下。

A: Strong salt tolerance ability; A+ or A-: Salt tolerance ability floating up and down in class A; B: Moderate salt tolerance ability; B+ or B-: Salt tolerance ability floating up and down in class B.

除此之外,克拉莎 [*Cladium jamaicense* subsp. *chinense*

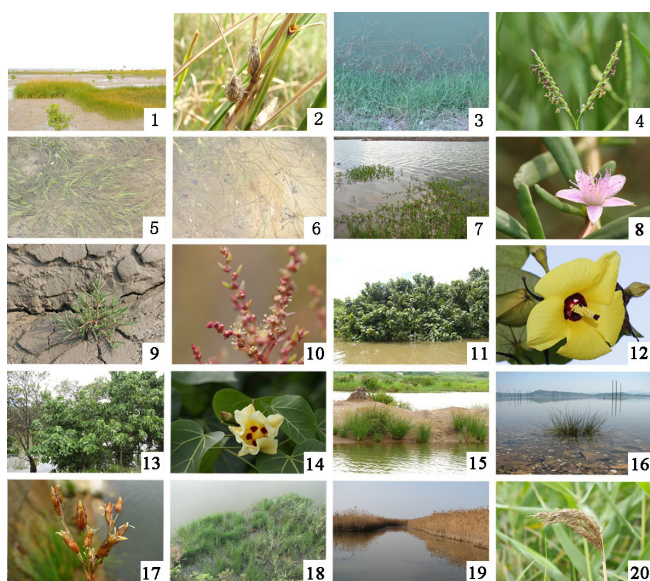


图1 耐盐能力为A级的植物的生境和形态。1-2: 扁秆荆三棱; 3-4: 海雀稗; 5-6: 川蔓藻; 7-8: 海马齿; 9-10: 盐地碱蓬; 11-12: 黄槿; 13-14: 杨叶肖槿; 15-17: 锈鳞飘拂草; 18: 双穗雀稗; 19-20: 芦苇。

**Fig. 1** The habitat and morphology of the plants with salt-tolerant ability in class A. 1-2: *Bolboschoenus planiculmis*; 3-4: *Paspalum vaginatum*; 5-6: *Ruppia maritima*; 7-8: *Sesuvium portulacastrum*; 9-10: *Suaeda salsa*; 11-12: *Hibiscus tiliaceu*; 13-14: *Thespesia populnea*; 15-17: *Fimbristylis sieboldii*; 18: *Paspalum distichum*; 19-20: *Phragmites australis*.

(Nees) T. Koyama Stearn & L. H. J. Williams]、荻苳 (*Cyperus malaccensis* Lamarck)、碱蓬 [*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge]、海三棱藨草 (*Scirpus × mariqueter* Tang & Wang)、三棱水葱 [*Schoenoplectus triqueter* (Linn.) Palla]、互花米草 (*Spartina alterniflora* Loiseleur)、尖叶卤蕨 (*Acrostichum speciosum* Willdenow)、黄花鸢尾 (*Iris wilsonii* C. H. Wright)、狼尾草 [*Pennisetum alopecuroides* (Linn.) Sprengel]等均具有一定的耐盐、耐水湿和污水净化能力, 同样值得推荐。

### 3 结论

目前人工湿地处理高盐污水的研究和应用实例还不多见。本文从植物产地、适宜生境、形态特点、生长习性、净化污水能力、人工湿地应用现状等方面对23种湿地植物进行介绍, 以为构建人工湿地处理高盐污水提供更多植物选择。耐盐植物的筛选是影响人工湿地处理高盐污水的重要因素, 需要进一步扩大植物筛选范围。在此基础上为了提高人工湿地的净化能力, 今后需深入开展以下研究工作: (1) 加强对植物应用于人工湿地后的适应性、净化效果及吸收污染物后生长规律的深入研究; (2) 研究如何合理配置植物以提高人工湿地净化效率。

### 参考文献 [References]

- 1 雷云, 解庆林, 李艳红. 高盐度废水处理研究进展[J]. 环境科学与管理, 2007, **32** (6): 94-98 [Lei Y, Xie QL, Li YH. The study on the treatment of high salinity wastewater [J]. *Environ Sci Manage*, 2007, **32** (6): 94-98]
- 2 文湘华, 占新民, 王建龙, 钱易. 含盐废水的生物处理研究进展[J]. 环

- 境科学, 1999, **20** (3): 104-106 [Wen XH, Zhan XM, Wang JL, Qian Y. Review of the biological treatment of salinity wastewater [J]. *Environ Sci*, 1999, **20** (3): 104-106]
- 3 卢晓君, 林海. 难降解高含盐化工污水处理技术研究[J]. 广州化工, 2010, **38** (2): 157-162 [Lu XJ, Lin H. Study on treatment of hard-biodegradable hypersaline wastewater from chemical industry [J]. *Guangzhou Chem Ind*, 2010, **38** (2): 157-162]
- 4 徐锐, 曾玮, 温康文. 高盐污水生物处理技术浅探[J]. 广东化工, 2008, **35** (11): 90-94 [Xu R, Zeng W, Wen KW. Discussion about the Technology of the high-salt wastewater biological treatment [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2008, **35** (11): 90-94]
- 5 崔有为, 王淑莹, 朱岩, 李桂星, 甘湘庆, 彭永臻. 海水代用及其含盐污水的生物处理[J]. 工业水处理, 2005, **25** (10): 1-5 [Cui YW, Wang SY, Zhu Y, Li GX, Gan XQ, Peng YZ. Seawater substitute and bio-treatment of saline wastewater [J]. *Ind Water Treat*, 2005, **25** (10): 1-5]
- 6 朱彤, 许振成, 胡康萍, 马桂花, 李华. 人工湿地污水处理系统应用研究[J]. 环境科学研究, 1991, **4** (5): 17-22 [Zhu T, Xu ZC, Hu KP, Ma GH, LH. Application research on constructed wetland systems for wastewater treatment [J]. *Res Environ Sci*, 1991, **4** (5): 17-22]
- 7 Calheiros CSC, Quitério PVB, Silva G, Crispim LFC, Brix H, Moura SC, Castro PML. Use of constructed wetland systems with *Arundo* and *Sarcocornia* for polishing high salinity tannery wastewater [J]. *J Environ Manage*, 2012, **95**: 66-71
- 8 邱金泉, 王静, 张雨山. 人工湿地处理高盐度污水的适用性及研究进展[J]. 工业水处理, 2009, **29** (11): 1-3 [Qiu JQ, Wang J, Zhang YS. Applicability of constructed wetlands to the treatment of wastewater with high salinity and its research progress [J]. *Ind Water Treat*, 2009, **29** (11): 1-3]
- 9 杨琼, 蓝崇钰, 谭凤仪, 陈里娥, 胡柳柳. 红树林人工湿地对生活污水的净化效果[J]. 生态学杂志, 2014, **33** (9): 2510-2517 [Yang Q, Lan CY, Tan FY, Chen LE, Hu LL. Purification efficiency of domestic wastewater by mangrove constructed wetlands [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33** (9): 2510-2517]
- 10 陈明利, 吴晓芙, 陈永华, 蒋丽娟, 纪智慧, 马群. 景观型人工湿地污水处理系统构建及植物脱氮效应研究[J]. 环境科学, 2010, **31** (3): 660-666 [Chen ML, Wu XF, Chen YH, Jiang LJ, Ji ZH, Ma Q. Construction of a landscaping-type wetland system for wastewater treatment and analysis of plant denitrifying effect [J]. *Environ Sci*, 2010, **31** (3): 660-666]
- 11 De Lange HJ, Paulissen MPCP. Efficiency of three halophyte species in removing nutrients from saline water: a pilot study [J]. *Wetlands Ecol Manage*, 2016, **24**: 587-59612
- 12 王文卿, 陈琼. 南方滨海耐盐植物资源(一) [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2013: 1-444 [Wang WQ, Chen Q. Salt-Tolerant Plant Resources From Coastal Areas of South China (1) [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2013: 1-444]
- 13 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 李建. 5种湿地植物生理生长特性变化及其对污水净化效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32** (8): 1625-1632 [Li LS, Ni XL, Li ZG, LJ. Growth characteristics and sewage cleaning effect of five wetland plants [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, **32** (8): 1625-1632]
- 14 吴朝波, 段瑞军, 王蕾, 郭建春, 符少萍, 刘娇, 李瑞梅, 胡新文. 对11种热带滨海植物Cd富集能力的初步评价[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2015, **33** (3): 234-240 [Wu CB, Duan RJ, Wang L, Guo JC, Fu SP, Liu J, Li RM, Hu XW. Preliminary evaluation on Cd enrichment ability

- of eleven species of tropical coastal plants [J]. *Nat Sci J Hainan Univ*, 2015, **33** (3): 234-240]
- 15 Kantrud HA. Wigeongrass (*Ruppia maritima* L.): a literature review [J]. *US Fish Wildl Serv*, 1991, **10**: 1-58
- 16 王卫红, 季民, 薛玉伟, 张志杨, 唐运平. 川蔓藻(*Ruppia maritima*)对滨海城市再生水的净化作用[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24** (4): 775-779 [Wang WH, Ji M, Xue YW, Zhang ZY, Tang YP. Purification efficiency of *Ruppia maritima* on reclaimed wastewater [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2005, **24** (4): 775-779]
- 17 林永青, 吴佳鑫, 郑新庆, 黄凌风. 浮床栽培海马齿对海水中悬浮颗粒物清除作用的实验研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, **50** (5): 909-914 [Lin YQ, Wu JX, Zhen XQ, Huang LF. Removal of suspended particulate matter in seawater by *Sesuvium portulacastrum* planted in floating-bed [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 2011, **50** (5): 909-914]
- 18 姜秋怡, 侯学良, 王文卿, 张宜辉. 福建植物新资料(一)[J]. 亚热带植物科学, 2013, **42** (2): 174-176 [Jiang QY, Hou XL, Wang WQ, Zhang YH. New materials of plants in Fujina Province (I) [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2013, **42** (2): 174-176]
- 19 王耀平, 白军红, 肖蓉, 高海峰, 黄来斌, 黄辰. 黄河口盐地碱蓬湿地土壤-植物系统重金属污染评价[J]. 生态学报, 2013, **33** (10): 3083-3091 [Wang YP, Bai JH, Xiao R, Gao HF, Huang LB, Huang C. Assessment of heavy metal contamination in the soil-plant system of the *Suaeda salsa* wetland in the Yellow River Estuary. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (10): 3083-3091]
- 20 王文卿, 林鹏. 红树林生态系统重金属污染的研究[J]. 海洋科学, 1999, **23** (3): 45-48 [Wang WQ, Lin P. Studies of the heavy metal pollution in mangrove ecosystems-a review [J]. *Mar Sci*, 1999, **23** (3): 45-48]
- 21 李霞, 莫创荣, 卢杰. 我国红树林净化污水研究进展[J]. 海洋环境科学, 2005, **24** (4): 77-80 [Li X, Mo CR, Lu J. A review of studies on purification of wastewater by mangroves in China [J]. *Mar Environ Sci*, 2005, **24** (4): 77-80]
- 22 李玫, 陈志力, 廖宝文. 5种华南沿海湿地植物对人工含盐污水的生理响应[J]. 安徽农业科学, 2012, **40** (27): 13441-13443 [LI M, CHEN ZL, LIAO BW. Physiological responses of five south china coastal wetland plants to artificial saline wastewater [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2012, **40** (27): 13441-13443]
- 23 魏国余, 招礼军, 朱栗琼, 韩超杰, 刘云. 城市污水对4种树木生理指标的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, **35** (17): 5078-5079 [Wei GY, Zhao LJ, Zhu LQ, Han CJ, Liu Y. Effect of municipal sewage on physiological index of four tree species [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2007, **35** (17): 5078-5079]
- 24 王谦, 成水平. 大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, **33** (5): 96-102 [Wang Q, Cheng SP. Review on phytoremediation of heavy metal polluted water by macrophytes [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, **33** (5): 96-102]
- 25 曾林慧, 李松, 徐国勋, 单胜道, 曹志洪. 无土栽培植物对农村生活污水的净化特性研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32** (8): 48-52 [Zeng LH, Li S, Xu GX, Shan SD, Cao ZH. Treatment of rural domestic wastewater with soilless cultivated plants [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, **32** (8): 48-52]
- 26 董小霞, 颜昌宙, 王灶生, 赵佩红, 周石磊, 王萌. 组合式水生植物净化系统对Cu, Pb和Cd的去除与生物富集特征[J]. 环境工程学报, 2014, **8** (4): 1447-1453 [Dong XX, Yan CZ, Wang ZS, Zhao PH, Zhou SL, Wang M. Removal efficiency and accumulation characteristics of Cu, Pb and Cd in combined purification systems [J]. *Chin J Environ Eng*, 2014, **8** (4): 1447-1453]
- 27 陈勤, 沈羽, 方炎明, 严靖, 李萍萍, 张开梅. 紫湖流域重金属污染风险与植物富集特征[J]. 农业工程学报, 2014, **30** (14): 198-205 [Chen Q, Shen Y, Fang YM, Yan J, Li PP, Zhang KM. Heavy metals pollution risk and characteristics of plant accumulation along Zihu River [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, **30** (14): 198-205]
- 28 郑文教, 王文卿, 林鹏. 九龙江口桐花树红树林对重金属的吸收与累积[J]. 应用与环境生物学报, 1996, **2** (3): 207-213 [Zhen WJ, Wang WQ, Lin P. Absorption and accumulation of heavy metals in *Aegiceras corniculatum* mangrove forest in the estuary of the Jiulong River in Fujian [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 1996, **2** (3): 207-213]
- 29 陈畅, 孙可迪, 王少波. 一种改进型潜流湿地处理城市污水试验研究[J]. 环境与可持续发展, 2016, **41** (2): 55-57 [Chen Y, Sun KD, Wang SB. A pilot study of an improved subsurface flow wetland in city sewage treatment [J]. *Environ Sustain Dev*, 2016, **41** (2): 55-57]
- 30 蔡佩英, 刘爱琴, 侯晓龙. 7种水生植物去除城市生活污水氮磷效果的研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5** (5): 1067-1070 [Cai PY, Liu AY, Hou XL. Study on effects of seven hydrophytes on nitrogen and phosphorus removal from domestic sewage [J]. *Chin J Environ Eng*, 2011, **5** (5): 1067-1070]
- 31 Gao F, Yang ZH, Li C, Jin WH. Saline domestic sewage treatment in constructed wetlands: study of plant selection and treatment characteristics [J]. *Desalin Water Treat*, 2015, **53** (3): 593-602