

炭化液对 NaCl 胁迫下高丹草种子萌发和幼苗生长的影响

梁玉¹, 李金凤¹, 崔键^{1,①}, 李文平², 常雅军¹, 汪帆², 刘晓静¹, 姚东瑞^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源研究与利用重点实验室
江苏省水生植物资源与水环境修复工程研究中心, 江苏 南京 210014; 2. 江苏沿海生态科技发展有限公司, 江苏 南京 211800]

摘要: 为探讨炭化液对 NaCl 胁迫下高丹草(*Sorghum bicolor* × *sudanense*) 种子萌发和幼苗生长的影响, 利用工程水生植物金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Linn.) 和苦草[*Vallisneria natans* (Lour.) Hara] 制备炭化液, 研究了 NaCl 胁迫下 2 种炭化液及其稀释比例对高丹草种子萌发及幼苗生长和生理指标的影响。结果显示: 在 0~16 g · L⁻¹ NaCl 范围内, 高丹草种子的发芽率、发芽势和发芽指数随着 NaCl 质量浓度的提高呈下降趋势, 在 16 g · L⁻¹ NaCl 条件下发芽率仅 5.6%; 种子萌发阶段的耐盐适应质量浓度、耐盐半致死质量浓度和耐盐极限质量浓度分别为 4.00、8.03 和 15.06 g · L⁻¹。在 4 g · L⁻¹ NaCl 条件下, 添加金鱼藻炭化液和苦草炭化液(稀释比例 1:15) 对高丹草种子发芽势、发芽率和发芽指数的影响不显著, 但总体上显著($P < 0.05$) 促进了芽长和根长; 且处理 10 和 15 d, 金鱼藻炭化液处理的芽长和根长分别较苦草炭化液处理显著增加。在 8~16 g · L⁻¹ NaCl 条件下, 添加金鱼藻炭化液(稀释比例 1:15) 总体上显著增加了高丹草种子的发芽势、发芽率、发芽指数、芽长和根长。在 8 g · L⁻¹ NaCl 条件下, 添加稀释比例 1:15 和 1:5 的金鱼藻炭化液均较对照显著增加了高丹草幼苗的株高、根长、茎长、叶长、总鲜质量、地上部鲜质量、地下部鲜质量和根冠比, 显著降低了超氧阴离子含量、过氧化氢酶活性和可溶性蛋白质含量。综上所述, 较高质量浓度 NaCl 胁迫下, 添加金鱼藻炭化液显著促进了高丹草的种子萌发, 有效减少了高丹草幼苗受到的氧化损伤, 进而缓解了 NaCl 对高丹草种子萌发和幼苗生长的胁迫作用。

关键词: 高丹草; 炭化液; NaCl 胁迫; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: Q945.78; TK69; X173 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)03-0088-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.03.08

Effects of carbonized solutions on seed germination and seedling growth of *Sorghum bicolor* × *sudanense* under NaCl stress LIANG Yu¹, LI Jinfeng¹, CUI Jian^{1,①}, LI Wenping², CHANG Yajun¹, WANG Fan², LIU Xiaojing¹, YAO Dongrui^{1,①} [1. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Jiangsu Engineering Research Center of Aquatic Plant Resources and Water Environment Remediation, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Coastal Ecological Technology Development Co., Ltd., Nanjing 211800, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(3): 80-88, 96

Abstract: To investigate the effects of carbonized solutions on seed germination and seedling growth of *Sorghum bicolor* × *sudanense* under NaCl stress, the carbonized solutions were prepared by using engineering aquatic plants *Ceratophyllum demersum* Linn. and *Vallisneria natans* (Lour.) Hara, and the effects of two carbonized solutions and their dilution ratios on seed germination and growth and

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022304); 江苏省沿海开发集团有限公司“揭榜挂帅”项目(2022YHTDJB015)

作者简介: 梁玉(1998—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事滨海湿地生态与修复方面的研究。

①通信作者 E-mail: jcu@cnbg.net; shuishengzu@126.com

引用格式: 梁玉, 李金凤, 崔键, 等. 炭化液对 NaCl 胁迫下高丹草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(3): 80-88, 96.

physiological indexes of seedlings of *S. bicolor* × *sudanense* under NaCl stress were explored. The results show that within the range of 0–16 g · L⁻¹ NaCl, the germination rate, germination potential, and germination index of *S. bicolor* × *sudanense* seeds decrease with the increase of NaCl mass concentration, and the germination rate is only 5.6% under 16 g · L⁻¹ NaCl condition; the salt tolerance adaptive mass concentration, salt tolerance semi-lethal mass concentration, and salt tolerance limit mass concentration at seed germination stage are 4.00, 8.03, and 15.06 g · L⁻¹, respectively. Under 4 g · L⁻¹ NaCl condition, the addition of carbonized solutions of *C. demersum* and *V. natans* (dilution ratio 1 : 15) have no significant effects on the germination potential, germination rate, and germination index of *S. bicolor* × *sudanense* seeds, but significantly ($P < 0.05$) promote the shoot length and root length in general; after 10 and 15 d of treatment, the shoot length and root length of the carbonized solution treatment of *C. demersum* increase significantly compared with those of the carbonized solution treatment of *V. natans*. Under 8–16 g · L⁻¹ NaCl conditions, the addition of carbonized solution of *C. demersum* (dilution ratio 1 : 15) significantly increases the germination potential, germination rate, germination index, shoot length, and root length of *S. bicolor* × *sudanense* seeds in general. Under 8 g · L⁻¹ NaCl condition, the addition of carbonized solutions of *C. demersum* diluted at the ratios of 1 : 15 and 1 : 5 both significantly increase the height, root length, stem length, leaf length, total fresh mass, fresh mass of above-ground part, fresh mass of under-ground part, and root/shoot ratio of *S. bicolor* × *sudanense* seedlings compared with the control, and significantly decrease the superoxide anion content, catalase activity, and soluble protein content. In conclusion, under the relatively high mass concentrations of NaCl stress, the addition of carbonized solution of *C. demersum* significantly promote the germination of *S. bicolor* × *sudanense* seeds, effectively reduce the oxidative damage of *S. bicolor* × *sudanense* seedlings, and then alleviate the stress of NaCl on seed germination and seedling growth of *S. bicolor* × *sudanense*.

Key words: *Sorghum bicolor* × *sudanense*; carbonized solution; NaCl stress; seed germination; seedling growth

在生态退化、环境污染、资源枯竭和气候变化的背景下,生物质废物资源的高效利用已受到广泛关注并成为当前生态循环和清洁生产领域研究的热点^[1]。随着全球“碳达峰碳中和”战略的推进,生物质的热解炭化技术再度兴起,并在温室气体减排、土壤改良和污染修复等方面的成效显著^[2-4]。然而,热解炭化的生物质材料多集中在含水量相对低的农林废弃物,热解方法也集中在快速热解、慢速热解、热解气化和微波热解^[3],较少涉及水热炭化技术。水热炭化技术是一种新兴的高效处理含水量高的生物质的方法。随着水生态修复的推进,工程运维过程中产生大量水生植物残体,如水龙〔*Ludwigia adscendens* (Linn.) Hara〕、绿狐尾藻〔*Myriophyllum quitense* Kunth〕、金鱼藻〔*Ceratophyllum demersum* Linn.〕和苦草〔*Vallisneria natans* (Lour.) Hara〕等,因其含水量较高及受堆放和储运条件限制,难以及时有效地对其资源化利用,植株死亡腐烂还会造成二次污染^[4],水热炭化技术为此类工程水生植物残体的高效利用提供了一种解决方案。由于水的添加,水热炭化过程中产生大量具有复杂组成的液相产物(简称炭化液),若不加以利用,将对水土环境产生一定的负面影响,制

约产业的可持续发展。

当前,炭化液的应用方向集中在微藻培养^[5-6]、厌氧消化^[7]和湿式氧化^[8]等,且炭化液富含碳和营养元素,在绿色农业生产方面也具有较大的潜在利用价值。例如:Jiang等^[9]从炭化液中提取腐殖质生产富含腐殖酸钾的水溶性肥料;He等^[10]利用炭化液部分替代尿素,土壤溶解性有机质的腐殖化指数提高了12.3%~26.8%,水稻(*Oryza sativa* Linn.)产量提高了6.3%~34.1%;Mau等^[11]将炭化液直接用于蔬菜种植,发现幼苗土培0~20 d炭化液处理组与对照组(添加自来水)生菜(*Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort.)的生长相似,无显著差异,土培40 d时炭化液处理组显著($P < 0.05$)促进了生菜的生长。此外,莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii* P. A. Dangeard)、水稻和白菜(*Brassica rapa* var. *glabra* Regel)等植物的生长效应还受到炭化液的制备材料及稀释比例的影响,表现为促进、抑制或者双重化感效应^[10,12-13]。中国有面积 2.3×10^6 hm²沿海滩涂和 1.0×10^8 hm²内陆盐碱地,这些是不可多得的土地后备资源,综合利用潜力巨大^[14]。但土壤盐碱化严重制约植物的生长发育,植物在不同生育期对盐分的敏感性不同,幼苗期更为

敏感^[15],因而研究盐胁迫下植物种子萌发和幼苗生长状况,对于开发利用沿海滩涂以及内陆盐碱地资源,实现碳中和具有重要意义。

高丹草 (*Sorghum bicolor* × *sudanense*) 为高粱 [*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench] 与苏丹草 [*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf)] 的杂交种,具有高大直立、茎粗叶宽、产量高等特点,是多种生态脆弱区(含干旱区和盐碱区)生态综合治理的先锋植物,也是利用盐碱地等边际土壤助力碳达峰碳中和的重要植物物种^[16]。盐胁迫下高丹草的种子萌发和幼苗生长已有相关研究,盐浓度对高丹草种子萌发影响较大^[17],但其种子萌发的相关耐盐阈值及炭化液对其种子萌发的作用效果和机制尚不明晰。因此,本研究利用高含水量的工程水生植物金鱼藻和苦草制备炭化液,在探究高丹草种子萌发耐盐阈值的前提下,进一步探究不同植物种类制备的炭化液及其稀释比例对 NaCl 胁迫下高丹草种子萌发和幼苗生长的作用,以期对盐碱地的植物改良提供理论依据和参考,为高含水量生物质材料的水热炭化产物拓展产业链路径。

1 材料和方法

1.1 材料

供试高丹草种子购自沭阳县柯帆苗木场;2种水生植物材料金鱼藻和苦草均来自作者所在团队2021年8月在无锡荡口古镇河道生态修复运维过程产生的残体。金鱼藻和苦草炭化液在 THL-SRS-5L 水热生物炭化炉(河南众信蓝天环保装备有限公司)中制备:分别称取 1.0 kg 金鱼藻(含水量 93.4%)和苦草(含水量 91.3%)鲜样粉碎,加入去离子水 3 L,经水热反应釜(300 °C, 3.0 h),冷却、沉淀 24 h 后,获取的上清液分别为金鱼藻炭化液和苦草炭化液。分别使用 NexION 350X 电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS(美

国 PerkinElmer 公司)、Vanquish UPLC 超高效液相色谱仪(美国 Thermo 公司)和 Q Exactive HF-X 高分辨质谱仪(美国 Thermo 公司)对炭化液中矿质元素和代谢物进行检测;使用雷磁 PHS-25 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定炭化液 pH 值;使用 Yena multi N/C 3100 总有机碳/总氮分析仪(德国耶拿公司)测定炭化液总有机碳(TOC)和总有机氮(TON)含量。金鱼藻和苦草炭化液的详细测试指标和结果见表 1 和表 2。

1.2 处理方法

1.2.1 NaCl 胁迫下的种子萌发实验 挑选籽粒饱满且大小基本一致的高丹草种子,先用质量体积分数 0.2% CuSO₄ 溶液浸泡 15 min,然后用无菌水冲洗 3~5 遍后置于 30 °C 水浴(去离子水)浸种 24 h,将种子均匀摆在铺有 2 层滤纸的培养皿内,每皿 30 粒。参考马志媛等^[18]的方法,设置 NaCl 质量浓度为 0(对照)、2、4、6、8、10、12 和 16 g · L⁻¹,其中对照为去离子水。每个培养皿摆放 30 粒种子,分别加入 15 mL 各处理液,置于光照培养箱[光照度 5 000~5 500 lx,光照时间 14 h · d⁻¹,温度(25±2) °C],培养 7 d。每个处理 3 次重复。发芽率达到对照发芽率 75% 时的 NaCl 质量浓度为耐盐适应质量浓度,发芽率达到对照发芽率 50% 时的 NaCl 质量浓度为耐盐半致死质量浓度,发芽率达到对照发芽率 10% 时的 NaCl 质量浓度为耐盐致死质量浓度^[19]。

1.2.2 炭化液缓解 NaCl 胁迫下的种子萌发实验 分别将金鱼藻炭化液和苦草炭化液用去离子水按照体积比 1:15 稀释。根据高丹草种子萌发耐盐适应质量浓度,共设置 6 个 NaCl 胁迫和炭化液复合处理,分别为去离子水,去离子水-金鱼藻炭化液,去离子水-苦草炭化液,4 g · L⁻¹ NaCl-去离子水,4 g · L⁻¹ NaCl-金鱼藻炭化液,4 g · L⁻¹ NaCl-苦草炭化液。每个处理 3 次重复。浸种处理和培养条件与“1.2.1”一

表 1 金鱼藻和苦草炭化液的矿质元素含量和 pH 值¹⁾

Table 1 Mineral element contents and pH values of carbonized solutions of *Ceratophyllum demersum* Linn. and *Vallisneria natans* (Lour.) Hara¹⁾

炭化液 Carbonized solution	含量/(mg · L ⁻¹) Content										pH 值 pH value
	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	K	Na	TOC	TON	
CD	549.390	0.715	0.002	0.006	67.024	3.920	486.070	98.430	1 433.00	431.60	7.19
VN	8.220	0.054	0.002	—	34.762	0.732	690.260	302.160	1 453.00	389.10	7.61

¹⁾ CD: 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* Linn.; VN: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara. TOC: 总有机碳 Total organic carbon; TON: 总有机氮 Total organic nitrogen. —: 含量低于 0.001 mg · L⁻¹ The content is less than 0.001 mg · L⁻¹.

表2 金鱼藻和苦草炭化液中各类代谢物数量及相对含量¹⁾Table 2 Number and relative content of each kind of metabolite in carbonized solutions of *Ceratophyllum demersum* Linn. and *Vallisneria natans* (Lour.) Hara¹⁾

CS	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7		其他 Others		合计 Total	
	n	C/%	n	C/%	n	C/%	n	C/%	n	C/%	n	C/%	n	C/%	n	C/%	n	C/%
CD	89	31.93	55	25.19	28	19.78	27	13.49	23	5.10	15	2.09	10	1.25	11	1.16	258	100.00
VN	89	31.00	54	24.03	28	18.59	27	16.08	23	4.76	15	1.72	10	2.63	11	1.18	257	100.00

¹⁾ CS: 炭化液 Carbonized solution; CD: 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* Linn.; VN: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara. M1: 脂质和类脂分子 Lipids and lipid-like molecules; M2: 有机杂环化合物 Organoheterocyclic compounds; M3: 有机酸及其衍生物 Organic acids and derivatives; M4: 苯环型化合物 Benzenoids; M5: 有机氧化合物 Organic oxygen compounds; M6: 苯丙素类和聚酮类 Phenylpropanoids and polyketides; M7: 生物碱及其衍生物 Alkaloids and derivatives. n: 数量 Number; C: 相对含量 Relative content.

致,培养 15 d。

筛选出对 NaCl 胁迫缓解效果较佳的炭化液种类后,为了研究炭化液对不同质量浓度 NaCl 处理下高丹草种子萌发的影响,设置 0(对照)、4、8、12、16 g·L⁻¹ NaCl,其中对照为去离子水。浸种处理和培养条件与“1.2.1”一致,培养 7 d。

1.2.3 炭化液缓解 NaCl 胁迫下的幼苗生长实验 挑选籽粒饱满且大小基本一致的高丹草种子,先用质量体积分数 0.2% CuSO₄ 溶液浸泡 15 min,然后用无菌水冲洗 3~5 遍后播种到盛有 30 g 蛭石的纸杯中,每个纸杯播种 10 粒,待幼苗株高 4~5 cm 时,定苗 8 株,进行 NaCl 胁迫处理和炭化液处理。根据高丹草种子萌发耐盐半致死质量浓度,将 30 mL 8 g·L⁻¹ NaCl 溶液于 3 d 内分 2 次添加至装有蛭石的纸杯,NaCl 溶液 2 次加完后开始计算处理时间。将金鱼藻炭化液用去离子水分别按照体积比 1:30、1:15、1:5 稀释。分别于处理 5 和 15 d 向各纸杯中加入稀释比例为 1:30、1:15、1:5 的金鱼藻炭化液,每次每个纸杯加 30 mL,并以 30 mL 去离子水为对照。每个处理 3 次重复。幼苗置于光照度 5 000~5 500 lx、光照时间 14 h·d⁻¹、温度(25±2)℃ 恒温室内,培养 25 d 后,测定高丹草幼苗的生长及相关生理指标。

1.3 指标测定及方法

以胚芽突破种皮 2 mm 作为发芽标准,每隔 24 h 观察记录 1 次种子发芽状况。使用直尺(精度 0.1 cm)和游标卡尺(精度 0.1 mm)测量芽长和根长。分别根据下列公式计算种子的发芽势、发芽率、发芽指数、相对发芽率和相对盐害率:发芽势=(第 3 天的发芽种子数/供试种子数)×100%;发芽率=(第 7 天的发芽种子数/供试种子数)×100%;发芽指数=Σ(Gt/Dt),式中,Gt 为某天的发芽种子数,Dt 为相应的发芽天数;相对发芽率=(处理的发芽率/对照的

发芽率)×100%;相对盐害率=[(对照的发芽率-处理的发芽率)/对照的发芽率]×100%。

各处理随机取 3 株高丹草幼苗,清水冲洗干净后,用滤纸吸干幼苗表面水分,使用直尺测量幼苗的株高、根长(最长根长)、茎长(茎基部至植株顶端向下第 2 枚叶片处的距离)和叶长(从植株顶端向下第 2 枚叶片的长度)。使用电子天平(精度 0.01 g)称量单株的总鲜质量、地上部鲜质量和地下部鲜质量,计算根冠比(地下部鲜质量与地上部鲜质量的比值)。在各处理 8 株幼苗上随机取 4 g 左右无病斑新鲜叶片,液氮速冻后置于-80℃ 保存,用于相关生理指标的测定。采用紫外吸收法^[20]测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用氮蓝四唑(NBT)还原法^[21]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用分光光度法^[22]测定过氧化氢(H₂O₂)含量,采用羟胺氧化法^[23]测定超氧阴离子(O₂⁻)含量,采用考马斯亮蓝法^[24]¹⁸⁴⁻¹⁸⁵测定可溶性蛋白质含量,采用体积分数 95%乙醇比色法^[24]¹³⁰⁻¹³⁷测定总叶绿素含量。上述指标均重复测定 3 次,结果取平均值。分别根据下列公式计算 CAT 比活力和 SOD 比活力:CAT 比活力=CAT 活性/可溶性蛋白质含量;SOD 比活力=SOD 活性/可溶性蛋白质含量。

1.4 数据处理和分析

利用 EXCEL 2016 软件对种子萌发指标以及幼苗生长和生理指标进行整理和统计;利用 SPSS 26.0 软件对相关数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(最小显著差异法和 Duncan's 新复极差法)。

2 结果和分析

2.1 NaCl 胁迫对高丹草种子萌发的影响

不同质量浓度 NaCl 处理对高丹草种子萌发的影

响见表3。由表3可见:随着NaCl质量浓度的提高,高丹草种子的发芽势、发芽率以及发芽指数呈下降趋势。与 $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理相比, $2\sim 16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数均显著($P<0.05$)降低,其中,2和 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理间种子的发芽势、发芽率和发芽指数差异不显著; $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数较 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理显著降低; $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数较 $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理明显降低,且发芽势和发芽指数的降幅达到显著水平; $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数较 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理显著降低。与 $0\sim 8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理相比, $10\sim 16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理种子的发芽

率、发芽势和发芽指数均大幅度显著降低。随着NaCl质量浓度的提高,高丹草种子的相对盐害率明显升高,其中,2和 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理的种子相对盐害率分别为13.7%和21.6%,显著低于 $6\sim 16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理,且 $16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理种子的相对盐害率高达94.3%。

为了进一步明确高丹草种子萌发期对NaCl胁迫的耐受程度,将NaCl质量浓度(x)与高丹草种子的相对发芽率(y)建立拟合方程,得到一元二次函数 $y=0.0004x^2-0.0661x+1.0049$, $R^2=0.9931$ 。高丹草种子萌发期对NaCl的耐盐适应质量浓度、耐盐半致死质量浓度和耐盐极限质量浓度分别为 4.00 、 8.03 和 $15.06\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表3 不同质量浓度NaCl处理对高丹草种子萌发的影响($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 3 Effects of different mass concentrations of NaCl treatments on seed germination of *Sorghum bicolor* × *sudanense* ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

NaCl 质量浓度/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) Mass concentration of NaCl	发芽势/% Germination potential	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	相对盐害率/% Relative salt damage rate	相对发芽率/% Relative germination rate
0	64.4±3.9a	97.8±3.9a	27.4±0.8a	0.0±0.0e	100.0±0.0a
2	47.8±5.1b	84.4±5.1b	21.5±2.0b	13.7±5.2d	86.3±5.2b
4	44.4±1.9b	76.7±8.8b	19.9±1.8b	21.6±9.0d	78.4±9.0b
6	33.3±5.8c	60.0±6.7c	15.5±1.3c	38.7±6.8c	61.3±6.8c
8	23.3±5.8d	50.0±8.8c	11.2±0.9d	48.9±9.0c	51.1±9.0c
10	7.8±1.9e	33.3±3.3d	6.7±0.9e	65.9±3.4b	34.1±3.4d
12	6.7±3.3ef	30.0±5.8d	5.4±0.8e	69.3±5.9b	30.7±5.9d
16	0.0±0.0f	5.6±3.9e	0.9±0.2f	94.3±3.9a	5.7±3.9e

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences.

2.2 炭化液对NaCl胁迫下高丹草种子萌发的缓解效应

金鱼藻和苦草炭化液(稀释比例1:15)对 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理下高丹草种子萌发的影响见表4。由表4可见:在同一质量浓度NaCl条件下,金鱼藻和苦草炭化液处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数与对应的对照差异不显著,说明金鱼藻和苦草炭化液对 0 和 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下高丹草种子萌发的影响较小,但金鱼藻炭化液处理种子的发芽率和发芽指数高于苦草炭化液。在同一炭化液条件下, 0 和 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl处理间种子的发芽势、发芽率和发芽指数均存在显著($P<0.05$)差异。

由表4还可见:处理5d,在 $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下,金鱼藻和苦草炭化液处理高丹草种子的芽长和根长总体较对照显著增加;在 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下,金鱼藻和苦草炭化液处理种子的根长较对照显著增加,

芽长与对照无显著差异。处理10和15d,在 0 和 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下,金鱼藻和苦草炭化液处理种子的芽长和根长总体较对应的对照显著增加。在 $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下,苦草炭化液对种子芽长和根长的促进作用较金鱼藻炭化液更佳;而在 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下,金鱼藻炭化液对高丹草种子芽长和根长受到的NaCl胁迫的缓解效果较苦草炭化液更佳。

为了进一步验证金鱼藻炭化液对NaCl胁迫下高丹草种子萌发的影响,增加了NaCl胁迫强度($8\sim 16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl),结果见表5。由表5可见:随着NaCl质量浓度的提高,金鱼藻炭化液(稀释比例1:15)处理下高丹草种子的发芽势、发芽率和发芽指数总体呈下降趋势,其中, $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下金鱼藻炭化液处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数与 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下均无显著差异。同一质量浓度NaCl条件下,金鱼藻炭化液处理高丹草种子的发芽势、发芽

表4 金鱼藻和苦草炭化液(稀释比例1:15)对4 g·L⁻¹ NaCl处理下高丹草种子萌发的影响($\bar{X}\pm SE$)¹⁾Table 4 Effects of carbonized solutions of *Ceratophyllum demersum* Linn. and *Vallisneria natans* (Lour.) Hara (dilution ratio 1:15) on the germination of *Sorghum bicolor* × *sudanense* seeds under 4 g·L⁻¹ NaCl treatment ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

C	CS	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数	芽长/cm Shoot length			根长/cm Root length		
		Germination potential	Germination rate	Germination index	5 d	10 d	15 d	5 d	10 d	15 d
0	CK	70.0±6.7aA	90.0±3.3aA	27.0±1.0aA	1.09±0.34bA	3.41±0.75bA	6.02±0.53bA	0.23±0.05cA	0.35±0.11bA	1.03±0.22cA
	CD	63.3±9.4aA	90.0±0.0aA	25.3±1.9aA	1.16±0.29abA	3.93±0.87abA	9.05±0.50aA	1.31±0.44bA	3.78±1.34aA	8.74±0.83bA
	VN	65.6±8.4aA	85.6±5.1aA	25.2±2.0aA	1.33±0.46aA	4.28±1.25aA	9.16±0.78aA	1.59±0.55aA	4.30±1.01aA	9.67±0.98aA
4	CK	51.7±2.4aB	70.0±5.8aB	19.8±1.3aB	0.65±0.16aB	1.17±0.34cB	1.88±0.12cB	0.19±0.04bB	0.29±0.16cA	0.43±0.07cB
	CD	40.0±8.8aB	74.4±11.7aB	19.5±3.3aB	0.79±0.30aB	2.44±0.55aB	6.26±0.57aB	0.90±0.34aB	2.38±0.66aB	3.28±0.54aB
	VN	44.4±1.9aB	64.4±5.1aB	18.5±1.4aB	0.65±0.30aB	1.71±0.43bB	5.02±0.53bB	0.74±0.36aB	1.76±0.39bB	2.43±0.51bB

¹⁾C: NaCl 质量浓度 Mass concentration of NaCl (g·L⁻¹). CS: 炭化液 Carbonized solution; CK: 对照 The control; CD: 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* Linn.; VN: 苦草 *Vallisneria natans* (Lour.) Hara. 同列中不同小写字母表示同一质量浓度 NaCl 不同炭化液处理间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different carbonized solution treatments with the same mass concentration of NaCl; 同列中不同大写字母表示同一炭化液不同质量浓度 NaCl 处理间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different mass concentrations of NaCl treatments with the same carbonized solution.

表5 金鱼藻炭化液(稀释比例1:15)对不同质量浓度NaCl处理下高丹草种子萌发的影响($\bar{X}\pm SE$)¹⁾Table 5 Effect of carbonized solution of *Ceratophyllum demersum* Linn. (dilution ratio 1:15) on the germination of *Sorghum bicolor* × *sudanense* seeds under different mass concentrations of NaCl treatments ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

C	CS	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数	芽长/cm	根长/cm
		Germination potential	Germination rate	Germination index	Shoot length	Root length
0	CK	67.8±5.1aA	91.1±3.8aA	26.8±2.4aA	5.90±0.59bA	3.90±1.19bA
	CD	71.1±7.7aA	95.6±7.7aA	28.1±2.3aA	9.23±0.88aA	8.90±1.98aA
4	CK	41.1±1.9aB	80.0±6.7aB	19.7±0.7aB	1.61±0.15bB	0.20±0.05bB
	CD	46.7±3.3aB	78.9±5.1aB	21.2±1.8aB	4.12±0.70aB	2.06±0.53aB
8	CK	27.8±3.9bC	61.1±5.1bC	13.7±1.2bC	0.98±0.20bC	0.17±0.02bB
	CD	47.8±6.9aB	73.3±3.3aB	19.0±1.7aB	1.64±0.13aC	0.53±0.10aC
12	CK	8.9±1.9bD	41.1±3.8bD	6.7±1.4bD	0.33±0.09bD	0.13±0.02bB
	CD	20.0±5.8aC	52.2±1.9aC	10.8±1.8aC	0.92±0.15aD	0.46±0.08aC
16	CK	0.0±0.0bE	5.6±1.9bE	1.0±0.6bE	0.21±0.06bD	0.12±0.01bB
	CD	6.7±0.0aD	26.7±3.3aD	4.3±0.6aD	0.44±0.07aE	0.28±0.04aC

¹⁾C: NaCl 质量浓度 Mass concentration of NaCl (g·L⁻¹). CS: 炭化液 Carbonized solution; CK: 对照 The control; CD: 金鱼藻 *Ceratophyllum demersum* Linn. 同列中不同小写字母表示同一质量浓度 NaCl 不同炭化液处理间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different carbonized solution treatments with the same mass concentration of NaCl; 同列中不同大写字母表示同一炭化液不同质量浓度 NaCl 处理间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different mass concentrations of NaCl treatments with the same carbonized solution.

率和发芽指数总体高于对应的对照,其中,在4 g·L⁻¹ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数与对照无显著差异;在8和12 g·L⁻¹ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数均较对应的对照显著升高,发芽势的增幅分别为71.9%和124.7%,发芽率的增幅分别为20.0%和27.0%,发芽指数的增幅分别为38.7%和61.2%;在16 g·L⁻¹ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理种子的发芽势、发芽率和发芽指数均较对照显著升高,发芽率和发芽指数的增幅分别为376.8%和330.0%。说明添加金鱼藻炭化液对较高质量浓度NaCl(8~16 g·L⁻¹ NaCl)条件下高丹草的种子萌发有促进作用。

由表5还可见:随着NaCl质量浓度的提高,金鱼藻炭化液处理下高丹草种子的芽长显著变短;种子根长在0~8 g·L⁻¹ NaCl 条件下显著变短,在8~16 g·L⁻¹ NaCl 条件下无显著差异。在同一质量浓度NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理种子的芽长和根长均较对应的对照显著增加,在0、4、8、12和16 g·L⁻¹ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理种子芽长的增幅分别为56.4%、155.9%、67.3%、178.8%和109.5%,根长的增幅分别为128.2%、930.0%、211.8%、253.8%和133.3%。说明稀释比例1:15的金鱼藻炭化液可缓解高丹草种子萌发过程中受到的NaCl胁迫,对0~16 g·L⁻¹ NaCl 质量浓度处理下高丹草种子萌发的芽长和根长生长均有显著促进作用。

2.3 不同稀释比例金鱼藻炭化液对 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下高丹草幼苗生长的缓解效应

不同稀释比例金鱼藻炭化液对 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下高丹草幼苗生长指标的影响见表6。由表6可见:在 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,随着金鱼藻炭化液稀释比例的增加,高丹草幼苗的株高、根长、茎长、叶长、总鲜质量、地上部鲜质量、地下部鲜质量和根冠比总体呈下降趋势。与对照相比较,稀释比例 1:30 的金鱼藻炭化液处理的这 8 个指标均有所增加,但差异不显著;而稀释比例 1:15 和 1:5 的金鱼藻炭化液处理的这 8 个指标显著 ($P < 0.05$) 增加。

不同稀释比例金鱼藻炭化液对 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处

理下高丹草幼苗生理指标的影响见表7。由表7可见:在 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,稀释比例 1:30、1:15 和 1:5 的金鱼藻炭化液处理的高丹草幼苗的总叶绿素(Chl)含量、过氧化氢(H_2O_2)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和 SOD 比活力与对照无显著差异,而超氧阴离子(O_2^-)含量、过氧化氢酶(CAT)活性和可溶性蛋白质(SP)含量较对照显著降低,降幅分别为 35.1%~37.8%、43.0%~72.7%和 23.1%~31.1%;稀释比例 1:30 和 1:15 的金鱼藻炭化液处理的 CAT 比活力与对照无显著差异,稀释比例 1:5 的金鱼藻炭化液处理的 CAT 比活力较对照显著降低,降幅为 51.6%。

表6 不同稀释比例金鱼藻炭化液对 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下高丹草幼苗生长指标的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 6 Effects of different dilution ratios of carbonized solution of *Ceratophyllum demersum* Linn. on the growth indexes of *Sorghum bicolor* × *sudanense* seedlings under $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl treatment ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

稀释比例 Dilution ratio	株高/cm Height	根长/cm Root length	茎长/cm Stem length	叶长/cm Leaf length	总鲜质量/g Total fresh mass	地上部鲜质量/g Fresh mass of above-ground part	地下部鲜质量/g Fresh mass of under-ground part	根冠比 Root/shoot ratio
CK	21.67±1.58c	20.03±1.22b	4.23±0.15c	17.43±1.67c	2.64±0.42b	1.43±0.23b	1.22±0.19b	0.86±0.05b
1:30	25.03±1.91bc	23.03±0.81b	4.67±0.35c	20.37±1.88bc	2.95±0.18b	1.52±0.07b	1.42±0.12b	0.93±0.05ab
1:15	26.97±2.17b	32.30±2.38a	5.47±0.25b	21.50±1.97ab	3.82±0.06a	1.91±0.09a	1.91±0.10a	1.00±0.10a
1:5	31.30±2.26a	25.67±5.88a	6.53±0.21a	24.77±2.10a	4.15±0.44a	2.07±0.18a	2.08±0.27a	1.01±0.05a

¹⁾ CK; 对照 The control. 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences.

表7 不同稀释比例金鱼藻炭化液对 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下高丹草幼苗生理指标的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 7 Effects of different dilution ratios of carbonized solution of *Ceratophyllum demersum* Linn. on the physiological indexes of *Sorghum bicolor* × *sudanense* seedlings under $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl treatment ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

稀释比例 Dilution ratio	总叶绿素 含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Total chlorophyll content	超氧阴离子 含量/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$) Superoxide anion content	过氧化氢 含量/($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$) Hydrogen peroxide content	超氧化物歧化酶 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) Superoxide dismutase activity	过氧化氢酶 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) Catalase activity	可溶性蛋白质 含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Soluble protein content	超氧化物歧化酶 比活力 Superoxide dismutase specific activity	过氧化氢酶 比活力 Catalase specific activity
CK	1.52±0.21a	0.37±0.01a	3.80±0.66a	182.02±23.02a	76.78±3.00a	9.73±1.16a	19.75±0.18a	6.47±1.14a
1:30	1.37±0.22a	0.24±0.03b	3.83±0.34a	179.52±29.53a	43.80±8.73b	6.83±0.27b	26.35±4.70a	6.45±1.53a
1:15	1.42±0.06a	0.23±0.03b	3.90±0.54a	168.39±5.45a	39.37±0.49b	7.48±0.42b	22.56±1.51a	5.27±0.27a
1:5	1.61±0.10a	0.23±0.02b	3.60±0.34a	174.52±19.61a	20.95±1.66c	6.70±0.26b	26.14±3.96a	3.13±0.30b

¹⁾ CK; 对照 The control. 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences.

3 讨 论

3.1 炭化液对 NaCl 胁迫下高丹草种子萌发的缓解效应

本研究中,在 $0 \sim 16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,高丹草种子的发芽率、发芽势和发芽指数均随着 NaCl 质量

浓度的提高呈下降趋势。乔佩等^[25]的研究结果显示: $0 \sim 400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下小麦 (*Triticum aestivum* Linn.) 种子的发芽率和发芽指数均随着 NaCl 质量浓度的提高而降低,与本研究结果一致。随着 NaCl 质量浓度的提高,高丹草种子的相对盐害率呈逐渐升高的趋势, $8 \sim 16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下种子的相对盐害率达到 48.9%~94.3%。这可能是 NaCl 溶液

中较高的离子浓度一方面增加了高丹草种子的渗透势,导致质壁分离,影响了种子的吸水能力,从而降低了种子的萌发力^[26];另一方面抑制了种子中代谢相关酶的活性,造成细胞内部代谢紊乱,抑制了种子的萌发^[27]。

在 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,随着处理时间的延长,高丹草种子的芽长和根长缓慢增加,盐胁迫症状愈加明显,由最初的叶尖泛黄,到叶尖和边缘干枯,幼苗逐渐萎蔫甚至死亡,说明 NaCl 胁迫时间越长,高丹草种子的芽长和根长生长受到的抑制越严重,推测 NaCl 胁迫通过渗透作用以及离子毒害等,限制高丹草根系的吸收能力,抑制高丹草幼苗的生长。在 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,添加金鱼藻和苦草炭化液(稀释比例 1:15)总体上促进了高丹草种子芽长和根长的生长,且添加金鱼藻炭化液的促进作用更佳。原因可能在于,与苦草炭化液相比,金鱼藻炭化液的 pH 值较低,且金鱼藻炭化液中 Na 和 K 的含量均低于苦草炭化液,而在 NaCl 胁迫下,离子浓度过高会损伤细胞甚至导致细胞死亡,尤其是 Na^+ 含量升高^[28],因此,在 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理高丹草种子的芽长和根长总体上显著大于苦草炭化液处理。同时,与苦草炭化液相比较,金鱼藻炭化液中矿物质元素(Fe、Mn、Zn、Ca 和 Mg)含量及总有机氮含量更高,可为植物生长提供更多的养分,进而促进了高丹草种子芽长和根长的伸长生长。

金鱼藻和苦草炭化液(稀释比例 1:15)处理对 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 条件下高丹草种子发芽势、发芽率和发芽指数的影响较小,与对照均无显著差异,说明该 NaCl 胁迫条件下添加这 2 种炭化液均未能影响高丹草种子内的离子动态平衡。在 8、12 和 $16\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理较对应的对照显著 ($P<0.05$) 促进高丹草种子的发芽势、发芽率和发芽指数,表明添加金鱼藻炭化液对较高质量浓度 NaCl 胁迫下的高丹草种子萌发有促进作用,这可能与 Na^+/K^+ 平衡有关。随着 NaCl 浓度的提高, Na^+ 、 Cl^- 在植物体内大量积累, Na^+ 含量高于 K^+ 含量,导致 Na^+/K^+ 比升高,产生离子胁迫以及养分失衡,抑制酶促反应^[29]。本研究中,金鱼藻炭化液中 Na 含量较低,K 含量较高,调节 Na^+/K^+ 平衡,在质量浓度较高的 NaCl 溶液中避免了植物根系吸收大量的 Na^+ ,缓解了细胞的渗透胁迫,从而促进种子萌发。

3.2 炭化液对 NaCl 胁迫下高丹草幼苗生长的缓解效应

炭化液可以缓解 NaCl 胁迫对植物造成的渗透胁迫,可能通过诱导植物体内相关生长素的合成^[30] 促进植物生长,增强根系活力,进而提高幼苗的根冠比,具体原因包括:1)炭化液中含有 Fe、Mn、Ca、Mg 等必需元素,在调节植物体的许多生命进程中都起着极为关键的作用,如光合作用、线粒体呼吸、营养物质运输和激素合成等,可能提高植物生长和抗性^[31-32];2)炭化液中的微量元素以及部分有机物质可能具有较强的微生物亲和性^[33],可提高部分微生物和酶的活性,在一定程度上缓解盐害^[34],炭化液中的有机物也可作为微生物生长的碳源,改变了微生物的群落结构,间接提高了植物的抗盐能力;3)炭化液中的某些化合物(如倍半萜类化合物)可能与生长相关蛋白质相互作用,起到激素类似物的作用^[30],进而促进幼苗生长。在 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 条件下,金鱼藻炭化液处理对高丹草幼苗生长的促进效应随着稀释比例的增加而减小,对高丹草幼苗生长的促进效应由高至低依次为稀释比例 1:5、1:15、1:30 的金鱼藻炭化液。盐胁迫会抑制植物细胞的增殖生长,进而影响植物的生长,减少干质量的积累^[35],同时,植物的根冠比可以用来衡量其地上部和地下部的相关性。与对照相比,稀释比例为 1:15 和 1:5 的金鱼藻炭化液处理显著促进了高丹草幼苗生长。

植物抵抗盐胁迫是一个复杂的生物学过程,在这个过程中通常以可溶性蛋白质含量、过氧化氢(H_2O_2)含量、超氧阴离子(O_2^-)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性等生理指标作为监测指标。盐诱导的离子毒性损害光合反应中心,使电子吸收过载,导致 O_2^- 、 H_2O_2 和 $\cdot\text{OH}$ 等活性氧(ROS)的产生并可通过氧化损伤蛋白质、DNA 和 RNA 以及膜导致细胞损伤和死亡^[36]。SOD 在活性氧清除过程中首先发挥作用,将 O_2^- 迅速歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,而歧化反应产生的 H_2O_2 会立即被过氧化氢酶(CAT)等酶分解为 H_2O ,从而降低 ROS 对细胞造成的功能性伤害^[37]。本研究中,不同稀释比例的金鱼藻炭化液处理高丹草幼苗的 O_2^- 含量均显著低于对照,表明炭化液的添加降低了高丹草幼苗受到的盐害程度。NaCl 胁迫能造成植物幼苗 SOD 和 CAT 活性升高^[38]。不同稀释比例金鱼藻炭化液处理的高丹草幼苗的 SOD 活性较对照有所降低,CAT 活性均较对照显著降低,而随着金鱼藻

炭化液稀释比例的减小,高丹草幼苗的CAT比活力逐渐降低,且稀释比例1:5的金鱼藻炭化液处理的CAT比活力显著低于对照,说明添加炭化液后提高了幼苗叶片的抗氧化能力,减少了活性氧的产生,植物在细胞水平上的氧化损伤减轻^[12]。

4 结 论

高丹草种子的发芽势、发芽率以及发芽指数随着NaCl胁迫增加总体呈下降的趋势,其种子萌发的耐盐适应质量浓度为 $4.00\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,耐盐半致死质量浓度为 $8.03\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,耐盐极限质量浓度为 $15.06\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。金鱼藻和苦草炭2种水生植物炭化液对NaCl条件下高丹草种子萌发和幼苗生长均具有一定的影响,且金鱼藻炭化液对高丹草幼苗生长的缓解效应更佳。在 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl条件下,添加稀释比例1:15和1:5的金鱼藻炭化液均较对照显著增加了高丹草幼苗的生长指标,显著降低了超氧阴离子含量、过氧化氢酶活性和可溶性蛋白质含量。以稀释比例1:15和1:5的金鱼藻炭化液对NaCl胁迫下高丹草幼苗生长的促进作用较佳。

致谢: 感谢江苏省中国科学院植物研究所崔建伟、吴玥、沈子尧和黄潜豪4位研究生在本研究数据获取过程中的帮助!

参考文献:

- [1] ALAN H, KÖKER A R. Analyzing and mapping agricultural waste recycling research: an integrative review for conceptual framework and future directions[J]. *Resources Policy*, 2023, 85: 103987.
- [2] 霍丽丽, 赵立欣, 姚宗路, 等. 农业生物质能温室气体减排潜力[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(22): 179-187.
- [3] 周建斌, 马欢欢, 章一蒙. 秸秆制备生物质炭技术及产业化进展[J]. *生物加工过程*, 2021, 19(4): 345-357.
- [4] 崔 键, 杜 易, 丁程成, 等. 中国湖泊水体磷的赋存形态及污染治理措施进展[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(3): 621-633.
- [5] BELETE Y Z, LEU S, BOUSSIB S, et al. Characterization and utilization of hydrothermal carbonization aqueous phase as nutrient source for microalgal growth[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121758.
- [6] SHRESTHA A, ACHARYA B, FAROOQUE A A. Study of hydrochar and process water from hydrothermal carbonization of sea lettuce[J]. *Renewable Energy*, 2021, 163: 589-598.
- [7] CHEN X, MA X, PENG X, et al. Effects of aqueous phase recirculation in hydrothermal carbonization of sweet potato waste[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 167-174.
- [8] TOUFIQ REZA M, FREITAS A, YANG X, et al. Wet air oxidation

- of hydrothermal carbonization (HTC) process liquid[J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2016, 4: 3250-3254.
- [9] JIANG H, DENG F, LUO Y, et al. Hydrothermal carbonization of corn straw in biogas slurry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 353: 131682.
- [10] HE H, FENG Y, WANG H, et al. Waste-based hydrothermal carbonization aqueous phase substitutes urea for rice paddy return: improved soil fertility and grain yield[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 344: 131135.
- [11] MAU V, NEUMANN J, WEHRLI B, et al. Nutrient behavior in hydrothermal carbonization aqueous phase following recirculation and reuse[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(17): 10426-10434.
- [12] HEILMANN S M, JADER L R, HARNED L A, et al. Hydrothermal carbonization of microalgae II. Fatty acid, char, and algal nutrient products[J]. *Applied Energy*, 2011, 88: 3286-3290.
- [13] 吴 昊, 王奉博, 王 竞, 等. 海带水热碳化产物改良滨海盐碱土壤研究[J]. *大连理工大学学报*, 2019, 59(4): 343-349.
- [14] 黄立华, 杨 易, 刘伯顺, 等. 苏打盐碱化稻田土壤反硝化和氨挥发特征及主要影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(8): 1748-1757.
- [15] 覃广泉, 陈 平, 苏东海. 盐胁迫对4种禾本科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(3): 205-206, 232.
- [16] 孔德真, 段震宇, 王 刚, 等. 盐、碱胁迫下高丹草苗期生理特征及转录组学分析[J]. *生物技术通报*, 2023, 39(6): 199-207.
- [17] 田 祺, 张会慧, 孙广玉. 高丹草种子萌发和幼苗生长对模拟盐碱互作胁迫的响应[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(6): 1707-1710, 1736.
- [18] 马志媛, 谭伟杰, 曹 宇. 不同浓度NaCl对高丹草种子萌发的影响[J]. *现代农业科技*, 2009(14): 301.
- [19] 刘玉艳, 王 辉, 于凤鸣, 等. 盐胁迫对二色补血草种子萌发的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1794-1800.
- [20] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 211-232.
- [21] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 82-97.
- [22] 温璐华, 王 真, 庄维兵, 等. 外源GA₄处理解除果梅花芽休眠的生理效应研究[J]. *中国南方果树*, 2015, 44(5): 16-22.
- [23] 崔 键, 刘怀锋, 李绍华. 半根和全根水分胁迫对苹果幼苗超氧阴离子产生量及其与光合作用关系的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2007, 25(2): 172-176.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [25] 乔 佩, 卢存福, 李红梅, 等. 盐胁迫对诱变小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 720-727.

