



张婉晴,代梦雅,胡乃月,张英华.磷、铁处理对冬小麦种子萌发和幼苗活力的影响[J].中国农业大学学报,2023,28(04):1-12.

ZHANG Wanqing, DAI Mengya, HU Naiyue, ZHANG Yinghua. Effects of P and Fe treatments on seed germination and seedling vigor of winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(04): 1-12.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.04.01

磷、铁处理对冬小麦种子萌发和幼苗活力的影响

张婉晴 代梦雅 胡乃月 张英华*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘要 为明确磷、铁处理对冬小麦种子萌发和幼苗活力的影响,以冬小麦品种‘济麦22’为材料,采用 NaH_2PO_4 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 作为处理溶液,选择不降低种子发芽率的最大摩尔浓度处理种子;测定苗期正常水分(T_1)和干旱处理(T_2)下冬小麦幼苗干重、株高、叶面积、SPAD 和抗氧化酶活性等指标的变化。结果表明:0.05~0.30 mol/L NaH_2PO_4 处理的冬小麦种子发芽率比对照提高 2.00%~14.00%,0.01~0.04 mol/L $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理的冬小麦种子发芽率比对照提高 4.01%,而 0.50~0.90 mol/L NaH_2PO_4 处理的冬小麦种子发芽率与对照相比降低 16.00%~24.00%,0.05~0.07 mol/L $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理的冬小麦种子发芽率与对照相比降低 10.00%~24.00%,在本试验条件下, NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对种子萌发生长不产生抑制作用的最大浓度分别为 0.30 和 0.04 mol/L;2种水分条件下, NaH_2PO_4 处理能显著提高冬小麦幼苗干重和株高, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理只在正常水分下显著提高幼苗的株高; NaH_2PO_4 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理均能显著提高冬小麦幼苗新生叶片的叶面积、叶片的 SPAD 以及叶片 SOD 和 CAT 活性,但对 POD 活性无显著提高。总之,适宜浓度的 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理能促进冬小麦种子的萌发,同时可以提高冬小麦幼苗的有效光合面积和叶绿素含量,改善了幼苗的光合作用,提高了叶片抗氧化酶活性,进而增强了幼苗活力和抗旱性。

关键词 磷酸二氢钠; 硫酸铁; 冬小麦; 种子萌发; 幼苗活力

中图分类号 S512.1

文章编号 1007-4333(2023)04-0001-12

文献标志码 A

Effects of P and Fe treatments on seed germination and seedling vigor of winter wheat

ZHANG Wanqing, DAI Mengya, HU Naiyue, ZHANG Yinghua*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to clarify the effects of P and Fe treatments on the seed germination and seedling vigor of winter wheat, winter wheat cultivar ‘Jimai 22’ was taken as study material. NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ were used as the treatment solutions, and the maximum molar concentration which did not reduce seed germination rate was selected as the treatment concentration. The changes of dry weight, plant height, leaf area, SPAD and antioxidant enzyme activity of winter wheat seedlings under normal water (T_1) and drought treatment (T_2) at seedling stage were measured. The results showed that: Compared with the control, the germination rate of winter wheat seeds treated with 0.05 – 0.30 mol/L NaH_2PO_4 increased by 2.00% – 14.00%, and the germination rate of winter wheat seeds treated with 0.01 – 0.40 mol/L $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ increased by 4.01%. Compared with the control, the germination rate of winter wheat seeds treated with 0.50 – 0.90 mol/L NaH_2PO_4 decreased by 16.00% – 24.00%, and the germination rate of winter wheat seeds treated with 0.05 – 0.07 mol/L $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ decreased by 10.00% – 24.00%. Under the experimental

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(31871563); 国家现代农业产业技术体系(CARS-03)

第一作者: 张婉晴(ORCID:0000-0002-4947-4501), 硕士研究生, E-mail: fcyzzwq@163.com

通讯作者: 张英华(ORCID:0000-0002-1356-6084), 教授, 主要从事小麦节水高产优质高效栽培理论与技术研究, E-mail: yhzhang@cau.edu.cn

conditions, the maximum concentrations of NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ that would not inhibit seed germination and growth were 0.30 and 0.04 mol/L, respectively. Under the two water conditions, NaH_2PO_4 treatment significantly increased the dry weight and seedling height of winter wheat seedlings, while $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ treatment significantly increased seedling height only under normal water condition. Both NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ treatments significantly increased the leaf area, SPAD, SOD and CAT activities of newborn leaves of winter wheat seedlings, but not POD activity. In conclusion, the appropriate concentration of NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ treatments can promote the germination of winter wheat seeds, and NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ treatments can improve the photosynthesis of winter wheat seedlings by increasing the effective photosynthetic area and chlorophyll content, and increase the activity of antioxidant enzymes in leaves, and then further enhance the seedling vitality and drought resistance.

Keywords NaH_2PO_4 ; $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; winter wheat; seed germination; seedling vigor

种子活力和种子营养物质含量决定了种子在不同环境条件下能否整齐、快速发芽和茁壮生长,对作物产量有重要的影响,因此,增强种子活力、强化种子营养是农业生产的重要措施。种子引发是一种播种前的处理方法^[1],一般是指在种子萌发前通过天然或合成化合物的处理,诱导种子进入某种特定的生理状态从而更好地发芽,并促进发芽后的生长^[2]。另外,种子引发将种子预先暴露在各种生物或非生物逆境胁迫下,刺激萌发前的代谢过程,有助于增强作物的抗逆性^[3]。矿质营养引发是种子引发的一种,是用含有限制性营养物质的溶液浸泡种子的技术^[1],该方法能在获得营养效应的同时,结合引发剂的生化优势,可提高种子质量、发芽参数和育苗效果^[4]。

已有研究认为,作物生长发育需要 17 种必需元素^[4]。土壤中元素缺乏或元素不平衡都会使作物生长受到抑制。磷是所有生物细胞必需的一种基本的、不可替代的化学元素,是植物、动物和人生长发育必需的营养物质^[5]。磷也被认为是继氮之后提高产量的关键元素,是作物生长、代谢和发育的大量元素^[6]。铁是所有高等生物必需的微量营养素^[7]。铁参与细胞器中的代谢反应,在作物光合色素合成、呼吸和光合电子传递等过程中发挥重要作用^[8]。铁对于线粒体和叶绿体的新陈代谢是必不可少的,在核糖核酸还原和氮还原等基本代谢反应以及呼吸和光合作用等产生能量的电子转移反应中发挥作用^[9]。

干旱是植物非生物胁迫的重要表现形式之一,是作物产量的主要限制因素,干旱胁迫使得植物细胞内一系列生理生化过程发生变化,导致叶绿体、线粒体、过氧化物酶体内的活性氧(ROS)增加^[10],这些活性氧类物质具有高度的活性和毒性,能够破坏蛋白质、脂类、碳水化合物和 DNA,最终导致氧化应激反应^[11]。植物具有非常高效的抗氧化酶防御系

统,保护细胞免受氧化损伤^[11]。有研究发现,种子引发可以提高抗氧化酶活性,从而防止萌发过程中的脂质过氧化^[12-13]。已有研究表明,磷处理能提高玉米种子磷含量和根系生物量^[14],提高大麦种子磷含量以及干旱胁迫下幼苗水分利用效率,促进大麦幼苗生长和磷吸收^[15],提高水分胁迫下冬小麦幼苗光合速率和水分利用效率,使幼苗内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)活性增强,有效提高小麦幼苗抗旱能力^[16]。铁处理对小麦苗期根长、根直径、根表面积和根体积均有提高作用^[17],能显著提高面包小麦品种的产量和籽粒脂肪、蛋白质含量^[18]。铁处理也能提高玉米干物质积累、叶面积、株高、茎粗以及叶片叶绿素相对含量、净光合速率等^[19]。

幼苗生长是作物生产的第一个关键步骤,决定作物的最终产量,高效的种子萌发和幼苗活力对农业生产非常重要。然而,有关引发处理促进冬小麦种子萌发的浓度范围以及该浓度范围下引发对幼苗生长和抗氧化能力影响的研究报道相对较少。本研究采用不同浓度的 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液分别对冬小麦种子进行预处理,考察种子萌发情况,以筛选出不影响种子发芽的最大处理浓度,并进一步在正常水分和干旱条件下栽培,测定幼苗干重、株高、叶面积、SPAD、抗氧化酶的活性变化,旨在揭示 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦种子萌发和幼苗生长及抗旱性的影响,以期能为发展冬小麦抗旱节水栽培技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于 2018—2019 年在中国农业大学西校区温室进行,以冬小麦品种‘济麦 22’为供试材料。盆栽试验所用大田土养分组成为:全氮 0.98 g/kg,

速效磷 0.023 g/kg, 速效钾 0.24 g/kg, 有效铁 5.93 mg/kg, pH 8.90。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

种子引发试验: NaH_2PO_4 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理浓度设置见表 1, 均以水处理为对照(CK)。处理前先将冬小麦种子置于 3% H_2O_2 溶液中浸泡 15 min 消毒。将消毒后的种子在配置好的溶液中处理 12 h,

浸泡后用去离子水反复冲洗, 备用。在处理后的种子中选择大小一致、籽粒饱满的种子, 均匀地摆在培养皿中, 每个培养皿 20 粒, 培养皿底部铺两层湿润的发芽纸。将培养皿置于恒温培养箱中培养 7 d (25 °C, 光照 12 h/d), 培养期间保持发芽纸湿润。记录各处理每天的发芽数, 并在培养第 7 天时测量幼苗芽长、根长以及干重, 计算发芽率、发芽指数、活力指数。

表 1 处理浓度设置

Table 1 Concentration settings for treatment

处理 Treatment	浓度/(mol/L) Concentration								
NaH_2PO_4	0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.50	0.70	0.90	
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	

盆栽试验: 根据种子引发试验的结果, 选择不抑制种子萌发的最高浓度作为盆栽试验处理浓度, NaH_2PO_4 处理浓度设定为 0.30 mol/L, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理浓度设定为 0.04 mol/L。

选用 30 cm × 40 cm 的塑料花盆, 每盆装 15 kg 过筛后的大田土, 浇透水之后备用。试验采用裂区设计, 以水分条件为主区, 引发处理为副区。设置正常水分(T_1 , 田间最大持水量的 70%~75%) 和干旱处理(T_2 , 田间最大持水量的 50%~55%) 2 个水分条件, 每个水分条件下设置水(H)、 NaH_2PO_4 (P)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fe) 3 种处理方式, 共 6 个处理, 每个处理设置 6 个重复。在处理后的种子中挑选出大小一致的 20 粒均匀播在盆中, 播完之后在种子上覆盖 2 cm 细土, 此时 T_1 、 T_2 进行统一水管理。当幼苗生长至 3 叶期时, 间苗, 每盆留 15 株。在幼苗第 4 叶展开时对 T_1 、 T_2 分别进行正常水管理和干旱处理, T_2 干旱处理 10 d 后结束, 恢复正常水管理, 在此期间 T_1 始终保持正常水管理。干旱处理期间通过称重法控制土壤水分含量。将幼苗第 4 叶展开时即不同水分处理开始当天规定为水分处理后 0 d, 于水分处理后 6 d (此时 T_1 为正常水管理, T_2 为干旱处理)、12 d (此时 T_1 为正常水管理, T_2 已恢复正常水管理) 分 2 次测定各处理幼苗不同叶位叶片的 SPAD, 并对不同叶位的叶片进行取样, 每次各处理取 4 个重复, 每个重复取 2 株。取样后迅速将叶片用铝箔纸包好置于液氮中冷冻, 之后放

在超低温冰箱(-80 °C)中保存, 用于测定幼苗不同叶位叶片的抗氧化酶活性。并于处理后 10 d (此时 T_1 为正常水管理, T_2 干旱处理已结束) 测定幼苗干重、苗高、不同叶位叶面积(展开叶)。

1.2.2 测定和计算方法

种子引发试验中发芽率、发芽指数、活力指数计算公式如下:

$$\text{发芽率} = (\text{发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数 GI} = \sum (G_t / D_t)$$

式中: GI 为发芽指数, G_t 为在 t 日的发芽数, D_t 为发芽日数。

$$\text{活力指数 VI} = \text{GI} \times S$$

式中: VI 为活力指数, GI 为发芽指数, S 为单株幼苗干重。

盆栽试验中超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参照潘瑞炽等^[20]的方法, 过氧化物酶(POD)活性测定参照陈坤明等^[21]的方法, 过氧化氢酶(CAT)活性测定参照曾韶西等^[22]的方法。

1.3 统计分析

使用 Excel 对数据进行整理与作图, 使用 SPSS 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦种子萌发生长的影响

由表 2 可知, 与水处理(CK)相比, 种子发芽率和

发芽指数在 NaH_2PO_4 处理浓度为 0.50~0.90 mol/L 时显著降低,幼苗芽长在处理浓度为 0.70~0.90 mol/L 时显著降低,幼苗根长在不同处理浓度下与水处理无显著差异,幼苗干重在处理浓度为 0.90 mol/L 时显著降低,活力指数在处理浓度为 0.50~0.90 mol/L

时显著降低。由此可见, NaH_2PO_4 处理种子发芽率在浓度 0.50 mol/L 时开始显著下降,在此基础上继续提高处理浓度,种子萌发受抑制程度进一步增大。因此,本试验中不影响种子发芽率的最高 NaH_2PO_4 处理浓度为 0.30 mol/L。

表 2 NaH_2PO_4 处理对冬小麦种子萌发和幼苗生长的影响

Table 2 Effects of NaH_2PO_4 treatment on seed germination and seedling growth of winter wheat

浓度/(mol/L) Concentration	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	幼苗芽长/cm Seedling bud length	幼苗根长/cm Seedling root length	幼苗干重/mg Seedling dry weight	活力指数 Vigor index
0.00(CK)	83.33 a	38.63 ab	11.04 ab	11.50 a	16.78 ab	0.65 ab
0.05	88.33 a	41.09 ab	11.68 a	11.14 a	17.18 ab	0.70 a
0.10	95.00 a	41.76 a	11.72 a	11.39 a	17.10 ab	0.71 a
0.20	83.33 a	37.46 ab	11.74 a	10.86 a	17.31 a	0.62 ab
0.30	85.00 a	34.86 b	10.64 bc	9.91 a	16.55 ab	0.51 b
0.50	70.00 b	22.13 c	10.13 bcd	11.19 a	14.42 bc	0.32 cd
0.70	63.33 bc	19.96 c	9.93 cd	11.09 a	14.34 bc	0.35 c
0.90	46.67 c	10.24 d	9.33 de	9.91 a	13.76 c	0.14 e

注:同一列数据的不同小写字母表示不同处理浓度之间差异显著($P<0.05$)。表 3 同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatment concentrations ($P<0.05$). Table 3 is the same.

由表 3 可知,与水处理(CK)相比,种子发芽率在 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理浓度为 0.05~0.07 mol/L 时显著降低,发芽指数在处理浓度为 0.03~0.07 mol/L 时显著降低,幼苗芽长在处理浓度为 0.04~0.07 mol/L 时显著降低,幼苗根长和幼苗干重在处理浓度为 0.03~0.07 mol/L 时显著降低,活力指数在处理浓度为 0.02~0.07 mol/L 时显著降低。由此可见, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \geq 0.05$ mol/L 时发芽率开始显著下降,在此基础上继续提高处理浓度,种子萌发受抑制程度进一步增大。因此,本试验中不影响种子发芽率的最高 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理浓度为 0.04 mol/L。

2.2 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦幼苗活力的影响

2.2.1 幼苗的干重和苗高

由图 1 可知,正常水分(T_1)条件下, NaH_2PO_4 (P)处理幼苗干重、株高显著高于水处理(H), $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fe)处理幼苗干重与水处理(H)无显著差异,株高显著高于水处理(H);干旱条件(T_2)下,P处理幼苗干重、株高显著高于H处理,Fe处理幼苗

干重和株高与H处理无显著差异。可见,不管是正常水分(T_1)还是干旱条件下(T_2)P处理均能提高冬小麦幼苗的干重和株高,而Fe处理仅可以在正常水分(T_1)下提高冬小麦株高,但对幼苗干重无显著影响。

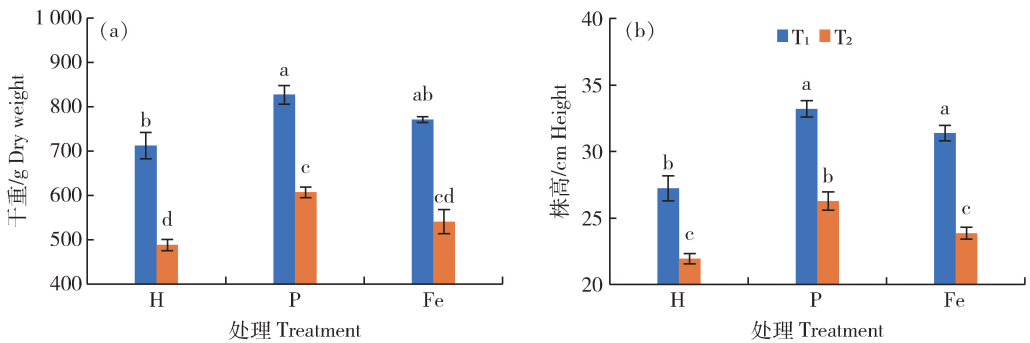
2.2.2 幼苗的叶面积

由图 2 可知,正常水分(T_1)条件下, NaH_2PO_4 (P)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fe)处理幼苗第 1、2 叶叶面积与水处理(H)均无显著差异;P处理幼苗第 3 叶叶面积与H处理无显著差异,Fe处理幼苗第 3 叶叶面积显著高于H处理;P处理幼苗第 4 叶叶面积显著高于H处理,Fe处理幼苗第 4 叶叶面积与H处理无显著差异;P、Fe处理幼苗第 5 叶叶面积均显著高于H处理。干旱处理(T_2)条件下,P、Fe处理幼苗第 1、2 叶叶面积均与H处理无显著差异;P处理幼苗第 3、4 叶叶面积显著高于H处理,Fe处理幼苗第 3、4 叶叶面积与H处理无显著差异;P、Fe处理幼苗第 5 叶叶面积均显著高于H处理,见图 2(b)。可见,P、Fe处理在两种水分条件下显著提高了冬小麦幼苗新生叶片的叶面积。

表 3 Fe₂(SO₄)₃ 引发对冬小麦种子萌发和幼苗生长的影响

Table 3 Effects of Fe₂(SO₄)₃ treatment on seed germination and seedling growth of winter wheat

浓度/ (mol/L) Concentration	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	幼苗芽长/cm Seedling bud length	幼苗根长/cm Seedling root length	幼苗干重/mg Seedling dry weight	活力指数 Vigor index
0.00(CK)	83.33 a	38.63 ab	11.04 abc	11.50 a	16.78 a	0.65 a
0.01	86.67 a	38.88 ab	11.46 a	10.57 a	16.78 a	0.65 a
0.02	83.33 a	31.31 bc	11.12 abc	10.64 a	16.48 ab	0.48 b
0.03	81.67 a	29.08 cd	10.06 bcd	7.86 cd	14.97 bc	0.47 b
0.04	81.67 a	23.29 de	9.55 d	8.80 bc	15.25 abc	0.36 bc
0.05	75.00 b	21.57 def	9.91 cd	8.78 bc	12.59 de	0.27 cd
0.06	70.00 b	19.03 ef	8.85 d	7.83 cd	13.83 cd	0.27 cd
0.07	63.33 b	15.14 f	7.46 e	6.93 d	11.25 e	0.17 d



T₁, 正常水分; T₂, 干旱。H, 水处理; P, NaH₂PO₄ 处理; Fe, Fe₂(SO₄)₃ 处理。不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。下同。

T₁, well-watered; T₂, drought. H, water treatment; P, NaH₂PO₄ treatment; Fe, Fe₂(SO₄)₃ treatment. Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05). The same below.

图 1 正常水分和干旱条件下 NaH₂PO₄、Fe₂(SO₄)₃ 处理的冬小麦幼苗的干重(a)和株高(b)

Fig. 1 Dry weight (a) and seedling height (b) of winter wheat seedlings under well-watered and drought conditions under NaH₂PO₄ and Fe₂(SO₄)₃ treatments

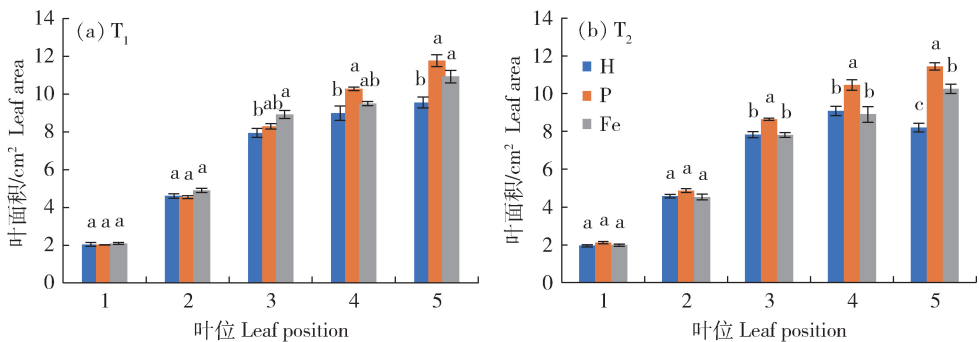


图 2 正常水分(a)和干旱(b)条件下 NaH₂PO₄、Fe₂(SO₄)₃ 处理的冬小麦幼苗叶面积

Fig. 2 Leaf area of winter wheat seedlings under well-watered (a) and drought (b) conditions under NaH₂PO₄ and Fe₂(SO₄)₃ treatments

2.2.3 幼苗的 SPAD

由表 4 可知,正常水分(T_1)处理后 6 d, NaH_2PO_4 (P)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fe)处理幼苗第 1—5 叶 SPAD 均显著高于水处理(H)。由图 3 可知,正常水分(T_1)处理后 12 d, P、Fe 处理幼苗第 2—6 叶 SPAD 仍显著高于 H 处理(此时第 1 叶已衰老);干旱处理(T_2)后 6 d, P、Fe 处理幼苗第 1—5

叶 SPAD 均显著高于 H 处理;干旱处理(T_2)后 12 d(复水后 2 d), P、Fe 处理幼苗第 2—5 叶 SPAD 均显著高于 H 处理;P 处理幼苗第 6 叶 SPAD 与 H 处理无显著差异,Fe 处理幼苗第 6 叶 SPAD 显著高于 H 处理。可见,正常水分(T_1)和干旱条件(T_2)下, P、Fe 处理均能提高幼苗各叶位 SPAD。

表 4 正常水分(T_1)和干旱(T_2)条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理的冬小麦幼苗叶片 SPAD

Table 4 SPAD of winter wheat seedlings under well-watered (T_1) and drought (T_2) conditions under NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ treatments

水分条件 Water condition	处理 Treatment	处理后 6 d 6 d after treatment					T_1 处理后 12 d (T_2 复水后 2 d) 12 d after T_1 treatment (2 d after T_2 rehydration)				
		第 1 叶 1 st leaf	第 2 叶 2 nd leaf	第 3 叶 3 rd leaf	第 4 叶 4 th leaf	第 5 叶 5 th leaf	第 2 叶 2 nd leaf	第 3 叶 3 rd leaf	第 4 叶 4 th leaf	第 5 叶 5 th leaf	第 6 叶 6 th leaf
		T_1	H	47.50 b	46.33 b	47.07 b	48.03 b	48.40 b	33.97 b	41.53 b	45.13 b
	P	49.83 a	48.47 a	48.73 a	49.83 a	50.17 a	39.67 a	46.20 a	49.23 a	52.50 a	50.00 a
	Fe	50.17 a	49.50 a	49.00 a	50.00 a	50.80 a	39.13 a	46.00 a	49.60 a	53.60 a	50.60 a
T_2	H	46.83 c	44.87 b	47.77 b	47.93 b	48.40 b	29.50 b	44.50 c	48.20 c	49.60 c	52.37 b
	P	48.73 b	49.33 a	49.97 a	51.03 a	51.30 a	35.43 a	46.70 b	50.47 b	52.47 b	54.27 ab
	Fe	50.23 a	49.50 a	50.20 a	51.40 a	52.67 a	36.80 a	48.67 a	52.70 a	55.50 a	56.00 a

2.3 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦幼苗抗氧化能力的影响

2.3.1 幼苗叶片 SOD 活性

由表 5 可知,正常水分(T_1)处理后 6 d, NaH_2PO_4 (P)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fe)处理后幼苗各叶位 SOD 活性均略有升高但与水处理(H)无显著差异;正常水分(T_1)处理后 12 d,幼苗第 1 叶脱落,第 6 叶展开, P、Fe 处理幼苗第 2、5、6 叶 SOD 活性均显著高于 H 处理, P 处理幼苗第 3、4 叶 SOD 活性显著高于 H 处理, Fe 处理幼苗第 3、4 叶 SOD 活性与 H 处理无显著差异。干旱处理(T_2)后 6 d, P 处理幼苗第 1、2 叶 SOD 活性与 H 处理无显著差异, Fe 处理幼苗第 1、2 叶 SOD 活性显著高于 H 处理; P、Fe 处理幼苗第 3、4、5 叶 SOD 活性与 H 处理无显著差异;干旱处理(T_2)后 12 d(复水后 2 d), P 处理幼苗各叶位 SOD 活性与 H 处理均无显著差异, Fe 处理幼苗各叶位 SOD 活性显著高于 H 处理。可见,正常水分(T_1)下 P 处理显著提高了冬小麦幼苗 SOD 活性,干旱条件(T_2)下 Fe 处理显著提高了冬小麦幼苗 SOD 活性。

2.3.2 幼苗叶片 POD 活性

由表 6 可知,正常水分(T_1)处理后 6 d, NaH_2PO_4 (P)处理幼苗第 1 叶 POD 活性显著高于水处理(H), $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理(Fe)幼苗第 1 叶 POD 活性与 H 处理无显著差异; P 处理幼苗第 2 叶 POD 活性与 H 处理无显著差异, Fe 处理幼苗第 2 叶 POD 活性显著高于 H 处理; P、Fe 处理幼苗第 3、4 叶 POD 活性与 H 处理无显著差异; P、Fe 处理幼苗第 5 叶 POD 活性显著高于 H 处理;正常水分(T_1)处理后 12 d,幼苗第 1 叶脱落,第 6 叶展开, P、Fe 处理幼苗各叶位 POD 活性与 H 处理均无显著差异。干旱处理(T_2)后 6 d, P 处理幼苗各叶位 POD 活性略有下降, Fe 处理幼苗各叶位 POD 活性略有提高,但 P、Fe 处理幼苗第 1—4 叶 POD 活性与 H 处理均无显著差异, P 处理幼苗第 5 叶 POD 活性显著低于 H 处理, Fe 处理幼苗第 5 叶 POD 活性与 H 处理无显著差异;干旱处理(T_2)后 12 d, P、Fe 处理幼苗第 2 叶 POD 活性与 H 处理均无显著差异, P 处理幼苗第 3—6 叶 POD 活性显著低于 H 处理, Fe 处理幼苗第 3—6 叶 POD 活性与 H 处理无显著差异。可

表 5 正常水分(T₁)和干旱(T₂)条件下 NaH₂PO₄、Fe₂(SO₄)₃ 处理的冬小麦幼苗叶片 SOD 活性

Table 5 SOD activity of winter wheat seedlings under well-watered (T₁) and drought (T₂) conditions under NaH₂PO₄ and Fe₂(SO₄)₃ treatments

水分条件 Water condition	处理 Treatment	处理后 6 d 6 d after treatment						T ₁ 处理后 12 d (T ₂ 复水后 2 d) 12 d after T ₁ treatment (2 d after T ₂ rehydration)						U/g
		第 1 叶 1 st leaf	第 2 叶 2 nd leaf	第 3 叶 3 rd leaf	第 4 叶 4 th leaf	第 5 叶 5 th leaf	第 6 叶 6 th leaf	第 1 叶 1 st leaf	第 2 叶 2 nd leaf	第 3 叶 3 rd leaf	第 4 叶 4 th leaf	第 5 叶 5 th leaf	第 6 叶 6 th leaf	
		T ₁	H	346.28 a	343.39 a	338.70 a	341.83 a	334.91 a	340.71 b	387.85 b	361.41 b	277.16 b	280.48 b	
	P	360.19 a	357.21 a	350.09 a	346.79 a	337.62 a	402.12 a	487.69 a	488.55 a	365.41 a	396.67 a			
	Fe	381.93 a	371.71 a	361.45 a	359.36 a	339.49 a	435.35 a	395.80 b	389.23 b	366.61 a	358.07 a			
T ₂	H	342.69 b	331.40 b	367.12 a	331.35 a	359.24 a	355.16 b	346.20 b	332.55 b	359.42 b	281.39 b			
	P	373.40 b	363.04 ab	371.82 a	349.26 a	358.54 a	372.74 ab	386.02 ab	370.98 ab	377.33 ab	314.28 ab			
	Fe	420.98 a	400.01 a	393.72 a	355.87 a	350.43 a	402.25 a	414.48 a	401.38 a	407.15 a	341.13 a			

表 6 正常水分(T₁)和干旱(T₂)条件下 NaH₂PO₄、Fe₂(SO₄)₃ 处理的冬小麦幼苗叶片 POD 活性

Table 6 POD activity of winter wheat seedlings under well-watered (T₁) and drought (T₂) conditions under NaH₂PO₄ and Fe₂(SO₄)₃ treatments

水分条件 Water condition	处理 Treatment	处理后 6 d 6 d after treatment						T ₁ 处理后 12 d (T ₂ 复水后 2 d) 12 d after T ₁ treatment (2 d after T ₂ rehydration)						U/g
		第 1 叶 1 st leaf	第 2 叶 2 nd leaf	第 3 叶 3 rd leaf	第 4 叶 4 th leaf	第 5 叶 5 th leaf	第 6 叶 6 th leaf	第 1 叶 1 st leaf	第 2 叶 2 nd leaf	第 3 叶 3 rd leaf	第 4 叶 4 th leaf	第 5 叶 5 th leaf	第 6 叶 6 th leaf	
		T ₁	H	302.72 b	272.74 b	256.09 a	233.72 a	215.05 b	263.90 a	243.22 a	283.47 a	240.08 a	243.11 a	
	P	349.17 a	316.09 ab	297.71 a	263.24 a	269.84 a	240.41 a	288.73 a	259.63 a	264.64 a	241.08 a			
	Fe	345.51 ab	321.96 a	299.51 a	273.97 a	260.79 a	208.72 a	269.47 a	257.86 a	266.84 a	276.72 a			
T ₂	H	330.44 a	335.76 a	322.06 a	286.12 ab	307.21 a	279.08 a	337.01 a	309.63 a	291.69 a	259.36 a			
	P	329.95 a	320.52 a	304.72 a	271.05 b	257.76 b	265.43 a	265.25 b	221.65 b	222.76 b	221.03 b			
	Fe	343.53 a	364.73 a	339.01 a	318.27 a	339.22 a	257.29 a	315.33 a	291.41 a	285.80 a	268.43 a			

见,2种水分条件下P、Fe处理对幼苗不同叶位POD活性均无显著提高。

2.3.3 幼苗叶片CAT活性

由表7可知,正常水分(T_1)处理后6d, NaH_2PO_4 (P)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (Fe)处理幼苗各叶位CAT活性与水处理(H)均无显著差异;正常水分(T_1)处理后12d,幼苗第1叶脱落,第6叶展开,P、Fe处理后幼苗各叶位叶片CAT活性均提高,其中,P处理幼苗第2叶CAT活性与H处理无显著差异,Fe处理幼苗第2叶CAT活性显著高于H处理,P、Fe处理幼苗第3—6叶CAT活性均显著高于H处理。干旱处理(T_2)后6d,P处理幼苗第1

叶CAT活性与H处理无显著差异,Fe处理幼苗第1叶CAT活性显著高于H处理,P、Fe处理幼苗第2—5叶CAT活性与H处理均无显著差异;干旱处理(T_2)后12d,P、Fe处理幼苗第2叶CAT活性均显著高于H处理,P处理幼苗第3—5叶CAT活性与H处理均无显著差异,Fe处理幼苗第3—5叶CAT活性显著高于H处理,P、Fe处理幼苗第6叶CAT活性与H处理均无显著差异。可见,正常水分(T_1)下P、Fe处理均能显著提高冬小麦幼苗不同叶位叶片CAT活性,干旱条件(T_2)下Fe处理显著提高了冬小麦幼苗不同叶位叶片CAT活性。

表7 正常水分(T_1)和干旱(T_2)条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理的冬小麦幼苗叶片CAT活性

Table 7 CAT activity of winter wheat seedlings under well-watered (T_1) and drought (T_2) conditions under NaH_2PO_4 and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ treatments

U/g

水分条件 Water condition	处理 Treatment	处理后6d 6 d after treatment					T_1 处理后12d(T_2 复水后2d) 12 d after T_1 treatment (2 d after T_2 rehydration)				
		第1叶 1 st leaf	第2叶 2 nd leaf	第3叶 3 rd leaf	第4叶 4 th leaf	第5叶 5 th leaf	第2叶 2 nd leaf	第3叶 3 rd leaf	第4叶 4 th leaf	第5叶 5 th leaf	第6叶 6 th leaf
		T_1	H	23.11 a	17.09 a	18.35 a	18.03 a	18.16 a	16.26 b	16.14 c	18.33 b
	P	21.72 a	16.00 a	16.65 a	16.12 a	15.17 a	18.47 ab	25.04 b	24.84 a	22.20 a	24.54 a
	Fe	22.49 a	16.97 a	17.74 a	16.20 a	17.74 a	22.04 a	29.22 a	26.17 a	23.91 a	22.44 a
T_2	H	17.01 b	17.26 a	17.13 a	16.43 a	17.34 a	10.03 b	18.54 b	15.85 b	16.33 b	13.94 a
	P	20.12 ab	18.39 a	17.72 a	18.02 a	18.20 a	16.03 a	21.22 ab	19.61 ab	19.98 ab	15.95 a
	Fe	21.78 a	20.03 a	17.81 a	17.48 a	16.88 a	18.34 a	25.69 a	22.66 a	22.04 a	17.65 a

3 讨论

3.1 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦种子萌发的影响

磷、铁处理能促进作物种子萌发,处理试剂、处理浓度不同,效果也不相同。已有研究表明,经磷酸二氢钾(KH_2PO_4)处理的黑麦种子发芽率提高^[23]。就处理浓度而言,5 mmol/L的磷酸氢二钾(K_2HPO_4)处理鹰嘴豆种子效果更好^[24]。0.01~100.00 mmol/L磷酸二氢钠(NaH_2PO_4)浸种10 h能使小麦种子的发芽率和发芽势提高^[25]。0.1、0.2、0.4 mol/L磷酸二氢钾(KH_2PO_4)处理均能提高小麦发芽率,且发芽率随处理浓度升高呈现先升后降的趋势,在0.2 mol/L时达到最高值,处理浓度过高则抑制小麦种子发芽^[26]。铁作为植物体必须的微量金属元

素,可以促进其代谢和其他生理活动,低浓度的铁可以用作营养载体,为生物体提供营养,促进其生长,0.001~0.005 mg/L铁处理可促进莴苣种子萌发和幼苗根系伸长,使幼苗根长提高12%~26%^[27]。2 mg/L $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理能提高面包小麦种子发芽率,继续提高 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 浓度至8 mg/L,细胞有丝分裂指数显著降低,细胞分裂异常,对种子萌发和籽粒产量均有负面影响^[28]。在本试验中,低浓度 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦种子发芽率均有提高作用但并不显著(表2和表3),与Sarwar等^[28]研究结果相比,可能是由于处理时长、处理试剂不同等原因所致,但低浓度处理对种子发芽无抑制作用。可见, NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理浓度较低时不会抑制种子萌发,浓度过高时,处理溶液渗透势过高抑制了种子的水合作用,使得处理本身对种

子萌发形成胁迫,降低种子发芽率。

3.2 正常水分条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦幼苗活力和抗氧化能力的影响

种子引发能增强幼苗活力,对幼苗生长有促进作用。Yagmur 等^[23] 研究结果显示,经磷酸二氢钾(KH_2PO_4)处理的黑麦幼苗生长量提高。磷处理还能显著提高绿豆芽生物量以及幼苗根长、茎长^[29]。铁处理能提高玉米株高和总生物量^[30]。本研究也发现,正常水分条件下, NaH_2PO_4 处理小麦幼苗干重、株高显著高于水处理, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理株高显著高于水处理(图 1)。 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理提高幼苗株高和生物量的作用可以从改善幼苗光合作用、增强幼苗抗氧化酶活性等方面解释。 KH_2PO_4 处理对冬小麦幼苗光合电子传递、光合原初反应过程均有促进作用,且提高了 PS II 的电子传递和热耗散能力^[31]。铁处理能提高叶片叶绿素含量,促进叶绿素的形成,铁作为氧载体,是细胞分裂和生长所必需的,参与酶(过氧化氢酶、过氧化物酶、细胞色素氧化酶和黄嘌呤氧化酶)的形成,对呼吸、光合作用必不可少,可以显著提高植株的净同化速率,有助于光合同化物的贮藏^[28]。本试验中, NaH_2PO_4 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 各浓度处理均提高了冬小麦幼苗新生叶片叶面积和各叶位 SPAD(图 2 和图 3)。叶面积、叶绿素含量与光合作用密切相关, NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理可能通过提高叶面积和叶绿素含量促进幼苗光合作用,进而提高幼苗干重、株高。转录组学和蛋白质组学研究表明,处理试剂诱导种子萌发可以与抗氧化系统的激活联系在一起,甘蓝型油菜种子引发过程中编码过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的基因表达上调,谷胱甘肽还原酶(GR)积累增多,处理后萌发过程中脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)积累^[32]。本研究中, NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理后幼苗抗氧化酶尤其是 SOD、CAT 活性显著提高(表 4 和表 6)。种子引发前的贮藏过程中种子发生衰老,导致过氧化氢(H_2O_2)积累,过氧化氢酶(CAT)基因表达水平和蛋白质含量降低,种子引发可通过激活 CAT 活性恢复种子的生理活动^[33]。可见,种子贮藏过程中衰老导致的氧化损伤可以通过种子引发改善,种子引发可能激活抗氧化酶基因的表达,诱导了抗氧化酶合成,提高了抗氧化酶活性。

除改善幼苗光合作用、增强幼苗抗氧化能力外, NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理后幼苗活力的提高还可

以从其他方面解释:引发可以促进种子对水分和营养物质的吸收^[34-35];引发可以加快种子内部蛋白质等物质的合成以及对植酸、矿物质等储备物质的利用^[35];引发可以加快 DNA 复制和细胞分裂^[36],启动细胞内线粒体的修复和再激活过程并启动新的线粒体的生物合成^[37];引发还可以调控种子内部的激素含量,提高种子赤霉素(GA)/脱落酸(ABA)比值,有助于胚细胞伸长和种子内部储备物质的动员^[38],提高种子乙烯含量,促进胚乳弱化和启动后萌发^[39]。总之,种子引发可以在短时间内提供较高的能量,提高养分利用效率,提高相对生长率,从而促进幼苗生长。

3.3 干旱条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对冬小麦幼苗活力和抗氧化能力的影响

种子引发的主要优势在于增强植物的抗逆性。水分胁迫条件下,0.5% (w/v) 磷酸二氢钾(KH_2PO_4)引发能促进六倍体小黑麦幼苗生长^[23]。本研究也发现,干旱条件下, NaH_2PO_4 处理后幼苗干重和苗高与水处理相比显著提高(图 1),可以从改善幼苗光合作用等方面解释。本研究中,干旱条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理能提高幼苗新叶叶面积和叶片 SPAD(图 2 和图 3)。同样有研究表明,经氧化铁纳米粒子 Fe_3O_2 -NPs 引发后的小麦植株与未引发相比叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别增加 72%、265% 和 96%^[40]。因此,磷处理通过提高幼苗有效光合面积和叶绿素含量改善了幼苗的光合作用,进而提高了幼苗生长量,增强了幼苗活力。干旱条件下,种子引发对幼苗抗氧化酶活性的影响也是其提高幼苗活力的重要原因之一。干旱会增加植物体内活性氧(ROS)的生成,过高的活性氧浓度会导致膜质过氧化、蛋白质损伤等,此时植物会启动其体内的抗氧化防御系统清除有害的活性氧^[41]。低温条件下,引发后的大豆(*Glycine max* L.)种子 SOD 和 CAT 活性增加,这被认为是引发后种子对低温逆境的耐受原因^[42]。在盐胁迫条件下引发的甘蓝型油菜种子中,SOD 和 CAT 活性增强,基因表达率升高^[43]。引发后的种子抗氧化特性的增强意味着幼苗和植株在逆境条件下的适应性增强。经氧化铁纳米粒子 Fe_3O_2 -NPs 引发的小麦植株在水分胁迫下超氧化物歧化酶(SOD)含量增加 115%^[15]。本研究中,干旱条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理均提高了冬小麦幼苗不同叶位叶片 SOD 和 CAT 活性(表 4 和表 6),恢复水分后差异更

加显著,可能原因是干旱信号由根系自下向上传递,叶片感受干旱信号后做出反应需要时间,因此恢复水分后差异更加显著。然而,干旱条件下 NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理对幼苗不同叶位叶片过氧化物酶(POD)活性影响不显著(表5)。胁迫条件下的水稻种子中过氧化物酶(POD)活性没有增加,但谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性提高,热休克蛋白 HSP70 表达量提高^[15],这可能是胁迫条件下另一种保护机制。Chen 等^[44]的研究表明,其他与种子萌发相关的活性氧(ROS)清除机制如抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环,可能是被引发种子中关键的抗氧化机制。

除抗氧化系统的激活外,种子引发过程中许多其他的生理、生化和分子机制也受到刺激,有助于提高植物的抗逆性。种子引发可以调节信号分子和植物激素的水平,从而影响它们在萌发过程中的相互关系和干扰,从而影响植株生长、发育和胁迫耐受性^[45]。引发对种子含水量的调控也是其增强植物抗逆性的重要原因。引发处理可以提高种子吸水率,因为种子内部的水通道蛋白调节水分运动,在引发处理(浸种)期间以及不利条件下会调控种子萌发^[46]。大田生产中,种子引发技术已经在一系列作物上推广,例如小麦、玉米、水稻等^[47-48]。针对 10 个国家 17 种作物种子引发处理的 Meta 分析结果表明,种子引发对作物生产有显著的积极影响:种子出苗速度比常规播种提高 22%,最终出苗率提高 11%,总产量比常规播种提高 21%,此外,在非生物逆境胁迫条件下,种子引发优点更为突出,对在低投入、资源贫乏的农业系统中工作的农民来说,种子引发尤其有益^[49]。在大田生产中,将种子引发与微量施肥相结合,可以提高肥料利用率、价值成本比、毛利率等经济效益,为农民提供一种新的增产增收选择。总之,种子引发技术具有提高农业生产力的巨大潜力,特别是在旱地农业中,这项技术的推广将大大改善作物在不同农业生态条件下的农艺和经济表现^[50]。

4 结论

适宜浓度的 NaH_2PO_4 (0.05~0.30 mol/L)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (0.01~0.04 mol/L)处理均能促进冬小麦种子萌发生长,在本试验条件下, NaH_2PO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 不抑制种子萌发的最大处理浓度分别为 0.30 和 0.04 mol/L。种子经该浓度处理后,在苗期

正常供水和干旱胁迫下,冬小麦幼苗活力和抗氧化能力均受到显著影响; NaH_2PO_4 处理后幼苗干重和株高均显著提高, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理只在正常水分下可显著提高幼苗的株高; NaH_2PO_4 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 引发均可显著提高幼苗叶片的叶面积、SPAD、SOD 和 CAT 活性,但对 POD 活性无显著影响。综上,适宜浓度的 P、Fe 处理均能促进冬小麦种子萌发和幼苗生长,可提高有效光合面积和叶绿素含量,从而改善了幼苗的光合作用,提高了叶片抗氧化酶活性,增强了幼苗活力和抗旱性。

参考文献 References

- [1] Lutts S, Benincasa P, Wojtyla L, Kubala S S, Pace R, Lechowska K, Quinet M, Garnczarska M. Seed priming: New comprehensive approaches for an old empirical technique. In Susana A, Alma B. *New Challenges in Seed Biology-basic and Translational Research Driving Seed Technology*[M/OL]. London: IntechOpen Limited, (2016-10-12). DOI: 10.5772/64420
- [2] Jisha K C, Vijayakumari K, Puthur J T. Seed priming for abiotic stress tolerance: An overview[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(5): 1381-1396
- [3] Ibrahim E A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 192: 38-46
- [4] Farooq M, Wahid A, Siddique K H M. Micronutrient application through seed treatments: A review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 12(1): 125-142
- [5] Huang H M, Li J, Li B, Zhang D D, Zhao N, Tang S F. Comparison of different K-struvite crystallization processes for simultaneous potassium and phosphate recovery from source-separated urine[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 787-795
- [6] Yadav H, Fatima R, Sharma A, Mathur S. Enhancement of applicability of rock phosphate in alkaline soils by organic compost[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113: 80-85
- [7] Bashir K, Ishimaru Y, Nishizawa N K. Iron uptake and loading into rice grains[J]. *Rice*, 2010, 3(2): 122-130
- [8] Vigani G, Zocchi G, Bashir K, Philippar K, Briat J F. Signals from chloroplasts and mitochondria for iron homeostasis regulation[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(6): 305-311
- [9] Guerinot M L, Yi Y. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available[J]. *Plant Physiology*, 1994, 104(3): 815
- [10] Cruz de Carvalho M H. Drought stress and reactive oxygen species: Production, scavenging and signaling[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2008, 3(3): 156-165
- [11] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930
- [12] Roqueiro G, Maldonado S, Rios M C, Maroder H. Fluctuation of oxidative stress indicators in *Salix nigra* seeds during priming [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(10): 3631-3642
- [13] Azooz M M. Salt stress mitigation by seed priming with salicylic acid in two faba bean genotypes differing in salt tolerance [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2009, 11(4): 343-350
- [14] Muhammad I, Kolla M, Volker R, Günter N. Impact of nutrient seed priming on germination, seedling development, nutritional status and grain yield of maize [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(12): 1803-1821
- [15] Ajouri A, Asgedom H, Becker M. Seed priming enhances germination

- and seedling growth of barley under conditions of P and Zn deficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(5): 630-636
- [16] 杨俊兴, 郭庆军, 韩雁, 张彤. 水分胁迫条件下钙赤合剂和磷浸种对冬小麦幼苗净光合速率和抗氧化系统的影响[J]. *作物杂志*, 2012(4): 25-29
Yang J X, Guo Q J, Han Y, Zhang T. Effects of seed soaking with Ca-GA mixture and phosphorus on photosynthetic rate and antioxidant system of wheat seedlings under water stress condition[J]. *Crops*, 2012(4): 25-29 (in Chinese)
- [17] 李春霞. 锰、铁和钼肥处理种子与叶面喷施对小麦生长与吸收的影响及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
Li C X. Effects and mechanism of seed soaking and foliar spraying of manganese, iron and molybdenum on growth and absorb of wheat[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019 (in Chinese)
- [18] Zulfiqar U, Maqsood M, Hussain S, Anwar-ul-Haq M. Iron nutrition improves productivity, profitability, and biofortification of bread wheat under conventional and conservation tillage systems[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(3): 1298-1310
- [19] 王兴义, 左冰云, 韩清芳, 邹小春, 丁瑞霞, 崔雯雯, 贾志宽. 铁肥浸种对玉米发育前期生长及光合荧光特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(5): 711-717
Wang X Y, Zuo B Y, Han Q F, Wu X C, Ding R X, Cui W W, Jia Z K. Effects of seed soaking with iron fertilizer on growth and photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L) in early stage [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(5): 711-717 (in Chinese)
- [20] 潘瑞炽, 豆志杰, 叶庆生. 茉莉酸甲酯对水分胁迫下花生幼苗 SOD 活性和膜脂过氧化作用的影响[J]. *植物生理学报*, 1995, 21(3): 221-228
Pan R C, Dou Z J, Ye Q S. Effects of methyl jasmonate on SOD activity and membrane-lipid peroxidation in peanut seedlings during water stress[J]. *Acta Physiologica Sinica*, 1995, 21(3): 221-228 (in Chinese)
- [21] 陈坤明, 张承烈. 干旱期间春小麦叶片多胺含量与作物抗旱性的关系[J]. *植物生理学报*, 2000, 26(5): 381-386
Chen K M, Zhang C L. Polyamine contents in the spring wheat leaves and their relations to drought-resistance [J]. *Acta Physiologica Sinica*, 2000, 26(5): 381-386 (in Chinese)
- [22] 曾丽西, 王以柔, 刘鸿先. 低温光照下与黄瓜子叶叶绿素降低有关的酶促反应[J]. *植物生理学报*, 1991, 17(2): 177-182
Zeng S X, Wang Y R, Liu H X. Some enzymatic reactions related to chlorophyll degradation in cucumber cotyledons under chilling in the light[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 1991, 17(2): 177-182 (in Chinese)
- [23] Yagmur M, Kaydan D. Alleviation of osmotic stress of water and salt in germination and seedling growth of triticale with seed priming treatments[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2008, 7(13): 2156-2162
- [24] Sarwar N, Yousaf S, Jamil F F. Induction of salt tolerance in chickpea by using simple and safe chemicals[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2006, 38(2): 325-329
- [25] 曹柳, 卢一富, 李真理, 杨俊兴, 顾松圆. 磷钾浸种对干旱胁迫冬小麦种子萌发与生理生化特性的影响[J]. *贵州农业科学*, 2016, 44(5): 32-35
Cao L, Lu Y F, Li Z L, Yang J X, Gu S P. Effects of different phosphorus and potassium agents on seed germination and physiological and biochemical characteristics of winter wheat under drought stress[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(5): 32-35 (in Chinese)
- [26] 张建, 范光发, 姜辉. 磷酸二氢钾-赤霉素浸种对小麦种子萌发的影响[J]. *园艺与种苗*, 2020, 40(5): 51-53
Zhang J, Fan G F, Lou H. Effects of KH_2PO_4 and GA soaking on wheat seeds germination[J]. *Horticulture & Seed*, 2020, 40(5): 51-53 (in Chinese)
- [27] Liu R Q, Zhang H Y, Lai R. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: Nanotoxicants or nonnutrients? [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2016, 227(1): 1-14
- [28] Reis S, Pavia I, Carvalho A, Moutinho-Pereira J, Correia C, Lima-Brito J. Seed priming with iron and zinc in bread wheat: Effects in germination, mitosis and grain yield[J]. *Protoplasma*, 2018, 255(4): 1179-1194
- [29] Umair A, Ali S, Sarwar M, Bashir K. Assessment of some priming techniques in mungbean (*Vigna radiata*): A green house study[J]. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 2013, 26: 265-274
- [30] Sharifi R, Mohammadi K, Rokhzadi A. Effect of seed priming and foliar application with micronutrients on quality of forage corn (*Zea mays*) [J]. *Environmental and Experimental Biology*, 2016, 14(4): 151-156
- [31] 杨俊兴, 张彤, 王磊. Ca-GA 合剂和磷浸种对水分胁迫条件下冬小麦萌发及幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. *安徽农业科学*, 2005, 33(2): 210-212, 222
Yang J X, Zhang T, Wang L. Effects of Ca-GA mixture and phosphorus immersion on germination and chlorophyll fluorescence parameters of winter wheat seedlings under water stress [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2005, 33(2): 210-212, 222
- [32] Kubala S, Garnczarska M, Wojtyla L, Clippe A, Kosmala A, Żmienko A, Lutts S, Quinet M. Deciphering priming-induced improvement of rapeseed (*Brassica napus* L) germination through an integrated transcriptomic and proteomic approach[J]. *Plant Science*, 2015, 231: 94-113
- [33] Kibinza S, Bazin J, Bailly C, Farrant J M, Corbineau F, El-Maarouf-Bouteau H. Catalase is a key enzyme in seed recovery from ageing during priming[J]. *Plant Science*, 2011, 181(3): 309-315
- [34] Galhaut L, de Lespinay A, Walker D J, Pilar Bernal M P, Correal E, Lutts S. Seed priming of *Trifolium repens* L. improved germination and early seedling growth on heavy metal-contaminated soil[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2014, 225(4): 1-15
- [35] Murad A, Zia U, Mian I A, Naseem K, Nangial K, Muhammad A, Muhammad S. Response of maize to nitrogen levels and seed priming[J]. *Pure and Applied Biology*, 2016, 5(3): 578-587
- [36] Sathish S, Sundareswa S, Senthil N, Ganesan K N. Biochemical changes due to seed priming in maize hybrid COH(M)₅ [J]. *Research Journal of Seed Science*, 2012, 5(3): 71-83
- [37] Sun H P, Li L, Wang X, Wu S, Wang X F. Ascorbate-glutathione cycle of mitochondria in osmoprimed soybean cotyledons in response to imbibitional chilling injury[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(3): 226-232
- [38] El-Araby M M, Moustafa S M A, Ismail A I, Hegazi A Z A. Hormone and phenol levels during germination and osmopriming of tomato seeds, and associated variations in protein patterns and anatomical seed features[J]. *Acta Agronomica Hungarica*, 2006, 54(4): 441-457
- [39] Chen K, Arora R. Priming memory invokes seed stress-tolerance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 94: 33-45
- [40] Noor R, Yasmin H, Ilyas N, Nosheen A, Hassan M N, Mumtaz S, Khan N, Ahmad A, Ahmad P. Comparative analysis of iron oxide nanoparticles synthesized from ginger (*Zingiber officinale*) and cumin seeds (*Cuminum cyminum*) to induce resistance in wheat against drought stress[J]. *Chemosphere*, 2022, 292: 133-201
- [41] 高鑫宇, 刘丽君, 刘博, 马玉玲, 王瑞奇, 董守坤. PEG 模拟干旱对大豆抗氧化酶活性及抗氧化能力的影响[J]. *大豆科学*, 2016, 35(4): 616-619
Gao X Y, Liu L J, Liu B, Ma Y L, Wang R Q, Dong S K. Effect of drought stress simulated by PEG on antioxidant enzyme activities and antioxidant capacity in soybean[J]. *Soybean Science*, 2016, 35(4): 616-619 (in Chinese)
- [42] Maria P M, Françoise C, Dominique V, Christophe B, Daniel C. Osmoconditioning reduces physiological and biochemical damage induced by chilling in soybean seeds[J]. *Physiologia Plantarum*, 2001, 111(4): 473-482
- [43] Kubala S, Wojtyla L, Garnczarska M. Seed priming improves salt stress tolerance during germination by modulation of antioxidative capacity[J].

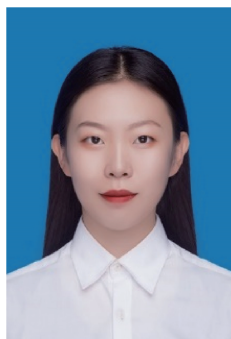
Journal of Biotechnology Computational Biology and Bionanotechnology, 2013, 94(2): 217-229

- [44] Chen K T, Arora R. Dynamics of the antioxidant system during seed osmopriming, post-priming germination, and seedling establishment in Spinach (*Spinacia oleracea*) [J]. *Plant Science*, 2011, 180(2): 212-220
- [45] Łukasz W, Katarzyna L, Szymon K, Małgorzata G. Different modes of hydrogen peroxide action during seed germination [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2016-02-04). DOI: doi.org/10.3389/fpls.2016.00066
- [46] Wojtyła Ł, Lechowska K, Kubala S, Garnczarska M. Molecular processes induced in primed seeds: Increasing the potential to stabilize crop yields under drought conditions [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 203: 116-126
- [47] Harris D, Raghuvanshi B S, Gangwar J S, Singh S C, Joshi K D, Rashid A, Hollington P A. Participatory evaluation by farmers of on-

farm seed priming in wheat in India, Nepal and Pakistan [J]. *Experimental Agriculture*, 2001, 37(3): 403-415

- [48] Harris D, Joshi A, Khan P A, Gothkar P, Sodhi P S. On-farm seed priming in semi-arid agriculture: Development and evaluation in maize, rice and chickpea in India using participatory methods [J]. *Experimental Agriculture*, 1999, 35(1): 15-29
- [49] Carrillo-Reche J, Vallejo-Marín M, Quilliam R S. Quantifying the potential of “on-farm” seed priming to increase crop performance in developing countries [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, 38(6): 1-14
- [50] Sime G, Aune J B. On-farm seed priming and fertilizer micro-dosing: Agronomic and economic responses of maize in semi-arid Ethiopia [J/OL]. *Food and Energy Security*, [2019-11-11]. DOI: doi.org/10.1002/fes3.190

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 张婉晴, 硕士研究生, 2020年9月至今就读于中国农业大学作物栽培学与耕作学专业, 在 *Agronomy, Crop and Pasture Science* 期刊参与发表论文2篇, 2020—2021年获中国农业大学硕士二等学业奖学金, 2021—2022年获中国农业大学硕士一等学业奖学金。



通讯作者简介: 张英华, 博士, 中国农业大学农学院教授, 博士生导师, 国家小麦产业技术体系岗位专家, 美国德州农工大学和澳大利亚CSIRO访问学者。主要从事小麦高产优质高效栽培理论与技术研究, 主持多项国家自然科学基金项目和国家重点研发计划课题。先后获得农业部中华农业科技一等奖、河南省科技进步二等奖、滨州市科技进步一等奖等奖项。以通讯作者在 *Journal of Experimental Botany, Field Crops Research, Food Chemistry, Agricultural Water Management, Science of the Total Environment, The Crop Journal, Journal of Integrative Agriculture* 等国际专业期刊发表论文40余篇, 出版教材和专著2部。