

增氧淡水与微咸水对小麦萌发特性的影响

王全九^{1,2} 侯丽娜¹ 孙燕¹ 刘阳¹ 解江博¹ 朱梦杰¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为合理开发利用微咸水、提高微咸水利用效率、降低微咸水灌溉下的次生盐碱化风险,将增氧技术与微咸水灌溉相结合,基于理论分析与试验研究相结合的方法,研究了微咸水、增氧淡水、增氧微咸水对小麦种子萌发特性的影响。结果表明:在不同矿化度的微咸水条件下,矿化度 2 g/L 较利于小麦种子的萌发。增氧淡水(溶解氧质量浓度 9.5 ~ 22.5 mg/L)能够增加萌发 4 d 的小麦种子萌发数量,但却抑制了小麦种子萌发过程中的单粒根质量和幼芽平均高度;当溶解氧质量浓度超过 22.5 mg/L 时,发芽率有所下降,说明过高的溶解氧质量浓度会抑制种子的萌发。不同矿化度微咸水增氧处理下的小麦种子表现出不同的较适宜溶解氧质量浓度,1、3、5 g/L 矿化度下的较适宜溶解氧质量浓度分别为 19.5、22.5、12.5 mg/L。根据增氧微咸水处理的耦合试验数据,建立了增氧微咸水处理条件下小麦种子发芽率与矿化度、溶解氧质量浓度之间的经验模型,经回归分析,相关系数为 0.900 2,决定系数为 0.810 3,说明模型拟合程度较好。

关键词: 小麦; 增氧微咸水; 矿化度; 溶解氧质量浓度; 发芽率

中图分类号: S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0274-09

OSID:



Effects of Oxygenated Fresh Water and Brackish Water on Germination Characteristics of Wheat

WANG Quanjiu^{1,2} GOU Li'na¹ SUN Yan¹ LIU Yang¹ XIE Jiangbo¹ ZHU Mengjie¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Reasonable development and utilization of brackish water, improvement of brackish water use efficiency, and reduction of secondary salinization risk under brackish water irrigation are effective measures to alleviate the shortage of fresh water resources in China. The combination of oxygenated technology and brackish water irrigation was carried out. Based on the combination of experimental research and theoretical analysis, the effects of brackish water, oxygenated fresh water, and oxygenated brackish water on the germination characteristics of wheat seeds were studied. The results showed that under the condition of brackish water with different salinities, 2 g/L was more favorable for wheat seed germination. The germination number of wheat seed for four days were increased by oxygenated fresh water cultivation (dissolved oxygen concentration 9.5 ~ 22.5 mg/L), but the root weight and average height of shoots were inhibited during the germination process of wheat seeds. The germination rate was decreased when the dissolved oxygen concentration exceeded 22.5 mg/L, indicating that excessive dissolved oxygen concentration would inhibit the seed germination. The wheat seeds treated with different salinity brackish water under oxygenated treatment showed different appropriate dissolved oxygen concentrations. The optimum concentrations of dissolved oxygen were 19.5 mg/L under 1 g/L salinity, 22.5 mg/L under 3 g/L, and 12.5 mg/L under 5 g/L, respectively. In addition, based on the coupled experimental data of oxygenated brackish water treatment, an empirical model between the wheat seed germination rate, salinity, and dissolved oxygen concentration was established.

Key words: wheat; oxygenated brackish water; salinity; dissolved oxygen concentration; germination rate

收稿日期: 2019-10-24 修回日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830754)、国家自然科学基金面上项目(51679190)和陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-732)

作者简介: 王全九(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与养分运移研究,E-mail: wquanjiu@163.com

0 引言

我国淡水资源短缺问题一直十分突出^[1],人均淡水资源量仅为世界人均水平的 1/3^[2]。水资源短缺成为影响我国区域社会、经济和生态可持续发展的重要因素^[3]。我国农业用水量占全国用水总量的 60% 以上^[4],农业用水的供需矛盾日益严重^[5]。合理开发利用其他水资源、发展新型农业灌溉技术、提高农业用水生产效率是缓解我国农业淡水资源紧缺的有效途径。

据统计,我国地下微咸水资源储量约 $2 \times 10^{11} \text{ m}^3/\text{a}$,大部分埋藏于地下 10 ~ 100 m 处,适宜被开采利用^[6]。国内外利用咸水与微咸水进行农业灌溉已有百年历史,我国亦从 20 世纪六七十年代就开始对微咸水灌溉技术进行研究利用,在宁夏、甘肃、内蒙古等北方地区,利用微咸水灌溉能够使作物高产^[7]。实践表明,微咸水灌溉是解决淡水资源短缺的有效途径之一^[8]。但微咸水灌溉同时也会增加土壤次生盐碱化风险,进而破坏土壤结构、抑制作物生长^[9]。因此,如何安全高效地利用微咸水进行农田灌溉是实现农业水土资源科学可持续利用的重要内容^[10]。在现有水资源条件下,寻找提高水资源利用率的新途径、发展节水高效农业已成为我国农业可持续发展的重要切入点^[11]。

近年来,磁化、去电子、增氧等灌溉水活化技术作为简便、低能耗、低投入、无污染且高效的水处理技术,已受到学者们的广泛关注。其中增氧技术于 20 世纪 70 年代出现,从生物学角度开辟了灌溉水生理功效提升的新研究领域。近年来,国内外研究结果一致表明,增氧灌溉对作物产量提高具有明显的促进作用^[12-16]。种子萌发是作物正常生长发育的基础,研究结果表明,氧气是种子萌发的主要影响因素之一,影响种子的萌发特性^[17]。熊元基等^[18]在对周围土壤进行机械、化学、电解增氧后发现,种子的基本生理指标均有不同程度提高。蒋程瑶等^[19]采用微纳米气泡技术提高水中含氧量的方法对小白菜、生菜等叶菜种子发芽进行了研究,结果表明,充足的水氧环境有利于种子萌发和幼苗生长。胡德勇等^[20]在电磁式空气泵通气技术进行增氧灌溉的条件下研究了秋黄瓜的萌发特征,结果表明,增氧对大棚秋黄瓜种子的种子发芽力指标、种子活力指标以及发芽整齐度较未处理对照组均有所提高。

研究表明,微咸水的安全利用需采用科学的方式,以降低微咸水灌溉所带来的土壤次生盐碱化风险,增氧灌溉活化水技术对植物生长具有改善与促进作用^[21]。本文将增氧灌溉技术与微咸水灌溉技术

相结合,研究增氧微咸水对小麦种子萌发特征的影响,为提高微咸水安全高效利用、降低微咸水利用风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试微咸水由氯化钠试剂(氯化钠质量分数大于等于 99.5%,分析纯)和淡水(矿化度 0.2 g/L、溶解氧质量浓度 9.5 mg/L)配置而成。增氧处理采用微纳米气泡快速发生装置,增氧过程中采用 HQ40 型便携式溶氧仪监测微咸水溶解氧质量浓度变化。

小麦种子为西农 585。

1.2 试验设计

试验在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地进行,试验处理分别为微咸水(B)、增氧淡水(O)、增氧微咸水(BO),以及未处理淡水(CK)作为对照,进行不同矿化度和不同增氧水平条件下的小麦种子萌发试验。微咸水(1 ~ 5 g/L)、增氧淡水(9.5 ~ 22.5 mg/L)各 5 个处理,不同矿化度(1、3、5 g/L)和不同增氧水平(9.5、12.5、16.5、19.5、22.5 mg/L)耦合处理 15 个。每个处理重复 3 次。采用培养皿进行小麦种子萌发试验。每个培养皿选取 25 颗已消毒种子均匀放置在湿润滤纸上,置于恒温培养箱中进行催芽。每天定时更换滤纸以保证培养皿中微咸水的矿化度保持不变。

1.3 测定指标与方法

本试验测定指标为种子发芽势、发芽率、发芽指数、单粒根质量、活力指数和幼芽平均高度。

根据《农作物种子检验规程》,小麦种子的萌发数量以根长达到种子长度的 1/2 作为萌发标准并于每天定时记录;第 7 天将培养皿中所有供试小麦的根剪下称量获得根鲜质量,称量前用滤纸吸走多余水分。发芽势和发芽率的测定时间分别为第 4、7 天,计算公式为

$$G_v = N_4 / A \times 100\%$$

$$G_p = N_7 / A \times 100\%$$

$$G_{pn} = N_n / A \times 100\%$$

$$V_l = G_l S$$

其中
$$G_l = \sum (G_t / D_t)$$

$$S = M / A$$

式中 G_v ——发芽势,% G_p ——发芽率,%
 G_{pn} ——第 n 天发芽率,%
 G_l ——发芽指数 V_l ——活力指数
 S ——每粒种子根鲜质量,g
 G_t —— t 时间内已萌发种子的数量

D_t —— t 时间内相应发芽时间, d
 N_n ——第 n 天已萌发种子的数量
 M ——供试种子总根鲜质量, g
 A ——供试种子数量

幼芽平均高度利用尺子对所有大于 0.3 cm 的幼苗进行测量,并对测量种子数量进行计数,取平均值。

1.4 数据处理分析

分析数据均采用平均值。使用 SPSS 21.0 进行方差分析,研究不同矿化度和不同增氧水平对小麦种子各萌发指标影响的显著性差异。使用 Excel 进行多元回归分析,研究增氧微咸水的溶解氧质量浓度、矿化度与种子萌发指标之间的经验关系模型。

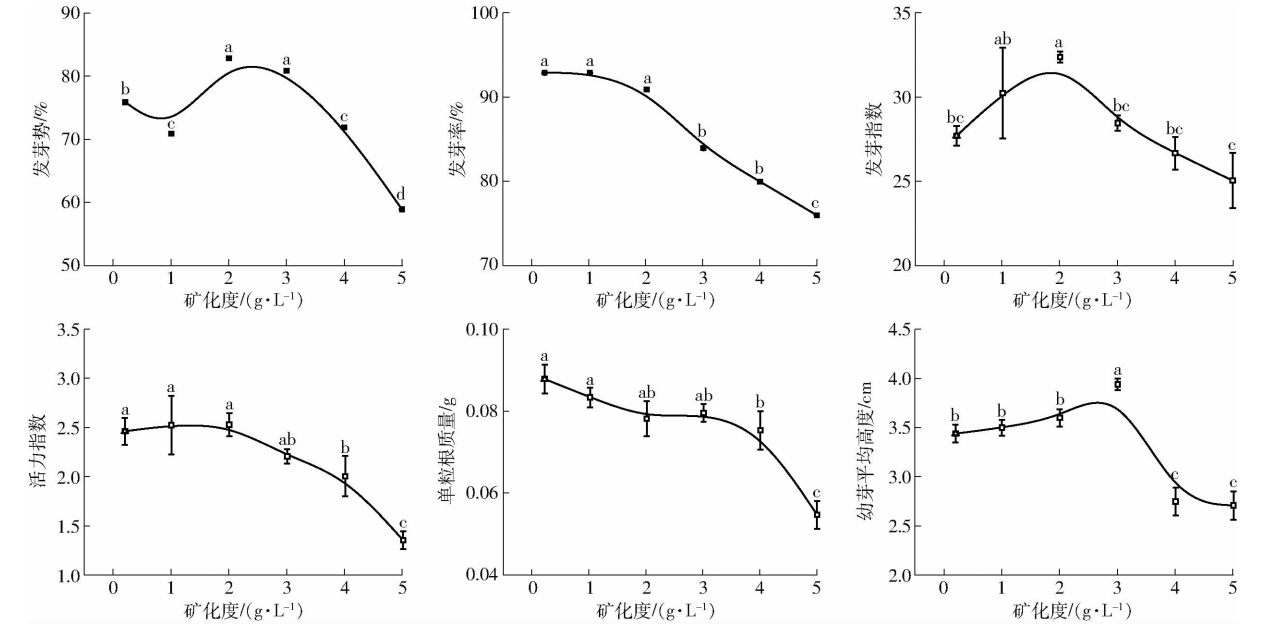


图 1 小麦萌发指标随微咸水矿化度的变化曲线
Fig. 1 Germination index of wheat changes with salinity of brackish water

发芽势和发芽指数在矿化度为 2、3 g/L 时较淡水处理(CK)都表现为增加,发芽势分别较对照组增加 8.77%、6.14%,发芽指数分别较对照组增加 25.11%、0.31%。在矿化度为 1 g/L 时发芽势较淡水处理(CK)减小 7.02%,但发芽指数增加了 9.16%,这是由于矿化度 1 g/L 处理使萌发 2 d 内种子的萌发数量高于淡水处理(CK),但萌发 3~4 d 时种子的萌发数量增长量比淡水处理(CK)低。矿化度为 4、5 g/L 时发芽势和发芽指数均低于淡水处理(CK)。活力指数在矿化度为 1、2 g/L 时分别较淡水处理(CK)增加 2.50%、2.70%,当矿化度为 3、4、5 g/L 时分别较淡水处理(CK)减小 10.28%、18.37%、44.58%。单粒根质量在所有矿化度下较淡水处理(CK)均表现为抑制作用,分别减小 5.14%、10.94%、9.37%、14.27%、37.74%。矿化度为 3 g/L 时活力指数较淡水处理(CK)表现为抑制,但发芽指数与之相反,这说明此条件下单粒根质

2 结果与分析

2.1 微咸水对小麦种子萌发特征的影响

2.1.1 微咸水下种子的萌发特征

图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)为不同矿化度的微咸水对小麦种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数和幼芽平均高度的影响。由图 1 可知,在微咸水条件下(矿化度 1~5 g/L),小麦种子发芽势、活力指数、发芽指数、幼芽平均高度随着矿化度的增加均呈现出先增加后减小的趋势。发芽率和单粒根质量随着矿化度的增加呈现减小趋势。

量对活力指数起主导作用,而矿化度为 1、2 g/L 时发芽指数对活力指数起主导作用。发芽率随矿化度的升高呈减小趋势,矿化度为 1、2、3、4、5 g/L 条件下分别较淡水处理(CK)降低了 0.36%、1.79%、9.32%、14.34%、19.71%,表明微咸水对种子发芽率具有不利影响。发芽率与发芽势在矿化度为 2、3 g/L 时的影响作用相反,这说明 2、3 g/L 矿化度有利于种子萌发 4 d 时发芽数量的增加,但不利于 4~7 d 发芽数量的持续增长。幼芽平均高度在微咸水矿化度为 3 g/L 时最大,相比于淡水处理(CK),幼芽平均高度增加 14.53%,矿化度为 1、2 g/L 条件下的幼芽平均高度分别增加 1.74%、4.65%,矿化度为 4、5 g/L 条件下的幼芽平均高度较淡水处理(CK)减小 20.16%、21.13%,表明当微咸水矿化度大于 4 g/L 时对幼芽平均高度有明显抑制作用。其中在矿化度为 2 g/L 时,发芽势、发芽指数、活力指数均为微咸水处理下的最大值,幼芽平均高度高于

淡水处理(CK),发芽率略有降低但仍大于 90%,单粒根质量减小幅度不大。可以认为在微咸水条件下,矿化度 2 g/L 较利于小麦种子萌发。

淡水处理(CK)的发芽势低于矿化度 2、3 g/L 的发芽势,表明适量的盐胁迫提高了种子萌发初期的发芽数量。淡水处理(CK)的发芽指数明显低于矿化度为 1、2 g/L 的发芽指数,表明较低的盐胁迫使种子萌发初期的发芽数量增加。并且在矿化度为 1、2 g/L 处理下的发芽率未低于 90%,较接近淡水处理的发芽率,而其发芽指数的明显提高可以认为是矿化度为 1、2 g/L 的处理使小麦种子的发芽进程提前导致。幼芽平均高度在矿化度 1 g/L 处理下略高于淡水处理(CK),在矿化度 3 g/L 处理下明显高于淡水处理(CK),这可能是由于较低矿化度的盐胁迫提高了萌发初期种子的萌发数量,而越早萌发出的幼芽,生长的时间越长,也就越高。小麦的部分指标在较低盐胁迫环境中高于淡水处理(CK),这可能是小麦萌发过程中对盐胁迫的一种适应性反应。在植物处于逆境时,组织细胞内会大量累积活性氧,导致脂膜过氧化,诱导细胞程序性死亡^[22],而抗氧化酶担任清除活性氧的关键步骤^[23]。据此推测,小麦种子在处于较低盐胁迫时,组织细胞内累积的活性氧数量较低,抗氧化酶等的酶活性有一定提高,有利于种子的萌发,致使部分指标高于淡水处理(CK);当矿化度超过 3 g/L 时,种子处于较高盐胁迫,组织细胞内累积大量活性氧,此时抗氧化酶已不足以清除活性氧,导致脂膜过氧化,且抗氧化酶和其他未知酶的大量存在或许对种子萌发也不利,致使各项指标迅速下降。

2.1.2 指标间相关性分析

微咸水处理条件下的微咸水矿化度与小麦种子

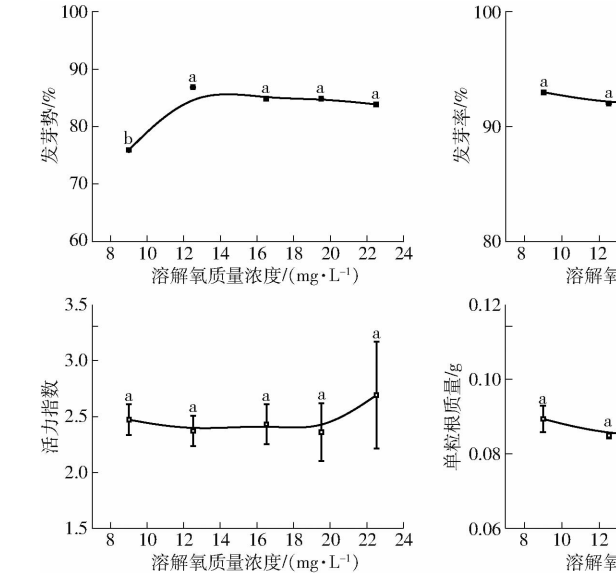


图2 小麦萌发指标随增氧淡水溶解氧质量浓度的变化曲线

Fig. 2 Index of wheat germination changes with concentration of dissolved oxygen in oxygenated fresh water

萌发指标(发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、幼芽平均高度)之间存在一定的相关性,对其进行相关性分析,结果见表 1。

表 1 微咸水条件下矿化度与各指标间的相关系数
Tab.1 Correlation coefficient between salinity and various indexes under brackish water condition

指标	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数	单粒根质量	幼芽平均高度
相关系数	-0.579	-0.990 **	-0.875	-0.933 *	-0.843	-0.704

注: **表示极显著($P < 0.01$), * 表示显著($P < 0.05$),下同。

由表 1 可看出,皮尔逊相关系数均符合 $|r| > 0.5$,表明矿化度与各指标之间具有中度及以上相关性。并且小麦种子发芽率和活力指数与矿化度之间均呈现显著相关关系。

2.2 增氧淡水对小麦种子萌发特征的影响

2.2.1 增氧淡水下小麦种子的萌发特征

增氧淡水溶解氧质量浓度分别为 9.5、12.5、16.5、19.5、22.5 mg/L,其中溶解氧质量浓度 9.5 mg/L 即为未增氧淡水。图 2 为不同溶解氧质量浓度增氧淡水对小麦种子发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、单粒根质量和幼芽平均高度的影响。由图 2 可知,发芽势和发芽指数随着溶解氧质量浓度的增加而先增加后略有减小;活力指数、幼芽平均高度随溶解氧质量浓度的增加而先减小后增加;发芽率随溶解氧质量浓度增加表现为先基本不变后减小趋势。

发芽势在溶解氧质量浓度 12.5 mg/L 时最大,较淡水处理(CK)增加 14.04%,溶解氧质量浓度在 12.5 ~ 22.5 mg/L 时,发芽势缓慢降低,但溶解氧质量浓度 16.5、19.5、22.5 mg/L 条件下发芽势仍分别

较淡水处理(CK)增加 11.40%、11.40%、10.53%，表明适当提高溶解氧质量浓度有利于增加小麦种子萌发 4 d 的萌发数量。发芽率在溶解氧质量浓度为 9.5~16.5 mg/L 时基本保持不变，在 16.5~22.5 mg/L 之间呈现缓慢下降趋势，在 16.5、22.5 mg/L 时分别较 CK 减小 3.58%、4.66%，表明溶解氧质量浓度的增高对发芽率影响不大，但过高的溶解氧质量浓度对种子发芽率略有抑制作用。发芽指数在溶解氧质量浓度为 12.5~22.5 mg/L 均高于淡水处理，分别增加 1.07%、3.41%、12.37%、9.46%，发芽指数在溶解氧质量浓度为 19.5 mg/L 时最大，表明溶解氧质量浓度增加有利于种子前期萌发数量的增加。单粒根质量和活力指数在 12.5、16.5、19.5 mg/L 时均低于淡水处理(CK)，在溶解氧质量浓度为 22.5 mg/L 时均高于淡水处理(CK)。结合发芽指数变化特征可以发现，溶解氧质量浓度 12.5~19.5 mg/L 单粒根质量的减小主要影响了活力指数的降低。幼芽平均高度在溶解氧质量浓度为 9.5~19.5 mg/L 之间时，表现为下降趋势，19.5~22.5 mg/L 时表现为上升趋势，但溶解氧质量浓度为 22.5 mg/L 时幼芽平均高度仍低于淡水处理(CK)，表明溶解氧质量浓度的增加对幼芽平均高度具有抑制作用。

2.2.2 指标间相关性分析

增氧淡水条件下小麦种子萌发过程中溶解氧质量浓度与萌发指标之间存在一定的相关性,对其进行相关性分析以及显著性分析,结果见表 2。

表 2 增氧淡水条件下溶解氧质量浓度与各指标的相关系数

Tab.2 Correlation coefficient between dissolved oxygen concentration and various indexes under oxygenated fresh water condition

指标	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数	单粒根质量	幼芽平均高度
相关系数	0.512	-0.921*	0.886*	0.492	-0.358	-0.331

由表 2 可看出,发芽势、发芽率、发芽指数与溶解氧质量浓度之间的皮尔逊相关系数均符合 $|r| > 0.5$,表明具有中度及以上相关性。而活力指数、单粒根质量、幼芽平均高度与溶解氧质量浓度之间的皮尔逊相关系数 $|r| > 0.3$,表明具有低度相关性。结合显著性相关分析可以表明,增氧淡水条件下,小麦种子发芽指数与溶解氧质量浓度之间呈显著正相关关系,而发芽率与溶解氧质量浓度之间呈现显著负相关关系。

2.3 增氧微咸水对小麦种子萌发特征的影响

2.3.1 增氧微咸水下小麦种子的萌发特征

研究增氧微咸水对小麦种子萌发特征的影响时,针对矿化度和溶解氧质量浓度对试验设置交叉处理,更有效地揭示在微咸水与增氧淡水耦合条件下小麦种子萌发状况,得到可靠稳定的模型。分别在矿化度为 1、3、5 g/L 条件下,设置溶解氧质量浓度分别为 9.5、12.5、16.5、19.5、22.5 mg/L。其中,溶解氧质量浓度 9.5 mg/L 为未增氧处理。图 3(图中不同大写字母表示在溶解氧质量浓度为 9.5 mg/L

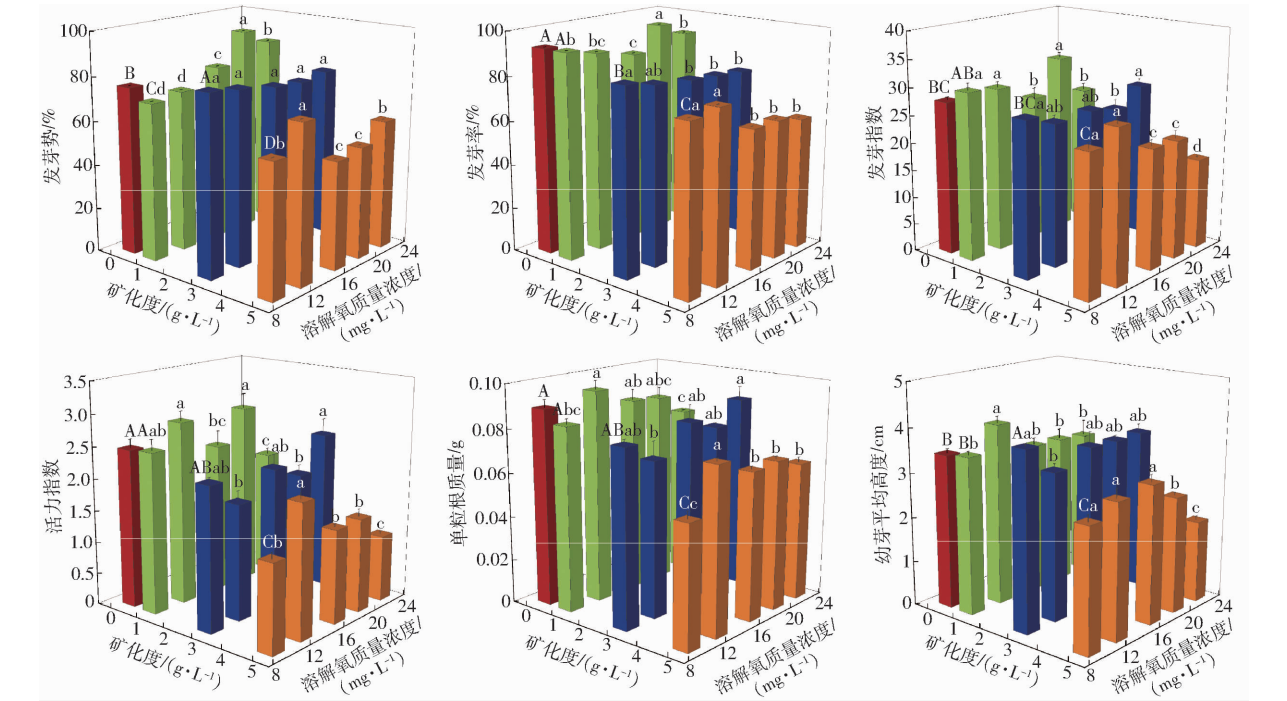


图 3 小麦萌发指标随增氧微咸水的溶解氧质量浓度、矿化度的变化

Fig.3 Index of wheat germination changes with dissolved oxygen concentration and salinity of oxygenated brackish water

时,不同矿化度条件下各处理差异显著($P < 0.05$))为不同矿化度的微咸水进行增氧处理影响小麦种子萌发指标的变化特征。

在矿化度为 1 g/L 时,发芽势、单粒根质量、幼芽平均高度随着溶解氧质量浓度的增加先增加后减小。矿化度为 1 g/L 时,发芽势在溶解氧质量浓度为 16.5、19.5、22.5 mg/L 分别较淡水处理(CK)增加 5.26%、23.68%、14.04%,在溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时较淡水处理(CK)减小 3.51%。未增氧处理、矿化度 1 g/L 的微咸水条件下发芽势较淡水处理(CK)减小 7.02%,分析得到对矿化度 1 g/L 微咸水进行增氧处理可以减弱矿化度对发芽势的抑制作用。矿化度为 1 g/L 时,单粒根质量在未增氧处理条件下较淡水处理减小 5.14%,在溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时单粒根质量较淡水处理增加 9.41%,在溶解氧质量浓度为 16.5、19.5、22.5 mg/L 时单粒根质量分别较淡水处理减小 0.53%、0.82%、11.09%。其中,溶解氧质量浓度为 12.5、16.5、19.5 mg/L 的单粒根质量高于未增氧、矿化度 1 g/L 的微咸水处理,但溶解氧质量浓度达到 22.5 mg/L 时单粒根质量低于未增氧处理微咸水。幼芽平均高度仅在微咸水溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时高于淡水处理(CK),亦仅在此溶解氧质量浓度条件下高于未增氧微咸水处理,溶解氧质量浓度为 16.5、19.5、22.5 mg/L 分别较淡水处理(CK)减小 2.00%、2.23%、4.07%。在矿化度为 1 g/L 时,发芽率、发芽指数随着溶解氧质量浓度的增加呈现先减小后增加、再减小趋势。发芽率仅在溶解氧质量浓度为 19.5 mg/L 时高于淡水处理(CK)4.30%。发芽指数在溶解氧质量浓度为 9.5、12.5、19.5 mg/L 时分别较淡水处理增加 7.95%、6.80%、17.16%,在溶解氧质量浓度为 16.5、22.5 mg/L 时较淡水处理(CK)减小 5.22%、9.35%。但发芽率和发芽指数均仅在溶解氧质量浓度为 19.5 mg/L 时高于未增氧、矿化度 1 g/L 的微咸水处理。活力指数表现为先增加后减小、再增加后减小的波动趋势,这应该是与溶解氧质量浓度与矿化度在共同作用效果出现相反时,起主导作用的因素不同有关。在矿化度为 1 g/L 时,活力指数在溶解氧质量浓度为 12.5、19.5 mg/L 时分别较淡水处理(CK)增加 15.33%、14.91%,且均明显高于未增氧、矿化度 1 g/L 的微咸水处理。活力指数在溶解氧质量浓度为 16.5、22.5 mg/L 时分别较淡水处理(CK)减小 5.63%、20.47%,且均明显低于未增氧、矿化度 1 g/L 的微咸水处理。结合单粒根质量和发芽指数变化特征,在溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L

时单粒根质量的增加对活力指数增长起主导作用,在溶解氧质量浓度为 16.5 mg/L 时发芽指数的增长对活力指数增长起主导作用。由此可知,矿化度为 1 g/L、溶解氧质量浓度为 19.5 mg/L 时,增氧处理可以改善矿化度对种子发芽势、发芽率、单粒根质量的抑制作用,进一步促进发芽指数、活力指数的提高,但对幼芽平均高度有较小抑制作用。

在矿化度为 3 g/L 时,发芽势和发芽率随着溶解氧质量浓度的增加先减小后增加。发芽势在增氧处理为 12.5 mg/L 时较淡水处理增加 3.51%,在增氧处理为 16.5、19.5、22.5 mg/L 时分别较淡水处理减小 0.44%、1.75%、0.44%。发芽率在 4 个增氧处理条件下均低于淡水处理(CK),分别较淡水处理(CK)减小 12.54%、15.41%、17.92%、15.41%。同时结合淡水增氧处理分析,随着溶解氧质量浓度提高,促进种子发芽势增长的作用逐渐减弱,增氧微咸水处理下种子发芽势、发芽率的抑制作用亦逐渐减弱,但仍低于未增氧、矿化度 3 g/L 微咸水处理。这说明在 3 g/L 矿化度条件下,种子的发芽势已达到较高水平,再进行增氧处理对种子的发芽势和发芽率不利。在矿化度为 3 g/L 时,发芽指数、单粒根质量、活力指数和幼芽平均高度随着溶解氧质量浓度的增加均表现为先减小后增加、再减小后增加的趋势。在溶解氧质量浓度为 12.5、16.5、19.5 mg/L 条件下,较淡水处理(CK),发芽指数分别减小 7.39%、6.01%、10.25%,单粒根质量分别减小 19.88%、5.57%、11.27%,活力指数分别减小 26.90%、12.49%、21.37%,且均低于未增氧、矿化度 3 g/L 微咸水处理。在溶解氧质量浓度为 22.5 mg/L 时,发芽指数较淡水处理(CK)略增长 0.98%,单粒根质量与活力指数较淡水处理几乎无差异,但均高于未增氧、矿化度 3 g/L 微咸水。这说明在 3 g/L 矿化度条件下当溶解氧质量浓度达到 22.5 mg/L 时,可以减小矿化度对发芽指数、单粒根质量和活力指数的抑制作用。幼芽平均高度仅在溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时低于淡水处理(CK)4.55%,在溶解氧质量浓度为 16.5、19.5、22.5 mg/L 时较淡水处理(CK)分别增长 4.64%、4.13%、4.81%,但均低于未增氧、矿化度 3 g/L 微咸水处理。由此可知,矿化度为 3 g/L、溶解氧质量浓度为 22.5 mg/L 时,增氧处理可以缓解矿化度对种子发芽指数、单粒根质量、活力指数的抑制作用,对幼芽平均高度具有促进作用,使发芽势略有降低,但发芽率仍达到 80%。

在矿化度为 5 g/L 时,发芽势随溶解氧质量浓度的增加而先增加后减小、再增加;发芽率、发芽指

数、单粒根质量、活力指数、幼芽平均高度均随溶解氧质量浓度的增加呈现先增加后减小的趋势。其中,溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时,小麦种子的发芽势、发芽率、发芽指数、单粒根质量、活力指数均分别较淡水处理(CK)减小 7.02%、17.20%、0.70%、15.05%、16.64%,但均高于未增氧、矿化度 5 g/L 微咸水处理。相比于淡水处理(CK),在溶解氧质量浓度为 16.5、19.5、22.5 mg/L 时,发芽势分别减小 35.09%、33.33%、23.25%,发芽率分别减小 32.62%、32.62%、37.28%,发芽指数分别减小 21.56%、22.23%、40.84%,单粒根质量分别减小 24.08%、22.84%、28.19%,活力指数分别减小 41.29%、40.72%、58.09%,且均低于未增氧、矿化度 5 g/L 微咸水处理。幼芽平均高度在溶解氧质量浓度达到 16.5 mg/L 时较淡水处理(CK)减小 10.89%,并且在溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时较淡水处理(CK)减小 13.26%,但均高于未增氧、矿化度 5 g/L 微咸水处理。幼芽平均高度在溶解氧质量浓度为 19.5、22.5 mg/L 时,分别较淡水处理(CK)减小 24.70%、46.85%,且均低于未增氧、矿化度 5 g/L 微咸水处理。由此可知,矿化度为 5 g/L 时、溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时,增氧处理可以缓解矿化度对种子发芽势、发芽率、发芽指数、单粒根质量、活力指数、幼芽平均高度的抑制作用。

研究表明,纳米气泡增氧水可以产生活性氧,水中活性氧含量对种子萌发至关重要,并且纳米气泡增氧水中的活性氧含量与水中纳米气泡密度呈正相关^[24]。本次研究中增氧水的处理是采用微纳米气泡快速发生装置对自来水进行增氧到溶解氧质量浓度为 22.5 mg/L,再将自来水(溶解氧质量浓度 9.5 mg/L)与该增氧水进行不同比例的混合以获得其他增氧水平(12.5、16.5、19.5 mg/L),可以认为本研究中的不同增氧水平对应不同活性氧含量水平。过量的活性氧具有氧化作用,导致脂质过氧化、DNA 损伤和断裂^[25-26]。而中等水平的活性氧含量具有生理促进作用,适量的活性氧对细胞壁的松弛有较大影响,并且可作为作物生长过程中的一种重要信号分子^[27-28]。

本研究淡水增氧处理结果中,溶解氧质量浓度 22.5 mg/L 时的发芽势、发芽率、发芽指数均较溶解氧质量浓度为 19.5 mg/L 时略有降低,这可能是由于溶解氧质量浓度 22.5 mg/L 时活性氧过量,对作物细胞产生了不利的氧化作用导致。本研究在不同矿化度条件下再进行纳米气泡增氧处理,是盐胁迫与纳米气泡增氧处理的耦合。1 g/L 矿化度在溶解氧质量浓度为 19.5 mg/L 较适宜,这可能是由于对比淡水其矿化度提升幅度较小,使这一结果与淡水增氧结果表现一致。3 g/L 矿化度下的发芽势明显高于 1 g/L 矿化度下,适量的盐胁迫促进了种子萌发初期的发芽势,较 1 g/L 矿化度相比种子处于一个较有利的环境中,这可能提高了种子对活性氧氧化作用的抵抗能力,所以种子可以耐受较高溶解氧质量浓度(22.5 mg/L),且该溶解氧质量浓度促进种子的代谢作用。矿化度 5 g/L 下种子的各项指标均明显低于 CK,种子处于一个非常不利的环境中,其细胞应该已遭受到破坏,这可能导致种子细胞对溶解氧质量浓度的耐受性明显降低,所以在溶解氧质量浓度为 12.5 mg/L 时较未增氧、矿化度 5 g/L 表现出促进作用,溶解氧质量浓度超过 12.5 mg/L 反而不利于种子发芽。

2.3.2 指标间相关性分析

不同矿化度微咸水增氧条件下小麦种子萌发过程中溶解氧质量浓度与萌发指标(发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、幼芽平均高度)之间存在一定的相关性,对其进行相关性分析以及显著性分析,结果见表 3。由表 3 可以看出,在矿化度为 3、5 g/L 时,发芽率与溶解氧质量浓度之间呈现极强相关。而矿化度为 1 g/L 时发芽率与溶解氧质量浓度仅具有中度以下相关性,这可能是由于矿化度为 1 g/L 微咸水条件下的小麦种子本就具有较高发芽率(93%),而增氧处理对小麦种子发芽率在较高增氧处理(12.5~16.5 mg/L)时影响作用微小,仅在高溶解氧质量浓度(16.5~22.5 mg/L)时具有较小抑制作用。因此造成矿化度为 1 g/L 时,溶解氧质量浓度与种子发芽率之间相关性不明显。由此可知,当微咸水矿化度较高时,增氧处理能够在一定程度上影响小麦种子的发芽率。

表 3 增氧微咸水条件下溶解氧质量浓度与各指标的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient between dissolved oxygen concentration and various indexes under oxygenated brackish water condition						
矿化度/(g·L ⁻¹)	发芽势	发芽率	发芽指数	活力指数	单粒根质量	幼芽平均高度
1	0.881 *	0.104	-0.391	-0.465	-0.466	-0.590
3	-0.900 *	-0.818	-0.063	0.365	0.608	-0.224
5	-0.447	-0.929 *	-0.883 *	-0.557	0.206	-0.669

2.4 经验模型构建

根据指标间相关性和显著性分析结果,可以发现发芽率与微咸水矿化度、增氧淡水溶解氧质量浓度、增氧微咸水溶解氧质量浓度之间均具有较好相关性,所以可以建立关系模型对发芽率在微咸水处理和增氧处理耦合条件下的变化特征进行描述。利用增氧微咸水处理的试验数据进行回归分析,建立增氧微咸水条件下的发芽率与矿化度、溶解氧质量浓度的经验模型:

假设发芽率与增氧微咸水中矿化度、溶解氧质量浓度之间存在关系式

$$G_v = KC^a M^b \tag{7}$$

式中 C ——溶解氧质量浓度

M ——矿化度

$K、a、b$ ——系数

将式(7)两边同时取对数,得

$$\ln G_v = \ln K + a \ln C + b \ln M \tag{8}$$

将增氧微咸水试验中发芽率及相应的溶解氧质量浓度、矿化度数据代入式(8),利用 Excel 进行回归分析得 $\ln K = 0.261\ 95, a = -0.180\ 84, b = -0.123\ 43$,可得 K 为 1.299 46。

则式(7)具体形式为

$$G_v = 1.299\ 46 C^{-0.180\ 84} M^{-0.123\ 43} \tag{9}$$

式(9)即为在增氧微咸水处理条件下,发芽率与矿化度、溶解氧质量浓度之间经验模型的具体方程。采用 Excel 2010 对方程进行回归分析,得到相

关系数为 0.900 2,决定系数为 0.810 3,表明发芽率与增氧微咸水的溶解氧质量浓度、矿化度之间具有较高相关性,且方程拟合程度较好。

3 结论

(1)微咸水矿化度试验结果表明,微咸水矿化度与小麦种子发芽率之间存在负相关关系。矿化度小于等于 3 g/L 的微咸水能够提高小麦种子的发芽势、发芽指数、幼芽平均高度,发芽率虽有所下降,但未低于 80%。微咸水矿化度大于 3 g/L 时,小麦种子萌发的各项指标均降低,故应用于小麦农田灌溉具有较大风险。

(2)增氧处理结果表明,当溶解氧质量浓度由 9.5 mg/L 增加至 22.5 mg/L 时,有利于提高小麦种子萌发前 4 d 的萌发数量,对单粒根质量和幼芽平均高度则具有抑制作用;当溶解氧质量浓度为 22.5 mg/L 时,对发芽率略有抑制作用,对单粒根质量具有促进作用。

(3)微咸水矿化度与增氧处理耦合试验结果表明,增氧处理可以改善或缓解矿化度对种子萌发指标的抑制作用。矿化度 1、3、5 g/L 时的较适宜溶解氧质量浓度分别为 19.5、22.5、12.5 mg/L。

(4)发芽率与矿化度、溶解氧质量浓度之间具有较好的相关性,建立了增氧微咸水灌溉下的小麦种子发芽率与矿化度、溶解氧质量浓度之间的经验模型,经回归分析,拟合度较好。

参 考 文 献

[1] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120.
ZHANG Liping,XIA Jun,HU Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009,18(2):116-120. (in Chinese)

[2] 张宏仁. 中国的淡水资源问题[J]. 环境保护,2001(5):3-7.
ZHANG Hongren. Problems of freshwater resource of China[J]. Environmental Protection,2001(5):3-7. (in Chinese)

[3] 张吉辉,李健,唐燕. 中国水资源与经济发展要素的时空匹配分析[J]. 资源科学,2012,34(8):1546-1555.
ZHANG Jihui,LI Jian,TANG Yan. Analysis of the spatio-temporal matching of water resource and economic development factors in China[J]. Resources Science,2012,34(8):1546-1555. (in Chinese)

[4] 陈瑶. 区域农业水资源平衡分析与农业节水[J]. 节水灌溉,2017(10):46-51.
CHEN Yao. Analysis of agricultural water-saving and supply-demand balance of regional agricultural water resources[J]. Water Saving Irrigation,2017(10):46-51. (in Chinese)

[5] KUYLENTIERN J,郑丰. 世界淡水资源的综合评价——未来整体可持续水的政策选择[J]. 水利水电快报,1999(3):27-28.

[6] 牛君仿,冯俊霞,路杨,等. 咸水安全利用农田调控技术措施研究进展[J]. 中国生态农业学报,2016,24(8):1005-1015.
NIU Junfang,FENG Junxia,LU Yang, et al. Advances in agricultural practices for attenuating salt stress under saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8):1005-1015. (in Chinese)

[7] CHAUHAN C P S, SINGH R B, GUPTA S K. Supplemental irrigation of wheat with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(3):253-258.

[8] 刘友兆,付光辉. 中国微咸水资源化若干问题研究[J]. 地理与地理信息科学,2004(2):57-60.
LIU Youzhao,FU Guanghui. Utilization of gentle salty water resource in China[J]. Geography and Geo-Information Science,2004(2):57-60. (in Chinese)

[9] HILLEL D, BRAIMOH A K, VLEK P L G. Soil degradation under irrigation[M]//BRAIMOH A K, VLEK P L G. Land use and soil resources. Dordrecht:Springer,Dordrecht,2008.

[10] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):117-126.
WANG Quanjiu,SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151217&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.017. (in Chinese)

[11] 穆艳,赵国庆,赵巧巧,等.活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):403-411.
MU Yan,ZHAO Guoqing,ZHAO Qiaoqiao, et al. Advances in the application of activated water irrigation[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019,36(4):403-411. (in Chinese)

[12] GOORAHOO D, CARSTENSEN G,ZOLDOSKE D F, et al. Using air in subsurface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers[J]. International Water & Irrigation Review, 2002,22(2):39-42.

[13] BHATTARAI S P,SU N,MIDMORE D J. Oxygation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88(5):313-377.

[14] BHATTARAI S P,SU N,MIDMORE D J. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils[J]. Annals of Applied Biology, 2015,144(3):285-298.

[15] 雷宏军,冯凯,张振华,等.河南3种典型土壤曝气滴灌草莓生长与品质[J].排灌机械工程学报,2017,35(2):158-164.
LEI Hongjun,FENG Kai,ZHANG Zhenhua, et al. Growth and quality of potted strawberry under aerated drip irrigation in the three typical soils in Henan Province[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(2):158-164. (in Chinese)

[16] 周云鹏,徐飞鹏,刘秀娟,等.微纳米气泡加氧灌溉对水培蔬菜生长与品质的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(8):98-100.
ZHOU Yunpeng,XU Feipeng,LIU Xiujian, et al. Influence of micro bubble oxygen irrigation on vegetable growth and quality effect[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(8):98-100. (in Chinese)

[17] WEITBRECHT K, MÜLLER K, LEUBNERMETZGER G. First off the mark: early seed germination[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(10):3289-3309.

[18] 熊元基,姚帮松,SU Ninghu,等.不同加氧处理对超级稻种子萌发和幼苗农艺性状的影响[J].江西农业大学学报,2014,36(2):256-260.
XIONG Yuanji,YAO Bangsong,SU Ninghu, et al. Effects of different oxygation treatments on the germination and agronomic characters of young seedlings of super rice[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014,36(2):256-260. (in Chinese)

[19] 蒋程瑶,赵淑梅,程燕飞,等.微/纳米气泡水中的氧环境对叶菜种子发芽的影响[J].北方园艺,2013(2):28-30.
JIANG Chengyao,ZHAO Shumei,CHENG Yanfei, et al. Effect of oxygen condition in micro/nano-bubble water on leafy vegetables seed germination[J]. Northern Horticulture, 2013(2):28-30. (in Chinese)

[20] 胡德勇,姚帮松,SU Ninghu,等.增氧灌溉对秋黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J].节水灌溉,2015(11):55-58.
HU Deyong,YAO Bangsong,SU Ninghu, et al. Effects on seed germination and seedling growth of autumn cucumber of aerated irrigation[J]. Water Saving Irrigation,2015(11):55-58. (in Chinese)

[21] 朱练峰,张均华,禹盛苗,等.磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质[J].农业工程学报,2014,30(19):107-114.
ZHU Lianfeng,ZHANG Junhua,YU Shengmiao, et al. Magnetized water irrigation enhanced rice growth and development, improved yield and quality[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(19):107-114. (in Chinese)

[22] MELCHIORRE M, GERMÁN R, TRIPPI V, et al. Superoxide dismutase and glutathione reductase overexpression in wheat protoplast: photooxidative stress tolerance and changes in cellular redox state[J]. Plant Growth Regulation, 2009, 57(1):57-68.

[23] 郑甲成,尤依锦,刘婷,等.盐胁迫对TaERECTA转基因小麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2019,34(6):922-927.
ZHENG Jiacheng,YOU Yijin,LIU Ting, et al. Effect of salt stress on the seeds germination and seedlings physiological traits of TaERECTA transgenic wheat[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019,34(6):922-927. (in Chinese)

[24] LIU S, OSHITA S, MAKINO Y, et al. Oxidative capacity of nanobubbles and its effect on seed germination[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(3):1347-1353.

[25] TOMIZAWA S, IMAI H, TSUKADA S, et al. The detection and quantification of highly reactive oxygen species using the novel HPF fluorescence probe in a rat model of focal cerebral ischemia[J]. Neuroscience Research, 2005, 53(3):304-313.

[26] MORITZ M, GESZKE-MORITZ M. The newest achievements in synthesis, immobilization and practical applications of antibacterial nanoparticles[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 228:596-613.

[27] ISHIBASHI Y, TAWARATSUMIDA T, ZHENG S H, et al. NADPH oxidases act as key enzyme on germination and seedling growth in barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. Plant Production Science, 2010, 13(1):45-52.

[28] MÜLLER K, LINKIES A, VREEBURG R A, et al. In vivo cell wall loosening byhydroxyl radicals during cress seed germination and elongation growth[J]. Plant Physiology, 2019,150(4):1855-1865.