



不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦生长的影响

张子怡¹ 王学虎² 苑莹¹ 沈志峰¹ 黄志浩²

1 河北萌帮生物科技有限公司 邢台 054000

2 河北萌帮水溶肥料股份有限公司 石家庄 050000

摘要: 为了探究 3 种工艺制备的腐植酸(上清褐煤腐植酸、原褐煤腐植酸和发酵褐煤腐植酸)对 NaCl 胁迫下小麦生长的影响,本试验设 5 个处理,分别为清水(T1)、150 mmol/L NaCl 溶液(T2)、T2+上清褐煤腐植酸溶液(T3)、T2+原褐煤腐植酸溶液(T4)、T2+发酵褐煤腐植酸溶液(T5)。结果表明,与 T1 相比,T2~T5 NaCl 胁迫处理不同程度地抑制了小麦种子萌发和植株生长。在 150 mmol/L NaCl 溶液(T2)胁迫下,添加 3 种工艺制备的腐植酸均可显著降低小麦叶片、根部的相对电导率和 MDA 含量,其中 T3 处理分别降低 22.31%、29.11%、18.70%,T5 处理分别降低 38.41%、39.29%、21.76%;均可提高小麦的发芽势、发芽率、发芽指数、根长、株高、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量以及 POD、CAT、SOD 活性,其中 T3 处理的发芽势、发芽率、发芽指数效果最好,分别显著提高了 23.25%、28.97%、44.04%;T5 处理的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量以及 POD、CAT、SOD 活性效果最好,分别显著提高了 37.58%、21.09%、37.63%、35.21%、101.44%;根长、株高差异不显著。综上所述,在促进小麦萌发方面以上清褐煤腐植酸效果显著,在促进小麦幼苗生长、抗氧化能力等方面以发酵褐煤腐植酸效果最好。

关键词: 小麦;腐植酸;NaCl 胁迫;种子萌发;幼苗生长特性

中图分类号: TQ314.1, S512.1

文章编号: 1671-9212(2024)06-0065-06

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.06.005

Effects of Humic Acids Produced by Different Process on Wheat Growth under NaCl Stress

Zhang Ziyi¹, Wang Xuehu², Yuan Ying¹, Shen Zhifeng¹, Huang Zhihao²

1 Hebei Monband Biotechnology Co. Ltd., Xingtai, 054000

2 Hebei Monband Water Soluble Fertilizer Co. Ltd., Shijiazhuang, 050000

Abstract: In order to research the effects of humic acids produced by three processes (supernatant lignite humic acid, original lignite humic acid, and fermented lignite humic acid) on wheat growth under NaCl stress, five treatments were set up in this study. They were five groups, i.e., clear water (T1), 150 mmol/L NaCl solution (T2), T2+supernatant lignite humic acid solution (T3), T2+original lignite humic acid solution (T4), and T2+fermented lignite humic acid solution (T5). The results showed that compared with T1, NaCl stress treatment T2, T3, T4 and T5 all inhibited wheat seed germination and plant growth with varied degrees. Under the stress of 150 mmol/L NaCl solution (T2), the relative conductivity and MDA content of wheat leaves and roots were significantly decreased by adding humic acid prepared by three different processes, and T3 treatment decreased by 22.31%, 29.11% and 18.70%, and T5 treatment decreased by 38.41%, 39.29% and 21.76%, respectively; The three kinds of humic acid could improve the

[基金项目] 石家庄市厅市会商专项资金项目(项目编号 225490590595A)。

[收稿日期] 2024-09-26

[作者简介] 张子怡,女,1997年生,硕士/农艺师,主要从事新型肥料研发与应用,E-mail: 2630598794@qq.com。

germination potential, germination rate, germination index, root length, plant height, soluble sugar content, soluble protein content, as well as POD, CAT and SOD activities of wheat. Among them, T3 treatment exhibited the best effect on germination potential, germination rate and germination index, which were significantly increased by 23.25%, 28.97% and 44.04%, respectively; T5 treatment showed the best effects on soluble sugar content, soluble protein content, POD, CAT and SOD activities, which were significantly increased by 37.58%, 21.09%, 37.63%, 35.21% and 101.44%, respectively; There was no significant difference in root length and plant height. In summary, the supernatant lignite humic acid had a significant effect on promoting wheat germination, while the fermented lignite humic acid had the best effect on promoting wheat seedling growth and antioxidant capacity.

Key words: wheat; humic acid; NaCl stress; seed germination; seedling growth characteristics

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是我国北方种植范围最广的粮食作物之一^[1]。土壤盐碱化是影响小麦产量最重要的非生物胁迫之一^[2, 3]。研究表明, 土壤含盐量过高会对作物机体造成渗透损伤, 影响抗氧化酶活性, 活性氧代谢失衡^[4], 导致作物生长减慢、脱水、叶片萎蔫, 根茎、叶片等营养器官干物质积累低, 品质或产量下降^[5]。因此, 合理利用外源物质, 通过调控作物生理反应、酶活性、基因表达等, 提高作物的耐盐性, 将有利于提高作物品质和产量, 减少经济损失^[6, 7]。

腐植酸是一种生物刺激素, 可以调控作物活性氧系统和细胞膜渗透性、改善植物生长环境、增强作物抗逆性^[8]; 可以改善作物生长并提高对非生物胁迫的抵抗力^[9]。逆境胁迫下, 施用腐植酸可以维持渗透胁迫下根细胞对水分吸收、根细胞伸长以及蛋白质和激素合成^[10, 11]; 增加作物干物质质量, 提高植株生长能力和抗逆性^[12]。然而, 针对不同工艺制备的腐植酸对作物生长影响的研究不多。本试验通过研究3种工艺制备的腐植酸对NaCl胁迫下小麦萌发、幼苗生长及抗氧化能力的影响, 以明确不同工艺制备的腐植酸对盐胁迫下小麦生长的影响, 揭示其抗逆生理机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试腐植酸悬浮剂为上清褐煤腐植酸 100 g/L

(分子量 8000 ~ 20000 D)、发酵褐煤腐植酸 100 g/L (分子量 20000 ~ 50000 D)、原褐煤腐植酸 100 g/L (分子量 20000 ~ 50000 D)。上述3种样品褐煤原料均开采于新疆, 上清褐煤腐植酸经发酵、研磨、过滤去除不溶物获得; 发酵褐煤腐植酸研磨后经悬浮处理再经专利菌株 [短短芽孢菌株 (*Brevibacillus brevis*) 与贪噬菌株 (*Variovorax paradoxus*) 按比例 1 ~ 2 : 1 ~ 2 混合配制而成, 2种菌株均由实验室自行从土壤中筛选获取] 发酵、研磨后悬浮处理获得; 原褐煤腐植酸未经任何处理直接研磨后进行悬浮处理获得。

供试作物: 小麦, 品种为“济麦 22”。

1.2 试验设计

试验在实验室采用培养皿模拟进行, 基于前期研究, NaCl 溶液浓度设置为 150 mmol/L。培养液设 5 个处理, 分别为清水 (T1)、150 mmol/L NaCl 溶液 (T2)、T2+ 上清褐煤腐植酸溶液 (T3)、T2+ 原褐煤腐植酸溶液 (T4)、T2+ 发酵褐煤腐植酸溶液 (T5), 以上培养液中腐植酸含量均为 0.1 g/L。每个培养皿中均置双层滤纸, 用相应的培养液充分浸湿, 均匀放置 30 粒饱满的小麦种子, 每个处理 3 次重复, 于 25 °C 恒温培养室中进行种子发芽试验。在培养期间, 每天更换相应的培养液, 以保持培养皿中滤纸水分和培养液浓度。

1.3 测定指标与方法

培养第 2 天开始统计小麦的种子发芽数, 发芽标准为胚根达到种子长度的 2 倍^[13], 连续统计



7天。测量种子根和叶片长度，计算小麦的发芽指标^[14]。试验第7天，取适量小麦幼苗根和叶片测定相关指标。采用苯酚法测定可溶性糖含量；考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量；试剂盒（由 Solarbio 提供）法检测过氧化物酶（POD）、过氧化氢酶（CAT）、超氧化物歧化酶（SOD）活性、丙二醛（MDA）含量；电导仪测定小麦幼苗叶片和根的电导率^[15]。

发芽势 (%) = 第3天种子发芽数 / 供试种子总数 × 100%

发芽率 (%) = 第7天种子发芽数 / 供试种子总数 × 100%

发芽指数 (GI) = $\sum G_t/D_t$

式中， G_t 为第 t 天的种子发芽数； D_t 为对应种子的发芽天数。

活力指数 (VI) = $GI \times S$

式中， S 为平均根长。

相对电导率 = $R_1/R_2 \times 100\%$

式中， R_1 为浸提液电导率； R_2 为水浴加热后浸提液电导率。

1.4 数据处理

采用 Excel 2020 和 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦种子萌发的影响

种子萌发期是植物对环境胁迫响应较为敏感

的时期，也是幼苗成活的关键时期，直接影响植株的生长发育。由表 1 可以看出，与 T1 处理相比，T2 处理显著降低了小麦的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长以及株高。与 T2 处理相比，T3 处理发芽势显著提高了 23.25%，T4、T5 处理差异不显著；T3、T5 处理发芽率分别显著提高了 23.25%、6.38%，T4 处理差异不显著；T3、T5 处理发芽指数分别显著提高了 44.04%、18.26%，T4 处理差异不显著；T3、T4、T5 处理活力指数和根长差异均不显著；T5 处理株高显著提高了 62.28%，T3、T4 处理差异不显著。结果表明，T3 处理有效缓解了 NaCl 胁迫对小麦发芽势的抑制作用，T3、T5 处理有效缓解了小麦发芽率、发芽指数的抑制作用，T5 处理有效缓解了 NaCl 胁迫对小麦活力指数、根长、株高的抑制作用。

2.2 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦相对电导率的影响

植物组织的相对电导率表征植物细胞膜受损害的大小。盐胁迫下，植物的细胞膜遭到破坏，使植物细胞的电解质外渗，植物浸提液的电导率也随之增加。由图 1 可以看出，与 T1 处理相比，T2 处理小麦叶片和根的相对电导率显著升高，分别提高了 153.43%、130.08%。与 T2 处理相比，T3 ~ T5 处理的小麦叶片和根相对电导率显著降低，分别降低了 22.31%、30.22%、38.41% 和 29.11%、27.15%、39.29%。结果表明，添加腐植酸的处理均可显著降低 NaCl 胁迫下小麦叶片和根的相对电导率，缓解 NaCl 胁迫对植物根系造成的损伤，以 T5 处理效果最好。

表 1 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦种子萌发的影响

Tab.1 Effects of humic acids produced by different process on wheat seed germination under NaCl stress

处理	发芽势 (%)	发芽率 (%)	发芽指数	活力指数	根长 (cm)	株高 (cm)
T1	68.66 ± 3.52a	89.36 ± 2.52a	11.33 ± 0.42a	103.47 ± 4.63a	9.07 ± 1.15a	10.37 ± 0.38a
T2	51.45 ± 1.54b	57.69 ± 1.64d	7.72 ± 0.09c	4.00 ± 0.58b	0.56 ± 0.05b	1.67 ± 0.08c
T3	63.41 ± 2.58a	74.40 ± 2.77b	11.12 ± 0.54a	6.91 ± 0.11b	0.66 ± 0.03b	1.84 ± 0.05c
T4	53.62 ± 2.21b	61.73 ± 3.28cd	7.84 ± 0.16c	5.89 ± 0.33b	0.73 ± 0.04b	1.80 ± 0.04c
T5	54.73 ± 2.60b	68.80 ± 3.85bc	9.13 ± 0.17b	7.29 ± 0.17b	0.83 ± 0.02b	2.71 ± 0.09b

注：表中同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

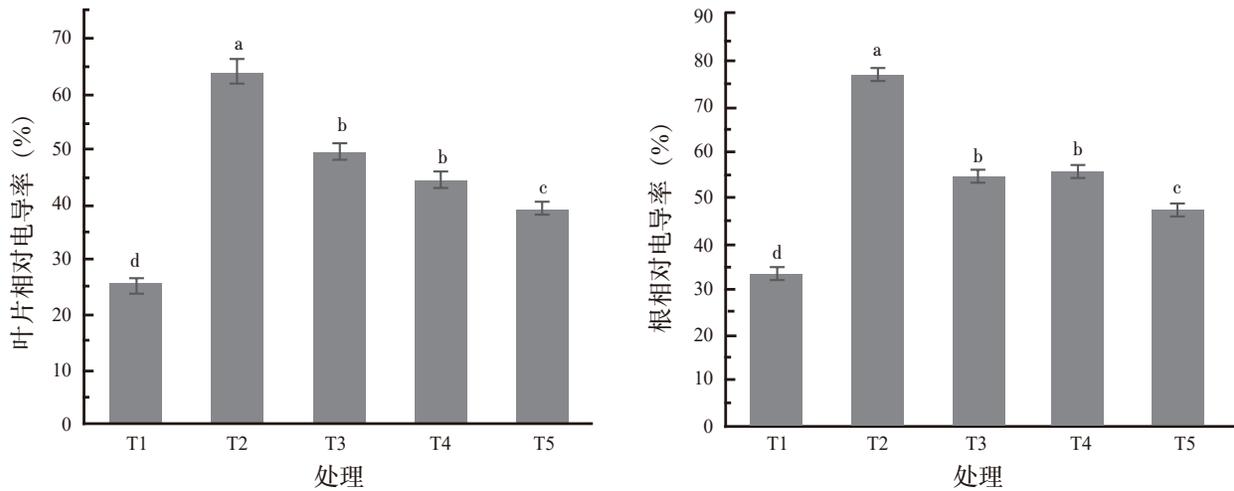


图1 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦相对电导率的影响

Fig.1 Effects of humic acids produced by different process on relative conductivity of wheat under NaCl stress

注：图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

2.3 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦可溶性糖、可溶性蛋白含量的影响

逆境胁迫下，植物细胞内会生成大量的可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质来缓解或避免细胞失水。由图2可以看出，与T1处理相比，T2~T5处理小麦的可溶性物质含量均显著提高。与T2

处理相比，T3~T5处理的可溶性糖含量分别显著提高了16.24%、23.89%、37.58%；T5处理的可溶性蛋白含量显著提高了21.09%，T3、T4处理差异均不显著。结果表明，T5处理能够促进NaCl胁迫下小麦叶片可溶性糖和可溶性蛋白的合成，进而有利于稳定植物细胞内水分平衡，维持质膜完整性。

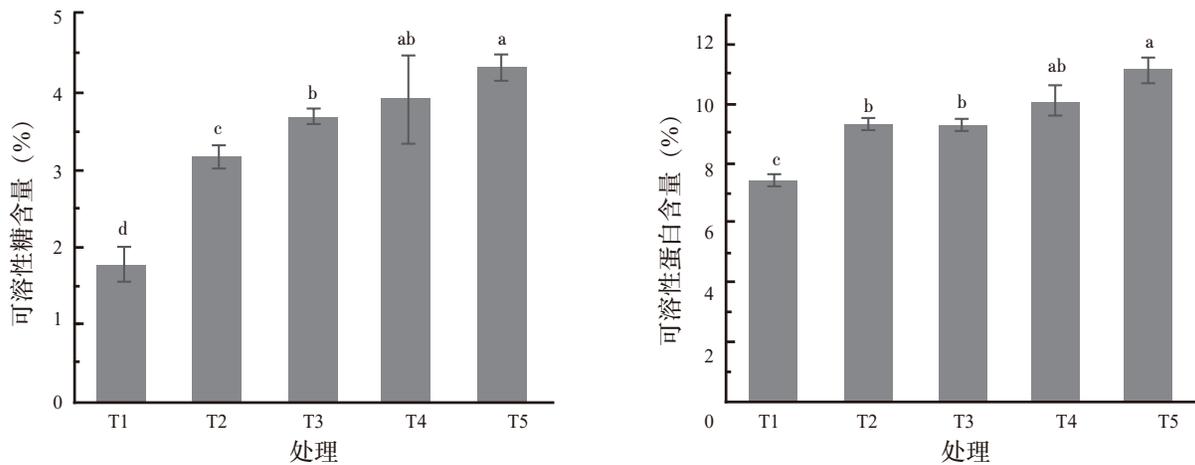


图2 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦可溶性糖、可溶性蛋白含量的影响

Fig.2 Effects of humic acids produced by different process on soluble sugar and soluble protein content of wheat under NaCl stress

2.4 不同工艺制备的腐植酸对 NaCl 胁迫下小麦抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

在逆境胁迫下，植物体内抗氧化酶活性对植物生长具有重要意义。由图3可以看出，与T1处理相比，T2~T5处理小麦叶片的过氧化物酶活性和

丙二醛含量显著升高；T3~T5处理超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性显著升高，T2处理不显著。与T2处理相比，T3、T5处理超氧化物歧化酶活性显著提高了96.98%、101.44%，T4处理差异不显著；T4、T5处理过氧化物酶活性显著提高了21.44%、



37.63%, T3 处理差异不显著; T3 ~ T5 处理过氧化氢酶活性显著提高了 22.81%、19.76%、35.21%; T3 ~ T5 处理丙二醛含量显著降低了 18.70%、15.43%、

21.76%。结果表明, T5 处理小麦叶片中抗氧化酶活性最高, 丙二醛含量最低, 使植物体内自由基水平维持在平衡状态, 有效缓解了活性氧对植物体的伤害。

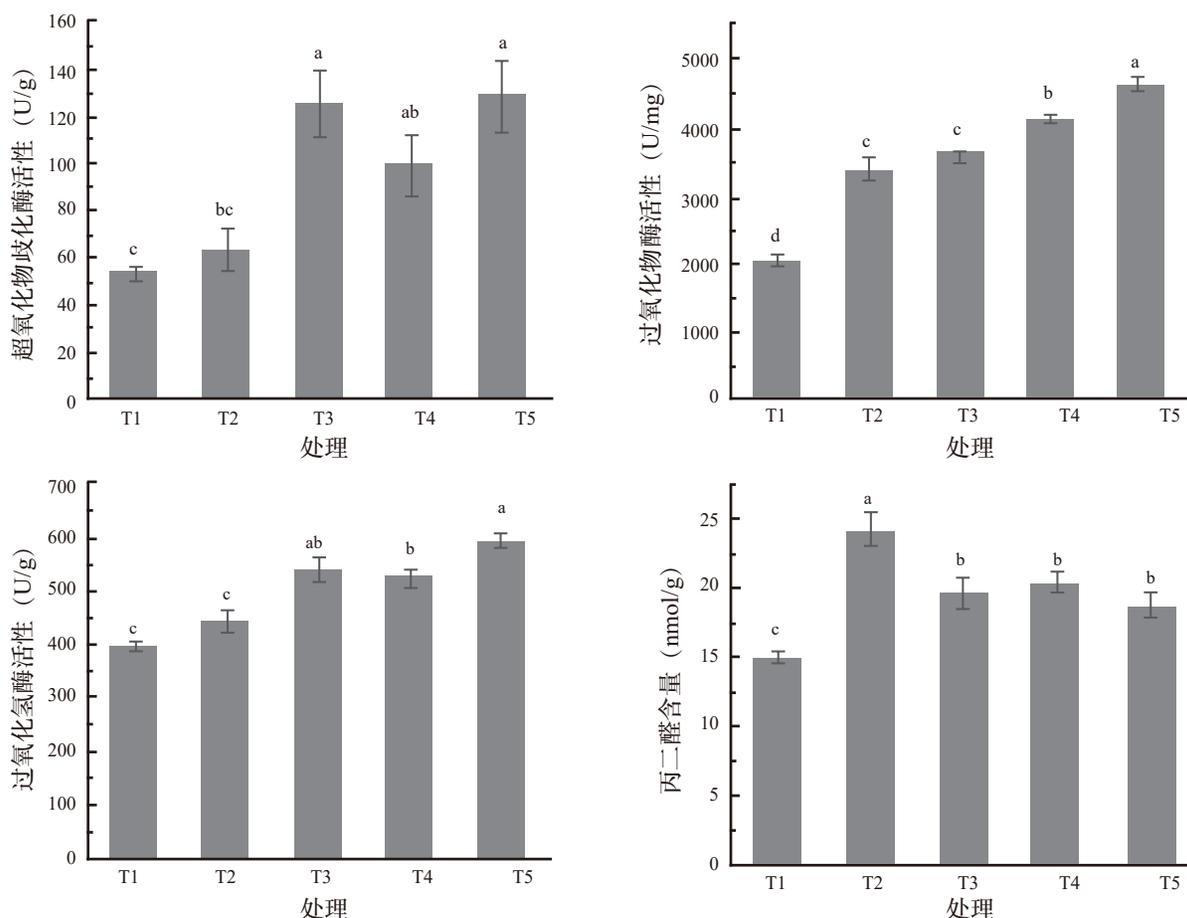


图3 NaCl 胁迫下不同工艺制备的腐植酸对小麦抗氧化酶和丙二醛含量的影响
Fig.3 Effects of humic acids produced by different process on antioxidant enzymes and MDA content of wheat under NaCl stress

3 结论与讨论

腐植酸可以缓解逆境胁迫对植物生长的影响, 改善植物形态和生理特性, 调节植物代谢, 改善植物生长环境, 在防止植物生态安全性中的氧化应激方面起着重要作用^[16, 17]。郭伟等^[18]研究发现, 盐胁迫会对小麦种子呼吸起抑制作用, 小麦中可溶性糖含量、 α -淀粉酶活性大大增加, 添加腐植酸显著缓解了盐胁迫下小麦种子的萌发能力和植株生长能力^[19]。周丽平等^[20]研究发现, 小分子量腐植酸活性较高, 并且对植物根系生长以及养分吸收的刺

激作用更佳。本试验中, 上清褐煤腐植酸分子量最小, 生物活性较高, 因此, 上清褐煤腐植酸处理小麦的发芽势、发芽率、发芽指数均高于原褐煤腐植酸和发酵褐煤腐植酸处理, 与上述研究结果一致。

袁红莉等^[21, 22]研究发现, 褐煤中腐植酸被微生物溶解后, 其性质发生了显著变化, 与原煤和化学提取的腐植酸相比, 含氮和含氧官能团更多, 生物活性提高。本试验中, 发酵褐煤腐植酸处理的小麦根长、株高、活力指数、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、过氧化物酶活性、电导率、丙二醛含量均高于原褐煤腐植酸和上清褐煤腐植酸处理, 与上述

研究结果一致。

综上,在NaCl胁迫浓度和腐植酸用量相同的情况下,上清褐煤腐植酸、发酵褐煤腐植酸、原褐煤腐植酸均可提高小麦的耐盐性,上清褐煤腐植酸更有利于刺激小麦种子萌发,发酵褐煤腐植酸更有利于小麦幼苗生长发育。基于此,后续将进一步开展二者搭配使用试验,以筛选出缓解小麦盐胁迫更为有效的方法。

参考文献

- [1] 邓肖,徐学欣,孙芹,等.不同盐浓度胁迫下冬小麦幼苗光合特性及转录组分析[J].植物生理学报,2023,59(9):1819~1829.
- [2] Xu Z S, Chen X J, Lu X P, et al. Integrative analysis of transcriptome and metabolome reveal mechanism of tolerance to salt stress in oat (*Avena sativa* L.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 160: 315 ~ 328.
- [3] Kaushal S S. Increased salinization decreases safe drinking water[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(6): 2765 ~ 2766.
- [4] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6(2): 66 ~ 71.
- [5] Wang H, Wu Z, Chen C, et al. Effects of salt and alkali stresses on growth and ion balance in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Soil and Environment, 2011, 57(6): 286 ~ 294.
- [6] 张亮,李玉婷,夏文静,等.盐胁迫下异甜菊醇浸种对油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J].福建农业学报,2020,35(8):883~890.
- [7] 张自强,白晨,张惠忠,等.甜菜耐盐性形态学、生理生化特性及分子水平研究进展[J].作物杂志,2020(3):27~33.
- [8] 陈玉玲.腐植酸对植物生理活动的影响[J].植物学通报,2000,17(1):11~16.
- [9] Zhang X, Schmidt R E. Hormone-containing products' impact on antioxidant status of tall fescue and creeping bentgrass subjected to drought[J]. Crop Science, 2000, 40: 1344 ~ 1349.
- [10] Canellas L P, Olivares F L, Aguiar N O, et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 196: 15 ~ 27.
- [11] 张水勤,袁亮,林治安,等.腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):1065~1076.
- [12] 谷端银,王秀峰,魏珉,等.腐植酸类物质与植物抗逆性研究进展[J].山东农业大学学报,2016,47(3):321~326.
- [13] 段才绪,何平,谢英赞,等.盐胁迫对决明种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].西南师范大学学报,2013,38(2):73~78.
- [14] 张艳,彭燕,何小双.甜菜碱浸种对干旱胁迫下白三叶种子萌发特性的影响[J].中国草地学报,2014,36(4):31~37.
- [15] 徐新娟,李勇超.2种植物相对电导率测定方法比较[J].江苏农业科学,2014,42(7):311~312.
- [16] Garcia A C, Berbara R L L, Farias L P, et al. Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress[J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(13): 3125 ~ 3134.
- [17] Aydin A, Kant C, Turan M. Humic acid application alleviate salinity stress of bean plants decreasing membrane leakage[J]. African Journal of Agricultural Research, 2012, 7(7): 1073 ~ 1086.
- [18] 郭伟,于立河.腐植酸浸种对盐胁迫下小麦萌发种子及幼苗生理特性的影响[J].麦类作物学报,2012,32(1):90~96.
- [19] 马太光,张瑞腾,郭秀霞,等.NaCl胁迫下腐植酸对黄瓜种子发芽特性的影响[J].湖北农业科学,2016,55(9):2287~2289.
- [20] 周丽平,袁亮,赵秉强,等.不同分子量风化煤腐植酸对玉米植株主要代谢物的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(1):142~148.
- [21] 袁红莉,蔡亚歧,周希贵,等.微生物降解褐煤产生的腐植酸化学特性研究[J].环境化学,2000,19(3):240~243.
- [22] 袁红莉,王风芹,李宝珍,等.微生物降解褐煤产生的腐植酸生物活性研究[C].氮素循环与农业和环境学术讨论会论文集,2001.