

代亚博, 叶君, 王小兵, 等. 不同类型盐胁迫对春小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(5): 887-899.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.05.003

不同类型盐胁迫对春小麦种子萌发及幼苗生长的影响

代亚博¹, 叶君^{1,2}, 王小兵², 路战远^{1,2}, 吴晓华², 张海斌², 赵轩徽², 刘娟², 史学芬³, 赵贤⁴, 王伟妮⁵, 李娟¹, 张德健¹

(1. 内蒙古大学生命科学学院/牧草与特色作物生物学教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010031; 3. 鄂尔多斯市农牧业科学研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 巴彦淖尔市现代农牧事业发展中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015000; 5. 鄂尔多斯市农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为明确不同类型盐胁迫对春小麦种子萌发及幼苗生长的影响, 本研究以内蒙古河套灌区春小麦主要栽培品种永良4号和农麦2号为试验材料, 设置3种类型(中性盐、碱性盐和复合盐)不同浓度梯度盐胁迫试验, 测定种子萌发特性、幼苗生长及其生物量积累情况, 计算各指标的耐盐临界值和极限浓度值, 评估不同品种的盐害等级并进行胁迫离子冗余分析和偏最小二乘结构方程构建与分析。结果表明, 不同类型盐胁迫对2个小麦品种种子萌发与幼苗生长均产生不同程度的抑制作用, 具体表现为碱性盐胁迫(Na_2CO_3 、 NaHCO_3) > 复合盐胁迫(NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaHCO_3) > 中性盐胁迫(NaCl 和 Na_2SO_4); 不同类型盐胁迫离子的效应表现为阳离子(Na^+) > 碱性阴离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^-) > 中性阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^-)。不同春小麦品种对不同类型盐胁迫的响应也不同, 在中性盐胁迫和碱性盐胁迫下, 农麦2号和永良4号的耐盐临界均值和极限浓度均值没有显著差异($P > 0.05$); 在复合盐胁迫下品种间差异显著($P < 0.05$); 此外, 2个品种的种子发芽性能对幼苗地上部性状的影响存在显著差异($P < 0.05$)。总体来看, 农麦2号小麦从种子萌发到幼苗阶段应对不同类型盐胁迫的能力较永良4号更好。上述研究结果为春小麦抗盐机理研究与耐盐新品种选育提供了重要参考。

关键词: 春小麦; 盐胁迫; 种子萌发; 幼苗生长; 耐盐临界值; 极限浓度值

中图分类号: S512.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)05-0887-13

Impact of different types of salt stress on seed germination and seedling growth of spring wheat

DAI Yabo¹, YE Jun^{1,2}, WANG Xiaobing², LU Zhanyuan^{1,2}, WU Xiaohua², ZHANG Haibin²,

ZHAO Xuanwei², LIU Juan², SHI Xuefen³, ZHAO Xian⁴, WANG Weini⁵, LI Juan¹, ZHANG Dejian¹

收稿日期: 2025-04-13

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFDZ0059); 国家自然科学基金项目(32560442); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2024MS03007); 农牧交错区耕地保育与产能提升创新人才团队项目(2025TYL09); 国家小麦产业技术体系项目(CARS-03); 内蒙古自治区科技计划项目(2025KJHZ0053、2025YFDZ0061); 内蒙古自治区“英才兴蒙”工程团队项目(2025TRL05); 内蒙古优势特色小麦育种联合攻关项目(YZ2023008); 呼伦贝尔市科技计划项目(KJTW2025002); 科研保障经费项目(2026KYBZN02)

作者简介: 代亚博(2000-), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为植物资源学与植物化学。(E-mail) 2869330798@qq.com。叶君为共同第一作者。

通讯作者: 李娟, (E-mail) lijuan198644@163.com; 张德健, (E-mail) zhangdejian00@163.com

(1. School of Life Sciences, Inner Mongolia University/Key Laboratory of Herbage & Endemic Crop Biology, Ministry of Education, Hohhot 010021, China; 2. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3. Ordos Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Ordos 017000, China; 4. Bayannur Modern Animal Husbandry Business Development Center, Bayannur 015000, China; 5. Ordos City Agriculture and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection Center, Ordos 017000, China)

Abstract: To clarify the effects of different types of salt stress on seed germination and seedling growth of spring wheat, this study used two main spring wheat varieties

(Yongliang 4 and Nongmai 2) cultivated in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia as experimental materials. Three types of salt stress (neutral salt, alkaline salt, and composite salt) were applied at different concentration gradients. Seed germination characteristics, seedling growth, and biomass accumulation were measured. The salt tolerance threshold and limiting concentration value for each index were calculated. The salt damage grades of different varieties were evaluated, and redundancy analysis of stress ions as well as the construction and analysis of a partial least squares structural equation model were performed. The results showed that different types of salt stress had varying degrees of inhibitory effects on seed germination and seedling growth of the two wheat varieties. The inhibition intensity ranked as follows: alkaline salt stress (Na_2CO_3 , NaHCO_3) > composite salt stress (NaCl , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , and NaHCO_3) > neutral salt stress (NaCl and Na_2SO_4). The effects of different salt stress ions were ranked as: cations (Na^+) > alkaline anions (CO_3^{2-} , HCO_3^-) > neutral anions (SO_4^{2-} , Cl^-). Different spring wheat varieties also exhibited different responses to various types of salt stress. Under neutral salt stress and alkaline salt stress, there were no significant differences between Nongmai 2 and Yongliang 4 in terms of the mean values of salt tolerance threshold and limiting concentration ($P>0.05$). Under composite salt stress, significant differences were observed between the two varieties ($P<0.05$). In addition, there were significant differences in the effects of seed germination performance of the two varieties on the aboveground traits of seedlings ($P<0.05$). Overall, Nongmai 2 exhibited stronger tolerance to various types of salt stress than Yongliang 4 from seed germination to the seedling stage. The above findings provide an important reference for the research on the mechanism of salt tolerance in spring wheat and the selection and breeding of new salt-tolerant varieties.

Key words: spring wheat; salt stress; seed germination; seedling growth; salt tolerance threshold; limiting concentration value

小麦作为全球重要的粮食作物,年种植面积达 $2.19 \times 10^8 \text{ hm}^2$,年产量超过 $7.600 \times 10^8 \text{ t}$ 。其富含人体必需的营养物质(谷物蛋白、淀粉、维生素等),为人类提供了约 20% 的卡路里和蛋白质,全球 35%~40% 的人口以小麦籽粒为口粮^[1-3]。中国小麦种植面积约 $2.40 \times 10^7 \text{ hm}^2$,年产量稳定在 $1.300 \times 10^8 \text{ t}$,其中,春小麦种植面积约 $1.24 \times 10^6 \text{ hm}^2$,年总产量约 $5.829 \times 10^6 \text{ t}$ 。内蒙古自治区作为中国主要的粮食产区之一,春小麦种植面积达 $4.79 \times 10^5 \text{ hm}^2$,年产量为 $1.708 \times 10^6 \text{ t}$ ^[4-5]。近年来,受降水偏少、蒸发强烈以及灌溉方式不当等因素影响,中国土壤盐渍化问题日趋严重。目前,中国潜在盐碱地总面积达 $1.00 \times 10^8 \text{ hm}^2$,约占全国土地总面积的 10%。依据全国土壤分类原则及盐渍化土壤发生特点,中国盐渍土可划分为盐土与碱土两大类。盐土以硫酸盐、氯化物为主,多形成于干旱和半干旱地区,面积约 $1.60 \times 10^6 \text{ hm}^2$,集中分布在滨海地区、黄淮海平原及西北内陆盆地等地。碱土以碳酸盐为主,土壤 pH 值较高,易导致土壤结构恶化,主要分布于东北松嫩平原、宁夏银川平原及内蒙古河套平原等地,面积约 $8.70 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[6-9]。

内蒙古自治区的盐碱化耕地面积达 $1.06 \times 10^6 \text{ hm}^2$,约占全区耕地面积的 10%。该地区同时分布有盐土与碱土。其中,盐土主要集中于河套灌区;碱土则以土默川平原与西辽河平原为主。在诸多区域,两类土壤呈

交错共存的分布特征,使得内蒙古盐渍化土壤的类型呈现出复杂多样的面貌。这些盐渍化土壤的常见阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 为主^[10-12]。这些离子的富集易导致小麦遭受多种逆境胁迫,包括高 pH 胁迫、渗透胁迫、离子毒害和氧化损伤等,抑制其正常生理代谢与生长发育,最终造成产量下降^[13-14]。萌发作为小麦生长发育的起始阶段,易受温度、湿度、土壤 pH 值及盐渍程度等环境因素的影响。其中,盐胁迫显著抑制种子萌发,降低发芽率与活力,进而对小麦苗期生长产生不利影响^[15]。不同类型的盐胁迫对春小麦萌发的抑制程度不同,不同小麦品种对盐胁迫的响应也存在差异。为探究不同类型盐胁迫对春小麦不同品种种子萌发特性及幼苗生长的影响,本研究针对内蒙古土壤盐渍化类型和范围不断变化的特点,以内蒙古河套灌区春小麦主栽品种永良 4 号和农麦 2 号为试验材料,设置 3 种类型(中性盐、碱性盐和复合盐)不同梯度盐胁迫处理,测定小麦种子萌发和幼苗生长特性,探究不同品种春小麦生长初期对不同盐胁迫的响应,旨在为春小麦耐盐机理研究及耐盐新品种选育提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

选用内蒙古河套灌区春小麦主栽品种永良 4 号

和农麦 2 号为试验材料,两品种均由内蒙古自治区农牧业科学院作物科学研究所提供。参试品种籽粒

表型及品质指标见表 1。

表 1 参试品种籽粒表型及品质指标

Table 1 Seed phenotypes and quality indicators of the tested varieties

品种	千粒重 (g)	面积 (mm ²)	周长 (mm)	长 (mm)	宽 (mm)	水分含量 (%)	蛋白质含量 (%)	容重 (g/L)
永良 4 号	48.87±0.35a	13.27±0.22a	15.16±0.19a	1.76±0.01a	5.56±0.04a	10.24±0.03a	13.92±0.04a	812.33±1.86a
农麦 2 号	48.62±0.85a	12.93±0.08a	15.14±0.13a	1.74±0.01a	5.49±0.03a	9.12±0.07b	14.02±0.16a	804.00±1.00b

同列数据后不同小写字母表示品种间差异显著($P < 0.05$)。

1.2 试验设计

本试验于 2024 年 11 月在内蒙古农牧业科学院作物科学研究所组培室进行。参考李媛媛等^[16]的方法并稍作调整。将培养皿在 75% 的乙醇中浸泡消毒 30 min,再用蒸馏水润洗 5 次,自然风干;选择健康饱满的小麦种子,用 5% 次氯酸钠(NaClO)浸泡 15 min 后再用蒸馏水冲洗 5 次,然后在蒸馏水中浸泡 10 h,培养皿上铺 2 层滤纸,2 层滤纸之间分别加入 10 mL 蒸馏水或不同类型不同浓度梯度盐溶液,选 20 粒浸泡后的种子放在培养皿中,于(25±2) °C、光照 8 h/黑暗 16 h 条件下培养,10 d 后测定相关指标。

参考前人研究结果^[11,17-18],本研究设置中性盐、碱性盐及复合盐 3 种类型的盐胁迫处理,各类型均设置不同浓度梯度,中性盐为 NaCl : Na₂SO₄ = 1 : 1 (摩尔比),浓度梯度为 0 mmol/L、50 mmol/L、100 mmol/L、150 mmol/L、200 mmol/L、250 mmol/L、300 mmol/L,以 0 mmol/L 为对照;碱性盐为 Na₂CO₃ : NaHCO₃ = 1 : 1 (摩尔比),浓度梯度为 0 mmol/L、25 mmol/L、50 mmol/L、75 mmol/L、100 mmol/L、125 mmol/L、150 mmol/L,以 0 mmol/L 为对照;复合盐为 NaCl : Na₂SO₄ : Na₂CO₃ : NaHCO₃ = 1 : 1 : 1 : 1 (摩尔比),浓度梯度为 0 mmol/L、25 mmol/L、50 mmol/L、75 mmol/L、100 mmol/L、125 mmol/L、150 mmol/L、175 mmol/L 和 200 mmol/L,以 0 mmol/L 为对照。

1.3 籽粒表型及品质测定

利用 SC-G 型种子外观品质检测自动分析仪(购自北京天翔飞域科技有限公司)测定籽粒表型指标,包括千粒重、面积、周长等;用 DA7200 多功能近红外分析仪[购自波通瑞华科学仪器(北京)有限公司]测定籽粒品质指标,包括水分含量、蛋白质含量;利用 GHCS-1000 型容重电子检测仪(购自杭州大成光电仪器有限公司)测定小麦籽粒容重。

1.4 发芽指标测定

依据《国家种子检验规程》^[19],将胚根长度≥种子长度、胚芽长度≥种子长度的一半视为成功发芽。在小麦种子发芽的第 3 d 统计发芽势,第 7 d 统计发芽率等指标,具体计算公式如下:

$$\text{发芽势} = (\text{第 3 d 发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽率} = (\text{第 7 d 发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\%$$

发芽指数(GI) = $\sum G_t / D_t$ (G_t 为第 t d 的发芽种子数, D_t 为相应的发芽日数)

活力指数(VI) = $S_{10d} \times GI_{10d}$ (S_{10d} 为第 10 d 幼苗的平均生长量; GI_{10d} 为第 10 d 的发芽指数)

萌发回复率 = $[(A - B) / (C - B)] \times 100\%$ (A 表示整个试验期间发芽的种子总数, B 表示经过不同盐胁迫处理后发芽的种子数量, C 表示该处理条件下的所有种子数量)^[15]。

相对盐害率 = (对照发芽率 - 盐胁迫处理发芽率) / 对照发芽率 $\times 100\%$ ^[11]

相对发芽势 = 盐胁迫处理发芽势 / 对照发芽势^[17]

相对发芽率 = 盐胁迫处理发芽率 / 对照发芽率^[17]

相对发芽指数 = 盐胁迫处理发芽指数 / 对照发芽指数^[17]

相对活力指数 = 盐胁迫处理活力指数 / 对照活力指数^[20]

1.5 幼苗生长及生物量的测定

于种子发芽第 10 d,用直尺测量全部参试小麦种子发芽后,幼苗植株的株高、最大根长并统计根数;对所有幼苗进行 5 次蒸馏水冲洗后,用干净滤纸吸去其表面水分,最后测定鲜重,将样品置于 105 °C 条件下杀青 45 min,然后在 75 °C 条件下烘干至恒重^[21],计算相关指标,具体计算公式如下:

$$\text{相对株高} = \text{盐胁迫处理植株株高} / \text{对照植株株高}$$

相对根数=盐胁迫处理植株根数/对照植株根数

相对最大根长=盐胁迫处理植株最大根长/对照植株最大根长

总鲜重=地下部鲜重(根系鲜重)+地上部鲜重(茎叶鲜重)

相对总鲜重=盐胁迫处理植株总鲜重/对照植株总鲜重

相对地上部鲜重=盐胁迫处理植株地上部鲜重/对照植株地上部鲜重

相对地下部鲜重=盐胁迫处理植株地下部鲜重/对照植株地下部鲜重

总干重=地下部干重(根系干重)+地上部干重(茎叶干重)

相对总干重=盐胁迫处理总干重/对照总干重

相对地上部干重=盐胁迫处理地上部干重/对照地上部干重

相对地下部干重=盐胁迫处理地下部干重/对照地下部干重

根冠比=地下部干重/地上部干重

1.6 耐盐临界值及极限浓度值的计算

选取与盐胁迫处理呈显著相关的种子萌发性状和幼苗生长指标进行线性回归分析,回归方程为 $Y = ax + b$,其中, Y 表示不同类型盐胁迫下各性状的相对值, x 表示不同类型盐胁迫的浓度, a 表示斜率, b 表示截距。通过回归方程可分别计算获得耐盐临界值与极限浓度值:当中性盐、碱性盐及复合盐胁迫下性状相对值分别为 0.5 和 0 时,对应的胁迫浓度即为该类型盐胁迫下的耐盐临界值和极限浓度值^[11]。

1.7 小麦种子萌发及幼苗盐胁迫伤害等级及耐盐性分级

根据小麦种子萌发至幼苗阶段的相对盐害率,将其耐盐性划分为 5 个等级:相对盐害率 0~20%,为高耐盐;相对盐害率 21%~40%,为中耐盐;相对盐害率 41%~60%,为低耐盐;相对盐害率 61%~80%,为中盐敏感;相对盐害率 81%~100%,为高盐敏感^[11]。

1.8 数据统计

采用 Excel 2016 软件进行数据的整理与计算,使用 SPSS 22.0 软件对试验材料各性状相对值进行单因素方差分析、 t 检验,用 Origin 2022 软件进行线性拟合及绘图,并利用该软件的 Redundancy Analysis v1.10 插件工具完成冗余分析(RDA),应用 SmartPLS 4.0 软件进行偏最小二乘结构方程的构建与分析。

2 结果与分析

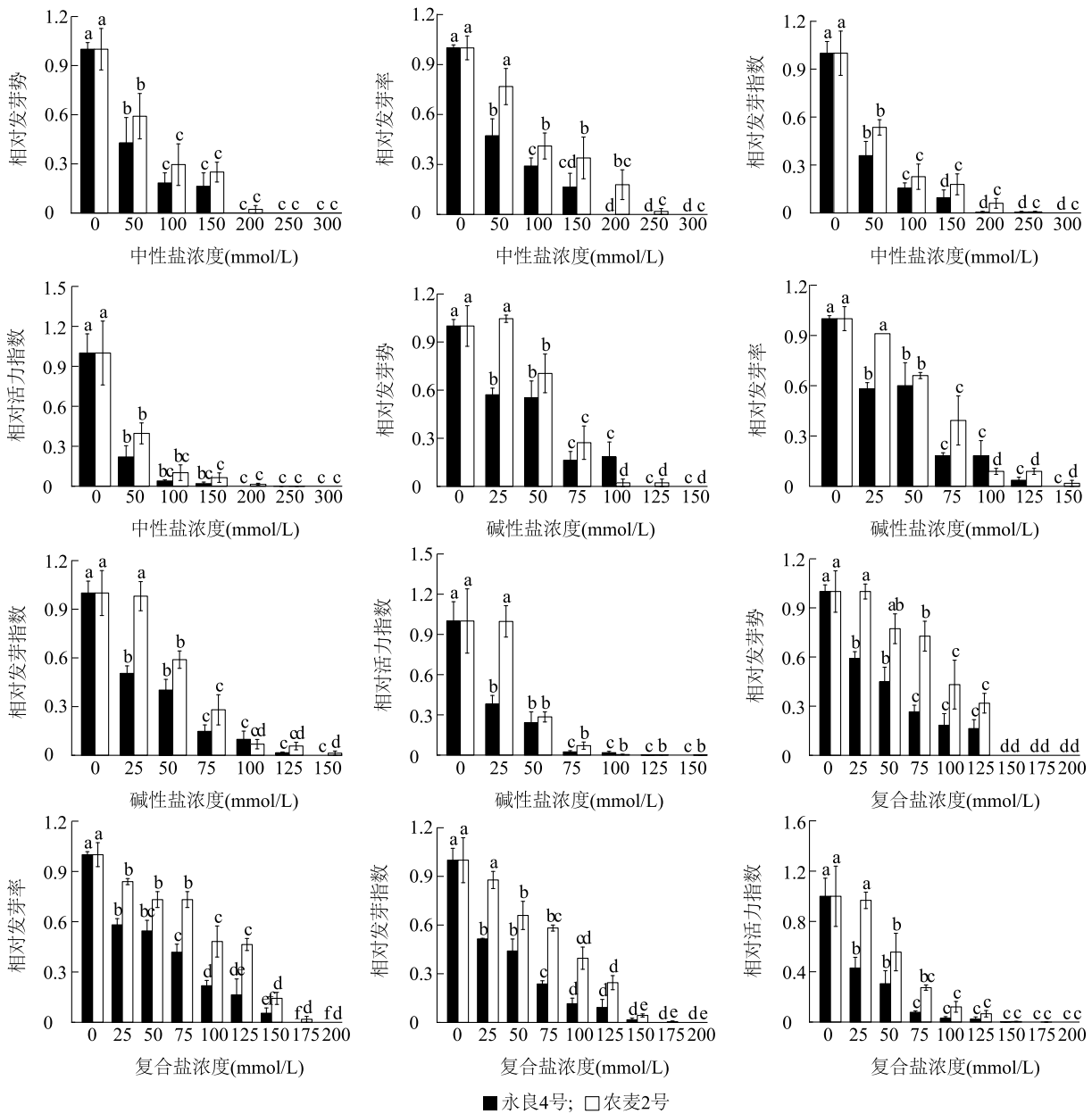
2.1 不同类型盐胁迫对春小麦种子发芽的影响

如图 1 所示,在不同类型盐胁迫下,随着盐浓度的增加,两个品种的发芽指标(相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数)均呈持续下降趋势,且多为显著性下降($P < 0.05$)。两个小麦品种间 25 mmol/L 碱性盐胁迫下,农麦 2 号发芽指标显著高于永良 4 号($P < 0.05$);25 mmol/L、75 mmol/L 复合盐胁迫下,农麦 2 号发芽指标显著高于永良 4 号($P < 0.05$);此外,125 mmol/L 复合盐胁迫下农麦 2 号相对发芽率显著高于永良 4 号($P < 0.05$),100 mmol/L 复合盐胁迫下农麦 2 号相对发芽指数显著高于永良 4 号($P < 0.05$)。

综上,不同类型盐胁迫下 2 个小麦品种发芽指标多表现出与盐浓度显著负相关($P < 0.05$),且农麦 2 号较永良 4 号表现出较强的耐盐性。

2.2 不同类型盐胁迫对春小麦幼苗生长的影响

如图 2 所示,在中性盐胁迫下,随着盐浓度增加 2 个小麦品种相对最大根长呈持续下降趋势,与 0 mmol/L 相比,其他盐浓度中性盐胁迫下小麦相对最大根长多表现显著下降($P < 0.05$);随着盐浓度增加小麦相对根数总体呈下降趋势,与 0 mmol/L 相比,50~100 mmol/L 中性盐胁迫下小麦相对根数无显著性差异($P > 0.05$),200~300 mmol/L 中性盐胁迫下小麦相对根数显著减少($P < 0.05$);随着盐浓度增加小麦相对株高呈持续下降趋势,与 0 mmol/L 相比,50 mmol/L 中性盐胁迫下相对株高无显著性差异($P > 0.05$),100~300 mmol/L 中性盐胁迫相对株高显著降低($P < 0.05$)。碱性盐胁迫下,随着盐浓度增加小麦相对最大根长持续下降,与 0 mmol/L 相比,25 mmol/L 碱性盐胁迫下小麦最大根长无显著差异($P > 0.05$),50~150 mmol/L 碱性盐胁迫下小麦相对最大根长显著下降($P < 0.05$);随着盐浓度增加小麦相对根数和相对株高均呈先上升后下降的趋势,与 0 mmol/L 相比,25 mmol/L 碱性盐胁迫下永良 4 号相对根数和相对株高显著增加($P < 0.05$)、农麦 2 号相对根数和相对株高无显著变化($P > 0.05$),50 mmol/L 碱性盐胁迫下永良 4 号相对根数和相对株高无显著变化($P > 0.05$),农麦 2 号相对根数和相对株高显著下降($P < 0.05$),75~150 mmol/L 碱性盐胁迫下 2 个小麦品种相对根数和相对株高均显著下降



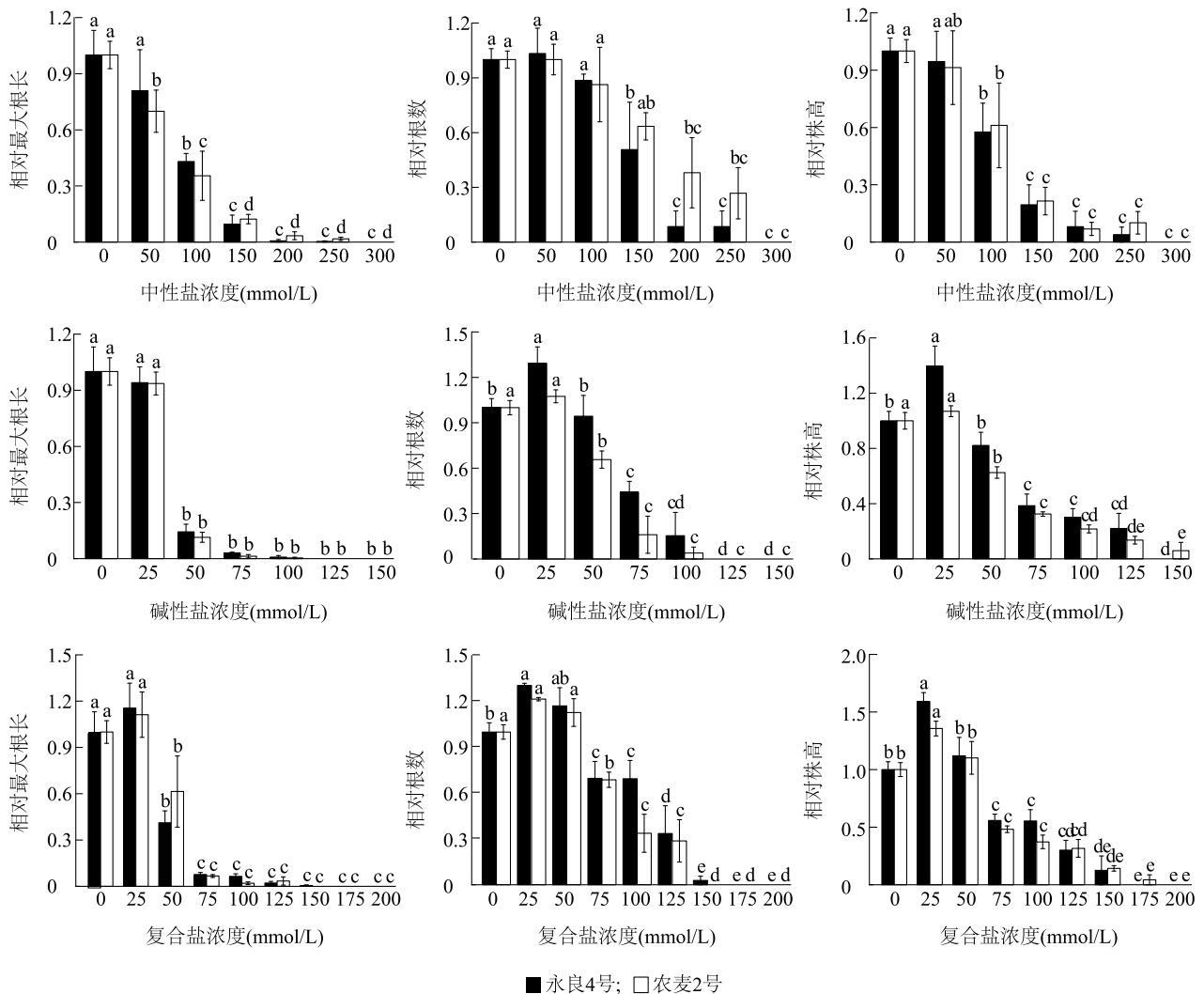
同一品种图柱上不同小写字母表示不同盐浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同类型盐胁迫对春小麦种子发芽的影响

Fig.1 Effects of different types of salt stress on seed germination of spring wheat

($P < 0.05$)。复合盐胁迫下,随着盐浓度增加小麦相对最大根长、相对根数及相对株高均呈现先上升后下降趋势;与 0 mmol/L相比,25 mmol/L复合盐胁迫下小麦相对最大根长无显著变化($P > 0.05$),50~200 mmol/L复合盐胁迫下相对最大根长显著下降($P < 0.05$);与 0 mmol/L相比,25 mmol/L复合盐胁迫下永良4号相对根数显著上升($P < 0.05$)、农麦2号无显著变化($P > 0.05$),50 mmol/L复合盐胁迫下

2 个小麦品种均无显著变化($P > 0.05$),75~200 mmol/L复合盐胁迫下2个品种相对根数均显著下降($P < 0.05$);与 0 mmol/L相比,25 mmol/L复合盐胁迫下2个小麦品种相对株高均显著上升($P < 0.05$),50 mmol/L复合盐胁迫下2个小麦品种相对株高均无显著变化($P > 0.05$),75~200 mmol/L复合盐胁迫下2个小麦品种相对株高均显著下降($P < 0.05$)。



同一品种图柱上不同小写字母表示不同盐浓度处理间差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同类型盐胁迫对春小麦幼苗生长的影响

Fig.2 Impact of various types of salt stress on seedling growth of spring wheat

综上,永良4号和农麦2号幼苗生长与中性盐、碱性盐、复合盐浓度均存在显著线性关系,品种间差异性不大。

2.3 不同类型盐胁迫对春小麦幼苗生物量的影响

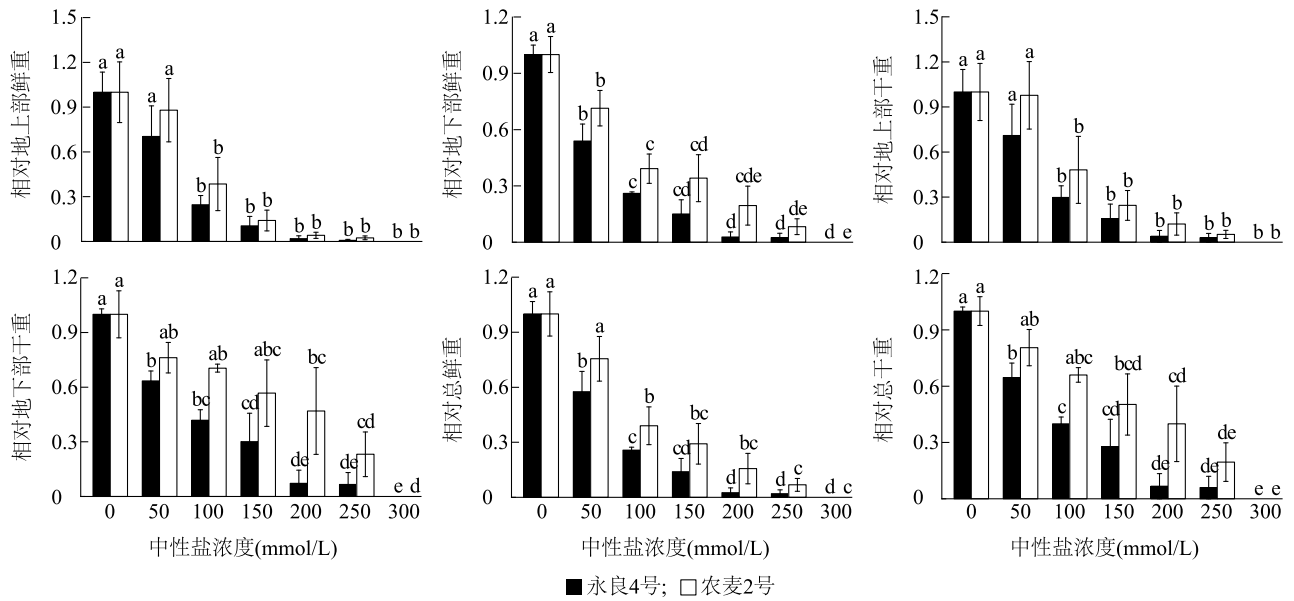
如图3所示,在中性盐胁迫下,随着盐浓度增加小麦生物量相关指标呈现持续下降趋势,且多表现为显著下降($P < 0.05$);中性盐浓度为100 mmol/L时,农麦2号相对地下部干重和相对总干重显著高于永良4号($P < 0.05$)。

如图4所示,整体来看,碱性盐胁迫浓度与生物量多存在显著负相关关系($P < 0.05$);在盐浓度为25 mmol/L时,农麦2号相对地下部鲜重和相对总鲜重均显著高于永良4号($P < 0.05$);浓度为125

mmol/L时永良4号相对地上部干重显著高于农麦2号($P < 0.05$)。

如图5所示,与0 mmol/L相比,随着复合盐胁迫浓度的增加,相关生物量指标多呈现显著变化($P < 0.05$)。品种间相比,复合盐浓度为75 mmol/L时农麦2号相对地上部鲜重、相对地上部干重及相对总鲜重显著高于永良4号($P < 0.05$),但该盐浓度下其相对地下部鲜重显著低于永良4号($P < 0.05$);复合盐浓度为125 mmol/L时农麦2号相对地下部干重显著高于永良4号($P < 0.05$);复合盐浓度为50 mmol/L时农麦2号相对总干重显著高于永良4号($P < 0.05$)。

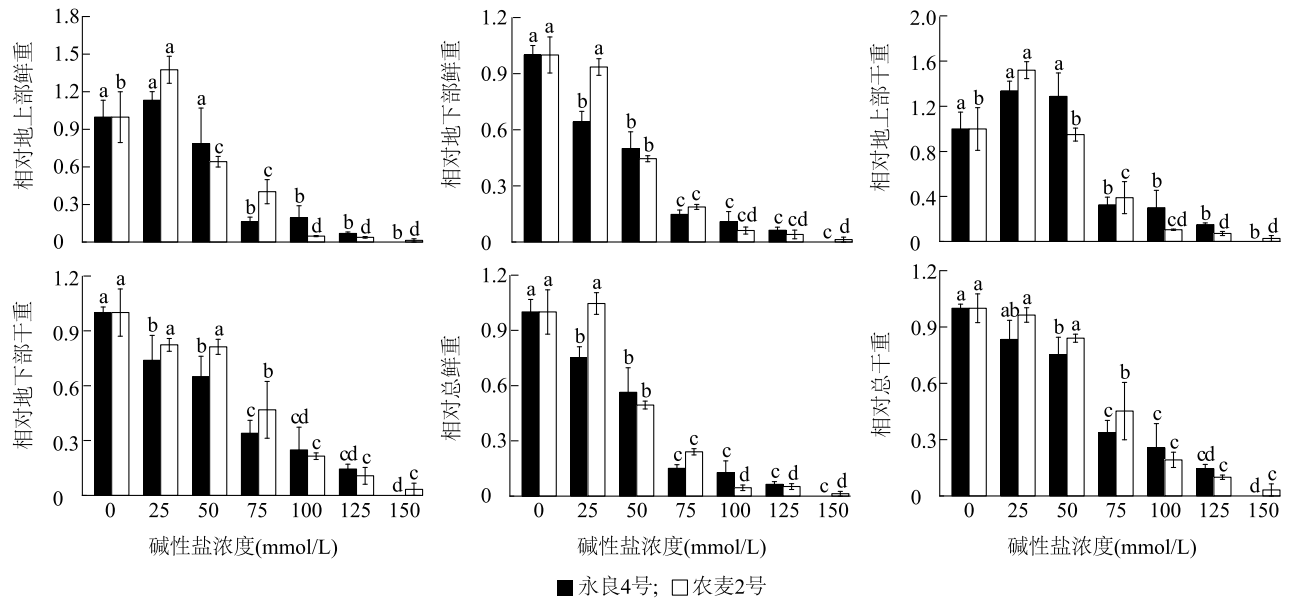
综上,小麦幼苗相关生物量指标与中性盐、碱性盐、复合盐浓度间大多存在负相关关系。



同一品种图柱上不同小写字母表示不同中性盐浓度处理间差异显著($P < 0.05$)。

图3 中性盐胁迫对春小麦幼苗鲜重和干重的影响

Fig.3 Effects of neutral salt stress on fresh weight and dry weight of spring wheat seedlings



同一品种图柱上不同小写字母表示不同碱性盐浓度处理间差异显著($P < 0.05$)。

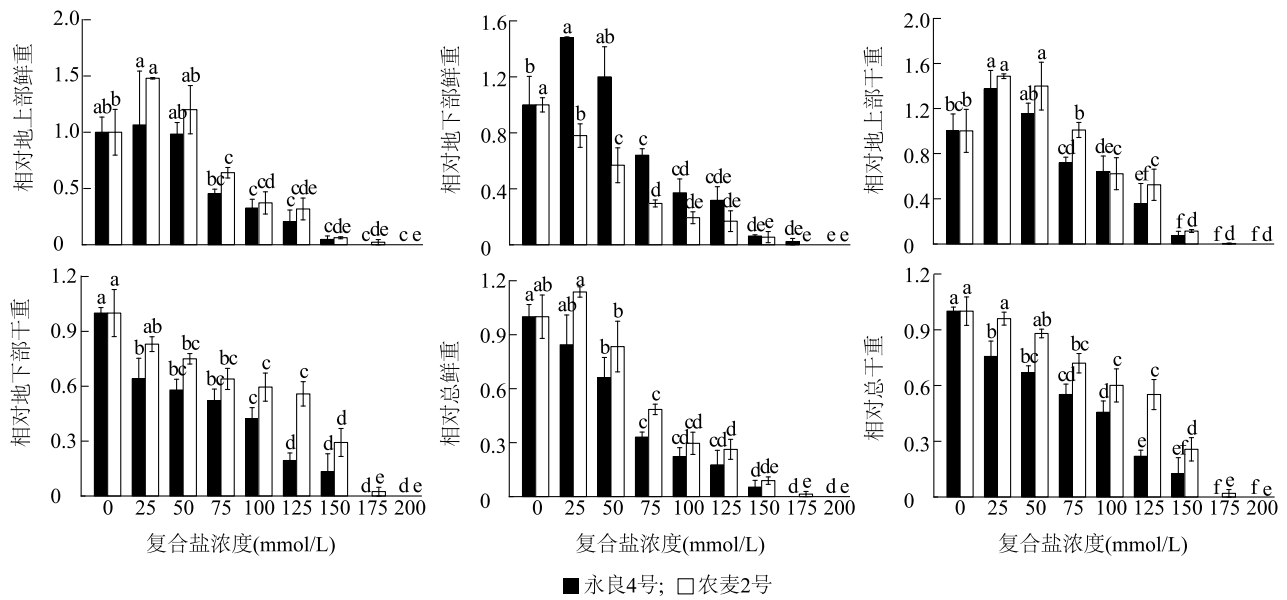
图4 碱性盐胁迫对春小麦幼苗鲜重和干重的影响

Fig.4 Effects of alkaline salt stress on fresh weight and dry weight of spring wheat seedlings

2.4 不同类型盐胁迫下小麦耐盐临界值与极限浓度值

从表2可知,中性盐胁迫下永良4号的耐盐临界值范围为10.00~170.00 mmol/L,极限浓度最大值为295.00 mmol/L;农麦2号的耐盐临界值范围为97.50~176.67 mmol/L,极限浓度最大值为343.33

mmol/L,综上,农麦2号的耐盐临界值和极限浓度值较永良4号高,但差异不显著($P > 0.05$)。碱性盐胁迫下永良4号的耐盐临界值范围为32.00~75.00 mmol/L,极限浓度最大值为138.57 mmol/L,农麦2号耐盐临界值范围为26.00~77.78 mmol/L,极限浓度最大值为138.57 mmol/L,结合耐盐临界值和极限



同一品种图柱上不同小写字母表示不同复合盐浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 复合盐胁迫对春小麦幼苗鲜重和干重的影响

Fig.5 Effects of compound salt stress on fresh weight and dry weight of spring wheat seedlings

浓度值的均值来看农麦 2 号较永良 4 号高,但差异不显著 ($P > 0.05$);复合盐胁迫下,永良 4 号耐盐临界值范围为 52.86~102.00 mmol/L,极限浓度最大值为 165.00 mmol/L,农麦 2 号耐盐临界值范围为

92.86~111.67 mmol/L,极限浓度最大值为 200.00 mmol/L,综上,复合盐胁迫下农麦 2 号较永良 4 号的耐盐临界值和极限浓度值更高,且两者间的耐盐临界值和极限浓度值间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

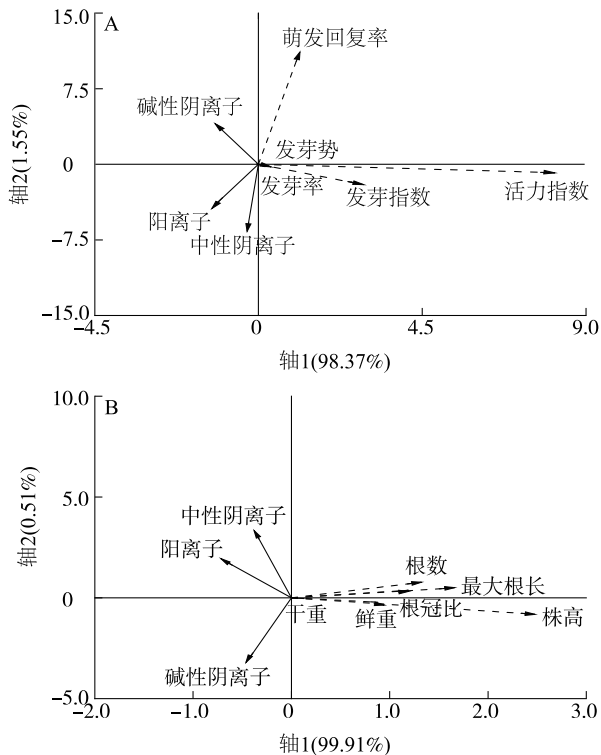
表 2 不同类型盐胁迫下小麦幼苗的耐盐临界值和极限浓度值

Table 2 Salt tolerance thresholds and limiting concentration values of wheat seedlings under different types of salt stress

盐胁迫类型	指标	永良 4 号		农麦 2 号	
		耐盐临界值 (mmol/L)	极限浓度值 (mmol/L)	耐盐临界值 (mmol/L)	极限浓度值 (mmol/L)
中性盐胁迫	相对发芽势	67.14	138.57	97.50	222.50
	相对发芽率	70.00	141.43	107.50	232.50
	相对根数	170.00	295.00	176.67	343.33
	相对株高	117.50	242.50	112.50	237.50
	相对总鲜重	10.00	260.00	120.00	286.67
	相对总干重	115.00	240.00	160.00	326.67
碱性盐胁迫	相对发芽势	46.67	102.22	76.00	126.00
	相对发芽率	51.25	113.75	58.57	130.00
	相对根数	75.00	137.50	67.00	117.00
	相对株高	72.50	135.00	67.14	138.57
	相对总鲜重	32.00	132.00	26.00	126.00
	相对总干重	67.14	138.57	77.78	133.33
复合盐胁迫	相对发芽势	52.86	124.29	106.67	190.00
	相对发芽率	67.14	138.57	100.00	200.00
	相对根数	102.00	152.00	110.00	172.50
	相对株高	96.25	158.75	95.00	178.33
	相对总鲜重	53.33	136.67	92.86	164.29
	相对总干重	81.67	165.00	111.67	195.00

2.5 不同类型盐胁迫离子与春小麦种子萌发特性及幼苗生长的冗余分析

对不同类型盐胁迫离子与春小麦种子萌发特性及幼苗生长进行冗余分析,结果(图6)发现,盐胁迫离子与春小麦种子萌发特性及幼苗生长之间存在显著关系。如图6A所示,阳离子(Na^+)、中性阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^-)、碱性阴离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)与春小麦种子萌发特性呈显著负相关。由轴1可知,这3种离子对春小麦种子萌发特性的影响强度依次为:阳离子>碱性阴离子>中性阴离子。碱性阴离子对种子活力指数、发芽指数、发芽势和发芽率的负向影响明显强于阳离子和中性阴离子。而在萌发回复率方面,碱性阴离子的负向作用相对较弱。根据图6B的信息,上述3种离子与幼苗株高、最大根长、根数、鲜重、干重以及根冠比之间均呈显著负相关。影响程度按强弱依次为阳离子、碱性阴离子和中性阴离子。其中,轴1下阳离子和中性阴离子对株高、鲜重及干重的影响较为显著,而碱性阴离子在幼苗根系结构(根冠比、最大根长、根数)方面的负向作用尤为显著。



A: 种子萌发特性;B: 幼苗生长。

图6 盐胁迫离子与春小麦种子萌发特性及幼苗生长的冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis of salt stress ions with spring wheat seed germination characteristics and seedling growth

2.6 不同类型盐胁迫下春小麦盐害等级

根据表3可知,中性盐胁迫在200 mmol/L、250 mmol/L、300 mmol/L浓度下,永良4号和农麦2号均高盐敏感;在50 mmol/L、100 mmol/L、150 mmol/L浓度下,农麦2号对盐胁迫的耐受能力比永良4号好。碱性盐胁迫浓度为25 mmol/L时,农麦2号与永良4号耐盐能力存在显著差异,农麦2号高耐盐,永良4号低耐盐;盐浓度为50 mmol/L、75 mmol/L时农麦2号耐盐能力比永良4号好;盐浓度为100 mmol/L、125 mmol/L、150 mmol/L时,2个品种均高盐敏感。在复合盐胁迫浓度为25 mmol/L、50 mmol/L、75 mmol/L、100 mmol/L、125 mmol/L时,2个小麦品种耐盐能力存在显著差异,农麦2号较永良4号耐盐能力强;盐浓度为150 mmol/L、175 mmol/L、200 mmol/L时,2个品种均高盐敏感。综上,不同类型盐胁迫下农麦2号的耐盐能力较永良4号好。

表3 不同盐胁迫下春小麦种子萌发的盐害等级

Table 3 Salt damage grades of spring wheat seed germination under different salt stresses

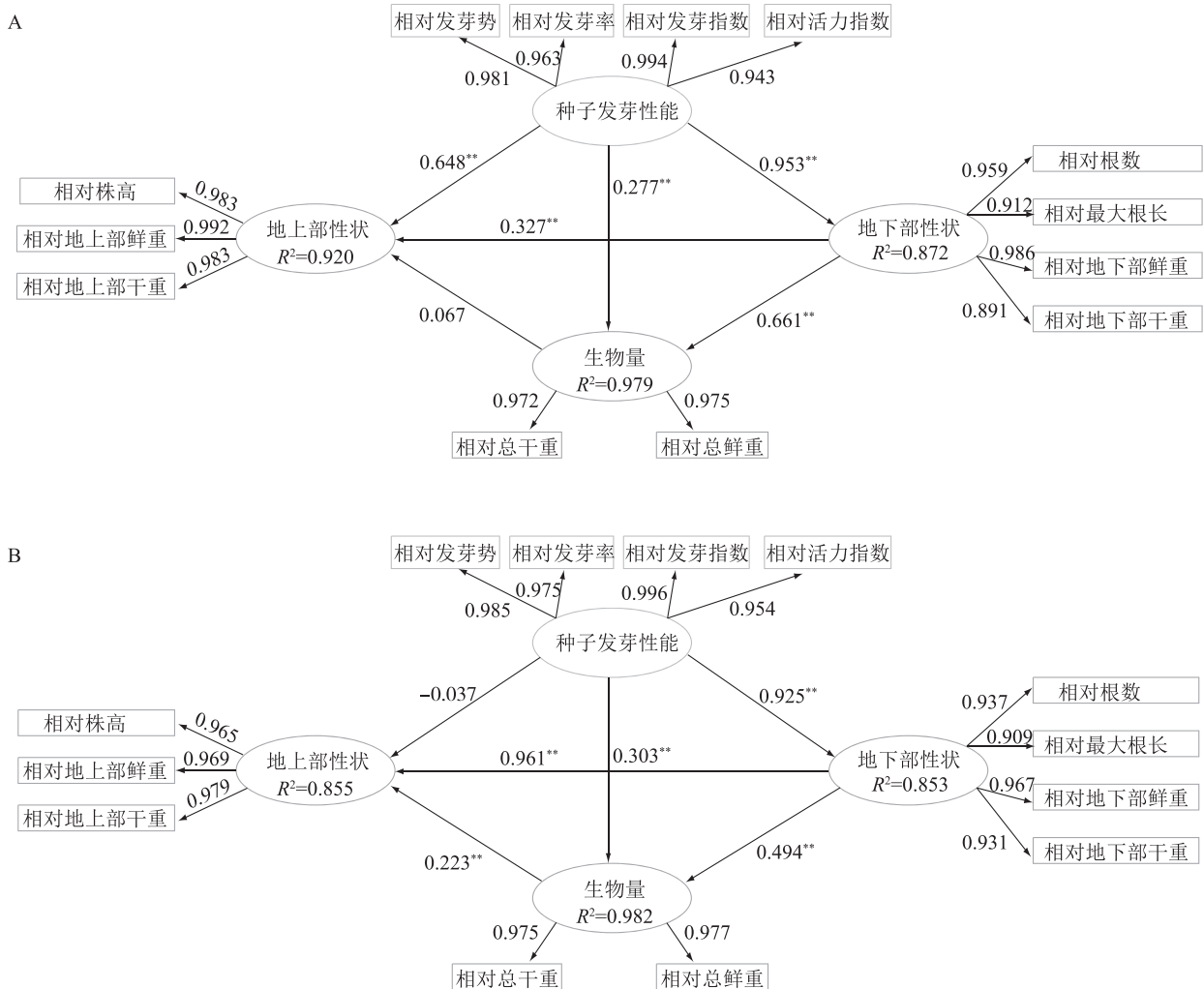
胁迫类型	盐胁迫浓度 (mmol/L)	盐害等级(级)	
		永良4号	农麦2号
中性盐胁迫	50	3	2
	100	4	3
	150	5	4
	200	5	5
	250	5	5
	300	5	5
碱性盐胁迫	25	3	1
	50	3	2
	75	5	4
	100	5	5
	125	5	5
	150	5	5
复合盐胁迫	25	3	1
	50	3	2
	75	3	2
	100	4	3
	125	5	3
	150	5	5
	175	5	5
	200	5	5

1级:相对盐害率0~20%,为高耐盐;2级:相对盐害率21%~40%,为中度耐盐;3级:相对盐害率41%~60%,为低耐盐;4级:相对盐害率61%~80%,为中盐敏感;5级:相对盐害率81%~100%,为高盐敏感。

2.7 不同品种春小麦耐盐路径分析

本研究利用偏最小二乘结构方程分析不同品种的耐盐路径,结果(图 7A)显示,农麦 2 号的结构方程耐盐路径解释率高达 0.979。种子发芽性能的直接作用及其通过地下部性状的间接作用均达到极显著水平($P < 0.01$)。与农麦 2 号表现不同的是,永良 4 号种子发芽性能对幼苗地上部性状影响不显著($P > 0.05$),其路径系数为-0.037,永良 4 号种子发芽性能对幼苗地下部性状的影响效应为 0.925 ($P < 0.01$)、对幼苗生物量影响的路径系数为 0.303 ($P < 0.01$)、地下部性状对生物量影响的路径系数为 0.494 ($P < 0.01$)。结合表 4 可知,永良 4 号种子发芽性能对幼苗生物量的总影响为 0.951。

的总影响为 0.959。由图 7B 可知,永良 4 号结构方程的耐盐路径解释率为 0.982,种子发芽性能的直接作用及其通过地下部性状的间接作用均达到极显著水平($P < 0.01$)。与农麦 2 号表现不同的是,永良 4 号种子发芽性能对幼苗地上部性状影响不显著($P > 0.05$),其路径系数为-0.037,永良 4 号种子发芽性能对幼苗地下部性状的影响效应为 0.925 ($P < 0.01$)、对幼苗生物量影响的路径系数为 0.303 ($P < 0.01$)、地下部性状对生物量影响的路径系数为 0.494 ($P < 0.01$)。结合表 4 可知,永良 4 号种子发芽性能对幼苗生物量的总影响为 0.951。



A: 农麦 2 号; B: 永良 4 号。R² 为决定系数,表示种子发芽性能、地上部性状和地下部性状等外源潜变量对地上部性状、地下部性状及生物量等内生潜变量变异的解释比例,反映了模型对各内生变量的解释能力;* 表示作用达显著水平($P < 0.05$),** 表示作用达极显著水平($P < 0.01$);实线箭头代表路径系数(β)>0,虚线箭头代表路径系数(β)<0。

图 7 不同品种春小麦的耐盐路径

Fig.7 Salt tolerance pathways of different spring wheat varieties

表 4 基于偏最小二乘结构方程的春小麦种子发芽性能对幼苗生长的影响分析结果

Table 4 Analysis results of the effects of spring wheat seed germination performance on seedling growth based on partial least squares structural equation model

品种	源指标	结果指标	直接影响	间接影响	总影响
农麦 2 号	种子发芽性能	地下部性状	0.935	NA	0.935
		地上部性状	0.648	0.305	0.953
		生物量	0.277	0.682	0.959
永良 4 号	种子发芽性能	地下部性状	0.925	NA	0.925
		地上部性状	-0.037	0.889	0.852
		生物量	0.303	0.648	0.951

源指标为核心影响源指标,代表其对幼苗性状的影响路径;NA 表示无对应间接影响路径,仅存在直接影响效应;直接影响、间接影响及总影响数值均为偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)得到的标准化路径系数(β),反映变量间的效应强度与方向;总影响为直接影响+间接影响,代表源指标对结果指标的综合效应。

3 讨论

近年来,土壤盐渍化类型和范围不断变化^[22-23],已成为小麦产量的限制因素之一。种子萌发阶段是小麦生长最脆弱的时期,直接决定了其成活率和最终产量^[4,24]。针对内蒙古土壤盐渍化类型复杂的特点,本研究以河套灌区主要栽培春小麦品种永良 4 号和农麦 2 号为试验材料,设置中性盐、碱性盐及复合盐 3 种类型的盐胁迫处理,各类型均设置不同浓度梯度,探究不同品种种子萌发及幼苗生长对不同类型盐胁迫的响应差异。结果表明,不同类型盐胁迫对春小麦产生了不同程度的影响。其中,碱性盐胁迫(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)对春小麦种子萌发及幼苗生长的影响最大,复合盐胁迫(NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaHCO_3)影响居中,中性盐胁迫(NaCl 和 Na_2SO_4)影响最小。这与前人研究结果基本一致,刘清玮等^[25]发现,在盐碱胁迫下菘蓝种子萌发受抑制程度依次表现为碱性盐>混合盐碱>中性盐;张梦婕等^[26]的研究结果表明,碱性盐与中性盐的复合胁迫对种子萌发的抑制作用显著高于单一中性盐胁迫;王春雨等^[27]针对大豆耐盐碱能力的研究也得到类似结果,碱胁迫对大豆生长的抑制程度高于盐和盐碱混合胁迫。值得注意的是,徐镇等^[28]的研究结果显示,在相同浓度下不同类型盐胁迫对植物影响程度表现为:盐碱胁迫>碱胁迫>盐胁迫,推测这一差异可能与盐的具体成分、胁迫离子种类及植物物种的响应差异有关^[29-31]。

本研究通过冗余分析可知,不同胁迫离子对春小麦的种子萌发及幼苗生长的影响程度依次表现

为:阳离子(Na^+)>碱性阴离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)>中性阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^-),阳离子(Na^+)对小麦种子萌发及幼苗生长的抑制作用最大,这一结论与徐镇等^[28]对籽莲种子发芽指标与胁迫因子的冗余分析结果($\text{Na}^+>\text{pH}>\text{SO}_4^{2-}$)类似。大量的 Na^+ 进入细胞中,一方面会破坏细胞膜的结构和功能(稳定性、通透性),导致细胞内营养物质流失,进一步造成更多 Na^+ 进入细胞,形成恶性循环;另一方面,过量的 Na^+ 会引起渗透胁迫,需渗透调节物质的合成,但由于气孔限制等原因,光合作用无法满足其合成所需的能量^[32-33]。此外,碱性阴离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)的作用也不容忽视,郭伟等^[34]的研究结果表明,随着碱性盐离子浓度的增加,小麦种子萌发特性、幼苗生长、根系结构均会受到显著影响。值得注意的是,本研究发现,小麦幼苗部分性状(相对株高、相对最大根长、相对根数)在 25 mmol/L 碱性盐和 25 mmol/L 复合盐胁迫下表现较对照更好的现象。造成该现象的原因可能是低浓度盐胁迫下 Na^+ 参与酶活调节,促进种子萌发后期幼苗光合作用增强,以支持幼苗早期生长;同时,低浓度盐分的存在还会影响生长素的分布,起到优化根系结构以应对渗透胁迫的作用^[14,35-37]。

本研究结果表明,相较于永良 4 号,农麦 2 号对不同类型盐胁迫表现出更强的耐受能力。结构方程模型分析结果显示,农麦 2 号种子发芽性能对幼苗地上部性状的标准化路径系数为 0.648,呈极显著($P<0.01$)正向效应;而永良 4 号的路径系数为 -0.037,效应微弱且方向相反。这一差异提示,二者耐盐性差异可能与籽粒特性、耐盐阈值及生物量分

配策略密切相关。在籽粒特性方面,农麦2号的蛋白质含量为14.02%,较高的蛋白质含量可为渗透调节物质合成提供充足的原料,从而在盐胁迫条件下表现出较好优势^[3,38-40]。其次,耐盐阈值测定结果表明,农麦2号对盐离子的吸收调控能力及整体耐盐性显著高于永良4号^[11,17]。在盐胁迫下,农麦2号可维持较高的地下部干重与总干重,这一特征符合耐盐植物普遍采用的生物量优先积累适应策略^[11,41]。此外,本研究中农麦2号表现出的耐盐优势与其已报道的抗旱特性^[42]相一致,进一步印证了小麦不同抗逆性状间存在遗传关联的观点^[4]。

总体而言,本研究结果表明,碱性盐胁迫对春小麦的抑制作用更为显著。为高效利用盐碱化土壤,建议首先施用土壤改良剂,中和土壤碱性、降低pH值;其次科学合理施肥,避免因过量施肥导致土壤盐渍化程度加剧、盐碱化面积进一步扩大。此外,应根据不同类型盐碱土的特点筛选并种植适宜的耐盐小麦品种,配合耐盐性锻炼以充分发挥品种耐盐潜力,从而进一步提升盐碱土地区粮食作物产量。

4 结论

本研究结果表明,不同类型盐胁迫对内蒙古河套灌区春小麦主要栽培品种永良4号和农麦2号的种子萌发及幼苗生长均产生不同程度的抑制效应。基于耐盐临界值与极限浓度值综合评价,碱性盐胁迫(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)对种子萌发和幼苗生长的抑制作用最强,复合盐胁迫(NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaHCO_3)次之,中性盐胁迫(NaCl 和 Na_2SO_4)最弱。冗余分析结果显示,3类离子对小麦种子萌发及幼苗生长的抑制强度由大到小依次为:阳离子(Na^+)>碱性阴离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)>中性阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^-)。同时,2个品种对盐胁迫的响应存在明显差异,其耐盐临界均值与极限浓度均值在品种间表现出不同程度的分化,尤其在复合盐胁迫下差异达显著水平($P<0.05$)。结合盐害等级与结构方程模型分析可知,农麦2号在种子萌发至幼苗建成的关键生育阶段表现出更强的耐盐优势。本研究结果可为深入解析春小麦耐盐机理及开展耐盐新品种选育提供重要理论依据与参考价值。

参考文献:

[1] HE H, PENG M W, LU W D, et al. Commercial organic fertilizer

substitution increases wheat yield by improving soil quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158132.

- [2] 赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志, 2018(4): 1-7.
- [3] 叶君,吴晓华,王小兵,等. 彩色小麦品系农艺性状与营养品质分析[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(10): 1270-1278.
- [4] 代亚博,王小兵,李娟,等. 小麦对盐碱胁迫响应机理的研究进展[J]. 北方农业学报, 2024, 52(4): 59-68.
- [5] 韩成福,韩柱. 降低内蒙古自治区粮食生产总成本的对策研究——基于玉米、大豆、小麦、粳稻的实证分析[J]. 内蒙古社会科学, 2022, 43(4): 201-206, 213.
- [6] 杨真,王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125-130.
- [7] 陈炳铭,冯文婷,王玉刚,等. 脱硫石膏在碱土改良中的无机固碳作用[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 247-257.
- [8] 王忠媛,谢江波,王玉刚,等. 温度对盐土和碱土土壤无机 CO_2 通量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2525-2531.
- [9] 贾美美. 盐碱胁迫对蒲公英生长和品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [10] 魏翠果,陈有君,蒙美莲,等. 钙对 NaCl 胁迫下马铃薯脱毒苗离子吸收、分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 993-1005.
- [11] 李刚,付凯勇,王焱栋,等. 中性和碱性盐复合胁迫对2个小麦品种种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 29-41.
- [12] TANG H, DU L, XIA C C, et al. Bridging gaps and seeding futures: a synthesis of soil salinization and the role of plant-soil interactions under climate change [J]. *iScience*, 2024, 27(9): 110804.
- [13] ALKHARABSHEH H M, SELEIMAN M F, HEWEDY O A, et al. Field crop responses and management strategies to mitigate soil salinity in modern agriculture: a review [J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2299.
- [14] 王亚妮,孙韬. 盐碱胁迫下小麦幼苗对施氮水平的生长、生理响应[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(2): 220-225.
- [15] SELEIMAN M F, TALHA ASLAM M, AHMED ALHAMMAD B, et al. Salinity stress in wheat: effects, mechanisms and management strategies [J]. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 2022, 91(4): 667-694.
- [16] 李媛媛,陈博,姚立蓉,等. 283份小麦品种(系)萌发期耐盐碱性评价及种质筛选[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(3): 25-33.
- [17] 王兴州,时晓磊,张恒,等. 引进春小麦品种萌发期耐盐性鉴定及评价[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(6): 1353-1362.
- [18] CHOUDHARY A, KAUR N, SHARMA A, et al. Evaluation and screening of elite wheat germplasm for salinity stress at the seedling phase [J]. *Physiologia Plantarum*, 2021, 173(4): 2207-2215.
- [19] 袁飞敏,权有娟,陈志国. 不同钠盐胁迫对藜麦种子萌发的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 182-187.
- [20] 赵绍庚,刘晓强,王玉玺,等. 玉米萌发期耐盐性评价及其杂种优势模式分析[J]. 植物遗传资源学报, 2025, 26(1): 79-89.

- [21] 张 军,魏 国,彭彦珉,等. 8 份强筋小麦品种抗旱性评价[J]. 麦类作物学报,2024,44(4):442-452.
- [22] 董 岳,胡奕婷,张 辉,等. 土壤含盐量对滨海盐渍农田土壤氮素转化和淋失特征的影响[J]. 江苏农业学报,2025,41(2):296-304.
- [23] 刘 铎,王 拯,李 平,等. 小麦对盐碱胁迫响应及耐盐碱调控技术研究进展[J]. 江苏农业学报,2024,40(10):1970-1975.
- [24] 陈茂盛,王 磊,牛子路,等. 内蒙古河套灌区土壤盐渍化特征[J]. 农业科学研究,2024,45(4):40-48.
- [25] 刘清玮,孙莉佳,高延辉. 盐碱胁迫对菘蓝种子萌发的影响[J]. 吉林农业大学学报,2015,37(2):166-170.
- [26] 张梦婕,吴湘琳,魏亚媛,等. 混合盐碱对棉花幼苗渗透调节物质的影响[J]. 新疆农业科学,2021,58(11):2011-2023.
- [27] 王春雨,朱冠雄,田艺心,等. 大豆耐盐碱生理机制及种质筛选研究进展[J]. 大豆科学,2024,43(1):107-113.
- [28] 徐 镇,王 武,徐惠风,等. 籽莲种子萌发对盐碱胁迫的响应[J]. 分子植物育种,2025,23(20):6831-6837.
- [29] 高萌萌,张 影,朴日花,等. 吉林省水稻品种耐苏打盐碱鉴定及生理生化特性分析[EB/OL]. (2024-07-20)[2025-01-13]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0535>.
- [30] 蔺吉祥,李晓宇,唐佳红,等. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及 Na^+ 、 K^+ 代谢的影响[J]. 麦类作物学报,2011,31(6):1148-1152.
- [31] 万何平,余 忆,陈敬东,等. 甘蓝型油菜耐盐碱性快速鉴定方法与应用[J]. 中国油料作物学报,2023,45(4):776-784.
- [32] MIRANSARI M, SMITH D. Sustainable wheat (*Triticum aestivum* L.) production in saline fields: a review[J]. Critical Reviews in Biotechnology,2019,39(8):999-1014.
- [33] 左照江,张汝民,高 岩. 盐胁迫下植物细胞离子流变化的研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2014,31(5):805-811.
- [34] 郭 伟,王庆祥,于立河. 混合盐碱胁迫对小麦种子萌发的影响[J]. 种子,2011,30(5):37-41.
- [35] WANG P, LI X Y, TIAN L, et al. Low salinity promotes the growth of broccoli sprouts by regulating hormonal homeostasis and photosynthesis[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology,2019,60(1):19-30.
- [36] HUA Y P, ZHANG Y F, ZHANG T Y, et al. Low iron ameliorates the salinity-induced growth cessation of seminal roots in wheat seedlings[J]. Plant, Cell & Environment,2023,46(2):567-591.
- [37] 孙新灵,韩 伟,王会芳,等. 耐盐锻炼对盐胁迫下小麦幼苗形态及根系生长的影响[J]. 山东农业科学,2021,53(12):33-37.
- [38] ATHAR H U R, ZULFIQAR F, MOOSA A, et al. Salt stress proteins in plants: an overview[J]. Frontiers in Plant Science,2022,13:999058.
- [39] XIONG M, XU J, ZHOU Z, et al. Salinity inhibits seed germination and embryo growth by reducing starch mobilization efficiency in barley[J]. Plant Direct,2024,8(2):564.
- [40] KUMAR P, GUPTA V, SINGH G, et al. Assessment of terminal heat tolerance based on agro-morphological and stress selection indices in wheat[J]. Cereal Research Communications,2021,49(2):217-226.
- [41] 赵花荣,张 玲,齐 月,等. 旱、渍胁迫对夏玉米根冠比及籽粒灌浆源库关系的影响[J]. 气候变化研究进展,2024,20(6):782-798.
- [42] 韩开明,张永平,关文雯,等. 抗旱节水春小麦品种鉴定指标比较研究[J]. 麦类作物学报,2011,31(5):927-934.

(责任编辑:黄克玲)