

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190339

谢宝华, 路峰, 韩广轩. 入侵植物互花米草的资源化利用研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1870–1879  
XIE B H, LU F, HAN G X. Resource utilization of invasive *Spartina alterniflora*: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1870–1879

## 入侵植物互花米草的资源化利用研究进展\*

谢宝华<sup>1</sup>, 路峰<sup>2</sup>, 韩广轩<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所/中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室/山东省海岸带环境过程重点实验室 烟台 264003; 2. 山东省黄河三角洲国家级自然保护区管理局 东营 257500)

**摘要:** 外来入侵种互花米草(*Spartina alterniflora*)在我国的分布面积约为 5.46 万  $\text{hm}^2$ , 每年地上干物质总量为  $7.5 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6$  t, 其防治与利用受到越来越多的关注, 若能将二者结合起来同时进行, 可望收获生态和经济双重收益。我国对互花米草利用的研究主要为对秸秆的直接利用, 包括燃料化利用、饲料化利用、原料化利用, 这些利用方式一般为低值化利用, 另有研究涉及互花米草的药用价值和耐盐基因等高值化利用。在所有利用研究中, 秸秆燃料化利用占比最大, 为 43%, 秸秆肥料化利用和耐盐基因等其他利用形式的占比最小, 合计约为 8%。总体而言, 过去对互花米草利用的研究集中于加工利用技术这一环节, 缺少对互花米草收集技术和市场化推广的研究, 未来应该重视互花米草利用产业链的每一个环节, 加强研究机构与企业的合作, 实现产学研同步配套发展。

**关键词:** 入侵植物; 互花米草; 资源化利用; 秸秆资源; 药用价值; 耐盐基因

**中图分类号:** S45

**文章编号:** 2096-6237(2019)12-1870-10

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Resource utilization of invasive *Spartina alterniflora*: A review\*

XIE Baohua<sup>1</sup>, LU Feng<sup>2</sup>, HAN Guangxuan<sup>1\*\*</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences / Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China; 2. Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257500, China)

**Abstract:** In China, *Spartina alterniflora*, an invasive alien plant species, covers an area of approximately 54 600 hectares. The total dry matter of the aboveground part of *S. alterniflora* is  $7.5 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6$  tons per year. The control and utilization of *S. alterniflora* have received increasing attention. A combined utilization and control approach could produce simultaneous economic and ecological benefits. Studies of the utilization of *S. alterniflora* in China tended to focus on the direct utilization of straw, including its use as fuel, feed, and raw material. These methods of utilization were generally low-value. Possible high-value utilization includes the medicinal value of *S. alterniflora* and its salt-tolerant genes. In all the studies, the largest proportion (43%) of straw was utilized as fuel, whereas the smallest proportion (approximately 8%) was utilized for other purposes, such as fertilizer and for its salt-tolerant genes. Previous studies have focused on utilization technologies, but they have not looked at *S. alterniflora* collection technology and market promotion. In the future, attention should be paid to every

\* 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-023, KFJ-EW-STZ-127)和国家级自然保护区专项资金项目(Y639071021)资助

\*\* 通信作者: 韩广轩, 主要研究方向为滨海湿地生态学。E-mail: gxhan@yic.ac.cn

谢宝华, 主要研究方向为滨海湿地生态学。E-mail: bxh@yic.ac.cn

收稿日期: 2019-05-05 接受日期: 2019-07-25

\* This study was supported by the Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-STZ-ZDTP-023, KFJ-EW-STZ-127) and the Special Funds of National Nature Reserve of China (Y639071021).

\*\* Corresponding author, E-mail: gxhan@yic.ac.cn

Received May 5, 2019; accepted Jul. 25, 2019

link of the industry chain of *S. alterniflora* utilization, and cooperation between research institutions and enterprises is essential for the synchronous development of industry, education, and research.

**Keywords:** Invasive plant; *Spartina alterniflora*; Resource utilization; Straw resource; Medicinal value; Salt tolerant gene

为了消浪护堤、促淤造陆、改善海滩生态环境等目的, 1979 年互花米草(*Spartina alterniflora*)被引入我国<sup>[1]</sup>。然而事与愿违, 虽然互花米草在部分地区如江苏盐城发挥了很好的保滩护堤等作用<sup>[2]</sup>, 但在全国范围内其负面影响更大。由于极强的耐盐、耐淹、繁殖和扩散能力, 互花米草在我国海岸带快速蔓延<sup>[3-4]</sup>, 对大部分沿海滩涂湿地的生物多样性维持及生态安全造成了严重威胁<sup>[5-6]</sup>。2003 年初, 国家环保总局公布了我国首批外来入侵物种名单, 互花米草作为唯一的盐沼植物名列其中(中华人民共和国生态环境部, [http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022\\_172155.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172155.htm))。

在其他很多国家和地区, 互花米草也是臭名昭彰的外来入侵种, 科学家们投入了巨大的精力研究互花米草的入侵机制与防控方法<sup>[7-12]</sup>, 并在少数地区进行了大尺度的防控实践<sup>[13-15]</sup>。

由于互花米草防控的难度和成本很大, 在互花米草管理中, 一方面应积极探索经济有效的控制措施以扼制其扩散速率, 将其对生态系统的危害降低到最低; 另一方面应转换思维方式, 充分利用互花米草生长迅速和抗逆性强等特点, 将其作为一种资源加以利用, 通过资源化开发达到“化害为利、变废为宝”的目的。防控与利用相结合, 有可能收获生态和经济双重效益。

我国互花米草利用形式多样, 但尚处于研究阶段。互花米草利用主要是对秸秆的低值化利用(如肥料化、原料化、饲料化及燃料化等利用形式), 另外还包括对互花米草药用价值和耐盐基因等高新技术利用的研究。据笔者不完全统计, 在公开发表的互花米草利用研究论文中, 秸秆燃料化利用占比最大, 为 43%, 秸秆肥料化利用和耐盐基因等其他利用的占比最小, 分别为 3%和 5%(图 1)。

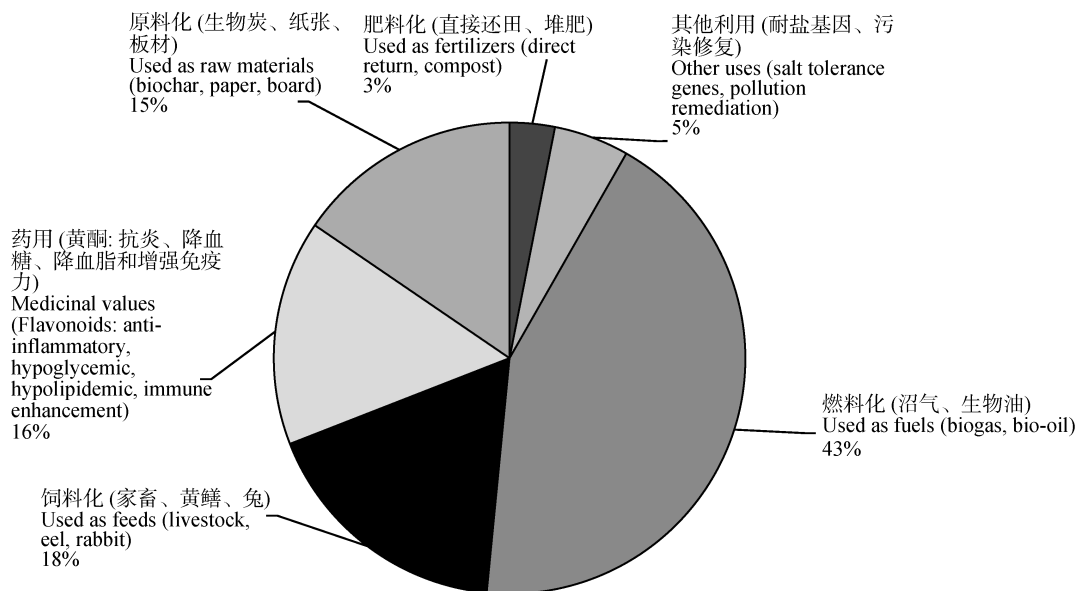


图 1 互花米草不同利用方式研究的比例

Fig. 1 Proportions of studies on different utilization modes of *Spartina alterniflora*

本文系统总结了我国几十年来关于互花米草利用的研究状况, 分类阐述了不同利用形式及其技术, 对不同利用形式的可行性作了分析与展望, 以期为我国互花米草控制、利用与管理提供帮助。

## 1 我国互花米草入侵历史及其分布

### 1.1 互花米草入侵与分布

互花米草于 1979 年被引入我国, 之后被人为引

种到从广东至河北的沿海各地<sup>[1]</sup>, 造成了互花米草在全国海岸带地区的疾速扩张。基于遥感影像数据和野外调查, 研究人员对 2007 年和 2014 年前后互花米草的分布情况进行了全国范围的调查统计, 2014—2015 年, 我国互花米草总面积为 54 580~54 551 hm<sup>2</sup>, 江苏省占全国面积的比例最大, 为 33%~40%(表 1)。对互花米草入侵历史过程的研究表明, 在主要分布省市中, 只有广东省的互花米草面

积自 1995 年后呈现持续下降趋势, 其他省市均为持续上升<sup>[15]</sup>。不同人员统计调查的全国互花米草总面积非常一致, 差别仅在 1% 左右, 但具体到省级面积时, 则有很大差异, 尤其是 2014—2015 年的数据。

在 Zhang 等<sup>[15]</sup>和 Liu 等<sup>[16]</sup>的两份研究中, 山东、江苏、浙江、福建和广东省的互花米草面积差别均达 20% 以上(表 1), 这可能是由于不同研究采用的遥感影像不同, 也可能是野外调查不够充分所致。

表 1 中国主要分布区的互花米草种群面积  
Table 1 Population areas of *Spartina alterniflora* in the main distribution areas of China  $\text{hm}^2$

辽宁 Liaoning	河北 Hebei	天津 Tianjin	山东 Shandong	江苏 Jiangsu	上海 Shanghai	浙江 Zhejiang	福建 Fujian	广东 Guangdong	广西 Guangxi	总计 Total	数据时间 Dataset time	文献 References
57	474	163	686	18 711	4 741	4 812	4 166	546	95	34 451	2007	[17] <sup>2)</sup>
	241	570	564	17 842	5 336	5 092	3 932	349	251	34 177	2006—2008	[18]
		684 <sup>1)</sup>	3 284	21 843	9 548	9 662	9 485	198	444	55 181	2014	[15] <sup>3)</sup>
	26	426	2 484	18 363	10 109	14 282	7 267	780	843	54 580	2015	[16]

1) 此数据为天津和河北的总和。2) 在香港和澳门有零星互花米草, 一般不足 200  $\text{m}^2$ 。3) 辽宁省和海南省有少量互花米草。1) This data is actually the sum of Tianjin and Hebei. 2) There is a small amount of *Spartina alterniflora* in Hong Kong and Macao, generally less than 200  $\text{m}^2$ . 3) In addition, there are a small amount of *S. alterniflora* in Liaoning Province and Hainan Province.

## 1.2 互花米草生物量资源

在互花米草利用研究中, 绝大多数是对互花米草地上生物质的利用。因此, 本文基于文献中互花米草分布面积(表 1)和地上生物量数据(表 2), 对全国互花米草地上生物量进行了估算。用表 1 中的 2014 年和 2015 年的各省市面积数据, 与表 2 中生物量范围的上下限相乘, 得出每个省市的 4 个生物量总量数据(河北与天津合在一起), 据此得出生物量范围、均值和标准

误差(图 2)。生长季末期我国互花米草地上干物质总量为  $7.5 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 按照含水量 82.5%<sup>[19]</sup>计算的鲜重总量为  $4.29 \times 10^6 \sim 6.57 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。互花米草地上生物量相当于 2014 年我国农作物秸秆产量的 4.4%~6.7%<sup>[20]</sup>。在互花米草主要分布区中, 江苏省的互花米草生物量占全国总量的 35%~42%, 江苏、上海、浙江和福建 4 省市占全国总量的 93%~94%。单产高、面积大且分布集中, 为互花米草开发利用提供了便利。

表 2 中国主要分布区生长季末期互花米草地上干物质生物量

Table 2 Aboveground dry biomasses of *Spartina alterniflora* at the end of growing season in the main distribution areas of China  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

	天津 Tianjin	山东 Shandong	江苏 Jiangsu	上海 Shanghai	浙江 Zhejiang	福建 Fujian	广东 Guangdong	广西 Guangxi
生物量范围 Range of biomass	19 220	11 080	17 002	11 141	18 685	15 319	3 100	9 480
文献 Reference	[21]	[7]	[22]	[22]	[22]	[22]	[19]	[23-24]

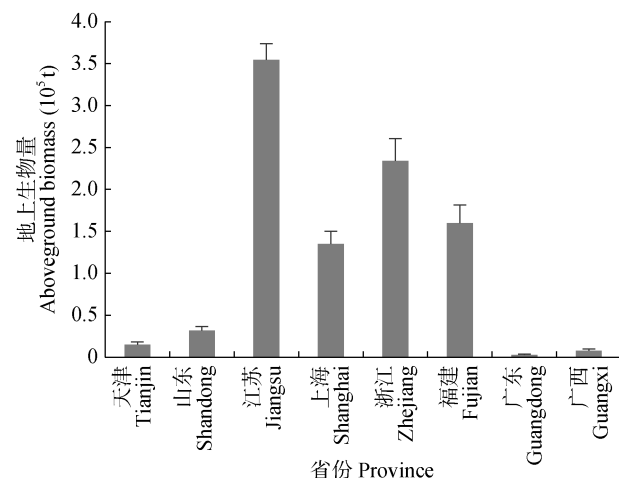


图 2 各省市互花米草年度地上生物量(天津数据为天津与河北之和)

Fig. 2 Annual amounts of the aboveground biomass of *Spartina alterniflora* in various provinces (Tianjin data is the sum of Tianjin and Hebei) of China

## 2 互花米草秸秆的利用

对互花米草的利用一般是对其秸秆的利用, 我国农作物秸秆资源综合利用途径主要包括肥料化、燃料化、饲料化、原料化和基料化这 5 种途径, 通常称之为“五料化”利用<sup>[20]</sup>。本文对互花米草秸秆利用形式按“五料化”进行了分类总结。

### 2.1 燃料化利用

植物燃料化利用是指对植物生物质能的利用, 生物质能是指由光合作用而固定在各种有机体中的太阳能。互花米草地上部分的热值约为  $1.6 \times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[25]</sup>, 与水稻(*Oryza sativa*)秸、玉米(*Zea mays*)秸等农作物秸秆的热值基本一致<sup>[20]</sup>, 相当于 0.55 kg 标准煤。互花米草的高生产力(表 2)和高热值, 为其燃料化利用提供了可能。

我国互花米草生物质能利用研究集中于制备沼

气, 最近几年有研究尝试用互花米草制备生物油。互花米草是较好的生产沼气的潜在原料, 其干物质产气量为  $0.20\sim 0.22\text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$ , 高于稻草、麦草和猪粪<sup>[26]</sup>。互花米草茎和叶的产气能力相差无几<sup>[27]</sup>, 但不同生长期互花米草的理化特性和厌氧发酵特性有较大差别, 从生物量以及产气稳定性两方面考虑, 8 月份是互花米草的最佳采收时期<sup>[28]</sup>。

厌氧发酵是利用互花米草生物能的重要途径, 发酵方式包括湿式发酵、半干式发酵、干式发酵以及混合发酵。为了提高产气能力, 可对互花米草进行预处理、控制发酵过程和深度气化<sup>[29-30]</sup>。光照、 $\gamma$ -射线辐照、氨液浸泡和石灰堆沤等预处理可破坏互花米草的木质纤维结构, 达到提高其厌氧生物可降解性和产气量的目的<sup>[30-34]</sup>, 但 NaOH 处理和汽爆等预处理却适得其反<sup>[35-36]</sup>。对互花米草厌氧发酵后的沼渣经适当处理后进行深度气化, 可进一步提高互花米草的产沼气能力并改善沼气工程原料的供给稳定性<sup>[37-38]</sup>。把互花米草与粪肥或土豆等有机物按一定比例混合发酵, 也可提高其沼气产量<sup>[33,39-40]</sup>。

虽有研究利用热解气化技术, 将大米草中的碳、氢等元素转化为  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等可燃气体, 并实现了气、电、热三联供<sup>[41]</sup>。然而, 米草属是 Na、K 含量很高的盐生植物, 直接燃烧往往会导致结渣、沉积与腐蚀锅炉等问题<sup>[42]</sup>。互花米草的碱金属对褐煤热解有催化作用, 可以促进  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  气体的产生, 提高热解气体质量, 因此, 将互花米草与褐煤共热解, 可使其碱金属含量高的弊端转变为有利因素<sup>[43]</sup>。

从 2007 年至今, 利用互花米草生产沼气仍仅限于实验室中。既然现有研究已经证实互花米草产沼气能力与农作物秸秆类似, 相关研究的重心不应当事半功半地集中在提高产气量上, 而应着眼于市场化应用, 包括发明或改进适宜滩涂的收割机械、消除互花米草的钠抑制、加强沼气及沼渣的深化利用、实现规模化生产及降低成本等。相比较沼气, 生物油具有易储存、易运输、能量密度高且使用方便等优点, 利用互花米草制备生物油是很好的尝试, 国内这方面的研究刚刚开始。互花米草生物油是一种组分复杂的含氧有机混合物, 包括酸类、酚类、酯类、呋喃等, 主要成分为酚类和酯类, 利用醇-水共溶剂作为液化互花米草的介质, 可提高产油率、改善生物油品质<sup>[44]</sup>。利用催化剂 KOH 在乙醇-水共溶剂中催化液化互花米草, 可促进互花米草解聚初期挥发物的产生, 并对生物油质量分数有一定的影响, 酚类含量升高, 酯类含量降低<sup>[45]</sup>。

## 2.2 饲料化利用

### 2.2.1 营养成分

互花米草含有丰富的可利用糖类, 干草含粗蛋白  $6.7\%\sim 13.57\%$ 、粗脂肪  $1.67\%\sim 3.04\%$ 、粗纤维  $26.00\%\sim 27.10\%$ 、粗灰分  $11.43\%\sim 15.55\%$ 、无氮浸出物  $16.64\%\sim 37.4\%$ 、盐分  $3.32\%\sim 3.51\%$ 、钙  $0.24\%\sim 0.34\%$ 、磷  $0.02\%\sim 0.19\%$ , 而且氨基酸种类齐全、含量丰富, 具有一定的饲用价值<sup>[46-49]</sup>。

### 2.2.2 饲养研究

#### 1) 互花米草鲜草或草粉

拔节期至开花期的青割互花米草可作为奶牛和山羊日粮中的潜在粗草料, 但青割米草在奶牛和山羊饲料中的比例不宜超过  $25\%$  和  $30\%$ , 而且由于互花米草适口性较差, 山羊会优先食用其他牧草<sup>[49-50]</sup>。在江苏大丰滩涂的野外调查中发现, 野生麋鹿喜食互花米草, 牙璋、野兔等食草野生动物也采食互花米草<sup>[51]</sup>, 但这其实是麋鹿等野生动物无奈的选择, 因为在野放麋鹿生境中只有芦苇(*Phragmites australis*) 和互花米草 2 种食源植物, 圈养麋鹿有营养和口感更好的牧草, 便不会取食互花米草<sup>[52]</sup>。

互花米草草粉可以替代猪或鸡的部分饲料, 但其可替代比例很低, 不宜超过  $6\%$ , 在作为长毛兔的替代饲料时, 米草草粉所占比例可以高一些<sup>[47,53-54]</sup>。互花米草采集和加工难度大<sup>[53]</sup>, 而且在动物饲料中可占比例很小, 因此将其作为替代饲料的经济效益可能不尽如人意。

#### 2) 互花米草生物矿质液

从互花米草中提取的生物矿质液是一种无毒具浓郁甜香味的深棕色黏稠状液体, 比重  $1.30$ , 兼有重甜、重咸味道, 亲水性好, 生物矿质液所含总可溶糖约  $18\%$ 、全盐约  $20\%$ 、总蛋白质约  $1.5\%$ 。较多的黄酮类化合物使互花米草生物矿质液具有抗氧化作用和增强免疫力等生物活性, 对 Wistar 大白鼠和昆明种小白鼠的试验证实互花米草生物矿质液无毒, 具有使动物增重和强心的生物活性, 也具备人类食用的潜在价值<sup>[55-56]</sup>。在饲料中添加一定比例( $0.1\%\sim 0.5\%$ )的互花米草生物矿质液, 能够加快黄鳝生长速度, 改善黄鳝肉质, 降低粗脂肪含量, 提高人类必需微量元素的含量, 并对黄鳝或家禽有显著的着色作用<sup>[57-58]</sup>。

## 2.3 原料化利用

秸秆原料化利用是指以秸秆为原材料, 采用一系列生产工艺制备各种工业原料, 如纸张、板材、净化功能材料等, 秸秆纤维作为一种天然纤维素纤

维,具有良好的生物降解性,因此用其开发的制品也具有良好的环保性能<sup>[20]</sup>。目前我国互花米草原料化利用主要集中于生物炭制备和板材加工。

### 2.3.1 制备生物炭

生物炭(biochar)是生物质在完全或部分缺氧的条件下热解( $<700$ )形成的一种固态的、难熔的、稳定的、高度芳香化的富含碳的材料<sup>[59]</sup>。生物炭含碳量高、孔隙丰富、比表面积大、吸附能力强,目前已被应用于吸湿剂、土壤改良剂、除味剂、重金属吸附稳定剂等诸多领域<sup>[60-62]</sup>。

互花米草秸秆的内部呈海绵状,有许多竖直的通气孔,适合生物炭对比表面积、孔容及吸附能力等指标的要求。把互花米草或其厌氧发酵渣用氢氧化钾或磷酸等化学溶液浸渍后高温活化,即可制得高效生物炭,其总孔容积和比表面积可达到市场上现有生物炭的标准,对水体中某些污染物(如镉)的吸附性能甚至远高于大孔树脂、棉花(*Gossypium* spp.)秸秆活性炭等市场现有生物炭<sup>[63-64]</sup>。

热解温度对互花米草生物炭性能有重要影响。升温裂解是一个炭化程度和芳香性逐渐增加而亲水性和极性不断减弱的过程,不同温度下热分解互花米草制得的生物炭,其吸附原理和能力不同。300 热解制得的生物炭对土壤三氯生的吸附量显著高于 600 制得的生物炭,前者的吸附以分配作用为主,后者的吸附以表面吸收为主<sup>[65]</sup>。在 350~600 区间内,450 制备的互花米草生物炭吸附镉的性能最佳,且最大吸附量明显高于棉花和小麦(*Triticum aestivum*)等农作物秸秆生物炭<sup>[66]</sup>。在利用秸秆热裂解制备生物炭的过程中,同时可以得到  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  等可燃气体,这些可燃气可用于发电,因此,气炭联产可提高对秸秆的利用效率<sup>[67]</sup>,在互花米草利用中,值得对此进行深入研究。

### 2.3.2 制备纸张板材

由于纤维短窄、含盐量高等性能的限制,利用互花米草为原料制造纸张或板材的研究很少,制成的成品一般性能也较差。在利用互花米草生产纸浆时,热机械制浆技术优于化学制浆技术,将互花米草纸浆与其他化学纸浆适当混合,可用于制造各种模塑纸浆产品<sup>[68]</sup>。由于互花米草碎料较细,用其制作碎料板时,用胶成本高,产品性能差,因此,互花米草只能作为部分替代原料,与木质刨花混合制作木草复合碎料板<sup>[69-70]</sup>。相对于生产纸浆和碎料板,用互花米草制造纤维板具有更好的可行性,将互花米草秸秆与造纸污泥复配加工成的互花米草纤维板,在硬

挺度、耐破度、密度和吸水性能等指标上均明显优于纺织纤维板和废纸浆纤维板<sup>[71]</sup>。

### 2.4 肥料化利用

秸秆肥料化利用指秸秆还田,可提升土壤肥力和作物产量<sup>[20]</sup>。互花米草肥料化利用的研究非常少,其主要原因是大量农业秸秆尚且难以充分利用。仅有的短期研究表明,无论是直接用作稻田基肥,还是与羊粪混合堆肥后再还田,互花米草对作物的增产效果和对土壤的改良效果与农业秸秆并无差异<sup>[47,72]</sup>,另外,若长期使用高盐分的互花米草还田,很可能导致土壤质量下降,因此,互花米草的肥料化利用是不可行的。

## 3 药用价值

互花米草含有糖类、氨基酸、蛋白质、类黄酮、有机酸类、香豆素类和生物碱类等成分<sup>[73-74]</sup>,其药用价值研究集中于利用黄酮类化合物(flavonoids compounds)。互花米草地上和地下部分的总黄酮含量分别为  $4.16\sim 4.67\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $2.33\sim 2.44\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,叶片中总黄酮含量为  $29.13\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,是根、茎、种子等其他器官的 3.6~5.4 倍。另外,互花米草越冬芽的总黄酮含量随着由陆向海的方向基本呈升高趋势<sup>[75]</sup>。

互花米草总黄酮具有抗炎、降血糖、降血脂和增强免疫力等作用。互花米草总黄酮可显著提高小鼠腹腔巨噬细胞的吞噬作用,提高细胞免疫功能,对非特异性免疫系统有促进作用<sup>[76]</sup>。互花米草总黄酮外用具有一定的抗炎功效,对炎症早期的毛细血管通透性增高和水肿、中期的炎性渗出和炎性细胞的游走与浸润具有一定的抑制作用,而且功效随着剂量增大而有所增强<sup>[77]</sup>。大剂量的互花米草总黄酮可能促进胰岛  $\beta$ -细胞分泌胰岛素,从而显著降低正常小鼠的血糖<sup>[78]</sup>。互花米草总黄酮还具有明显的降血脂作用,可使大鼠血清中甘油三酯和总胆固醇明显降低<sup>[79]</sup>。最近有研究表明,以互花米草提取物为功能性成分,添加到化妆品配方中,可制成互花米草护肤霜和洗发香波等一系列天然功能性化妆品<sup>[80]</sup>。

互花米草药用价值的研究多数发生在 1991—2002 年,近十余年已鲜见此类研究报道,这可能是互花米草药用价值较低的缘故。事实上,迄今为止市面上并没有以互花米草药用价值为主的药品,南京大学致力于互花米草利用研究,与生产厂家合作推出了以米草提取物为原料的保健品,如“复合米草口服液”(原名“肝宝口服液”)和“解风堂”(可降尿酸)。

#### 4 其他利用形式

互花米草作为典型高度耐盐的泌盐盐生植物,是挖掘耐盐基因的好资源。依靠分子生物学手段克隆相关耐盐基因,并将其转移到非抗盐的作物中,培育出耐盐的转基因新品种,可望为我国大面积开发盐碱地提供有力支持。我国关于互花米草耐盐基因的研究刚刚起步,目前已克隆得到了互花米草 $\text{Na}^+/\text{H}^+$ 逆向转运蛋白基因 *SaNHX1* 和甜菜碱醛脱氢酶基因 *SaBADH*, 后者可能在抵御盐和干旱对互花米草的胁迫中发挥重要作用<sup>[81-82]</sup>。杂交可能是利用互花米草耐盐基因的另一种途径,互花米草与水稻杂交的正反远缘杂交,可作为培育粮饲兼用的滩涂耐盐水稻新品种的新策略<sup>[83-84]</sup>。

互花米草内生菌可在湿地重金属污染修复中发挥重要作用。从互花米草根部和叶片中分离的内生菌,可通过重金属浓度梯度筛选得出耐重金属菌株——球形赖氨酸芽孢杆菌(*Lysinibacillus sphaericus*), 这说明互花米草可为湿地重金属污染的植物原位修复提供良好的菌种资源<sup>[85]</sup>。

#### 5 总结与展望

1)加强互花米草利用的产学研一体化。我国互花米草利用尚处于实验室研究阶段,与规模化、市场化、产业化的距离还很远。在互花米草利用产业链上,应该包括3个缺一不可、环环相扣的环节:米草收集、加工利用、规模市场化,过去的研究集中于加工利用技术这一环节,其他两个环节尤其是第3环节的研究严重缺乏,如目前虽有履带式米草收集机械的专利申请,但履带式机械难以通过滩涂上宽阔的潮沟。没有米草收集和市场化推广,何谈利用?互花米草利用需要国家和地方政策的支持,更需要从市场经济规律寻求产业化解决途径。未来研究中,应该重视互花米草利用产业链的每一个环节,实现产学研同步配套发展。如果离开了企业的参与,互花米草利用研究的成果很难走出实验室,甚至难以出现可以市场化推广的成果。

2)结合互花米草防控,推动互花米草低值化利用的规模化和市场化,深化高值化利用研究。与难以消化的海量农业秸秆相比,互花米草秸秆无论在量、质还是收获成本上,都处于劣势,只从利用角度考虑,互花米草秸秆的单一常规化低值利用是没有出路的,气炭联产等综合利用方式可能具有更好的经济效益。对互花米草的有效利用是有相当价值的,可以降低互花米草防控的成本,有助于大尺度的互花米草防控与管理。未来应把防控与利用结合起来,

建立防控与利用示范基地,推动互花米草低值化利用的规模化和市场化,同时还应加强高值化利用研究,深挖互花米草的资源化利用潜力。

#### 参考文献 References

- [1] 徐国万, 卓荣宗, 曹豪, 等. 互花米草生物量年动态及其与滩涂生境的关系[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(3): 230-235  
XU G W, ZHUO R Z, CAO H, et al. Annual changes of biomass of *Spartina alterniflora* and the relationships between biomass and tidal land habits[J]. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1989, 13(3): 230-235
- [2] QIN P, XIE M, JIANG Y S, et al. Estimation of the ecological-economic benefits of two *Spartina alterniflora* plantations in North Jiangsu, China[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(1): 5-17
- [3] 宫璐, 李俊生, 柳晓燕, 等. 中国沿海互花米草遗传多样性及其遗传结构[J]. 草业科学, 2014, 31(7): 1290-1297  
GONG L, LI J S, LIU X Y, et al. Genetic diversity of *Spartina alterniflora* in coastal areas of China[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(7): 1290-1297
- [4] AN S Q, GU B H, ZHOU C F, et al. *Spartina* invasion in China: implications for invasive species management and future research[J]. Weed Research, 2007, 47(3): 183-191
- [5] 邓自发, 安树青, 智颖飙, 等. 外来种互花米草入侵模式与爆发机制[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2678-2686  
DENG Z F, AN S Q, ZHI Y B, et al. Preliminary studies on invasive model and outbreak mechanism of exotic species, *Spartina alterniflora* Loisel[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2678-2686
- [6] LI B, LIAO C H, ZHANG X D, et al. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River estuary, China: An overview of current status and ecosystem effects[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 511-520
- [7] 乔沛阳, 王安东, 谢宝华, 等. 除草剂对黄河三角洲入侵植物互花米草的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5627-5634  
QIAO P Y, WANG A D, XIE B H, et al. Effects of herbicides on invasive *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5627-5634
- [8] 谢宝华, 王安东, 赵亚杰, 等. 刈割加淹水对互花米草萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 417-423  
XIE B H, WANG A D, ZHAO Y J, et al. Effects of mowing plus waterlogging on germination and seedling growth of *Spartina alterniflora*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2): 417-423
- [9] 谢宝华, 韩广轩. 外来入侵种互花米草防治研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3464-3476  
XIE B H, HAN G X. Control of invasive *Spartina alterniflora*: A review[J]. The Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3464-3476
- [10] ADAMS J, VAN WYK E, RIDDIN T. First record of *Spartina alterniflora* in southern Africa indicates adaptive potential of this saline grass[J]. Biological Invasions, 2016, 18(8): 2153-2158

- [11] YUAN L, ZHANG L Q, XIAO D R, et al. The application of cutting plus waterlogging to control *Spartina alterniflora* on saltmarshes in the Yangtze Estuary, China[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2011, 92(1): 103–110
- [12] GAO Y, TANG L, WANG J Q, et al. Clipping at early fluorescence is more efficient for controlling the invasive plant *Spartina alterniflora*[J]. Ecological Research, 2009, 24(5): 1033–1041
- [13] PATTEN K, O'CASEY C, METZGER C. Large-scale chemical control of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in Willapa Bay, WA: Towards eradication and ecological restoration[J]. Invasive Plant Science and Management, 2017, 10(3): 284–292
- [14] 汤臣栋. 上海崇明东滩互花米草生态控制与鸟类栖息地优化工程[J]. 湿地科学与管理, 2016, 12(3): 4–8  
TANG C D. Ecological control of *Spartina alterniflora* and improvement of birds habitats in Chongming Dongtan wetland, Shanghai[J]. Wetland Science & Management, 2016, 12(3): 4–8
- [15] ZHANG D H, HU Y M, LIU M, et al. Introduction and spread of an exotic plant, *Spartina alterniflora*, along Coastal Marshes of China[J]. Wetlands, 2017, 37(6): 1181–1193
- [16] LIU M Y, MAO D H, WANG Z M, et al. Rapid invasion of *Spartina alterniflora* in the coastal zone of mainland China: new observations from landsat OLI images[J]. Remote Sensing, 2018, 10(12): 1933
- [17] 左平, 刘长安, 赵书河, 等. 米草属植物在中国海岸带的分布现状[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 31(5): 101–111  
ZUO P, LIU C A, ZHAO S H, et al. Distribution of *Spartina* plantations along the China's coast[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 101–111
- [18] LU J B, ZHANG Y. Spatial distribution of an invasive plant *Spartina alterniflora* and its potential as biofuels in China[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 175–181
- [19] 唐国玲, 沈禄恒, 翁伟花, 等. 无瓣海桑对互花米草的生态控制效果[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(1): 10–13  
TANG G L, SHEN L H, WENG W H, et al. Effects of using *Sonneratia apetala* to control the growth of *Spartina alterniflora* Loisel[J]. Journal of South China Agricultural University, 2007, 28(1): 10–13
- [20] 王红梅, 屠焰, 张乃锋, 等. 中国农作物秸秆资源量及其“五料化”利用现状[J]. 科技导报, 2017, 35(21): 81–88  
WANG H M, TU Y, ZHANG N F, et al. Chinese crop straw resource and its utilization status[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(21): 81–88
- [21] 宫乐, 张蕊, 李瑞利, 等. 天津滨海滩涂互花米草群落动态的研究[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2016, 49(2): 43–51  
GONG L, ZHANG R, LI R L, et al. Study on community dynamics of *Spartina alterniflora* at the intertidal zone in Tianjin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2016, 49(2): 43–51
- [22] ZHENG S Y, SHAO D D, SUN T. Productivity of invasive saltmarsh plant *Spartina alterniflora* along the coast of China: A meta-analysis[J]. Ecological Engineering, 2018, 117: 104–110
- [23] 赵相健, 柳晓燕, 宫璐, 等. 刈割加遮荫综合治理互花米草 (*Spartina alterniflora*) [J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2714–2719  
ZHAO X J, LIU X Y, GONG L, et al. Control of *Spartina alterniflora* by integrated technique of mowing plus shading[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2714–2719
- [24] 赵相健, 李俊生, 柳晓燕, 等. 刈割加遮荫对互花米草生长和存活的影响[J]. 广西植物, 2017, 37(3): 303–307  
ZHAO X J, LI J S, LIU X Y, et al. Combined effects of mowing and shading on growth and survival of *Spartina alterniflora*[J]. Guihaia, 2017, 37(3): 303–307
- [25] 徐永荣, 张万均, 冯宗炜, 等. 天津滨海盐渍土上几种植物的热值和元素含量及其相关性[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 450–455  
XU Y R, ZHANG W J, FENG Z W, et al. Caloric values, elemental contents and correlations between them of some plants on sea-beach salinity soil in Tianjin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 450–455
- [26] 朱洪光, 陈小华, 唐集兴. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 201–204  
ZHU H G, CHEN X H, TANG J X. Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 201–204
- [27] 罗艳, 陈广银, 罗兴章, 等. 互花米草不同部位厌氧发酵特性[J]. 环境化学, 2010, 29(5): 909–913  
LUO Y, CHEN G Y, LUO X Z, et al. Anaerobic digestion characteristics in different part of *Spartina alterniflora*[J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(5): 909–913
- [28] 陈广银, 郑正, 常志州, 等. 不同生长期互花米草的理化特性及厌氧发酵特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 260–265  
CHEN G Y, ZHENG Z, CHANG Z Z, et al. Characteristics of anaerobic digestion and physico-chemical properties of *Spartina alterniflora* at different growth stages[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 260–265
- [29] 陈广银, 常志州, 叶小梅, 等. 互花米草厌氧发酵产沼气研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(4): 509–516  
CHEN G Y, CHANG Z Z, YE X M, et al. Research process on biogas production of *Spartina alterniflora*[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(4): 509–516
- [30] 梁越敏, 郑正, 罗兴章, 等. 中温干式发酵对互花米草产气和结构特性的影响[J]. 环境化学, 2011, 30(3): 679–685  
LIANG Y G, ZHENG Z, LUO X Z, et al. Effect of mesophilic dry digestion on characteristics of biogas production and structure of smooth cordgrass[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(3): 679–685
- [31] 李继红, 杨世关, 郑正, 等. 互花米草厌氧发酵产沼气初步试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1254–1258  
LI J H, YANG S G, ZHENG Z, et al. Pilot study on anaerobic digestion of *Spartina alterniflora* to produce biogas[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(3): 1254–1258
- [32] 李继红, 杨世关, 郑正. 互花米草与土豆混合厌氧发酵产酸和产沼气特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 262–268  
LI J H, YANG S G, ZHENG Z. Characteristics of acidification fermentation and biogas production for co-digestion of

- Spartina alterniflora* and potato[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 263–268
- [33] ZHANG Y H, LIANG Y G, CHEN J F, et al. Effect of lime loading on the performance of simultaneous lime treatment and dry anaerobic digestion of smooth cordgrass[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2016, 38(20): 3048–3054
- [34] YANG S G, LI J H, ZHENG Z, et al. Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(4): 597–602
- [35] 陈广银, 郑正, 常志州, 等. NaOH 处理对互花米草高温干式厌氧发酵的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 2158–2163  
CHEN G Y, ZHENG Z, CHANG Z Z, et al. Effect of NaOH-treatment on dry-thermophilic anaerobic digestion of *Spartina alterniflora*[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 2158–2163
- [36] 邹星星, 郑正, 杨世关, 等. 汽爆预处理对互花米草厌氧发酵产气特性的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1117–1120  
ZOU X X, ZHENG Z, YANG S G, et al. Effect of steam explosion pretreatment on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of *Spartina alterniflora*[J]. China Environmental Science, 2009, 29(10): 1117–1120
- [37] 罗艳, 罗兴章, 郑正, 等. 不同 TS 浓度互花米草沼渣二次发酵特性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3425–3428  
LUO Y, LUO X Z, ZHENG Z, et al. Effect of TS loading rates of biogas residue of *Spartina alterniflora* for secondary anaerobic digestion[J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3425–3428
- [38] 罗艳, 陈广银, 罗兴章, 等. NaOH 溶液间歇式处理对互花米草厌氧发酵特性的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2017–2021  
LUO Y, CHEN G Y, LUO X Z, et al. Effect of intermittent treatment with NaOH solution on anaerobic digestion with *Spartina alterniflora*[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2017–2021
- [39] 陈广银, 郑正, 邹星星, 等. 牛粪与互花米草混合厌氧消化产沼气的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 179–183  
CHEN G Y, ZHENG Z, ZOU X X, et al. Experiment on producing biogas by anaerobic co-digestion of cow feces and *Spartina alterniflora*[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 179–183
- [40] LI J H, YANG S G, ZHENG Z A, et al. Anaerobic batch co-digestion of *Spartina alterniflora* and potato[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2011, 45(1/3): 81–95
- [41] 董玉平, 董磊, 景元琢, 等. 大米草气、电、热三联供技术研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 222–226  
DONG Y P, DONG L, JING Y Z, et al. Gas-heat-electricity triple cogeneration technology for gasification of *Spartina*[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 222–226
- [42] 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91–99  
WU C Z, ZHOU Z Q, YIN X L, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91–99
- [43] 李继红, 杨世关, 李晓彤. 互花米草与褐煤共热解特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 251–257  
LI J H, YANG S G, LI X T. Experiment on co-pyrolysis characteristics of *Spartina alterniflora* and lignite[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 251–257
- [44] 何志霞, 纪长浩, 徐贵生. 互花米草在乙醇-水体系中直接液化制备生物油[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 236–241  
HE Z X, JI C H, XU G S. Production of bio-oil by direct liquefaction of *Spartina alterniflora* in ethanol-water co-solvent[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 236–241
- [45] 徐贵生, 何志霞, 徐志祥, 等. 醇水共溶剂中 KOH 高效催化液化互花米草制备生物油[J]. 林产化学与工业, 2018, 38(4): 79–86  
XU G S, HE Z X, XU Z X, et al. Catalytic liquefaction of *Spartina alterniflora* in ethanol-water co-solvent for bio-oil[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2018, 38(4): 79–86
- [46] 曹日强, 施金峰. 互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)和大绳草(*Spartina cynosuroides* (L.)Roth)的比较生化研究 I. 地上部与地下部糖类及氨基酸含量的测定[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1988, 21(1): 85–90  
CAO R Q, SHI J F. Comparative studies on the biochemistry of *Spartina alterniflora* and *cynosuroides* (I) the content of sugar and amino acids in both the underground and aerial parts[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 1988, 21(1): 85–90
- [47] 王伯诚, 杨泉灿, 戴均灿, 等. 互花米草作水稻基肥和喂兔试验[J]. 浙江农业科学, 1996, (1): 37–38  
WANG B C, YANG Q C, DAI J C, et al. Experiment of *Spartina alterniflora* used as rice base fertilizer and feeding rabbits[J]. Zhejiang Agricultural Science, 1996, (1): 37–38
- [48] 缪伏荣, 刘景. 互花米草的饲用价值分析[J]. 福建农业学报, 2012, 27(6): 601–605  
MIAO F R, LIU J. *Spartina alterniflora* from Min River estuary wetlands — A new source for forage[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27(6): 601–605
- [49] 林少秋. 用美国互花米草圈养山羊效果试验[J]. 福建畜牧兽医, 2005, 27(5): 8–9  
LIN S Q. Effect of captive goats reared with *Spartina alterniflora*[J]. Fujian Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2005, 27(5): 8–9
- [50] QIN F F, TANG B P, ZHANG H S, et al. Potential use of *Spartina alterniflora* as forage for dairy cattle[J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 173–180
- [51] 丁玉华. 大丰野生麋鹿采食互花米草的发现与研究[J]. 野生动物杂志, 2009, 30(3): 118–120  
DING Y H. Preference of feeding on *Spartina alterniflora* Loisel by Mi-deer in Dafeng National Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2009, 30(3): 118–120
- [52] 纪一帆, 吴宝镛, 丁玉华, 等. 大丰野放麋鹿生境中芦苇和互花米草的营养对比分析[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2240–2244



- JI Y F, WU B L, DING Y H, et al. Nutritional components of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Dafeng freerange David's Deer habitat of Jiangsu Province, East China: A comparative analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2240–2244
- [53] 郑贵荣, 张如. 互花米草粉饲养肉猪试验[J]. 饲料研究, 1995, (5): 23–24  
ZHENG G R, ZHANG R. Feeding experiment of pork with *Spartina alterniflora* meal[J]. Feed Research, 1995, (5): 23–24
- [54] 郑贵荣, 徐开亩, 张如. 互花米草粉饲养肉鸡试验[J]. 养禽与禽病防治, 1994, (6): 21–22  
ZHENG G R, XU K M, ZHANG R. Feeding broilers with *Spartina alterniflora* meal[J]. Poultry Husbandry and Disease Control, 1994, (6): 21–22
- [55] 钦佩, 谢民, 桂诗礼. 米草食用价值的开发研究[J]. 自然杂志, 1988, (12): 931–933  
QIN P, XIE M, GUI S L. Exploitation and research on the edible value of *Spartina japonica*[J]. Journal of Nature, 1988, (12): 931–933
- [56] 钦佩, 谢民, 王长永, 等. 一种能增强肌体免疫功能的新型饮料[J]. 自然杂志, 1990, 13(4): 226–227  
QIN P, XIE M, WANG C Y, et al. A new beverage that enhances muscle immune function[J]. Journal of Nature, 1990, 13(4): 226–227
- [57] WANG G, QIN P, WAN S W, et al. Ecological control and integral utilization of *Spartina alterniflora*[J]. Ecological Engineering, 2008, 32(3): 249–255
- [58] ZHOU W Z, WANG J Q, LYU W G. Effects of biomineralliquid from *Spartina alterniflora* on growth, body color and nutritional components of rice field eels, *Monopterus albus*[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2016, 8(3): 182–185
- [59] LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for environmental management: an introduction[M]//LEHMANN J, JOSEPH S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London: Earthscan, 2009
- [60] LU X L, CASTRILLÓN S R V, SHAFFER D L, et al. *In situ* surface chemical modification of thin-film composite forward osmosis membranes for enhanced organic fouling resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(21): 12219–12228
- [61] PENIDO E S, MARTINS G C, MENDES T B M, et al. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 172: 326–333
- [62] BIEDERMAN L A, HARPOLE W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2013, 5(2): 202–214
- [63] 李坤权, 郑正, 张继彪, 等. 互花米草活性炭对水中对硝基苯胺的等温吸附[J]. 环境化学, 2010, 29(4): 588–591  
LI K Q, ZHENG Z, ZHANG J B, et al. Adsorption isotherm of p-nitroaniline onto activated carbon prepared from *Spartina alterniflora*[J]. Environment Chemistry, 2010, 29(4): 588–591
- [64] 王正芳, 郑正, 罗兴章, 等. 互花米草厌氧发酵渣活性炭处理含镉废水的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2383–2389  
WANG Z F, ZHENG Z, LUO X Z, et al. The treatment of cadmium-contained wastewater using activated carbon prepared from anaerobic digested residue of *S. alterniflora*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2383–2389
- [65] 罗力, 陈卫锋, 魏然, 等. 互花米草生物炭的添加对土壤吸附三氯生的影响及其机制研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(7): 2736–2743  
LUO L, CHEN W F, WEI R, et al. Effects of addition of *Spartina alterniflora*-derived biochars on the sorption of triclosan by soil and their mechanisms[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2736–2743
- [66] 仇祯, 周欣彤, 韩卉, 等. 互花米草生物炭的理化特性及其对镉的吸附效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 172–178  
QIU Z, ZHOU X T, HAN H, et al. Properties of *Spartina alterniflora* Loisel. derived-biochar and its effect on cadmium adsorption[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 172–178
- [67] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 92–101  
PAN G X, LI L Q, LIU X Y, et al. Industrialization of biochar from biomass pyrolysis: a new option for straw burning ban and green agriculture of China[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(13): 92–101
- [68] WU L F, XU Z J, QIN Z D, et al. Pulping utilization of *Spartina alterniflora* (common cordgrass) based on fiber characteristics[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 130/134: 833–837
- [69] 刘晓辉, 宋孝金, 陈涵, 等. 互花米草碎料板的生产工艺[J]. 林业科技开发, 2013, 27(1): 93–96  
LIU X H, SONG X J, CHEN H, et al. Manufacturing technology of particleboard with raw materials from *Spartina alterniflora*[J]. China Forestry Science and Technology, 2013, 27(1): 93–96
- [70] 陈涵. 互花米草木刨花复合碎料板制造工艺[J]. 福建林业科技, 2013, 40(1): 46–48  
CHEN H. Manufacturing technology of *Spartina alterniflora* wood shavings composite particleboard[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2013, 40(1): 46–48
- [71] 覃佐东, 金磊磊, 王建华, 等. 互花米草纤维与造纸污泥混合制作污泥纤维板[J]. 生物加工过程, 2014, 12(3): 65–68  
QIN Z D, JIN L L, WANG J H, et al. Development of novel sludge fiberboard combined with fibers of *Spartina alterniflora* and paper sludge[J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2014, 12(3): 65–68
- [72] 陈金海, 王红丽, 王磊, 等. 互花米草/羊粪混合堆肥还田对滨海盐碱土壤的改良效应: 实验室研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 513–521  
CHEN J H, WANG H L, WANG L, et al. Composting and returning of *Spartina alterniflora* straw/goat feces and its amelioration effect on the coastal saline soil: laboratory

- study[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(3): 513-521
- [73] 曹日强, 朱汝幸, 施金峰. 互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)和大绳草(*Spartina cynosuroides* (L.) Roth)的比较生化研究——(2)地上部与地下部次生代谢物质的初步研究[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1988, 24(3): 515-522
- CAO R Q, ZHU R X, SHI J F. A comparative biochemical study of *Spartina alterniflora* Loisel and *S. cynosuroides* (L.) ROTH ( ) A preliminary study of secondary metabolites of both the aerial and underground parts[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 1988, 24(3): 515-522
- [74] 马永建, 李莉, 袁宝君, 等. 互花米草成分研究 I. GC-MS 法研究叶片中脂肪酸[J]. 中国生化药物杂志, 2001, 22(4): 184-186
- MA Y J, LI L, YUAN B J, et al. Studies on component of *Spartina alterniflora* Loisel . Fatty acids in lamina with GC-MS[J]. Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics, 2001, 22(4): 184-186
- [75] 曹纬国, 刘志勤, 邵云, 等. 黄酮类化合物药理作用的研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, 23(12): 2241-2247
- CAO W G, LIU Z Q, SHAO Y, et al. A progress in pharmacological research of flavonoids[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(12): 2241-2247
- [76] 张康宣, 钦佩, 钱红美, 等. 互花米草总黄酮对小鼠免疫功能的影响[J]. 海洋科学, 1992, (5): 51-54
- ZHANG K X, QIN P, QIAN H M, et al. Influence of total flavonoids of *Spartina alterniflora* (ITS) on immune function in mice[J]. Marine Sciences, 1992, (5): 51-54
- [77] 胡芝华, 钦佩, 蔡鸣, 等. 互花米草总黄酮局部用药的抗炎作用[J]. 植物资源与环境, 1998, 7(2): 7-12
- HU Z H, QIN P, CAI M, et al. Anti inflammatory activity of topically applied total flavonoids of *Spartina alterniflora* Loisel *in vivo*[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1998, 7(2): 7-12
- [78] 蔡鸣, 钦佩, 张康宣, 等. 互花米草总黄酮(TFS)与生物矿质液(BML)对小鼠血糖的影响[J]. 海洋科学, 1996, (4): 12-13
- CAI M, QIN P, ZHANG K X, et al. Effects of TFS and BML on blood glucose in mice[J]. Marine Sciences, 1996, (4): 12-13
- [79] 胡芝华, 钦佩, 蔡鸣, 等. 互花米草总黄酮降血脂作用研究[J]. 海洋科学, 1998, (2): 16-18
- HU Z H, QIN P, CAI M, et al. Effect of total flavonoids of *Spartina alterniflora* on serum lipids *in vivo*[J]. Marine Sciences, 1998, (2): 16-18
- [80] 单承鸞, 马世宏, 季俊锋, 等. 互花米草在天然化妆品中的应用研究[J]. 中国野生植物资源, 2016, 35(3): 71-73
- SHAN C Y, MA S H, JI J F, et al. Application and research of *Spartina* in natural cosmetics[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2016, 35(3): 71-73
- [81] 刘振, 张侠, 尹海波, 等. 互花米草 BADH 基因的克隆与定量表达分析[J]. 河南农业科学, 2018, 47(11): 45-49
- LIU Z, ZHANG X, YIN H B, et al. Cloning and quantitative expression analysis of BADH gene from *Spartina alterniflora*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(11): 45-49
- [82] 徐璐, 尹海波, 张侠, 等. 互花米草 *NHX1* 基因的 cDNA 全长克隆、序列信息及定量表达分析[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 34-38
- XU L, YIN H B, ZHANG X, et al. Full-length cloning, sequence information and quantitative expression analysis of *NHX1* gene from *Spartina alterniflora*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(8): 34-38
- [83] CHEN Q K, CHEN B, CHEN H L, et al. An innovative strategy for reciprocal distant hybridization between *Spartina alterniflora* and rice[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(12): 2604-2611
- [84] CHEN Q K, TIAN C Y, SHA W F, et al. Exploration and innovation of distant hybridization germplasm of *Oryza sativa* and *Spartina alterniflora*[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(1): 131-133
- [85] 丁建, 杨盈, 谢嘉华, 等. 一株互花米草耐重金属内生菌的分离及其特性分析[J]. 泉州师范学院学报, 2014, 32(6): 10-14
- DING J, YANG Y, XIE J H, et al. Isolation and characterization of an endophytic metal tolerant bacterium from *Spartina alterniflora*[J]. Journal of Quanzhou Normal University, 2014, 32(6): 10-14