



不同程度盐胁迫对大豆苗期生物量及生理指标的影响

侯鹏浩¹, 杨万明², 杜维俊¹, 岳爱琴¹, 赵晋忠³, 张永坡³, 高春艳³, 王 敏¹

(1. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801; 2. 晋中学院 生物科学与技术学院, 山西 榆次 030600; 3. 山西农业大学 文理学院, 山西 太谷 030801)

摘要:为研究大豆在不同程度盐胁迫下的耐盐规律,并探讨盐胁迫下影响植株生长的主要生理原因,以4份不同耐盐性大豆品种为供试材料,采用营养液水培法,用不同浓度NaCl溶液处理,测定苗期大豆植株生长指标、叶片SPAD、各部位Na⁺、K⁺、Cl⁻含量并进行规律分析。结果表明:(1)植株地上部鲜重和干重及地下部鲜重随盐溶液浓度的升高先增大后减少,在200 mmol·L⁻¹高浓度盐胁迫下均显著低于对照,植株地下部干重在盐胁迫下变化未达显著水平。耐盐性品种在高浓度盐胁迫下植株生物积累量受抑制程度较低。高浓度盐胁迫显著降低了植株叶片SPAD,进而影响其光合作用,抑制植株生物量的积累。(2)植株根茎叶中Na⁺和Cl⁻含量随盐溶液浓度升高而增加,根中Na⁺和Cl⁻的积累较茎和叶对盐胁迫更敏感,耐盐性品种在盐胁迫下根中Cl⁻积累较少,茎叶中Na⁺积累较多。植株根茎中K⁺含量随盐溶液浓度的升高而减少,叶片中的K⁺含量在盐溶液处理下变化未达显著水平。(3)除耐盐品种晋大73外,其它品种在盐胁迫下植株茎叶中Na⁺和Cl⁻含量与植株生物量呈显著负相关,所有品种植株叶片中Na⁺和Cl⁻的含量与叶片SPAD呈显著负相关,表明盐害离子的积累是造成植株生物量减少、叶片失绿的重要原因。耐盐品种植株茎叶中Na⁺和Cl⁻含量与植株生物量相关性不显著,表明盐害离子对耐盐品种植株生物积累量影响不明显。

关键词:大豆;盐胁迫;植株生物量;离子含量

Effects of Different Degree Salt Stress on Biomass and Physiological Indexes of Soybean Seedling

HOU Peng-hao¹, YANG Wan-ming², DU Wei-jun¹, YUE Ai-qin¹, ZHAO Jin-zhong³, ZHANG Yong-po³, GAO Chun-yan³, WANG Min¹

(1. School of Agricultural Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. School of Biological Science and Technology, Jinzhong College, Yuci 030600, China; 3. School of Arts and Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: In order to study the trend of salt tolerance of soybean under different salt stress, and to explore the main physiological reasons that affecting plant growth under salt stress, we used the methods of nutrient hydroponic culture and different concentration of NaCl solution to determine the traits of four soybean varieties with different salt tolerance at seedling stage. The plant growth index, SPAD of leaves, Na⁺, K⁺ and Cl⁻ content of each part were tested. Results showed that: (1) The fresh and dry weight of the aboveground part and the fresh weight of the underground part of the plant increased firstly and then decreased with the increasing of salt solution concentration and it was significantly lower than the control group under high concentration salt stress of 200 mmol·L⁻¹, but the dry weight of underground part of the plant did not change significantly under salt stress. The plant biomass of salt-tolerant varieties were inhibited to a lesser extent under high salt stress. High concentration salt stress significantly reduced the SPAD of plant leaves, thus affecting photosynthesis and inhibiting the accumulation of plant biomass. (2) The contents of Na⁺ and Cl⁻ in roots, stems and leaves of plants increased with the increasing of salt solution concentration, and the accumulation of Na⁺ and Cl⁻ in roots was more sensitive to salt stress than in stems and leaves, for salt tolerant varieties, the accumulation of Cl⁻ in roots was less and Na⁺ in stems and leaves was more under salt stress. The K⁺ contents in roots and stems decreased with the increasing of salt solution concentration, while the K⁺ contents in leaves did not change significantly under salt solution treatment. (3) The contents of Na⁺ and Cl⁻ in the stems and leaves of plants under salt stress was negatively correlated with the plant biomass in all varieties except the salt-tolerant variety Jinda 73, and the contents of Na⁺ and Cl⁻ in leaves of all varieties were negatively correlated with the SPAD of leaves. This results showed that the accumulation of salt ions was an important reason for the decrease of plant biomass and leaf green loss. There was no significant correlation between the contents of Na⁺ and Cl⁻ in the stems and leaves of salt-tolerant cultivars and the plant biomass, indicating that the effect of salt-damaged ions on the plant biomass of salt-tolerant cultivars was not significant.

Keywords: Soybean; Salt stress; Plant biomass; Ion content

中国土壤盐渍化情况严重,盐渍化土壤在全国广泛分布,耕地中的盐渍化土壤更是严重影响着作物的生长^[1]。盐胁迫作为非生物胁迫的一种,主要通过离子胁迫、渗透胁迫等方式对作物产生危

收稿日期:2019-10-05

基金项目:山西省重点研发一般项目(201703D221004-5);山西省重点研发计划重点项目(201703D211001);山西省自然科学基金(201801D121247,201901D111304);山西农业大学科技创新基金(zdpy201706)。

第一作者简介:侯鹏浩(1995-),男,硕士,主要从事大豆遗传与种质创新研究。E-mail:1584598059@qq.com。

通讯作者:王敏(1981-),女,博士,副教授,主要从事大豆遗传与种质创新研究。E-mail:wangmin3502@126.com。

害^[2],是影响作物发育和造成其产量下降的主要原因之一^[3]。大豆作为世界上种植面积最广的油料作物之一,其本身含有丰富的蛋白质和油脂^[4],是人类获取油脂的主要作物。

栽培大豆属于中度耐盐植物,本身耐盐性不是很强,土壤盐含量超过 5 dS·m⁻¹时,其生长发育受到危害^[5]。大豆苗期在其整个生育期具有重要地位,苗期生长情况对其后期产量具有重要影响,但是苗期大豆较其它时期对盐胁迫更敏感,更易受盐害损伤。牛远等^[6]研究表明大豆苗期各性状在盐胁迫下受影响程度较芽期各性状更明显。罗庆云等^[7]研究了苗期大豆在不同盐浓度下各表型性状的变化情况,发现高浓度盐胁迫对大豆生长抑制明显。刘玉兰等^[8]以小粒豆为材料,发现碱性盐胁迫下小粒豆苗期生长受抑制作用更高。这些研究结果都表明大豆苗期的耐盐性研究极为重要。

前人研究结果大多都表明盐胁迫对大豆生长具有抑制作用,尤其在高盐浓度下更明显。除众多表型性状在盐胁迫下受影响外,各种生理指标在盐胁迫下也会发生变化,於丙军等^[9]研究发现盐胁迫下大豆植株内离子含量等生理指标变化明显且在各部位存在较大差异。再者,盐胁迫下大豆的各表型性状和离子含量等生理指标之间存在密切的关联,姜静涵等^[10]研究表明大豆叶片 SPAD 和叶片中 Na⁺ 含量之间存在密切联系。盐胁迫造成各盐害离子在植株体内的积累和再分配,这是植株各部位生物量减少的重要原因,将植株生物量等表型性状和体内离子含量等生理指标相结合来综合研究盐胁迫对大豆的影响显得十分重要。

营养液水培法是一种简单快速的培养植物的方法,其可在室内可控条件下对植物进行培养。本研究采用含有不同浓度 NaCl 溶液的营养液水培大豆,对不同大豆品种植株地上部和地下部鲜干重、叶片 SPAD 和植株各部位 Na⁺、Cl⁻、K⁺ 含量等指标进行测定,探究不同浓度的盐溶液对大豆苗期生物量积累及各项生理指标的影响,旨在更全面揭示盐胁迫对大豆的影响,为大豆苗期耐盐规律的进一步研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为 4 份不同耐盐性的大豆品种,分别为耐盐性强的品种晋大 53 和中等耐盐品种山宁 16、晋大 73 和平南。

1.2 试验设计

采用水培法,首先将吸胀水消过毒的大豆种子置于培养皿内培养 3 d 至发芽,然后挑选整齐一致的种子移至含有 1/2 浓度的 Hoagland 营养液的培

养盒中,每个培养盒移植 5 粒种子,将培养盒置于 RHZ 型人工气候箱(宁波江南仪器厂)内,气候箱环境条件设置为:14 h 昼/10 h 夜,温度 25 ℃,湿度 70%,光照强度 8 000 lx。待大豆幼苗长至两叶一心期时,对每个品种 4 个培养盒中的幼苗分别浇灌含 50,100,150,200 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液的营养液进行胁迫处理,向另外 1 个培养盒中的幼苗浇灌不含 NaCl 溶液的营养液作为对照,每个处理 3 次重复。每 3 d 换 1 次营养液,胁迫 9 d 后测定植株地上和地下部生物量、叶片 SAPD 和离子含量,将每个处理 5 个植株各指标的平均值作为 1 次重复。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株地上部和地下部物质积累 取植株根部,用滤纸吸干表面水分,用分析天平称量其质量作为地下部鲜重,称量植株茎叶作为地上部鲜重。将不同处理的植株茎叶及其根分别装入小纸袋并做好标记,置于烘箱中 105 ℃杀青 15 min,然后调至 80 ℃烘干至恒重,称量其干重。

1.3.2 叶片 SPAD 盐处理 9 d 后,用 SPAD-502 型叶绿素测定仪(Minolta Camem 公司,日本)测定大豆植株叶片叶绿素含量,每株测定 2 片真叶,每个叶片测定 3 个不同部位,每个处理取 5 个植株的均值为 1 次重复。

1.3.3 植株根、茎、叶中 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 含量 取 0.05 g 烘干的植株根茎叶,用研钵磨成粉末状,参考王宝山等^[11]的方法,将样品加入一定量的去离子水中,100 ℃水浴锅中煮沸 1.5 h,冷却后定容,6 000 r·min⁻¹离心 5 min,上清液用于离子测定。取 10 mL 样品上清液定容至 100 mL,使用 6400A 型火焰光度计(上海精科)测定 Na⁺、K⁺ 的含量,参考雷启福等^[12]和周强等^[13]的方法,取 5 mL 样品上清液,加入 2 mL 硝酸溶液($V_{\text{浓硝酸}}:V_{\text{水}}=1:1$)和 2 mL 丙酮,用 5 mg·mL⁻¹硝酸银溶液定容至 25 mL,用 UV1100 紫外可见光分光光度计(上海美谱达)测定 Cl⁻ 含量。

1.4 数据分析

使用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 对数据进行统计和方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度盐溶液处理对苗期大豆地上部和地下部鲜重和干重的影响

2.1.1 植株鲜重 所有材料植株地上部和地下部鲜重随盐溶液浓度的增加先增大后减小,植株地上部和地下部鲜重均在 50 mmol·L⁻¹ 的盐溶液浓度处理下达到最大值,其中晋大 53 与对照相比差异不显著,山宁 16、晋大 73 和平南均显著或极显著高于对照。在 200 mmol·L⁻¹ 高浓度盐胁迫下,4 个品种地

上部和地下部鲜重均达到最低值且显著或极显著低于对照。耐盐性品种晋大 73 在 200 mmol·L⁻¹ 高浓度盐胁迫下地上部鲜重和地下部鲜重较对照分别降低 3.8% 和 9.9%, 是所有品种中降低最少的(表 1)。结果表明低浓度盐溶液处理能增加植株地上部和地下部鲜重积累, 在 50 mmol·L⁻¹ 浓度下尤为明显, 高浓度盐胁迫处理会抑制植株地上部和地下部鲜重积累, 耐盐性品种受抑制程度较小。

2.1.2 植株干物质积累 所有品种地上部和地下部干重随着盐溶液浓度升高均呈现先上升后下降

的趋势, 但地下部干重变化没有达到显著水平, 除晋大 73 外, 其它品种地上部干重在 200 mmol·L⁻¹ 高浓度盐胁迫下均下降到最低值且极显著低于对照。不同品种间的比较表明, 耐盐性品种晋大 73 在 200 mmol·L⁻¹ 高浓度盐胁迫下地上部和地下部干重较对照分别减少 9.1% 和 11.2%, 在所有品种中下降最少(表 1)。结果说明盐胁迫对于植株地下部干重的影响不明显, 而植株地上部干重在高浓度盐胁迫处理下明显减少, 耐盐性品种受高浓度盐胁迫影响较小。

表 1 不同浓度 NaCl 处理对大豆苗期生物量的影响

Table 1 Effects of different NaCl concentrations on seedling biomass of soybean

品种 Variety	盐浓度 Salt concentration /(mmol·L ⁻¹)	地上部鲜重 Overground fresh weight/g	地上部干重 Overground dry weight/g	地下部鲜重 Underground fresh weight/g	地下部干重 Underground dry weight/g
晋大 53	CK	1.534 Aa	0.191 Aa	0.546 Aa	0.028 Aa
Jinda 53	50	1.634 Aa	0.207 Aa	0.550 Aa	0.030 Aa
	100	1.634 Aa	0.189 Aa	0.446 Bb	0.028 Aa
	150	1.460 Ab	0.173 ABb	0.415 Cc	0.028 Aa
	200	1.058 Bc	0.169 Bb	0.364 Dd	0.025 Aa
山宁 16	CK	1.371 Aa	0.176 ABa	0.145 Bb	0.021 Aa
Shanning 16	50	1.493 Ab	0.183 Aa	0.165 Aa	0.023 Aa
	100	1.380 Aab	0.175 ABa	0.160 Aa	0.023 Aa
	150	1.308 Aa	0.169 Bb	0.140 Bbc	0.021 Aa
	200	1.193 Bc	0.153 Cc	0.132 Bc	0.019 Aa
晋大 73	CK	0.889 Bc	0.125 Cc	0.456 Cc	0.022 Aa
Jinda 73	50	1.158 Aa	0.168 Aa	0.637 Aa	0.024 Aa
	100	0.988 Bb	0.143 Bb	0.554 Bb	0.022 Aa
	150	0.862 BCc	0.118 Cc	0.432 Ccd	0.021 Aa
	200	0.801 Cd	0.111 Cc	0.418 Cd	0.020 Aa
平南	CK	0.185 Bb	0.029 ABa	0.045 Bb	0.003 Aa
Pingnan	50	0.225 Aa	0.034 Aa	0.068 Aa	0.005 Aa
	100	0.170 Bc	0.025 BCb	0.066 Aa	0.005 Aa
	150	0.146 Cd	0.023 BCbc	0.052 Bb	0.004 Aa
	200	0.070 Cd	0.018 Cc	0.038 Cc	0.002 Aa

同一品种同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。下同。
Different lowecase after data of the same variety and column mean significant difference ($P < 0.05$) and different uppercase mean extremly significant difference ($P < 0.01$). The same below.

2.2 不同浓度盐溶液处理对苗期大豆植株叶片 SPAD 的影响

随着盐溶液浓度的增加, 4 个品种的叶片 SPAD 基本呈下降的趋势。山宁 16、晋大 73 和平南的叶片 SPAD 在 50 mmol·L⁻¹ 的盐溶液浓度下有小幅度增加, 但未达显著水平; 当盐溶液浓度达 100 mmol·L⁻¹ 以上时, 叶片 SPAD 显著低于对照; 达到 150 mmol·L⁻¹ 以上时, 叶片 SPAD 极显著低于对照(表 2)。表明高浓度盐胁迫会抑制叶绿素的合成, 影响叶片光合作用, 进而对植株生长和物质积累产生影响。

表 2 不同浓度 NaCl 处理对大豆叶片 SPAD 的影响

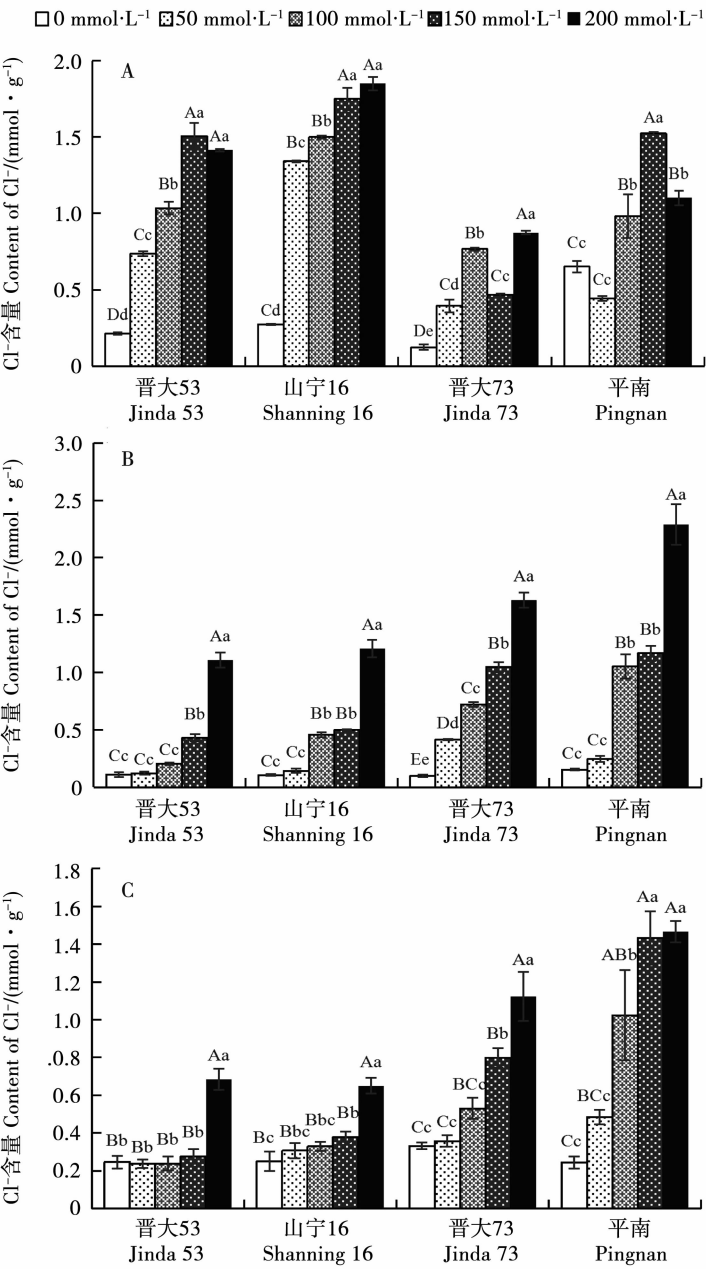
Table 2 Effects of different NaCl concentrations on leaf SPAD of soybean

盐浓度 Concentration/ (mmol·L ⁻¹)	SPAD			
	晋大 53 Jinda 53	山宁 16 Shanning 16	晋大 73 Jinda 73	平南 Pingnan
CK	35.0 Aa	32.2 Aa	31.9 Aba	33.9 Aa
50	34.7 Aab	32.3 Aa	32.4 Aa	34.1 Aa
100	34.1 Ab	31.2 ABb	30.8 BCB	31.0 Bb
150	33.0 Bc	30.8 Bb	29.6 CDc	30.3 Bb
200	31.8 Cd	29.1 Cc	29.3 Dc	28.6 Bc

2.3 不同浓度盐溶液处理对苗期大豆植株各部位离子含量的影响

2.3.1 Cl⁻的分布及变化情况 植株根中 Cl⁻ 含量在 4 个品种中基本随盐溶液浓度的升高而升高,除平南在 100 mmol·L⁻¹ 盐浓度以上,根中 Cl⁻ 含量与对照达到了极显著差异外,其它 3 个品种均在 50 mmol·L⁻¹ 盐浓度以上,根中 Cl⁻ 含量与对照达到了极显著差异,表明根在低盐浓度下已有较多的 Cl⁻ 积累。比较不同品种,晋大 73 的 Cl⁻ 含量在所

有处理下显著低于其它 3 个品种,表明耐盐性品种根中积累的 Cl⁻ 含量少。各品种茎和叶中 Cl⁻ 含量随着盐浓度的升高而增加,低浓度盐溶液处理下茎叶中 Cl⁻ 积累量增加不明显,在 200 mmol·L⁻¹ 高浓度盐胁迫下 Cl⁻ 含量均达到最高值(图 1)。综上所述,随着盐浓度的上升,大豆植株根茎叶各部位 Cl⁻ 含量上升,高浓度盐胁迫下更易积累较多的 Cl⁻,根中 Cl⁻ 的积累较茎和叶对盐胁迫更为敏感。



A:根;B:茎;C:叶片。同一品种不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示处理间差异极显著($P<0.01$)。下同。
A: Root; B: Stem; C: Leaf. Different lowercase in the same breed mean significant difference ($P<0.05$) and different uppercase mean very significant difference ($P<0.01$) between treatments. The same below .

图 1 不同浓度 NaCl 胁迫下大豆苗期根茎叶中 Cl⁻ 含量分析
Fig 1 Analysis of Cl⁻ contents in root, stem and leaf of soybean in seedling stage under different NaCl concentrations stress

2.3.2 K^+ 的分布及变化情况 根和茎中 K^+ 含量随盐溶液浓度的增加呈下降的趋势,在 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高浓度盐胁迫下各品种根茎中的 K^+ 含量极显著低于对照。叶中的 K^+ 含量在不同浓度盐溶液处理下变化不明显,除晋大 53 在 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及以上高浓度盐胁迫下有显著增加外,其它品种在各浓度盐

溶液处理下变化均未达显著水平。所有处理下根茎叶中 K^+ 含量在各品种之间未显示出明显差异(图 2)。综上说明,大豆根茎中的 K^+ 含量随着盐溶液处理浓度的增加而减少,高浓度盐溶液处理下根茎中的 K^+ 含量显著降低,叶片中 K^+ 的积累较根和茎对盐胁迫不敏感。

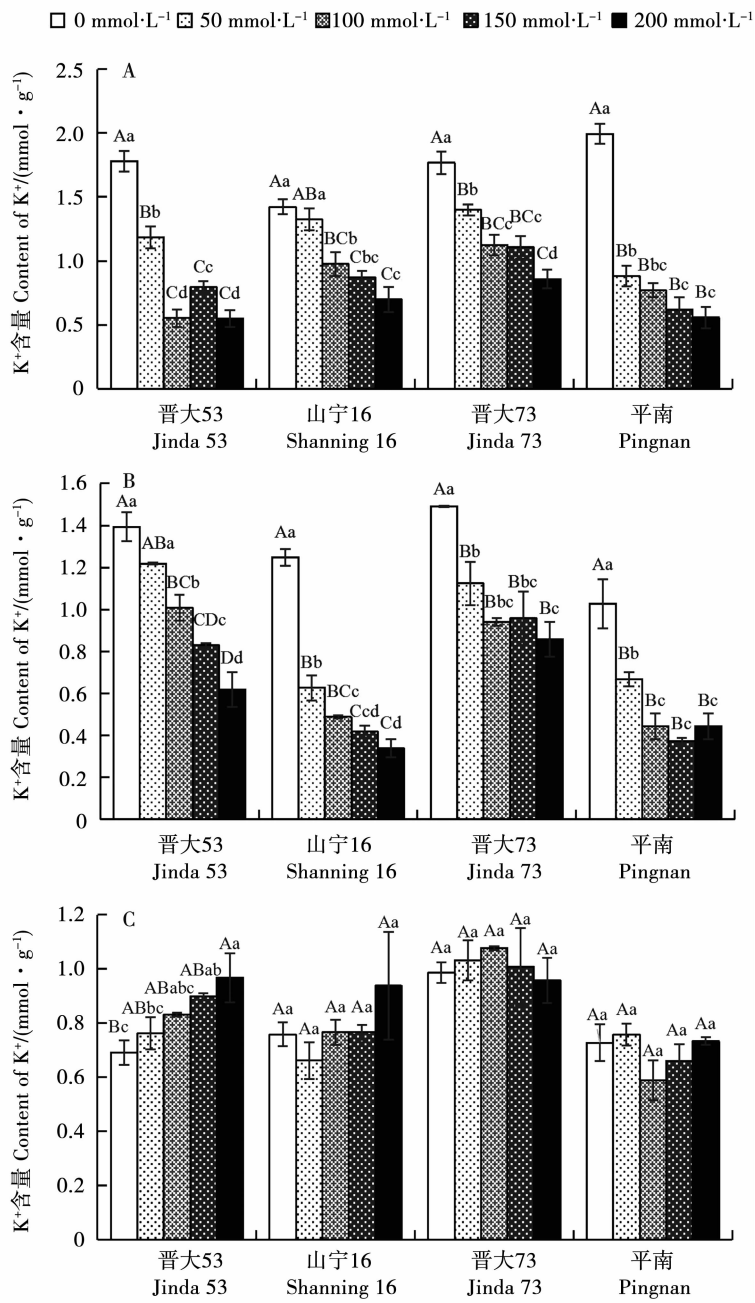


图 2 在不同浓度 NaCl 胁迫下大豆苗期根茎叶中 K^+ 含量分析

Fig. 2 Analysis of K^+ contents in root, stem and leaf of soybean in seedling stage under different NaCl concentrations stress

2.3.3 Na^+ 的分布及变化情况 高浓度盐溶液处理下各品种植株根茎叶中 Na^+ 含量较对照均显著增加,所有品种根中 Na^+ 含量在 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及以上的盐溶液处理下均极显著高于对照,表明根在低浓度盐胁迫下已积累较多 Na^+ 。比较各品种根茎叶中 Na^+ 含量,发现各处理下,根中 Na^+ 含量在品种之间

差异不明显,耐盐性品种晋大 73 在茎叶中的 Na^+ 含量显著高于其它 3 个品种,这说明耐盐性品种茎和叶中积累的 Na^+ 较多(图 3)。综上所述,高浓度盐胁迫下根茎叶中 Na^+ 含量明显增加,根中 Na^+ 的积累较茎和叶对盐胁迫更加敏感,盐溶液处理下,茎叶中 Na^+ 含量是反映耐盐性的重要指标。

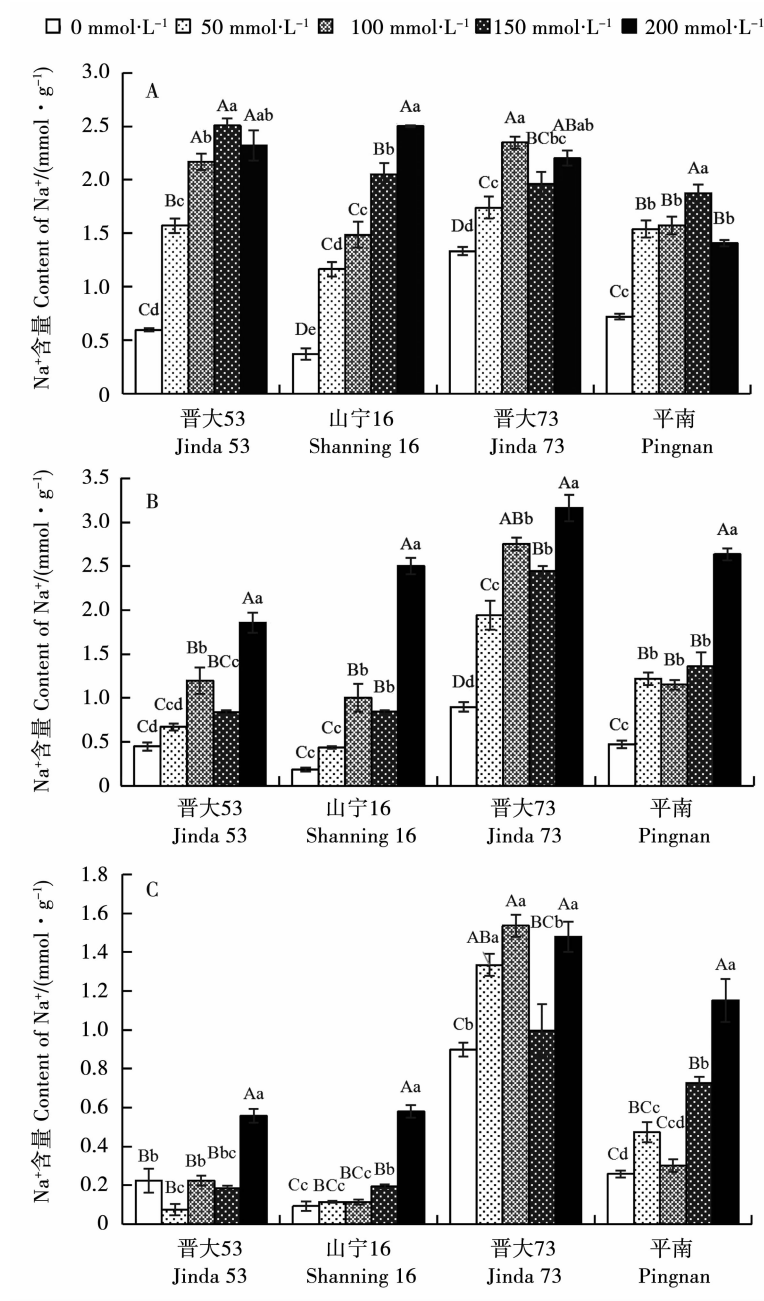


图 3 在不同浓度 NaCl 胁迫下苗期大豆植株根茎叶中 Na^+ 含量分析

Fig. 3 Analysis of Na^+ contents in root, stem and leaf of soybean in seedling stage under different NaCl concentrations stress

2.4 盐胁迫下植株各性状间的相关性分析

由表3可知:各品种根茎叶中的Na⁺和Cl⁻含量与其植株鲜重和干重之间均呈负相关,根中Na⁺和Cl⁻含量与其植株鲜重和干重相关性未达显著水平,除晋大73外,其它品种茎叶中的Na⁺和Cl⁻含量与其植株鲜重和干重相关性达到了显著或极显著水平,说明茎叶中Na⁺和Cl⁻的积累是造成植株生物量减少的重要原因,而耐盐性品种茎叶中的盐

害离子的积累对于植株生物量的影响较小。各品种根茎叶中的K⁺含量与植株鲜重和干重之间的相关性基本上均未达显著水平,说明植株各部位的K⁺的含量与植株生物量间无明显的联系。各品种叶片SPAD与其叶中Na⁺和Cl⁻含量均呈显著负相关,表明叶片中盐害离子的积累是造成叶片失绿的重要原因。

表3 大豆植株各部位离子含量与对应性状之间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between the content of ions in different parts of soybean plant and corresponding character										
品种 Variety	性状 Character	根中离子 The ion in roots			茎中离子 The ion in stems			叶中离子 The ion in leaves		
		Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺
晋大53	植株鲜重	-0.516	-0.650	0.531	-0.840 *	-0.990 **	0.854	-0.931 *	-0.956 *	-0.842
Jinda 53	植株干重	-0.571	-0.698	0.526	-0.668 *	-0.816 *	0.819	-0.785 *	-0.703 *	-0.805
	叶片 SPAD	-0.768	-0.866	0.737	-0.855	-0.951 *	0.975 **	-0.797 *	-0.851 *	-0.970 **
山宁16	植株鲜重	-0.685	-0.391	0.781	-0.805 *	-0.868 *	0.368	-0.841 *	-0.821 *	-0.952 *
Shanning16	植株干重	-0.750	-0.475	0.803	-0.898 *	-0.938 *	0.453	-0.938 *	-0.965 **	-0.929 *
	叶片 SPAD	-0.895 *	-0.702	0.935 *	-0.965 **	-0.991 **	0.691	-0.928 *	-0.956 *	-0.924 *
晋大73	植株鲜重	-0.088	-0.186	0.306	-0.293	-0.543	0.123	0.294	-0.685	0.679
Jinda 73	植株干重	-0.131	-0.227	0.350	-0.338	-0.580	0.170	0.262	-0.716	0.667
	叶片 SPAD	-0.642	-0.671	0.828	-0.830	-0.908 *	0.726	-0.687 *	-0.936 *	0.357
平南	植株鲜重	-0.038	-0.612	0.339	-0.772 *	-0.902 *	0.495	-0.828 *	-0.727 *	-0.023
Pinnan	植株干重	-0.132	-0.725	0.392	-0.721 *	-0.914 *	0.397	-0.760 *	-0.799 *	0.179
	叶片 SPAD	-0.481	-0.800	0.705	-0.815	-0.970 **	0.789	-0.786 *	-0.955 *	0.342

* 表示相关性达显著水平($P<0.05$); ** 表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。
* indicates there is significant correlation($P<0.05$); ** indicates there is extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨 论

3.1 苗期大豆生物量积累及叶片 SPAD 对盐胁迫的响应机制探讨

植物地下部易受到盐胁迫的影响^[14],地下部受损影响到植株地上部的正常生长^[15],植株地上和地下部鲜干重作为衡量生物量积累的指标,其在盐胁迫下的变化反映了幼苗的耐盐能力。本研究中,植株地下部鲜重在低浓度盐处理下有较明显的增加,高浓度盐胁迫则明显减少了地下部鲜重。对地下部干重调查发现,地下部干重在不同浓度盐溶液处理下虽有变化,但未达显著水平,这可能是因为地下部干重是根部去除水分后的重量,在盐胁迫下水分虽在根部发生差异分配和流动,但并未影响到干物质的变化。植株地上部生物量在低浓度盐溶液处理下有所增加,但高浓度盐胁迫严重抑制了其地

上部物质的积累,耐盐性品种晋大73生物量在高浓度盐胁迫下减少较小,说明高浓度盐胁迫对耐盐性品种物质积累的抑制较小。有研究发现,玉米地上部鲜干重和根系鲜干重在盐胁迫下都有所降低,盐胁迫对地上部干重的影响程度大于对地下根干重的影响^[16-17],本研究中植株在盐胁迫下地上部干重较地下部干重变化更明显也反映了这一点。叶绿素参与植物光合作用,对植物生长和作物产量具有重要影响^[18],叶片SPAD值反映了叶绿素含量,其代表着植株健康程度和生长状况,本研究中,高浓度盐胁迫使叶片SPAD显著降低,这表明高浓度的盐胁迫对植株叶片损伤更严重,影响其光合能力,进而使植株生物量积累减少。综上所述,高浓度盐胁迫对植株生长抑制作用明显,其生物量等性状在盐胁迫下的变化反映了苗期大豆植株受盐胁迫的影响。

3.2 苗期大豆各部位离子含量对盐胁迫的响应机制探讨

盐胁迫使植物体内离子分布和水分流动失衡,造成离子毒害,影响植物生长^[10],Na⁺是盐胁迫下的主要毒害离子,植物通过各部位对Na⁺的合理转运来减少盐害影响^[19-20]。Cl⁻作为主要盐胁迫离子,其大量积累也会使植物产生离子毒害。罗庆云等^[7]研究表明,盐胁迫浓度的上升使得大豆根茎叶中的Na⁺含量逐渐增加,根中Na⁺含量最多,叶中Na⁺含量最低,本研究也发现了类似的变化规律,并且还发现根较茎和叶更易积累较多的Na⁺,这可能是根作为植株营养吸收部位,其先受到盐胁迫的影响,也可能反映了植株将更多的盐害离子储于根部来减少其对地上部的危害的一种机制。Cl⁻的变化规律和Na⁺相似,由于两者都是盐胁迫的毒害离子,其在植物体内运输和分配机制方面可能存在相似之处。对于耐盐性品种晋大73,在盐胁迫下其根中Cl⁻含量较其它品种少,说明耐盐性品种根部在盐胁迫下对Cl⁻的吸收少,这样减少了盐胁迫对整个植株的损伤。K⁺在植物细胞内离子平衡中起重要作用,盐胁迫易造成植物体内K⁺的缺乏^[21],有研究表明,在盐胁迫下,Na⁺大量进入细胞,而K⁺发生外流,这样改变了细胞内合适的K⁺/Na⁺值,造成植物的盐胁迫损伤^[22],本研究中植株根茎中K⁺含量在盐胁迫下的减少使细胞内K⁺/Na⁺值失衡,最终导致植株受到胁迫损伤。

综上所述,盐胁迫破坏了大豆植株体内正常的离子流动和分布,造成植株受到损伤,植株为适应盐胁迫环境,将植株各部位离子进行合理的分配,以提高大豆在盐胁迫环境下的适应能力。

3.3 苗期大豆盐胁迫下各部位离子含量与叶片SPAD值及植株生物量之间关系的探讨

随着盐胁迫强度的增加,植株生物量的积累减少^[6],盐胁迫造成植株各部位盐害离子的大量积累,茎叶中Na⁺和Cl⁻含量的增加是造成植株生物量减少的重要原因,根中Na⁺和Cl⁻的含量与植株生物量之间相关性不显著,说明地下部盐害离子的积累并不是造成整个植株生物量减少的原因。对于耐盐性品种,盐害离子在植株各部位虽有积累,但是对植株生物量影响较小,说明耐盐性品种能有效的避免盐害离子对植株的损伤。植株内K⁺在盐胁迫下虽有变化,但是植株各部位K⁺的含量与植株生物量之间并无显著的关联,可能是由于K⁺不

是盐害离子,其对植株生物量的影响有限。有研究表明,植株叶片中Na⁺的积累造成叶片逐渐失绿^[10]。本研究发现除Na⁺外,叶片中Cl⁻含量的增加也造成叶片SPAD降低,这说明盐害离子在叶片中的积累造成植株叶片受损,进而降低其光合能力,对植株生物量的积累产生影响。综上所述,盐胁迫下植株茎叶中Na⁺和Cl⁻的积累是造成植株生物量减少的重要原因,叶片中盐害离子的积累降低叶片SPAD,影响光合能力,耐盐性品种受盐害离子影响较小,其能有效避免盐害损伤。

4 结 论

大豆苗期植株地上部鲜干重及地下部鲜重随盐溶液浓度的升高先增大后减小,在200 mmol·L⁻¹ NaCl高浓度盐胁迫下均显著低于对照,植株地下部干重在盐溶液处理下变化未达显著水平,高浓度盐胁迫对耐盐性品种地上和地下部生物量的积累影响较小,高浓度盐胁迫显著降低叶片SPAD。植株根茎叶中Na⁺和Cl⁻含量随盐溶液浓度升高而增加,根中Na⁺和Cl⁻的积累较茎和叶对盐胁迫更敏感。植株根茎中的K⁺含量随盐溶液浓度的升高而减少,叶片中的K⁺含量在盐溶液处理下变化未达显著水平。除耐盐品种晋大73外,其它品种植株茎叶中Na⁺和Cl⁻的含量与植株生物量呈显著负相关。所有品种植株叶片中Na⁺和Cl⁻的含量与叶片SPAD呈显著负相关。

参考文献

[1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845. (Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.)

[2] 潘晶,黄翠华,罗君,等. 盐胁迫对植物的影响及AMF提高植物耐盐性的机制[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4): 361-372. (Pan J, Huang C H, Luo J, et al. Effects of salt stress on plant and the mechanism of Arbuscular Mycorrhizal Fungi enhancing salt tolerance of plants[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(4): 361-372.)

[3] 刘春卿,杨劲松,陈德明,等. 不同耐盐性作物对盐胁迫的响应研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 993-998. (Liu C Q, Yang J S, Chen D M, et al. Responses to salt stress of crops different in salt tolerance [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 993-998.)

[4] Chaudhary J, Patil G B, Sonah H, et al. Expanding omics resources for improvement of soybean seed composition traits[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6(1021): 1-16.

[5] Asraf M, Wu L. Breeding for salinity tolerance in plants[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1994, 13(1): 17-42.

[6] 牛远,杨修艳,戴存凤,等. 大豆芽期和苗期耐盐性评价指标筛选[J]. 大豆科学,2018, 37(2): 215-223. (Niu Y, Yang X Y, Dai C F, et al. Related indices selection of soybean salt tolerance at germination and seedling stages[J]. Soybean Science, 2018, 37(2): 215-223.)

[7] 罗庆云, 於丙军, 刘友良. 大豆苗期耐盐性鉴定指标的检验[J]. 大豆科学, 2001, 20(3): 177-182. (Luo Q Y, Yu B J, Liu Y L. Effect of NaCl on the growth, K^+ , Na^+ and Cl^- distribution in seedlings of 6 soybean cultivars (*Glycine max* L. Merrill)[J]. Soybean Science, 2001, 20(3): 177-182.)

[8] 刘玉兰, 陈殿元, 元明浩, 等. 盐胁迫对小粒大豆幼苗生长发育及光合特性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 913-920. (Liu Y L, Chen D Y, Yuan M H, et al. Effects of salt stress on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Glycine gracilis*[J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 913-920.)

[9] 於丙军,罗庆云,刘友良. 盐胁迫对盐生野大豆生长和离子分布的影响[J]. 作物学报,2001, 27(6): 776-780. (Yu B J, Luo Q Y, Liu Y L. Effects of salt stress on growth and ionic distribution of salt-born *Glycine soja* [J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(6): 776-780.)

[10] 姜静涵,关荣霞,郭勇,等. 大豆苗期耐盐性的简便鉴定方法[J]. 作物学报,2013, 39(7): 1248-1256. (Jiang J H, Guan R X, Guo Y, et al. Simple evaluation method of tolerance to salt at seedling stage in soybean[J]. Acta Agronomica Sinica,2013, 39(7): 1248-1256.)

[11] 王宝山,赵可夫. 小麦叶片中 Na、K 提取方法的比较[J]. 植物生理学通讯,1995, 31(1): 50-52. (Wang B S, Zhao K F. Comparison of extractive methods of Na and K in wheat leaves[J]. Plant Physiology Communications, 1995, 31(1): 50-52.)

[12] 雷启福,周春山,高艺,等. AgCl 溶胶比浊法测定烟草中的微量氯[J]. 光谱实验室,2004, 21(5): 931-935. (Lei Q F, Zhou C S, Gao Y, et al. Determination of trace chlorine in tobacco by AgCl turbidimetry[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory,2004, 21(5): 931-935.)

[13] 周强,李萍,曹金花,等. 测定植物体内氯离子含量的滴定法和分光光度法比较[J]. 植物生理学通讯,2007, 43(6): 1163-1166. (Zhou Q, Li P, Cao J H, et al. Comparison on titration and spectrophotometric methods for determination of chloride content in plants[J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(6): 1163-1166.)

[14] 郭敏,王楠,付畅. 植物根系耐盐机制的研究进展[J]. 生物技术通报,2012(6): 7-12. (Guo M, Wang N, Fu C, et al. Progress of studies on salt tolerance mechanisms in plant root system under salt stress[J]. Biotechnology Bulletin,2012(6): 7-12.

[15] Merchan F, De L L, Rizzo S G, et al. Identification of regulatory pathways involved in the reacquisition of root growth after salt stress in *Medicago truncatula* [J]. The Plant Journal, 2007, 51(1): 1-17.

[16] 王俊娟,王德龙,樊伟莉,等. 陆地棉萌发至三叶期不同生育阶段耐盐特性[J]. 生态学报,2011, 31(13): 3720-3727. (Wang J J, Wang D L, Fan W L, et al. The characters of salt-tolerance at different growth stages in cotton [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3720-3727.)

[17] Strogonov B P. Physiological basis of salt tolerance of plants[J]. Soil Science, 1965, 99(5): 356.

[18] Fromme P, Melkozernv A, Jordan P, et al. Structure and function of photosystem I: Interaction with its soluble electron carriers and external antenna systems [J]. FEBS Letters, 2003, 555(1): 40-44.

[19] Hamwieh A, Xu D. Conserved salt tolerance quantitative trait locus (QTL) in wild and cultivated soybeans [J]. Breeding Science, 2008, 58(4): 355-359.

[20] Apse M P, Blumwald E. Na^+ transport in plants [J]. FEBS Letters, 2007, 581(12): 2247-2254.

[21] Naidoo G. Growth, water and ion relationships in the coastal halophytes *Triglochin bulbosa* and *T. striata* [J]. Environmental and Experimental Botany, 1994, 34(4): 419-426.

[22] 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. (Zuo Z J, Zhang R M, Gao Y. Advances in plant cell ion flux with salt stress: A review[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2014, 31(5): 805-811.)