

# 硼和氯化钠复合胁迫对小麦幼苗的影响

甄梅楠<sup>1,2</sup>, 代政<sup>2</sup>, 常璨<sup>2</sup>, 马成仓<sup>1</sup>, 刘春光<sup>2\*</sup>

(1.天津师范大学,天津市动植物抗性重点实验室,天津 300387; 2.南开大学环境污染过程与基准教育部重点实验室,天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室,天津 300071)

**摘要:**以盆栽小麦幼苗为供试植物,设定培养基质硼浓度分别为0、50、100 mg·kg<sup>-1</sup>,氯化钠浓度分别为0、1、2 g·kg<sup>-1</sup>,研究了硼和盐复合胁迫对植物生长的影响。结果表明,硼和氯化钠的单独胁迫均能显著抑制小麦生长;硼浓度为50 mg·kg<sup>-1</sup>时,氯化钠加重了硼对小麦生长的抑制;硼浓度为100 mg·kg<sup>-1</sup>时,氯化钠缓解了硼对小麦生长的抑制。硼和氯化钠的复合胁迫以及高硼胁迫使根冠比显著增大,氯化钠抑制了小麦对硼的吸收。综合来看,当硼胁迫较严重时,盐胁迫可以促进小麦增大根冠比和减少硼吸收来抵御硼毒害。

**关键词:**硼毒害;氯化钠;小麦;复合胁迫

中图分类号:X503.231

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)04-0418-05

doi: 10.13254/j.jare.2015.0114

## Combined Effects of Boron and NaCl on Wheat Seedlings

ZHEN Mei-nan<sup>1,2</sup>, DAI Zheng<sup>2</sup>, CHANG Can<sup>2</sup>, MA Cheng-cang<sup>1</sup>, LIU Chun-guang<sup>2\*</sup>

(1.Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2.Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** To investigate the combined effects of boron(B) and NaCl on the growth of wheat, a pot experiment was conducted using wheat (*Triticum aestivum* Linn.) seedlings. Boron concentrations of culture medium were set as 0, 50 mg·kg<sup>-1</sup> and 100 mg·kg<sup>-1</sup>, and NaCl concentrations were 0, 1 g·kg<sup>-1</sup> and 2 g·kg<sup>-1</sup>. The results showed that both boron and NaCl could significantly inhibit wheat growth. At 50 mg B·kg<sup>-1</sup>, NaCl aggravated growth inhibition caused by boron. At 100 mg B·kg<sup>-1</sup>, however, NaCl alleviated the inhibition caused by boron. The combined stress of boron and NaCl significantly increased the root to shoot ratio of wheat. NaCl inhibited the uptake of boron by wheat. It suggests that under severe boron stress, NaCl is able to alleviate boron toxicity in wheat by increasing root to shoot ratio and reducing boron uptake.

**Keywords:** boron toxicity; NaCl; wheat; combined stress

硼是高等植物生长所必需的微量元素,但如果土壤中硼含量过高则会对植物产生毒害<sup>[1]</sup>。植物体内积累过多的硼,会导致细胞壁形成受阻,新陈代谢紊乱,细胞分裂、分化受到抑制<sup>[2]</sup>以及抗氧化酶活性的改变<sup>[3]</sup>。硼毒害还会使植物叶片变黄,叶边缘干枯卷曲,出现斑点甚至凋落,进而导致农作物减产<sup>[4]</sup>。

盐胁迫会引起植物细胞失水、离子分布不平衡以

及离子毒害<sup>[5]</sup>;还会引起植物体内活性氧代谢失衡,抗氧化酶活性发生变化<sup>[6]</sup>。在干旱和半干旱地区,土壤高硼常与高盐相伴出现<sup>[7]</sup>。高盐条件的存在,会使硼对植物的毒害效应复杂化<sup>[8]</sup>。一方面,有研究表明盐胁迫会加重硼对植物的毒害效应<sup>[7,9-10]</sup>;另一方面,也有盐胁迫会缓解过量硼对植物生长的抑制作用的报道<sup>[11-13]</sup>。

硼和盐的复合胁迫对小麦的影响,目前尚缺乏一致的结论。有研究发现,小麦受硼毒害的影响与土壤中的盐分无关,只受到单独硼或单独盐胁迫的影响<sup>[14]</sup>。也有研究发现,盐胁迫下,小麦地上部的硼浓度明显低于对照<sup>[15]</sup>。Grieve等<sup>[7]</sup>则发现盐分加重了小麦硼毒害症状,还伴随着地上部总硼的增加。硼和盐共同作用会使小麦生物量进一步降低<sup>[16]</sup>。

收稿日期:2015-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(31370519);天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(14JCYBJC22700)

作者简介:甄梅楠(1987—),女,硕士研究生,主要从事污染土壤的植物修复研究。E-mail: zhenmeinan1005@126.com

\*通信作者:刘春光 E-mail: liuchunguang@nankai.edu.cn

本文以小麦为供试植物,研究了硼和盐的复合胁迫对小麦幼苗的影响,分析了硼和盐之间的相互作用关系,期望为更深入研究高盐和过量硼双重胁迫对小麦的毒害效应提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

采用盆栽试验,培养基质为蛭石。培养容器为带托盘的塑料花盆(内径 16.8 cm,高 17.5 cm)。小麦(*Triticum aestivum* Linn.)种子由天津农学院农学系提供,品种为津麦 0108。

### 1.2 试验设计

试验在南开大学生物站网室进行,试验期间温度范围为 2~20 ℃。挑选饱满的小麦种子直接播种于装有蛭石的花盆,每盆 30 粒。待幼苗长至约 15 cm 时,开始实施胁迫处理。

以 1/2 强度的 Hoagland 营养液为基础营养液,每盆浇灌 100 mL 营养液,根据蛭石质量计算相应的硼酸( $H_3BO_3$ )和氯化钠的添加量,配制成相应的溶液注入各盆。硼的浓度分为 3 个水平:0、50、100  $mg \cdot kg^{-1}$ ;氯化钠的浓度亦为 3 个水平:0、1、2  $g \cdot kg^{-1}$ 。试验共设 9 个处理(表 1),每个处理 5 个重复。为描述简便,分析过程中将硼浓度为 50  $mg \cdot kg^{-1}$  和 100  $mg \cdot kg^{-1}$  分别记为“中硼”和“高硼”;将氯化钠(以下简称“盐”)浓度为 1  $mg \cdot kg^{-1}$  和 2  $mg \cdot kg^{-1}$  分别记为“中盐”和“高盐”。每日定时称重,用去离子水补充蒸发蒸腾损失的水分。试验过程中观察并记录小麦的生长状况,并定期更换盆的位置,以保证每盆小麦接受到的光照基本相同。胁迫 30 d 后,待观察到不同处理组间有明显差别且最大胁迫组的小麦已干枯发黄时,将小麦收获并洗净,测定相关指标。

表 1 试验设计

Table 1 Design of the experiment

处理	B/ $mg \cdot kg^{-1}$	NaCl/ $g \cdot kg^{-1}$
CK	0	0
S1	0	1
S2	0	2
B1	50	0
B1S1	50	1
B1S2	50	2
B2	100	0
B2S1	100	1
B2S2	100	2

### 1.3 测定指标及方法

生物量:小麦植株清洗干净,用吸水纸吸去表面水分,将地上部和根部分开,用纸包好,105 ℃下杀青 1 h,85 ℃下烘干,分别称重。

根冠比:根干重与地上部干重的比值。

硼含量:称取 0.20 g 植株磨碎样品,加入 7 mL 65%硝酸( $HNO_3$ )和 1 mL 30%双氧水( $H_2O_2$ ),微波消解,消解液用去离子水定容至 15 mL,4 ℃下保存。经 0.45  $\mu m$  醋酸纤维滤膜过滤后用电感耦合等离子体-原子发射光谱(ICP-OES)测定硼浓度。

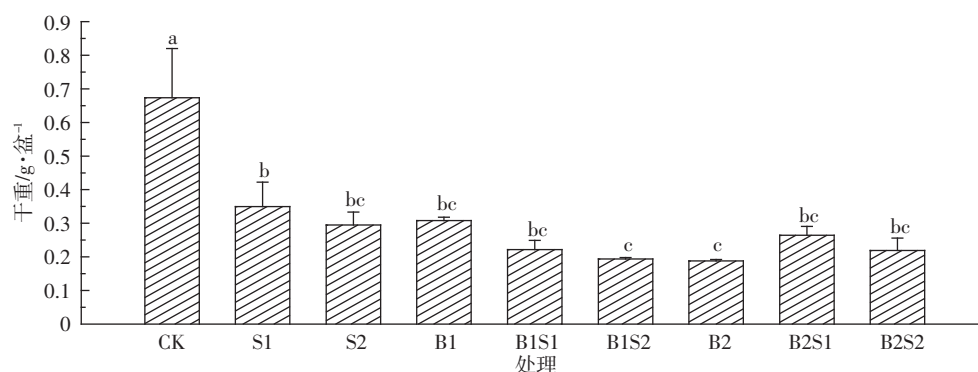
### 1.4 数据处理

数据处理采用 SPSS Statistics 20 进行数据分析,用 Duncan's 多重比较( $P < 0.05$ )检验不同处理之间的差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 硼和氯化钠复合胁迫对小麦幼苗生物量的影响

从图 1 可以看出,硼和盐的单独胁迫均使小麦干重显著降低,硼和盐的浓度越高,小麦干重降低越多。



相同字母的处理之间差异不显著,不同字母的处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。下同

图 1 硼和盐复合胁迫对小麦生物量的影响

Figure 1 Combined effects of boron and salinity on wheat biomass

与对照(CK)相比,中硼和高硼处理小麦干重分别降低了 54.3%和 72.1%;中盐和高盐处理小麦干重分别降低了 48.1%和 56.2%。中硼同时施加盐胁迫,使小麦的干重进一步降低,施加高盐比中盐处理的干重降低更多,但二者差异不显著。高硼同时施加盐胁迫,使小麦干重提高,中盐比高盐升高更多。

### 2.2 硼和氯化钠复合胁迫对小麦幼苗根冠比的影响

从图 2 可以看出,单独的盐胁迫和单独的中硼处理对小麦根冠比影响不大。高硼和硼盐复合胁迫显著增大了根冠比,其中高硼中盐增幅最大。由此可知,单独的盐胁迫和中硼胁迫,不能显著影响根冠比,而高硼胁迫会显著增大根冠比。此外,在中硼处理的同时施加盐胁迫,会显著增大根冠比。在高硼处理的同时施加中盐处理,会进一步增大根冠比,但施加高盐则不会有显著影响。

### 2.3 硼和氯化钠复合胁迫对小麦幼苗硼含量的影响

从表 2 可以看出,施加硼的处理小麦植株硼浓度显著提高,特别是地上部硼浓度提高幅度较大。施加硼的处理同时施加盐胁迫,使植株硼浓度显著降低。在中硼处理中,同时施加的中盐处理植株硼浓度显著低于高盐处理。在高硼处理中,则是同时施加高盐处理的植株硼浓度显著低于中盐处理。这意味着,在不同程度的硼胁迫下,盐对植物吸收硼的影响规律是不同的。由表 2 还可以看出,小麦根部硼浓度远低于地上部的硼浓度。

## 3 讨论

硼和盐复合胁迫对植物的影响,有人认为盐胁迫会加重硼对植物的毒害效应<sup>[7,9-10]</sup>,但也有人发现盐胁迫会缓解过量硼对植物的毒害<sup>[11-13]</sup>。本研究发现,在中硼胁迫下,施加盐胁迫会加重硼对小麦生物量的抑制作用。而在高硼条件下,盐胁迫未加重硼对小麦生物

表 2 硼和氯化钠复合胁迫对小麦幼苗地上部和根硼含量的影响

Table 2 Combined effects of boron and NaCl on shoot and root B content of wheat seedlings

处理	地上部硼浓度/mg·kg <sup>-1</sup> 干重	根硼浓度/mg·kg <sup>-1</sup> 干重
CK	10.1±1.04g	0.06±0.001d
S1	11.4±3.26g	0.06±0.002d
S2	12.3±0.86g	0.06±0.001d
B1	1 601.6±205.24b	2.03±0.341d
B1S1	239.6±42.16f	3.14±0.534d
B1S2	585.3±189.65e	17.06±1.732c
B2	2 283.4±81.14a	130.58±16.122a
B2S1	1 137.8±31.82c	38.00±2.058b
B2S2	880.3±70.65d	25.32±1.789c

注:表中的数值为平均值±标准偏差(SD);相同字母的处理之间差异不显著,不同字母的处理之间差异显著( $P<0.05$ )。

量的抑制,甚至还产生了一定的缓解效应。小麦幼苗的试验结果表明,硼和盐复合胁迫对植物的影响与施加硼的浓度有密切关系。

有研究报道,硼和盐复合胁迫下,盐比硼对植物会造成更多的氧化胁迫<sup>[17]</sup>,但这与 Bingham 等<sup>[14]</sup>对温室里培育的春小麦的研究结果相反。在本试验中,相对于高盐来说,高硼对生物量的影响更大,因为小麦属于较耐盐的作物<sup>[18]</sup>,这可能是盐未显著加重硼毒害的原因之一,Holloway 等<sup>[15]</sup>研究结果与本研究一致。

根冠比是反映植株地上部和根部的生长发育情况的重要指标,一般根冠比高的植物根系发达,资源利用效率高<sup>[19]</sup>。来自地下的胁迫会导致根冠比的增大,使植物获得更大的根表面积吸收水分和养分<sup>[20]</sup>。在本研究中,单独的盐胁迫和单独的中硼胁迫对根冠比没有显著影响。中硼复合盐胁迫以及高硼、高硼复合盐胁迫均显著提高了根冠比,表明这些条件下地上部受到的抑制显著大于根。已有研究指出,盐胁迫会导致

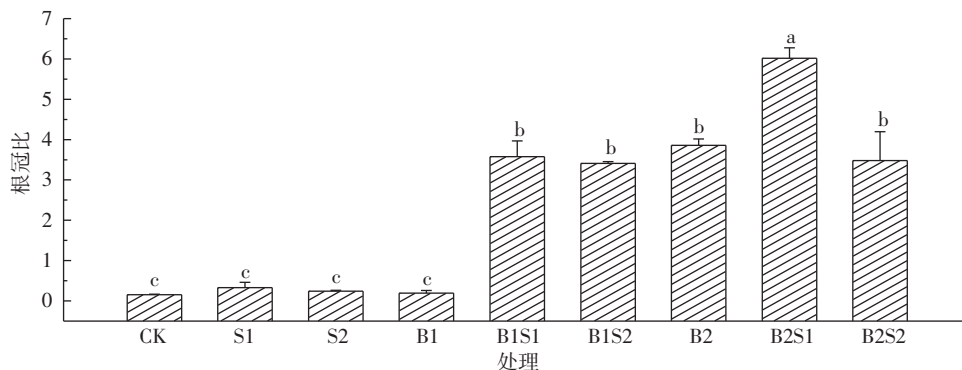


图 2 硼和盐复合胁迫对小麦根冠比的影响

Figure 2 Combined effects of boron and salinity on root to shoot ratio of wheat

对盐敏感的植物根冠比增大<sup>[21]</sup>。本研究中,由于小麦较耐盐,因此单独的盐胁迫未显著增大根冠比。有研究发现,在一定浓度范围内,对于耐硼植物,根冠比受硼浓度影响较小,对于不耐硼植物,根冠比随着硼浓度增大而增大<sup>[22]</sup>。由此可见,小麦对硼的耐受能力有限,结合生物量的结果不难发现,小麦通过增大根冠比来应对高硼以及硼盐复合胁迫,从而避免了生物量的大幅下降。

在本研究中,硼胁迫使得植物体内硼浓度显著升高,而盐抑制了硼的累积。有研究表明,植物体内硼的吸收在硼浓度从适量到过量的过程中都是被动扩散过程<sup>[23]</sup>。盐分会造成植物的生理干旱,抑制蒸腾作用并减少硼随水分向地上部运移,从而降低硼对植物的毒害效应<sup>[24]</sup>。有研究认为,硼和盐存在拮抗作用,盐分可能抑制硼的毒害效应或者硼会缓解盐的胁迫<sup>[17]</sup>。本试验中,小麦体内的硼主要在天上部积累,根部相对较少。有研究指出,小麦耐受硼的生理基础主要是限制硼在植物体内的积累<sup>[25]</sup>。小麦通过限制硼在根的富集,使硼通过蒸腾作用从根部转移到较为耐硼的地上部。对于盐敏感型植物来说,盐胁迫则会促进硼在植株内富集,这是因为盐会增大细胞膜渗透性和硼的扩散速率<sup>[9]</sup>。当细胞因失水过多而死亡后,细胞膜的选择透过性也会丧失,从而增大硼的被动扩散速率,导致更多的硼积累在植物体内<sup>[24]</sup>。此外,盐胁迫会导致植物体内产生渗透物质,其中一些渗透物质可与硼结合,从而促进可溶性硼向地上部的运输<sup>[17]</sup>。

对于比较耐盐的小麦,在盐胁迫时植物体内会启动渗透调节机制,主动增加植物体内的溶质含量,增强根系的吸水能力,避免盐分对细胞膜的损伤,防止过多的硼被吸收。在本研究中,盐胁迫条件下,小麦植株硼的富集量减少,因为硼的吸收主要是通过蒸腾拉力驱动下的被动扩散过程进行吸收和转运<sup>[16]</sup>,施加盐胁迫后会导致气孔关闭,使植物蒸腾速率降低,从而避免组织进一步脱水并抑制硼通过木质部向地上部的长距离运输,最终限制了硼在叶片中的积累<sup>[26]</sup>。

#### 4 结论

硼和氯化钠的单独胁迫均能显著抑制小麦生长。硼浓度为  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,氯化钠的复合胁迫加重了硼对小麦生长的抑制;当硼浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,氯化钠缓解了硼对小麦生长的抑制。硼和氯化钠的复合胁迫以及高硼胁迫使根冠比显著增大。氯化钠限制了小麦对硼的富集,在不同的硼浓度下,不同水平的氯化

钠对硼富集的抑制效果不同。

#### 参考文献:

- [1] Camacho-Cristóbal J J, Rexach J, González-Fontes A. Boron in plants: Deficiency and toxicity[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50 (10): 1247-1255.
- [2] Stangoulis J C R, Reid R J. Boron toxicity in plants and animals[M]// Goldbach H, Rerkasem B, Wimmer M A, et al. Boron in plant and animal nutrition. Springer US, 2002: 227-240.
- [3] Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(9): 405-410.
- [4] Rerkasem B, Jamjod S. Genotypic variation in plant response to low boron and implications for plant breeding[J]. *Plant and Soil*, 1997, 193 (1-2): 169-180.
- [5] Greenway H, Munns R. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1980, 31(1): 149-190.
- [6] 张新春, 庄炳昌, 李自超. 植物耐盐性研究进展[J]. *玉米科学*, 2002, 10 (1): 50-56.  
ZHANG Xin-chun, ZHUANG Bing-chang, LI Zi-chao. Advances in study of salt-stress tolerance in plants[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(1): 50-56. (in Chinese)
- [7] Grieve C M, Poss J A. Wheat response to interactive effects of boron and salinity[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(9): 1217-1226.
- [8] Yau S K, Ryan J. Boron toxicity tolerance in crops: Available alternative to soil amelioration[J]. *Crop Science*, 2008, 48(3): 854-865.
- [9] Alpaslan M, Gunes A. Interactive effects of boron and salinity stress on the growth, membrane permeability and mineral composition of tomato and cucumber plants[J]. *Plant and Soil*, 2001, 236(1): 123-128.
- [10] Bastías E I, González-Moro M B, González-Murua C. *Zea mays* L. amylacea from the Lluta Valley (Arica-Chile) tolerates salinity stress when high levels of boron are available[J]. *Plant and Soil*, 2004, 267 (1-2): 73-84.
- [11] Yadav H D, Yadav O P, Dhankar O P, et al. Effect of chloride salinity and boron on germination, growth, and mineral composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. *Annals of Arid Zone*, 1989, 28(1-2): 63-67.
- [12] Edelstein M, Ben-Hur M, Cohen R, et al. Boron and salinity effects on grafted and non-grafted melon plants[J]. *Plant and Soil*, 2005, 269(1-2): 273-284.
- [13] Yermiyahu U, Ben-Gal A, Keren R, et al. Combined effect of salinity and excess boron on plant growth and yield[J]. *Plant and Soil*, 2008, 304 (1-2): 73-87.
- [14] Bingham F T, Strong J E, Rhoades J D, et al. Effects of salinity and varying boron concentrations on boron uptake and growth of wheat[J]. *Plant and Soil*, 1987, 97(3): 345-351.
- [15] Holloway R E, Alston A M. The effects of salt and boron on growth of wheat[J]. *Crop and Pasture Science*, 1992, 43(5): 987-1001.
- [16] Wimmer M A, Goldbach H E. Boron-and-salt interactions in wheat are affected by boron supply[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(2): 171-179.
- [17] Masood S, Saleh L, Witzel K, et al. Determination of oxidative stress in

- wheat leaves as influenced by boron toxicity and NaCl stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 56: 56–61.
- [18] Maas E V, Grattan S R, Skaggs R W, et al. Crop yields as affected by salinity[M]// Skaggs R W, Van Schilfhaarde J, et al. Agricultural drainage. American Society of Agronomy, 1999: 55–108.
- [19] Magnani F, Mencuccini M, Grace J. Age-related decline in stand productivity: The role of structural acclimation under hydraulic constraints [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2000, 23(3): 251–263.
- [20] Szaniawski R K. Plant stress and homeostasis[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1987, 25(1): 63–72.
- [21] Seemann J R, Critchley C. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L[J]. *Planta*, 1985, 164(2): 151–162.
- [22] Stiles A R, Bautista D, Atalay E, et al. Mechanisms of boron tolerance and accumulation in plants: A physiological comparison of the extremely boron-tolerant plant species, *Puccinellia distans*, with the moderately boron-tolerant *Gypsophila arrostil*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(18): 7089–7095.
- [23] Brown P H, Bellaloui N, Wimmer M A, et al. Boron in plant biology[J]. *Plant Biology*, 2002, 4(2): 205–223.
- [24] Ismail A M. Response of maize and sorghum to excess boron and salinity[J]. *Biologia Plantarum*, 2004, 47(2): 313–316.
- [25] Schnurbusch T, Hayes J, Sutton T. Boron toxicity tolerance in wheat and barley: Australian perspectives[J]. *Breeding Science*, 2010, 60(4): 297–304.
- [26] Bañuelos G S, LeDuc D, Johnson J. Evaluating the tolerance of young hybrid poplar trees to recycled waters high in salinity and boron[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2010, 12(5): 419–439.