麦类作物学报 2026,46(9):1252－1258
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.13

网络出版时间:2026-09-08
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260908.1031.002

纳米二氧化钛引发时间和浓度对干旱胁迫下大麦种子萌发和幼苗生长的影响

叶 湘,宋瑞娇,齐军仓

(石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆石河子 832003)

摘 要:为探究纳米二氧化钛($nTiO_2$)引发处理对干旱胁迫下大麦种子萌发和幼苗生长的影响,明确其最佳处理时间与浓度组合,以大麦品种甘啤8号为材料,采用22%聚乙二醇-6000模拟干旱胁迫,设置3个引发时间(12、24、36 h)和5个浓度(0、250、500、750、1 000 mg·L^{-1}),比较分析不同处理下大麦种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数以及幼苗根长、芽长、根鲜重、芽鲜重、根干重、芽干重、根冠比、根数、芽鞘长等13个指标的差异。结果表明,引发时间、浓度及二者互作对大部分指标均有显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)影响。与未引发对照相比,水引发处理可显著提升部分种子萌发和幼苗生长指标。在12 h引发时间下,750 mg·L^{-1} $nTiO_2$处理效果最佳,种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数较水引发处理分别提高8.0个百分点、44.7个百分点、69.4%和145.8%,幼苗根长和芽长分别增加72.5%和5.2%;在24 h引发时间下,500 mg·L^{-1} $nTiO_2$处理表现最优,种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数较水引发处理分别提升18.7个百分点、10.7个百分点、28.9%和102.9%,幼苗根鲜重和根长分别增加40.5%和7.0%。当引发时间延长至36 h或浓度升至1 000 mg·L^{-1}时,$nTiO_2$对种子萌发和幼苗生长表现出抑制作用,种子发芽率及幼苗根系生长指标显著低于水引发处理。这说明适宜时间与浓度的$nTiO_2$引发可有效促进干旱胁迫下大麦种子萌发和幼苗生长,其中750 mg·L^{-1} $nTiO_2$引发12 h和500 mg·L^{-1} $nTiO_2$引发24 h在本试验条件下效果较佳,尤其是500 mg·L^{-1} $nTiO_2$引发24 h的综合效果更优。

关键词:纳米二氧化钛;干旱胁迫;大麦(*Hordeum vulgare* L.);种子引发;引发时间;引发浓度

中图分类号:S512.3;S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1252-07

Effects of Nano-Titanium Dioxide Priming Time and Concentration on the Germination of Barley Seeds and the Growth of Barley Seedlings under Drought Stress

Ye Xiang, Song Ruijiao, Qi Juncang

(College of Agriculture, Shihezi University / Key Laboratory of Oasis Ecology and Agriculture of Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of nano-titanium dioxide($nTiO_2$) priming on seed germination and seedling growth of barley under drought stress, and to determine the optimal combination of priming time and concentration. Using a barley cultivar Ganpi 8 as material, drought stress was simulated with 22% polyethylene glycol-6000. Three priming times(12, 24, and 36 h) and five $nTiO_2$ concentrations(0, 250, 500, 750, and 1 000 mg·L^{-1}) were set, and the diifferences in 13 indices including germination rate, germination potential, germination index, vigor index, root length, shoot length, root fresh weight, shoot fresh weight, root dry weight, shoot dry weight, root-shoot ratio, root number, and coleoptile length among different treatments were compared and analyzed. Two-way ANOVA showed that priming time, concentration, and their interaction had significant

收稿日期:2025-09-22 修回日期:2026-03-16
基金项目:国家现代农业产业技术体系自主项目(CARS-05-19B)
第一作者 E-mail:769809280@qq.com(叶 湘)
通讯作者 E-mail:shzqjc@qq.com(齐军仓)

effects on most indices($P<0.05$ or $P<0.01$), with significant interaction effects between time and concentration. Compared with the unprimed control(CK), hydro-priming(HP) significantly improved some germination and growth indices. Under 12 h priming time, 750 mg · L^{-1} $nTiO_2$ treatment showed the best effect, with germination rate, germination potential, germination index, and vigor index significantly increased by 8.0 percentage points, 44.7 percentage points, 69.4%, and 145.8%, respectively, compared with hydro-priming, and root length and shoot length increased by 72.5% and 5.2%, respectively. Under 24 h priming time, 500 mg · L^{-1} $nTiO_2$ treatment performed best, with the above germination indices significantly increased by 18.7 percentage points, 10.7 percentage points, 28.9%, and 102.9%, respectively, and root fresh weight and root length increased by 40.5% and 7.0%, respectively. When priming time was extended to 36 h or concentration increased to 1 000 mg · L^{-1}, $nTiO_2$ showed inhibitory effects, with germination rate and root growth indices significantly lower than those of hydro-priming. This indicates that appropriate time and concentration of $nTiO_2$ priming can effectively promote barley seed germination and seedling growth under drought stress, where 12 h priming with 750 mg · L^{-1} $nTiO_2$ and 24 h priming with 500 mg · L^{-1} $nTiO_2$ showed better effects under the experimental conditions, especially the comprehensive effect of 24 h priming with 500 mg · L^{-1} $nTiO_2$ showing the best overall performance.

Keywords: Nano-titanium dioxide; Drought stress; Barley; Seed primming; Priming time; Priming concentration

干旱是影响全球农业生产的重要环境因素之一[1]。大麦(*Hordeum vulgare* L.)是重要的粮食和饲料作物,产量仅次于玉米、小麦和水稻[2],其种子在萌发阶段对干旱胁迫最敏感[3]。种子引发可提高种子活力,是增强种子耐逆性的重要方法[4]。作为一种经济且可持续的技术,种子引发效果受引发剂种类、时间、浓度、温度等多种因素影响,其中引发时间与浓度尤为关键。

近年来,纳米材料在农业领域的应用日益广泛[5-6],其中纳米二氧化钛(nano-titanium-dioxide,$nTiO_2$)因其独特的光催化、抗菌、抗氧化等特性而备受关注[7]。研究发现,水培环境下施用 $nTiO_2$ 能够缓解镉胁迫对小麦造成的生理毒害[8]。叶面喷施 $nTiO_2$ 可促进青菜叶绿素合成,上调糖酵解和 TCA 循环途径相关基因表达[9]。在玉米盆栽实验中施用 $nTiO_2$ 可在一定程度上诱导抗氧化防御,减轻镉胁迫伤害[10]。$nTiO_2$ 可能参与调控多种植物生长,但关于 $nTiO_2$ 种子引发对干旱胁迫下大麦种子萌发和幼苗生长影响的研究却鲜见报道。本研究设置不同浓度 $nTiO_2$ 和不同引发时间,比较分析干旱胁迫下 $nTiO_2$ 引发处理对大麦种子的萌发特性和幼苗生长的影响,以期了解 $nTiO_2$ 引发对大麦萌发期抗旱能力的调节作用,为农业生产中利用纳米技术提高作物抗旱性提供理论支撑和技术参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

$nTiO_2$(颗粒大小 10～25 nm,锐钛矿)购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。供试大麦品种为甘啤 8 号,由石河子大学提供。

1.2　试验方法

1.2.1　适宜聚乙二醇-6000 胁迫浓度筛选

挑选籽粒饱满的大麦种子,先用 10%的次氯酸钠溶液浸泡 10 min 进行表面消毒,然后拿 75%酒精冲洗 5～6 s,最后在蒸馏水中洗净消毒剂残留并用吸水纸滤干水分。分别取 50 粒已消毒的种子,将其整齐排列在发芽盒中,每个发芽盒中分别加入 40 mL 不同浓度(0、10%、20%、21%、22%、23%、24%、25%)的聚乙二醇-6000 溶液。在第 7 天时统计大麦种子发芽率,以此筛选出诱导其萌发半致死聚乙二醇-6000 浓度。

1.2.2　种子引发处理

配制不同浓度(0、250、500、750 和 1 000 mg · L^{-1})的 $nTiO_2$ 溶液各 100 mL。将不同浓度溶液在超声波(100 W,40 kHZ)处理 30 min。分别取已消毒的大麦种子于不同浓度的 $nTiO_2$ 溶液中,放在摇床上避光吸胀 12、24 和 36 h(分别记作 P1、P2 和 P3)后用去离子水冲洗,在常温下通风回干至种子原始水分状态,选用未引发的大麦种

子作为对照(CK)。

1.2.3 发芽实验

采用发芽盒-滤纸法进行大麦种子萌发实验。取消毒后的种子置于铺有 4 层滤纸的发芽盒(每盒 50 粒种子)中,每盒加入 40 mL 半致死聚乙二醇-6000 溶液模拟干旱胁迫,并进行不同引发浓度和时间处理,每个处理设置 3 次重复。发芽盒置于 25 ℃恒温培养箱黑暗培养,每 24 h 统计 1 次发芽种子数,持续观察 7 d,最后计算发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数。

发芽率=(供试种子中第 7 天正常发芽种子数/供试种子总数)×100%;

发芽势=第 3 天发芽种子数/供试种子总数×100%;

发芽指数=$\sum(G_t/D_t)$,G_t 是第 t 天的发芽数,D_t 发芽时间;

活力指数=发芽指数×发芽第 7 天植株鲜重。

1.2.4 测定幼苗生长指标

在发芽第 7 天,从各发芽盒中随机抽取 20 株大麦幼苗,测定根和芽的鲜重,并根据两者的比值计算根冠比。然后将样品放入烘箱,经 105 ℃下杀青 30 min 后,80 ℃烘干至恒重,称根和芽的干重。同时,从各发芽盒中随机选取 6 株大麦幼苗,调查每株根数、芽长、芽鞘长和最大根长。

1.3 数据处理

数据用 Excel 2016 软件进行整理与初步处理,并使用 SPSS 25 软件完成统计分析和差异显著性检验;图表绘制分别在 Excel 2016 与 GraphPad Prism 中完成。

2 结果与分析

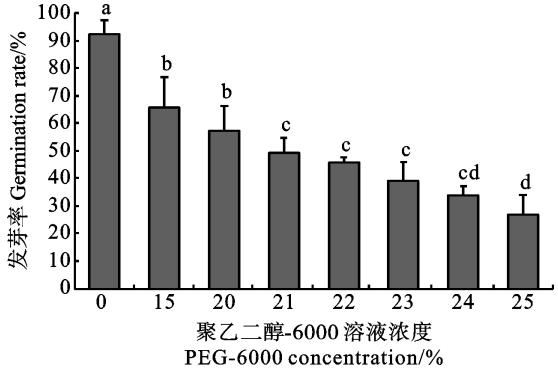
2.1 聚乙二醇-6000 浓度对大麦种子发芽率的影响

随着聚乙二醇-6000 浓度的升高,大麦种子的发芽率逐渐降低(图 1)。在 22%的聚乙二醇-6000 胁迫条件下,其发芽率大约降至正常水分条件下发芽率的一半。因此,本研究选择 22%聚乙二醇-6000 浓度用于后续实验模拟干旱胁迫。

2.2 $nTiO_2$ 引发对干旱胁迫下大麦种子萌发的影响

方差分析表明,$nTiO_2$ 引发时间、浓度及其互作对干旱胁迫下大麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数均有极显著影响($P<0.01$)(表 1)。干旱胁迫下,与 CK 相比,水引发处理(HP,0 mg·L^{-1} $nTiO_2$)的种子萌发能力均有所提升,其中 24 h 水引发效果最稳定(图 2)。

在 12 h 引发时间下,与 HP 处理相比,750 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 处理显著提高了种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,增幅分别为 8.0 个百分点、44.7 个百分点、69.4%和 145.8%;当 $nTiO_2$ 浓度升高至 1 000 mg·L^{-1} 时,虽然发芽势和发芽指数仍有提升,但发芽率显著降低,表明高浓度 $nTiO_2$ 引发对种子萌发已产生抑制作用。在 24 h 引发时间下,500 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 处理对种子萌发的促进效果最佳,与 HP 处理相比,该处理的种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别提升 18.7 个百分点、10.7 个百分点、28.9%和 102.9%,差异均显著,250 和 750 mg·L^{-1} 处理也表现出一定的促进效应,但效果逊于 500 mg·L^{-1} 处理;1 000 mg·L^{-1} 处理的促进作用减弱,各项指标低于 HP 处理。在 36 h 引发时间下,$nTiO_2$ 引发对种子萌发已产生明显的抑制作用,其中中高浓度(≥500 mg·L^{-1})$nTiO_2$ 处理的发芽率与发芽指数较 HP 处理显著降低,表现出明显的抑制效应(图 2)。



图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among the treatments($P<0.05$).

图 1 不同浓度聚乙二醇-6000 下大麦种子的发芽率

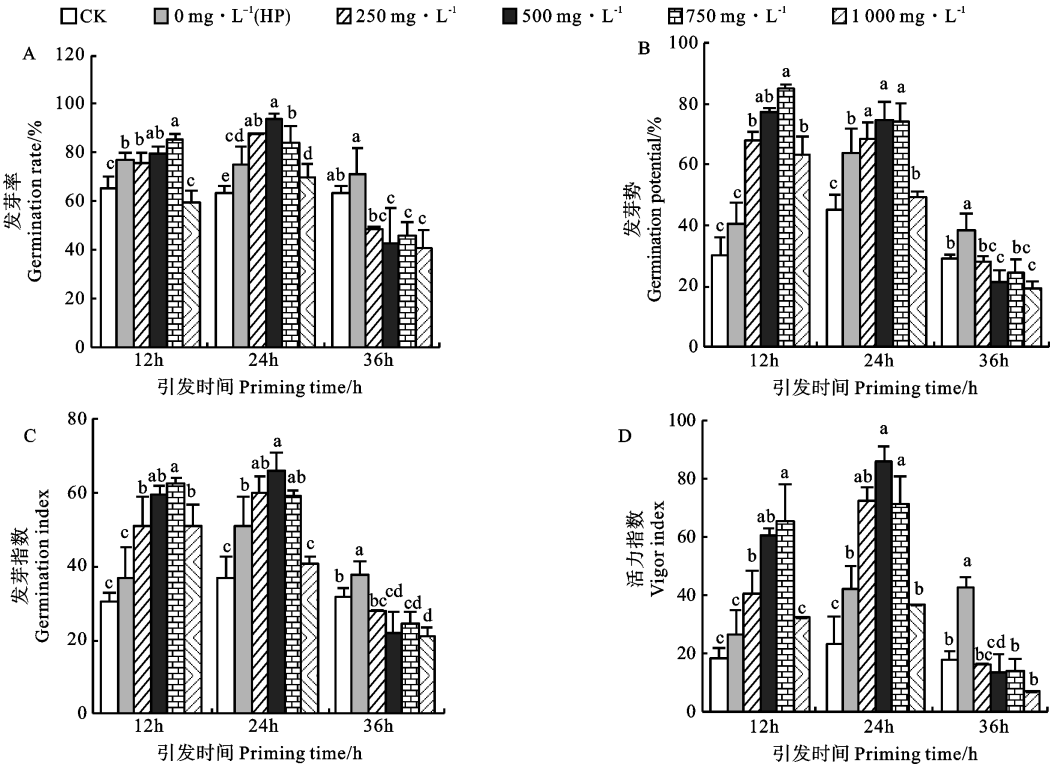
Fig. 1 Barley seed germination rate under different PEG-6000 concentrations

表 1 $nTiO_2$ 引发时间、浓度及互作对大麦种子萌发的影响(F 值)

Table 1 Effects of priming time, concentration and their interaction on seed germination indices of barley(F value)

指标 Index	时间 Time	浓度 Concentration	互作 Interaction
发芽率 Germination rate	103.52**	11.93**	10.04**
发芽势 Germination potential	165.55**	867.69**	12.72**
活力指数 Vigor index	43.27**	11.41**	6.07**
发芽指数 Germination index	151.98**	17.92**	14.46**

**:$P<0.01$。



图柱上不同字母表示同一引发时间下不同引发浓度间在 0.05 水平上差异显著。图 3 同。

Different letters above the columns indicate significant differences among different priming concentrations at the same priming time at 0.05 level. The same in figure 3.

图 2　不同 $nTiO_2$ 引发处理下大麦种子萌发的差异

Fig. 2　Difference of seed germination of barley under different $nTiO_2$ treatments

综合来看,$nTiO_2$ 引发对大麦种子萌发有一定的促进效果,但存在时间和浓度互作效应,其中 750 mg · $L^{-1}$$nTiO_2$ 引发 12 h 与 500 mg · $L^{-1}$$nTiO_2$ 引发 24 h 是两个最为有效的处理组合。

2.3　$nTiO_2$ 引发对干旱胁迫下大麦幼苗生长的影响

$nTiO_2$ 引发时间、浓度及其互作对干旱胁迫下大麦幼苗大部分生长指标有显著或极显著影响($P<0.05$ 或 $P<0.01$)(表 2)。其中,时间与浓度的互作效应在芽长、根长、根数、根鲜重、根干重、芽干重等指标上表现显著($P<0.05$)。与 CK 相比,HP 处理可显著提高根干重、芽干重、根长和芽长等指标,说明干旱胁迫下水引发在一定程度上能够改善幼苗生长状况(图 3)。

表 2　$nTiO_2$ 时间、浓度及互作对大麦幼苗生长指标的影响(F 值)

Table 2　Effects of priming time, $nTiO_2$ concentration and their interaction on seedling growth indices of barley(F value)

指标 Index	时间 Time	浓度 Concentration	互作 Interaction
根鲜重 Root fresh weight	156.312**	25.135**	16.818**
芽鲜重 Shoot fresh weight	2.565	3.813**	1.698
芽干重 Shoot dry weight	216.432**	6.163**	4.222**
根干重 Root dry weight	6.124**	10.298**	4.721**
芽鞘长 Coleoptile length	2.982	6.396**	2.856**
根数 Root number	27.677**	2.122	4.949**
根长 Root length	33.474**	8.448**	4.702**
根冠比 Root-shoot ratio	16.903**	0.576	1.035
芽长 Shoot length	31.458**	4.784*	4.660**

*:$P<0.05$; **:$P<0.01$.

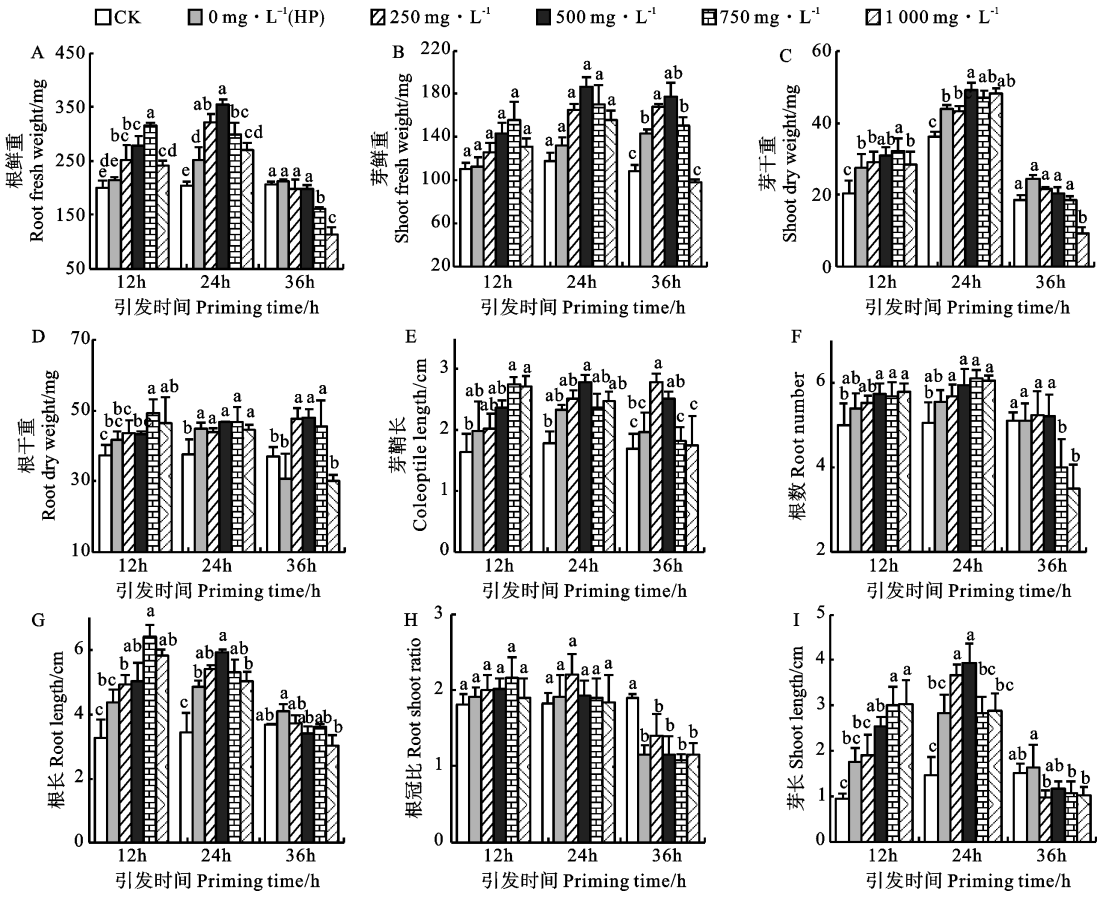


图 3 不同 $nTiO_2$ 引发处理下大麦幼苗生长的差异

Fig. 3 Difference of growth of barley seedlings under different $nTiO_2$ treatments

在 12 h 引发时间下，$nTiO_2$ 引发对大麦幼苗生长的促进效应随浓度升高而增强。与 HP 处理相比，750 mg · L^{-1} 浓度处理的促进效果表现最佳，其显著提高了根鲜重、根干重、芽干重、根长、芽长、根数及芽鞘长，增幅分别为 46.8%、39.1%、16.1%、72.5%、5.2%、38.8%和 18.5%。各浓度 $nTiO_2$ 处理对芽鲜重和根冠比影响较弱。

在 24 h 引发时间下，HP 处理较 CK 已显著提高了根鲜重、根干重、芽干重和根长。与 HP 处理相比，$nTiO_2$ 对大麦幼苗生长的促进作用主要集中在根系和芽鞘的伸长上。其中，500 mg · L^{-1} 浓度处理效果最优，使根鲜重、根长和芽鞘长均显著提高，增幅分别为 40.5%、7.0%和 18.9%。各浓度处理对芽鲜重和根干重的提升作用未达到显著水平。

在 36 h 引发时间下，$nTiO_2$ 处理对大麦幼苗生长的效应发生显著变化。与 CK 相比，250～750 mg · L^{-1} $nTiO_2$ 引发虽仍能维持一定的生物量积累（如芽鲜重和根干重），但所有浓度引发处理的根冠比均显著低于 CK 和 HP，表明长时间引发改变了光合产物的分配格局，抑制了根系的相对生长。

从以上结果看，$nTiO_2$ 引发对干旱胁迫下大麦幼苗生长有一定的促进作用，也存在时间和浓度互作效应，其中 750 mg · L^{-1} $nTiO_2$ 引发 12 h 与 500 mg · L^{-1} $nTiO_2$ 引发 24 h 是两个最为有效的处理组合。

3 讨论

纳米材料种子引发作为一种新兴的种子引发技术，其在增强作物抗逆性方面的潜力已被广泛报道[6,11-12]。研究表明，纳米银、纳米钙、纳米铈等纳米材料用于引发技术，提高水稻、油菜、辣椒等作物种子萌发期的抗逆性，能够有效缓解盐胁迫及镉胁迫等非生物逆境对种子萌发产生的毒害作用[13-15]。本研究证实，$nTiO_2$ 引发能有效缓解干旱胁迫对大麦种子萌发与幼苗生长的抑制，且该效应严格依赖于处理时间与浓度的协同作用。

本研究中，12 h 与 24 h 的引发处理显著促进了干旱胁迫下大麦种子萌发与幼苗生长，而 36 h

的处理表现出抑制作用。这与相关研究[16-18]在类似研究中的观察结果一致。本研究推测,短时引发足以使 $nTiO_2$ 颗粒在种皮上形成有益的"物理水合层"并可能通过微裂纹进入种子内部,作为微米/纳米级"人工水通道"促进吸胀初期水分的快速吸收,这对于启动干旱胁迫下的萌发进程至关重要[13]。然而,过长的引发时间(36 h)可能导致纳米颗粒在种皮孔隙或细胞间隙中过度聚集,反而物理性阻塞了水分与气体的交换通道,并可能因在组织内局部过量而诱发氧化应激,从而产生了萌发指标下降的现象。

在同一时间内,$nTiO_2$ 引发对植物种子萌发的促进作用呈现先升后降的浓度依赖性。本研究中,中低浓度(250～750 mg·L^{-1})$nTiO_2$ 的促进效果可归因于 $nTiO_2$ 的类抗氧化酶活性。$nTiO_2$ 能模拟过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性,直接清除种子在干旱胁迫下积累的过量活性氧(ROS),如 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot-}$,从而保护细胞膜结构完整性,这直接体现在本研究中活力指数与根系指标的显著提升上[19-21]。高浓度(1 000 mg·L^{-1})的 $nTiO_2$ 可能使种子内部的 ROS 清除机制饱和,过量的纳米颗粒本身即成为一种胁迫源,导致氧化还原失衡。本研究观察发现,高 $nTiO_2$ 浓度下大麦种子发芽率、幼苗根冠比等关键指标受到抑制,正是这种平衡被打破的体现。尽管有研究报道在拟南芥等物种中 1 000 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 仍具促进效应,但这种差异很可能源于作物种类、$nTiO_2$ 的尺寸、表面修饰及胁迫强度的特异性[22-24]。

通过比较不同处理组合的效果发现,750 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 引发 12 h 与 500 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 引发 24 h 两个组合均能显著缓解干旱胁迫对大麦种子萌发和幼苗生长的抑制。其中,500 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 引发 24 h 处理在发芽率、发芽势、活力指数、根系发育等方面的促进效果更为突出,表明适当延长引发时间并匹配适宜浓度,可更有效地激活种子内部的生理修复机制,增强其对干旱胁迫的适应能力。

4　结论

模拟干旱胁迫条件下,$nTiO_2$ 引发对大麦种子萌发具有显著的时间效应和浓度效应,且二者之间存在明显的互作关系。适宜时间和浓度的 $nTiO_2$ 引发处理可有效缓解干旱胁迫对大麦种子萌发和幼苗生长的抑制。在本试验条件下,750 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 引发 12 h 与 500 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 引发 24 h 为最佳处理组合,其中 500 mg·L^{-1} $nTiO_2$ 引发 24 h 处理的综合效果更优。

参考文献:

[1]Verma K K,Song X P,Kumari A,*et al*. Climate change adaptation: Challenges for agricultural sustainability [J]. *Plant, Cell & Environment*,2025,48(4):2522.

[2]Abdelrady W A,Ma Z X,Elshawy E E,*et al*. Physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in barley under salinity stress [J]. *Plant Stress*,2024,11:100403.

[3]郭姜维,姚立蓉,司二静,等.大麦不同抗旱品种抗氧化酶活性及其相关基因表达分析[J].麦类作物学报,2024,44(10):1262.
Guo J W,Yao L R,Si E J,*et al*. Analysis of antioxidant enzyme activity and related gene expression in different drought-resistant barley varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2024,44(10):1262.

[4]张康康,侯丹平,谭金松,等.种子引发技术及其提高抗旱性的机制[J].耕作与栽培,2021,41(3):38.
Zhang K K,Hou D P,Tan J S,*et al*. Seed priming technologies and its mechanisms to improve drought resistance [J]. *Tillage and Cultivation*,2021,41(3):38.

[5]Wu H H,Li Z H. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance [J]. *The Crop Journal*,2022,10(1):1.

[6]Zhao L J,Lu L,Wang A D,*et al*. Nano-biotechnology in agriculture:Use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2020,68(7):1935.

[7]姜丽思,李文远,张雨祺,等.纳米二氧化钛对植物的毒性效应研究进展[J].生物技术通报,2025,41(5):32.
Jiang L S,Li W Y,Zhang Y Q,*et al*. Research progress in the toxic effects of titanium dioxide nanoparticles on plants [J]. *Biotechnology Bulletin*,2025,41(5):32.

[8]刘 娅,陈金全,杨子月,等.纳米二氧化钛缓解镉胁迫下小麦幼苗生长及生理变化[J].环境工程,2021,39(5):184.
Liu Y,Chen J Q,Yang Z Y,*et al*. Growth and physiological indexes of wheat seedlings under cadmium stress alleviated by nano titanium dioxide [J]. *Environmental Engineering*,2021,39(5):184.

[9]Wei L,Ji L,Rico C,*et al*. Transcriptomics reveals the pathway for increasing *Brassica chinensis* L. yield under foliar application of titanium oxide nanoparticles [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2024,72(34):18957.

[10]郑泽其,李剑涛,吴佳妮,等.二氧化钛纳米颗粒对玉米幼苗吸收镉及其植物毒性的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(6):1217.
Zheng Z Q,Li J T,Wu J N,*et al*. Impact of titanium dioxide nanoparticles on cadmium uptake in maize seedlings and its phytotoxicity [J]. *Journal of Agricultural Resources and*

Environment,2022,39(6):1217.

[11]Nile S H, Thiruvengadam M, Wang Y, *et al*. Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture: Recent developments and future perspectives [J]. *Journal of Nanobiotechnology*,2022,20(1):254.

[12]Vita F, Haghmadad Milani M, Feyzi H, *et al*. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performances under abiotic stress condition [M]//Engineered Nanoparticles in Agriculture. Berlin: De Gruyter, 2023:197.

[13]Yan X, Chen S, Pan Z Y, *et al*. AgNPs-triggered seed metabolic and transcriptional reprogramming enhanced rice salt tolerance and blast resistance [J]. *ACS Nano*,2023,17(1):492.

[14]Cappetta E, Del Regno C, Conte M, *et al*. An integrated multilevel approach unveils complex seed-nanoparticle interactions and their implications for seed priming [J]. *ACS Nano*,2023,17(22):22539.

[15]段圣省,吴 妍,白晨阳,等. 不同浓度纳米钙引发甘蓝型油菜种子萌发期抗旱性比较[J]. 中南农业科技,2025,46(5):28.
Duan S S, Wu Y, Bai C Y, *et al*. Comparison of drought resistance of *Brassica napus* seeds during germination induced by different concentrations of nano-calcium [J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*,2025,46(5):28.

[16]Khan M N, Li Y H, Khan Z, *et al*. Nanoceria seed priming enhanced salt tolerance in rapeseed through modulating ROS homeostasis and α-amylase activities [J]. *Journal of Nanobiotechnology*,2021,19(1):276.

[17]Lin D H, Xing B S. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth [J]. *Environmental Pollution*,2007,150(2):243.

[18]Wu H H, Li Z H. Nano-enabled agriculture: How do nanoparticles cross barriers in plants? [J]. *Plant Communications*,2022,3(6):100346.

[19]周诗意,刘乃新,陈百翠,等. 纳米二氧化钛引发对盐胁迫下水稻种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(11):73.
Zhou S Y, Liu N X, Chen B C, *et al*. Impacts of nano-TiO_2 on germination of rice seeds under salt stress [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2025,53(11):73.

[20]Shah T, Latif S, Saeed F, *et al*. Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress [J]. *Journal of King Saud University-Science*,2021,33(1):101207.

[21]吴凤雪. 亚精胺与纳米二氧化钛浸种对玉米幼苗生长及镉积累的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023:1.
Wu F X. Effects of spermidine and nano titanium dioxide on growth and cadmium accumulation of *Zea mays* seedlings [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023:1.

[22]Wei J L, Zou Y, Li P, *et al*. Titanium dioxide nanoparticles promote root growth by interfering with Auxin pathways in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Phyton*,2020,89(4):883.

[23]Ruffini Castiglione M, Giorgetti L, Geri C, *et al*. The effects of nano-TiO_2 on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. [J]. *Journal of Nanoparticle Research*,2011,13(6):2443.

[24]Jiang F P, Shen Y Z, Ma C X, *et al*. Effects of TiO_2 nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings cultivated under super-elevated and normal CO_2 conditions [J]. *PLoS One*,2017,12(5):e0178088.