

# 滨海盐碱地覆膜和灌溉对玉米盐分离子 分布及生物量的影响

叶澜涛<sup>1,2,3</sup>, 周青云<sup>1,2,3</sup>, 李松敏<sup>1,2,3</sup>, 马 波<sup>1,2,3</sup>,  
王 航<sup>1,2,3</sup>, 尹林萍<sup>1,2,3</sup>

(1. 天津农学院水利工程学院, 天津 300384; 2. 中美生态农业与水环境保护国际联合研究中心, 天津 300384;  
3. 天津市农业水利工程技术工程中心, 天津 300384)

**摘 要:**以玉米为试材,于 2017—2018 年在天津市滨海盐碱土进行了膜下滴灌试验,分析了覆膜和灌溉对玉米盐分离子质量分布特征、玉米干物质的变化规律和产量的影响。结果表明:(1)覆膜和灌溉对玉米离子分布的影响显著,显著减小了根部  $\text{Na}^+$  吸收质量,成熟期 FI20 处理比 LI10 小 56%,从而减少了盐分对叶片的伤害;显著增大了茎部  $\text{K}^+$  的积累质量,成熟期 FI20 处理比 LI10 高 24%,提高了植物的耐盐性;显著增加了叶部  $\text{Ca}^{2+}$  质量,苗期 FI20 处理比 LI10 高 96%,促进作物幼根的生长和根毛的形成,改善了玉米体内的离子平衡,减轻了盐胁迫作用;显著增加了叶部  $\text{Mg}^{2+}$  质量,拔节期 FI20 处理比 LI10 高 136%,增强了植株叶片的光合作用,提高了植株的耐盐性。(2)玉米地上部和根系干物质重均随着生育期进程而增加,覆膜和灌溉改变了植物体内盐分离子质量,对玉米生物量的积累影响较大,成熟期 FI20 处理比 LI10 高 1%~46%;对玉米根冠比(R/S)有显著影响,使生物量分配比例显著改变,成熟期根冠比(R/S)FI20 处理比 LI10 小 48%~52%。(3)利用 2017 年玉米试验数据采用 Logistic 曲线建立了干物质生长模拟方程,引入了盐分离子修正系数,拟合方程显著。利用 2018 年玉米试验数据对建立的玉米干物质盐离子模型进行了验证,各个处理的拟合曲线与其实测值都较接近;建立的干物质生长模型能够较好地模拟盐碱地玉米干物质的累积过程。综上,覆膜和灌水定额为 20 mm 的 FI20 处理对植株的盐离子调节作用最显著,提高了玉米的耐盐性,改变了生物量的分配比例,获得了适当的干物质累积量,产量最高。

**关键词:**滨海盐碱土;玉米盐分离子分布;干物质累积;覆膜;滴灌

**中图分类号:**S513;S156.4 **文献标志码:**A

## Effects of plastic film-mulching and irrigation on the salt ion distribution and biomass of maize in coastal saline-alkali soil

YE Lantao<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Qingyun<sup>1,2,3</sup>, LI Songmin<sup>1,2,3</sup>, MA Bo<sup>1,2,3</sup>, WANG Hang<sup>1,2,3</sup>, YIN Linping<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin, 300384, China;

2. Sino-US International Joint Research Center for Ecological Agriculture and Water Environment Protection, Tianjin, 300384, China;

3. Tianjin Agricultural Water Conservancy Engineering and Technology Center, Tianjin, 300384, China)

**Abstract:** In this experiment, maize was used as test material, and drip irrigation under film was conducted in Tianjin coastal saline-alkali soil in 2017–2018. The effects of mulching and irrigation on the distribution characteristics of salt ion mass and the change of dry matter and yield in maize were analyzed. The results are as follows: (1) Film mulching and irrigation had a significant effect on the change of ion quality in maize and significantly reduced the absorption quality of  $\text{Na}^+$  in roots. FI20 was 56% smaller than LI10 in maturity, thus, reducing the damage of salt to leaves. It significantly increased the accumulation mass of  $\text{K}^+$  in stems. FI20 was 24% higher than LI10 did in maturity, and improved the salt tolerance of plants. It also significantly increased the mass of  $\text{Ca}^{2+}$  in leaves. FI20 was 96% higher than LI10 at the seedling stage, promoted the growth of young roots and the formation

of root hairs, improved the ion balance in maize and reduced the salt stress. It significantly increased the mass of  $Mg^{2+}$  in leaves and FI20 was 136% higher than LI10 in the jointing stage. It increased strengthen photosynthesis of leaves and enhanced salt tolerance of plants. (2) The dry matter weight of the aboveground and root increased with the extension of the growth period. Mulching and irrigation changed the mass of salt ions in the plant, and had a great influence on the accumulation of maize biomass. FI20 was 1%~46% bigger than LI10 in maturity. There was a significant influence on the ratio of root to crown (R/S) of maize, and changed the proportion of biomass distribution significantly. FI20 was 48%~52% smaller than LI10 in maturity. (3) The growth simulation equation of dry matter in 2017 was established by using logistic curve, and the salt ion correction coefficient was introduced, the fitting equation was significant. The salt ion model of maize was verified using the data of maize experiment in 2018. The fitting curves of each treatment were close to the measured values, which were in line with the change rule of logistic curve. The dry matter growth model can better simulate the accumulation process of dry matter of maize in saline-alkali land. To sum up, the treatment of film mulching and irrigation of FI20 had the most significant effect on the salt ion regulation of the plant, improved the salt tolerance of maize, changed the allocation of biomass, obtained the appropriate dry matter accumulation, with the better yield.

**Keywords:** coastal saline-alkali soil; salt ion distribution of maize; dry matter accumulation; film-mulching; drip irrigation

土壤盐碱化已经成为当今世界最严重的危害之一<sup>[1]</sup>,我国盐碱地占全球盐渍土总面积的 10.4%,我国盐渍土面积约占耕地面积的 10.3%,大多分布在北方干旱半干旱地区及滨海平原地带。研究表明,盐碱胁迫是限制农作物生长发育及产量的主要环境因素之一<sup>[2]</sup>。

盐胁迫主要引起植物渗透胁迫、离子毒害和矿物质营养缺乏,在受到盐胁迫时植物对  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  等离子的吸收受到影响,细胞内的离子平衡被打破,代谢发生紊乱,严重影响植物的生长发育<sup>[3]</sup>。因此,许多学者在不同盐胁迫水平下,研究了粮食作物和耐盐作物盐离子的含量及分布特征,探究作物减轻盐碱胁迫的机理,寻找适合盐碱地生长的作物<sup>[3-6]</sup>,并研究了盐分胁迫下植物生长及生理代谢反应<sup>[2-5]</sup>。还有很多学者研究了不同栽培方式对盐碱地的治理作用,研究表明,覆膜农艺措施结合滴灌节水技术,依据盐渍土水盐运动“盐随水来,盐随水去”的特点,控制土壤水分蒸发可以减轻盐分表聚,达到盐碱地改良的目的,能为作物提供一个良好的生长环境,可以增加作物产量,同时提高水分利用效率,以期寻找更适合盐碱土的灌溉和栽培方式<sup>[7-12]</sup>。

天津作为滨海大城市,水资源极度短缺,同时盐碱土问题较为严重,盐碱土的治理及水资源的有效利用成为重点研究问题。玉米是我国最重要的粮食作物之一,天津滨海区玉米产量面临着土壤盐渍化的严重威胁。在不同的覆盖及灌溉等措施下,植物体内盐分离子质量分布及对作物生长的影响研究较少。本文研究覆膜滴灌条件下玉米盐分离

子分布特征以及其对干物质累积和产量的影响,为盐碱地玉米丰产增收提供数据支撑,并对盐碱土的有效治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于天津市津南区葛沽镇,试验区面积为  $465\text{ m}^2$  ( $50\text{ m}\times 9.3\text{ m}$ ),地处东经  $117^\circ 14' 32''\sim 117^\circ 33' 10''$ ,北纬  $38^\circ 50' 02''\sim 39^\circ 04' 32''$ 。该区土壤大体分为潮土和黑砂土,土壤表层约 1 m 深为黄色,其下为黑色砂土,还有一部分是蚌螺贝壳土,质属盐碱, pH 值为 8.4,土层平均盐分含量为  $4.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其土壤盐分主要来自海水,地下水埋深较浅,排水不畅,因此,该区土壤属于滨海重度盐渍化土。土壤盐分阳离子成分本底值及土壤质地见表 1。

该区位于华北地区渤海沿岸,属于暖温带半湿润季风型大陆性气候,春季干旱少雨多风,气温回升快,蒸发量大,常有春旱发生;夏季受大陆低压和太平洋热带高压影响,盛行东南风,高温高湿,炎热多雨,降水高度集中;秋季短促,气温下降快,降水少,昼夜温差较大;冬季漫长,受西伯利亚、蒙古高压控制,盛行西北风,气候干冷,雨雪稀少。年平均日照时数  $2\,659\text{ h}$ ,年平均相对湿度 64%,年平均风速  $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,年平均降水量  $556.4\text{ mm}$ ,年平均降水日  $67.7\text{ d}$ ,多集中在 6—7 月,年平均气温  $11.9^\circ\text{C}$ ,极端年最高气温  $39.9^\circ\text{C}$ ,极端年最低气温  $-22.0^\circ\text{C}$ ,最热月(7 月)平均气温为  $25.9^\circ\text{C}$ ,最冷月(1 月)平均气温为  $-4.4^\circ\text{C}$ ,年平均无霜降  $206\text{ d}$ ,平均积雪日数

12.3 d,区内土地一般从 11 月 20 日前后开始冻结,翌年 3 月 20 日前后解冻,平均结冻期为 120 d,最大冻土深度可达 62 cm。

1.2 试验设计

田间试验供试作物为玉米(郑单 958),2017 年 4 月 22 日播种,8 月 14 日收获,全生育期 115 d;2018 年播种时间为 5 月 14 日,收获时间为 8 月 22 日,全生育期 101 d。盐分离子分布特征研究引用 2018 年数据,干物质及产量研究引用 2017、2018 年 2 a 数据。株距均为 25 cm,行距均为 60 cm。农田灌水方式为滴灌,滴灌采用一行一管设置,滴灌带间距 60 cm,管径 1.6 cm,滴头间距 30 cm,工作压力 0.1 MPa,滴头流量 1.38 L · h<sup>-1</sup>,农田灌溉水源为地下水。试验设置 2 种栽培方式(覆盖方式),其中 F 表示覆膜处理,L 表示露地处理;设置 2 种灌水量处理,分别以 I10、I20 表示,其中 I10 各生育期灌水定

额为 0 ~ 20 mm,I20 各全育期灌水定额为 20 ~ 40 mm,2017、2018 年玉米全生育期内灌水时间与灌水定额见表 2,试验布置见图 1。2017、2018 年玉米全生育期内降雨量及其分布见图 2。

1.3 观测指标与测定方法

1.3.1 春玉米干物质及产量测定 采集玉米根、茎、叶样品的时间为苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期。取样时每个处理选取 6 株长势均匀的玉米植株,带回实验室将根、茎、叶分开,置烘箱 105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干至恒重,植物样品烘干后立即用电子秤称量。

春玉米成熟收获后,各试验小区随机选取 2 m<sup>2</sup>的试验田,收获玉米果实并从 4 个处理中分别选取 5 株代表性的玉米植株进行考种,考种指标包括穗长、秃尖长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒重、穗轴重、百粒重。测产采取小区单打单收方法测定。

表 1 阳离子成分本底值及土壤物理特性

Table 1 Background value of cation composition and soil physical properties

| 土层深度<br>Soil depth/cm | Ca <sup>2+</sup><br>/(g · kg <sup>-1</sup> ) | Mg <sup>2+</sup><br>/(g · kg <sup>-1</sup> ) | Na <sup>+</sup><br>/(g · kg <sup>-1</sup> ) | K <sup>+</sup><br>/(g · kg <sup>-1</sup> ) | 土壤容重<br>Soil bulk density<br>/(g · cm <sup>-3</sup> ) | 饱和含水率<br>Saturated water content<br>/(cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> ) | 田间持水率<br>Field capacity<br>(cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup> ) |
|-----------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 0~20                  | 0.198                                        | 0.053                                        | 1.648                                       | 0.45                                       | 1.21                                                  | 54.69                                                                      | 25.28                                                            |
| 20~40                 | 0.155                                        | 0.057                                        | 1.571                                       | 0.237                                      | 1.69                                                  | 42.36                                                                      | 27.24                                                            |
| 40~60                 | 0.15                                         | 0.062                                        | 1.512                                       | 0.231                                      | 1.16                                                  | 48.51                                                                      | 26.67                                                            |

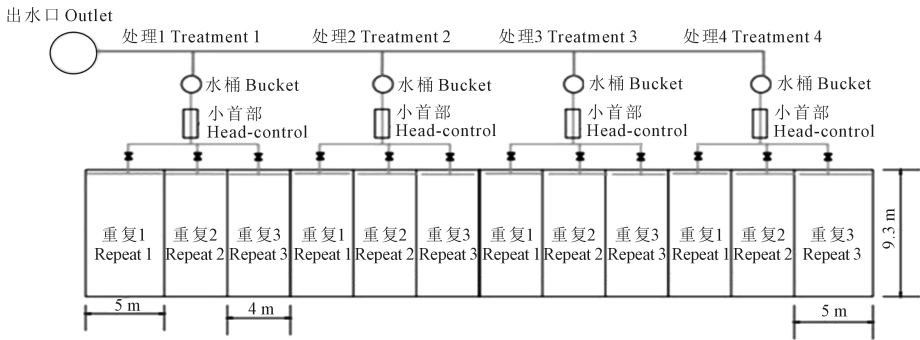


图 1 试验区布置

Fig.1 Layout of the experimental site

表 2 玉米各生育期灌水定额

Table 2 Irrigation quota in maize growth stages

| 年份<br>Year | 处理<br>Treatment | 灌溉量 Irrigation amount/mm |                       |                      |                          |
|------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
|            |                 | 苗期<br>Seedling stage     | 拔节期<br>Jointing stage | 抽穗期<br>Heading stage | 灌溉定额<br>Irrigation quota |
| 2017       | LI10            | 0                        | 20                    | 20                   | 40                       |
|            | LI20            | 0                        | 40                    | 40                   | 80                       |
|            | FI10            | 0                        | 20                    | 20                   | 40                       |
|            | FI20            | 0                        | 40                    | 40                   | 80                       |
| 2018       | LI10            | 10                       | 10                    | 10                   | 30                       |
|            | LI20            | 20                       | 20                    | 20                   | 60                       |
|            | FI10            | 10                       | 10                    | 10                   | 30                       |
|            | FI20            | 20                       | 20                    | 20                   | 60                       |

1.3.2 玉米样品采集与盐分阳离子浓度测定 将植物样品称重后,用粉碎机粉碎后过 50 目筛,保存于密封袋内,注意将空气完全挤压出去。待测液采用硝酸-高氯酸消解的方法制备。准确称取样品粉末 0.5 g,置 250 ml 锥形瓶中,加入 8 ml 硝酸-高氯酸混合液(3 : 1),摇匀,静置 6 h,然后放置在电热板上加热消解,保持微沸,持续加热至消解液呈无色透明,冷却后加入去离子水配制的 0.5%稀硝酸 5 ml,转入 25 ml 量瓶中,用去离子水洗涤锥形瓶,洗液合并于量瓶中,定容至量瓶刻度,作为供试样品溶液。Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度采用火焰原子吸收分光光度法测定(AA-6300C)。

1.3.3 数据分析 试验数据采用 Microsoft Excel 2010 系统软件进行处理,采用 SPSS 23.0 软件进行统计分析,用 LSD 法进行多重比较。

1.3.4 模型验证 在模型校正与验证结果的评价中所用的误差统计指标有:平均绝对误差 ( $MAE$ )、均方根误差 ( $RMSE$ ) 和决定系数 ( $R^2$ )、模型效率 ( $E$ )。其中  $R^2$  和  $E$  用于评价模型的预测能力,  $MAE$ 、 $RMSE$  用于显示模型预测中的误差。本研究中,利用式(1)~(3)指标来评价模型性能。当模型效率( $E$ )和决定系数( $R^2$ )越接近 1、 $MAE$  和  $RMSE$  越接近 0 时,表示模型性能越好。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i + S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M}_i)^2} \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}} \tag{2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - M_i| \tag{3}$$

式中, $S_i$  和  $M_i$  分别为预测值和测量值, $\bar{M}_i$  为  $M_i$  的平均值, $n$  是观察值的数目。

2 结果与分析

2.1 盐分离子在植株叶、茎、根的分布特征

2.1.1 钠离子 从各器官钠离子分布情况来看(图 3),玉米根部  $Na^+$  质量高于叶部、茎部。表明根系对于  $Na^+$  的截留能力较强,从而减少了其对叶片代谢的干扰,即植株根系吸收盐分后,大部分贮藏在根部,

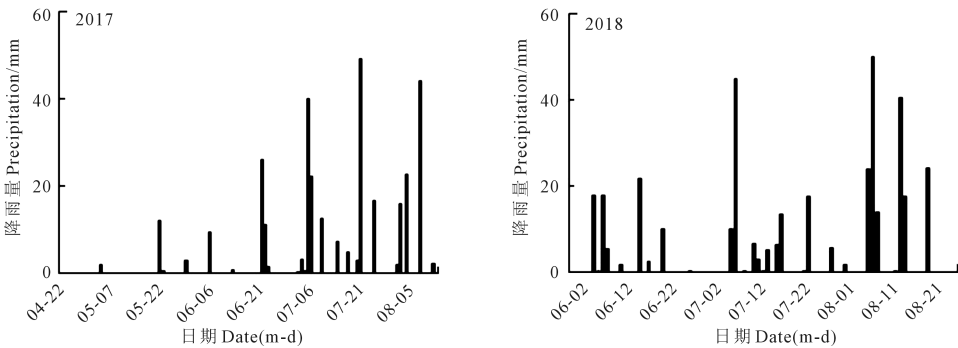
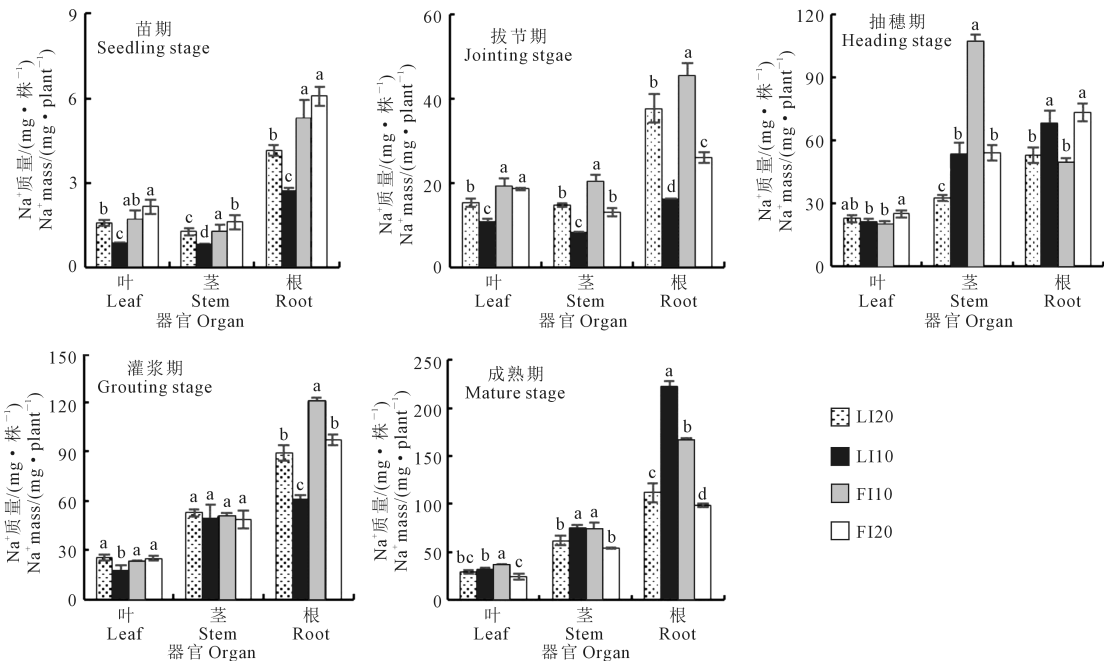


图 2 玉米全生育期降雨量及其分布  
Fig.2 Rainfall and distribution during the whole growth period of maize



注:不同字母表示处理间在  $P<0.05$  水平下具有显著差异,下同。  
Note: Different letters among different treatments indicate significant differences at the level of  $P<0.05$ . The same below.

图 3 不同处理玉米叶、茎、根钠离子的分布

Fig.3 Distribution of  $Na^+$  content in leaves, stems, and roots of maize under different treatments

不向或较少向叶部运输,以减少盐分对叶片的伤害。覆膜和灌溉对玉米根部的  $\text{Na}^+$  质量积累影响显著,成熟期 FI20 处理比 LI10 小 56%,各个处理差异具有统计学意义。

灌水定额相同情况下,抽穗期以前,覆膜和露地处理根部  $\text{Na}^+$  差异较大,两个覆盖处理间差异具有统计学意义;成熟期,覆膜对玉米根部  $\text{Na}^+$  吸收影响较大,覆膜使得土壤水分蒸发较少,植株体内盐分质量较小,明显减弱了玉米  $\text{Na}^+$  吸收质量,有利于作物的生长,覆膜和露地处理差异显著。

覆盖条件相同情况下,成熟期灌水量大的处理,灌水对土壤进行了充分的淋洗,植株体盐分质量较小,根部的  $\text{Na}^+$  的积累较少,不同灌水量处理差异显著。

2.1.2 钾离子 从各器官钾离子分布情况来看(图 4),玉米  $\text{K}^+$  吸收积累的主要植株部位为茎部,叶部和根部相对较少。覆膜和灌溉对玉米  $\text{K}^+$  吸收积累影响较大。覆膜与灌溉的交互作用使得茎部  $\text{K}^+$  的积累质量增大,成熟期 FI20 处理比 LI10 大 24%,不同处理差异显著。

在拔节期(播种后 41 d)后茎部  $\text{K}^+$  的吸收速度开始变大,在抽穗期(播种后 69 d)茎部  $\text{K}^+$  最大。灌浆期和成熟期,植株叶子不断老化掉落,4 个处理  $\text{K}^+$  质量均有所减小。

灌水定额为 10 mm,抽穗期以前,覆膜和露地处理茎部  $\text{K}^+$  质量差异较大,两个覆盖处理间差异具有统计学意义;成熟期露地处理水分蒸发较大,茎部  $\text{K}^+$  质量增加并大于覆膜处理,露地处理通过提高  $\text{K}^+$  浓度来提高植物的耐盐性,覆膜和露地处理差异不显著。灌水定额为 20 mm,覆膜处理茎部  $\text{K}^+$  质量显著大于露地处理。覆膜处理与露地处理差异性显著,覆膜增大了茎部的  $\text{K}^+$  质量,有利于作物的生长。

覆膜条件下,灌水量大的处理茎部  $\text{K}^+$  的积累质量较大,不同灌水量处理间差异显著;露地条件下,抽穗期后,灌水量小的处理茎部  $\text{K}^+$  的积累质量较大,不同灌水量处理间差异不显著。

2.1.3 钙离子 从各器官  $\text{Ca}^{2+}$  分布情况来看(图 5),玉米叶部  $\text{Ca}^{2+}$  质量高于茎部、根部。灌溉和覆膜的交互作用极显著地影响叶部  $\text{Ca}^{2+}$  质量,苗期 FI20 处理比 LI10 高 96%。

灌水定额为 10 mm,覆膜和露地处理叶部  $\text{Ca}^{2+}$  质量差异显著。灌水定额为 20 mm,覆膜处理叶部  $\text{Ca}^{2+}$  质量大于露地处理,灌溉水量较大时,覆膜影响叶部的  $\text{Ca}^{2+}$  质量,利于作物的生长。

覆膜条件下,抽穗期以前,灌水量大的处理叶部的  $\text{Ca}^{2+}$  积累质量较大,成熟期,灌水量小的处理叶部的  $\text{Ca}^{2+}$  积累质量较大,以改善玉米体内的离子平衡,减轻盐胁迫作用,不同灌水量处理差异显著。

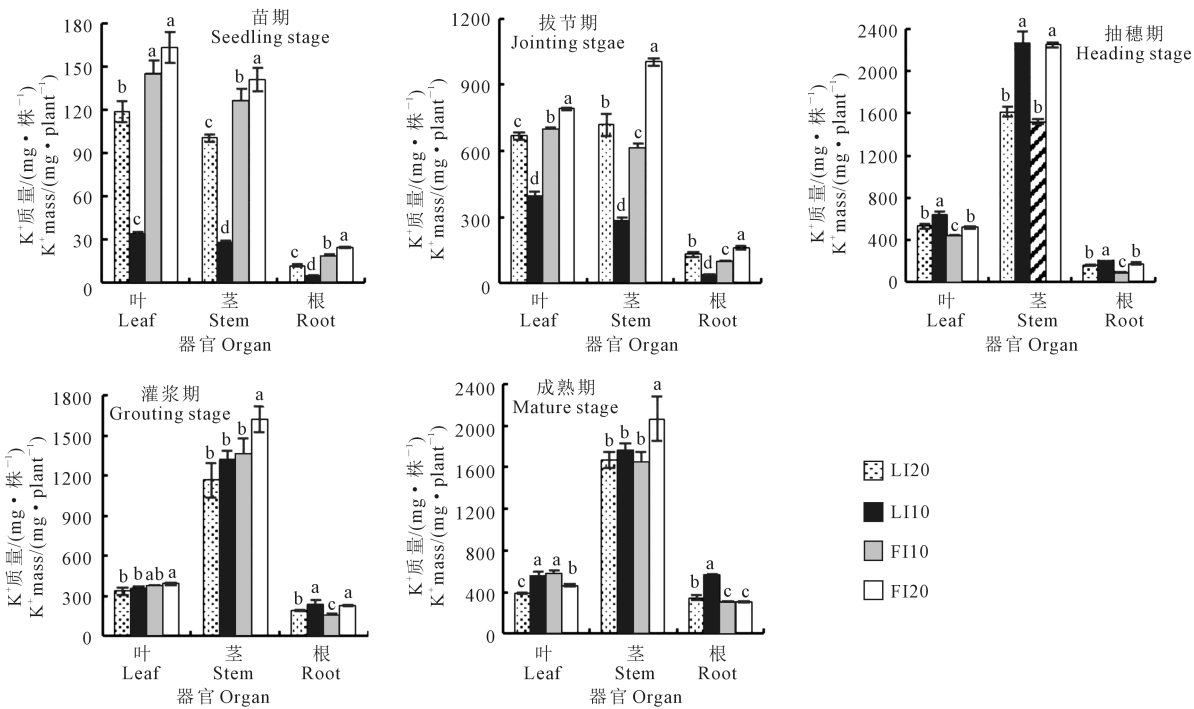


图 4 不同处理玉米叶、茎、根钾离子的分布

Fig.4 Distribution of  $\text{K}^+$  content in leaves, stems, and roots of maize under different treatments

**2.1.4 镁离子** 从各器官  $Mg^{2+}$  分布情况来看(图 6), 苗期和拔节期, 玉米叶部  $Mg^{2+}$  质量显著高于茎部、根部。灌溉和覆膜的交互作用极显著增加叶部的  $Mg^{2+}$  质量, 拔节期 F120 处理比 LI10 高 136%。灌溉定额相同时, 苗期和拔节期覆膜处理叶部  $Mg^{2+}$  质量较大, 两个处理差异显著。覆膜处理有助于增强植株叶片的光合作用, 从而增强植株的耐盐

性, 利于作物的生长。  
覆膜条件下, 苗期和拔节期灌水量大的处理叶部的  $Mg^{2+}$  积累质量较大, 不同灌水量处理差异显著; 成熟期, 灌水量小的处理叶部的  $Mg^{2+}$  积累质量较大, 以改善玉米体内的离子平衡, 减轻盐胁迫作用, 不同灌水量处理差异显著。

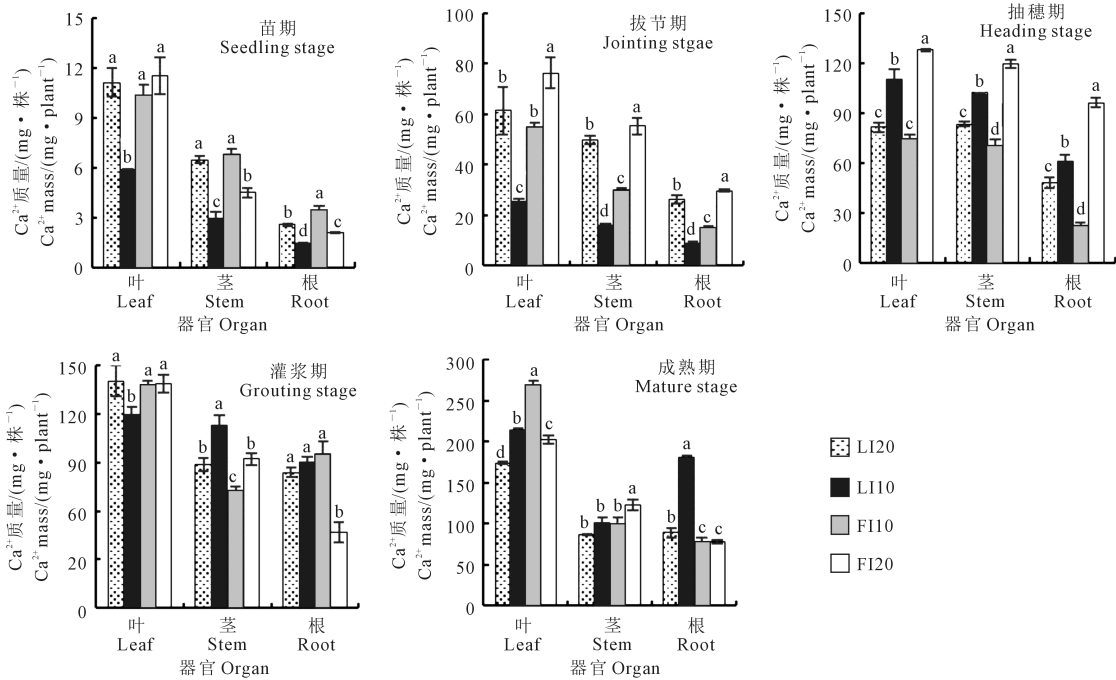


图 5 不同处理玉米叶、茎、根中钙离子分布  
Fig.5 Distribution of  $Ca^{+}$  content in leaves, stems, and roots of maize under different treatments

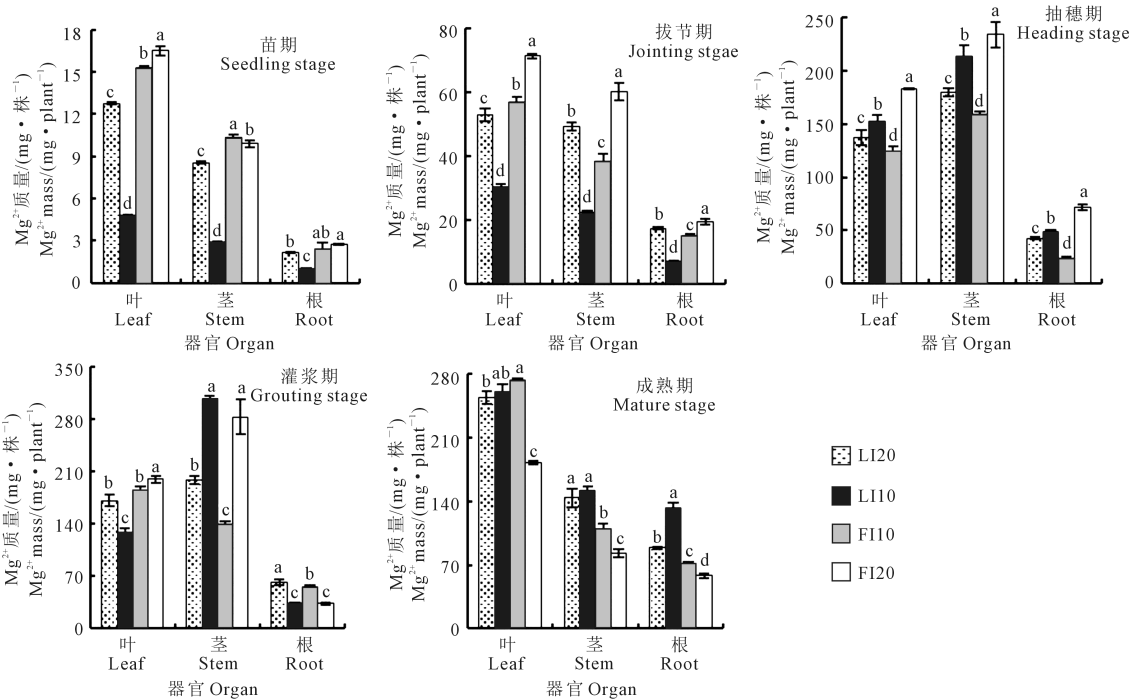


图 6 不同处理玉米叶、茎、根中镁离子分布  
Fig.6 Distribution of  $Mg^{+}$  content in leaves, stems, and roots of maize under different treatments

2.2 不同处理对全生育期玉米干物质质量的影响

2.2.1 玉米干物质质量的变化规律 从苗期到成熟期,4 种处理的生物量主要积累于地上部分,地下部分所占比例较小。

玉米地上部和根系干物质重均随着生育期的推进而增加,如图 7,苗期各处理玉米地上部和根系干重相差不大,此时地上部和根系较小,生长缓慢。拔节期、抽穗期和灌浆期,覆膜和灌溉的交互作用改变了植物体内盐分离子质量,从而影响地上部和根系的生长。成熟期覆膜条件下,灌水量小的 FI10 处理生物量大于灌水量大的 FI20 处理,覆膜和灌水的交互作用有助于作物获得适当的生物量,覆膜且灌水量大的 FI20 处理植株的生物量比不覆膜灌水量少的处理 LI10 高 1%~46%。

2.2.2 不同处理对玉米植株根冠比的影响 由图 8 可知,覆膜和灌水对玉米植株根冠比(R/S)有显著影响。覆膜和灌溉改变了植物体内盐分离子质量,使生物量分配比例改变。灌水定额相同情况下,覆膜处理玉米不同生育时期的 R/S 小于露地处理,露地处理土壤水分蒸发量大于覆膜处理,土壤的含盐量较大,

植株体内盐分钠离子质量增加,为适应植物体内外环境的改变,植株对生物量分配比例进行调节,同时通过根系的伸长生长来提高植物吸水能力,从而增大了植物的 R/S。玉米生育期内,露地处理植株的 R/S 较大,R/S 值为 0.08~0.25,覆膜处理 R/S 较小,R/S 值为 0.07~0.21,成熟期根冠比(R/S)FI20 处理比 LI10 小 48%~52%。前人研究盐分胁迫较大时 R/S 值为 0.14~0.46<sup>[13]</sup>,本研究土壤盐分胁迫较轻,R/S 较小。

在覆膜条件下,玉米不同生育时期各处理的 R/S 随灌溉量的增加表现出增加的趋势,表明滴灌水淋洗土壤盐分之后,灌水量不同,植株体内盐分钠离子质量不同,影响了玉米地上部和根系生长,使生物量分配比例改变。

FI20、LI20 和 FI10 3 个处理不同时期 R/S 均为单峰型曲线,R/S 最大值均出现在拔节期前,而在抽穗期 R/S 较小,表明在该时期膜下滴灌玉米由营养生长转入到生殖生长,与前人研究结果一致<sup>[13]</sup>。受水量较少影响,处理 LI10 最大 R/S 出现在抽穗期,较其他 3 个处理延后转入生殖生长,成熟期 R/S 达到第二个高峰值。

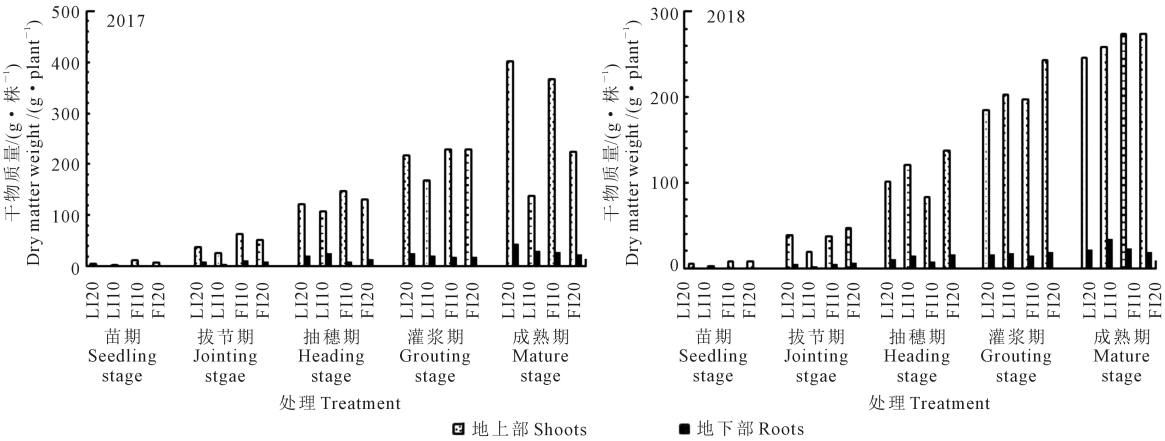


图 7 不同处理对玉米全生育期干物质质量的影响

Fig.7 Effects of different treatments on dry matter of maize in whole growth period

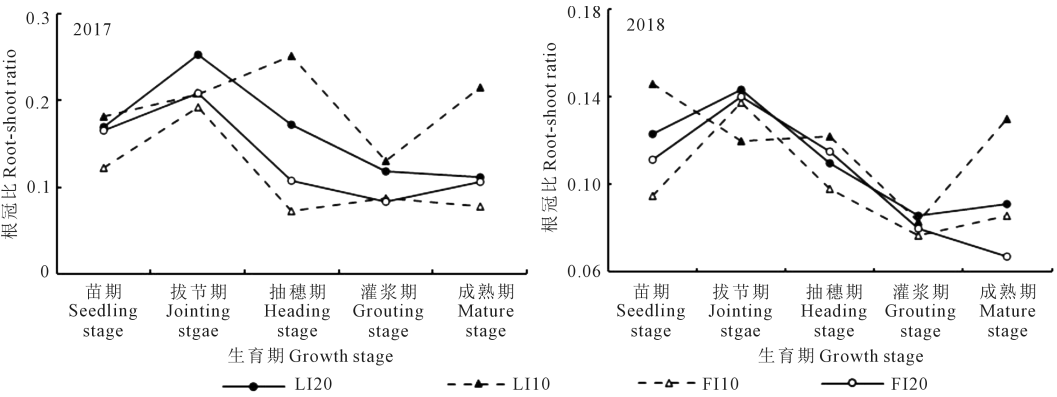


图 8 不同处理对玉米植株根冠比的影响

Fig.8 Effects of different treatments on root/shoot ratio of maize in whole growth period

2.2.3 玉米干物质质量模拟研究

(1)玉米干物质质量模型的建立。根据玉米对照处理的干物质质量数据,采用广泛应用于作物生长模拟的 Logistic 曲线<sup>[14-16]</sup>建立了盐碱地玉米干物质累积模拟曲线。以生育天数为自变量( $t$ ),以干物质质量为因变量( $y$ ),建立玉米干物质累积模拟模型,所采用 Logistic 曲线方程为:

$$y = \frac{K}{1 + e^{a-bt}} \tag{4}$$

式中, $y$  为因变量; $t$  为自变量; $K$  为增长极限,用来表征系统变化的顶值; $a$  为截距系数,用来表征基础状态参数; $b$  为增长率系数,用来表征系统状态趋近顶级的速度。

模拟模型参数如下: $K$  值为 296, $a$  值为 0.865, $b$  值为 40.266, $F$  检验为 23.781, $R^2$  为 0.888。

(2)玉米干物质质量模型的修正。以上干物质质量模拟模型中,并没有体现盐分对作物干物质累积的影响。由盐分钠离子质量分布特征的分析可知,作物体内的盐分钠离子对干物质累积影响较大,因此,使用 2017 年玉米盐分离子数据引入盐分离子修正系数。修正系数中,以盐分  $\text{Na}^+$  质量作为自变量( $x$ ),方程形式为二次抛物线形式,方程中各个参数见表 3,方程如下:

$$y = \gamma_{\text{Na}^+} + \frac{K}{1 + e^{a-bt}} \tag{5}$$

$$\gamma_{\text{Na}^+} = Ax^2 + Bx + C \tag{6}$$

式中, $\gamma$  为因变量,为盐分  $\text{Na}^+$  修正系数; $x$  为自变量; $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为方程参数。

(3)玉米干物质质量模型验证。利用 2018 年玉米试验数据对建立的玉米干物质质量盐离子模型进行了验证,验证结果见表 4 和图 9。模拟值与实测值之间采用预测误差统计法达到良好拟合。4 个处理干物质模拟值和实测值较接近,其均方根误差 ( $RMSE$ ) 在 22.500~28.522 之间,平均绝对误差 ( $MAE$ ) 在 18.289~22.924 之间,模型效率 ( $E$ ) 在 0.954~0.982 之间,决定系数 ( $R^2$ ) 在 0.899~0.927 之间,表明模拟值较接近实测值,呈现较好的拉长 S 形曲线,符合 Logistic 曲线的变化规律。建立的干物质累积模型以及盐分离子修正系数可以用来估算盐碱地玉米干物质的累积过程。

2.2.4 玉米产量构成因素分析 玉米产量构成因素包括有效穗数、穗粒数和百粒重。由表 5 可见,灌水定额为 10 mm 时,2017 年地膜覆盖较露地种植产量显著增加了 1.4 倍,穗粒数增加了 71%,百粒重增加了 41%;2018 年地膜覆盖较露地种植产量、穗粒数和百粒重增加较少。灌水定额为 20 mm 时,2017 年地膜覆盖较露地种植产量增加了 6.7%,穗粒数增加了 2.6%,百粒重增加了 4.0%,增加幅度较小;2018 年地膜覆盖较露地种植产量增加了 41%,穗粒数增加了 40.9%,百粒重没有显著差异。

露地种植条件下,2017 年灌水定额为 20 mm 比灌水定额为 10 mm 的产量显著增加了 1.2 倍,穗粒数增加了 63%,百粒重增加了 34%;2018 年灌水定额为 20 mm 与灌水定额为 10 mm 产量、穗粒数和百粒重没有显著差异。地膜覆盖条件下,2017 年灌水定额为 20 mm 比灌水定额为 10 mm 的产量增加 3.4%,

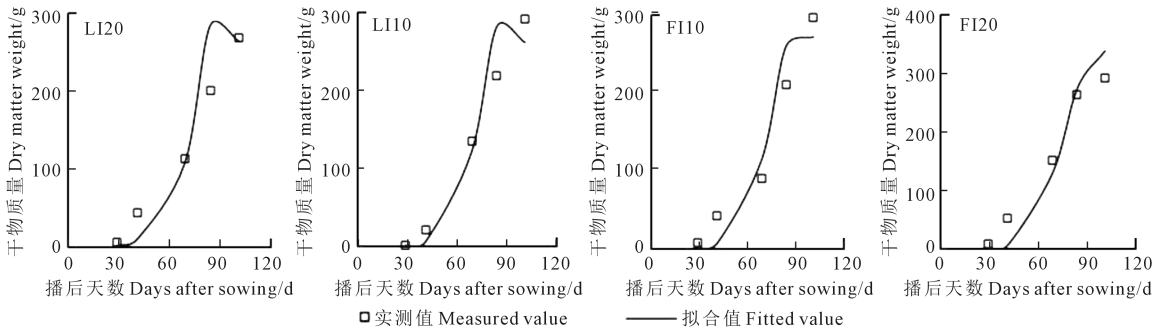


图 9 玉米干物质质量模型模拟验证结果(2018 年)  
Fig.9 Simulation results of maize dry matter model (2018)

表 3 2017 年玉米干物质模型修正参数

| 处理 Treatment | A     | B      | C     | R <sup>2</sup> |
|--------------|-------|--------|-------|----------------|
| LI20         | 0.054 | -0.674 | 2.471 | 0.615          |
| LI10         | 0.004 | -0.072 | 0.920 | 0.914          |
| FI10         | 0.035 | -0.630 | 3.439 | 0.857          |
| FI20         | 0.031 | -0.487 | 2.474 | 0.938          |

表 4 2018 年玉米干物质质量模型修正预测误差统计量

| 处理 Treatment | RMSE   | MAE    | R <sup>2</sup> | E     |
|--------------|--------|--------|----------------|-------|
| LI20         | 28.522 | 19.941 | 0.888          | 0.954 |
| LI10         | 22.500 | 18.289 | 0.923          | 0.982 |
| FI10         | 25.091 | 22.924 | 0.899          | 0.971 |
| FI20         | 25.809 | 21.455 | 0.927          | 0.966 |

表 5 不同处理玉米产量及产量构成因素  
Table 5 Maize yield and yield index of different treatments

| 年份<br>Year | 处理<br>Treatment | 有效穗数/(个·hm <sup>-2</sup> )<br>Effective ear number<br>per hectare | 穗粒数<br>Grain number | 百粒重<br>100-seed weight/g | 产量<br>Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 2017       | LI20            | 66700                                                             | 459.00±54.037a      | 26.25±1.198b             | 8036.5±448.68a                     |
|            | LI10            | 66700                                                             | 281.0±100.694b      | 19.66±0.127c             | 3684.8±367.14b                     |
|            | FI10            | 66700                                                             | 481.00±80.595a      | 27.63±0.384a             | 8864.±1432.29a                     |
|            | FI20            | 66700                                                             | 471.00±43.156a      | 27.2±0.512ab             | 8573.3±465.36a                     |
| 2018       | LI20            | 55583                                                             | 372.5±85.98b        | 25.98±0.98a              | 5379.6±1306.4b                     |
|            | LI10            | 55583                                                             | 403.25±7.56b        | 24.44±0.85a              | 5478.5±244.2b                      |
|            | FI10            | 55583                                                             | 409.75±55.24b       | 24.75±1.60a              | 5636.9±834.5b                      |
|            | FI20            | 55583                                                             | 525±57.88a          | 26.08±0.75a              | 7609.7±827.9a                      |

注:不同处理的小写字母表示  $P<0.05$  水平下具有差异。  
Note: Lowercase letters of different treatments indicate significant differences at the level of  $P<0.05$ .

穗粒数增加了 2.1%,百粒重增加了 1.2%;2018 年灌水定额为 20 mm 比灌水定额为 10 mm 的产量增加 34.9%,穗粒数增加了 28.1%,百粒重增加了 5.4%。  
结果表明,在覆膜条件下,灌水量适量有助于产量的增加。4 个处理之间,覆膜 FI20 的玉米产量构成因素与其他 3 个处理间的差异具有统计学意义。

3 讨 论

Na<sup>+</sup>是盐渍土中主要的阳离子,Na<sup>+</sup>在植物体内过量积累,影响作物对 K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等营养物质的吸收,破坏作物体内的矿质营养平衡,使这些离子质量不足或使阳离子之间的平衡被破坏。作物体内过量地积累 Na<sup>+</sup>是盐渍土地上作物受害、甚至无法生长的主要原因,因此降低作物体内的 Na<sup>+</sup>质量,使之保持在一定范围是作物正常生长的重要前提。覆盖栽培措施,具有抑制返盐和杂草生长的农田生态效应<sup>[17]</sup>。通过覆膜和灌溉的交互作用极显著地降低了玉米根系中的 Na<sup>+</sup>质量。

K<sup>+</sup>是一种重要的渗透调节离子,高浓度 K<sup>+</sup>可以提高植物的耐盐性。K<sup>+</sup>和 Na<sup>+</sup>是两个互为竞争性的元素,耐盐作物往往通过选择性吸收 K<sup>+</sup>,提高 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比来提高作物的抗盐性。K<sup>+</sup>主要存在于植物的茎部。灌溉和覆膜的交互作用极显著地增加了茎部的 K<sup>+</sup>质量,K<sup>+</sup>质量增加有助于交换植物体内的 Na<sup>+</sup>,减轻 Na<sup>+</sup>对作物的离子伤害,有利于作物的生长。

Ca<sup>2+</sup>作为一种重要的信号传导物质,在维持细胞稳定性方面有重要的作用。Ca<sup>2+</sup>主要存在于植物的叶部,Ca<sup>2+</sup>是构成细胞壁的成分之一,适量的 Ca<sup>2+</sup>能够促进作物幼根的生长和根毛的形成,对保持适当的细胞原生质胶体结构有很大的作用,过量的 Ca<sup>2+</sup>,在植物体内积累会形成草酸钙(CaC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)结晶而产生毒害作用。灌溉和覆膜的交互作用极显著地影响了叶部的 Ca<sup>2+</sup>质量,Ca<sup>2+</sup>在盐胁迫下可保护

细胞的膜结构,且不影响植株体内 K<sup>+</sup>的质量,可缓解盐对于玉米的胁迫作用;甚至增加对 K<sup>+</sup>的选择性吸收和运输,从而改善玉米体内的离子平衡。  
Mg<sup>2+</sup>有利于增强植株叶片的光合作用,提高光能利用率,满足植物生长的光能需要,灌溉和覆膜的交互作用极显著地增加了叶部的 Mg<sup>2+</sup>质量,从而增强植株的耐盐性。

覆膜与灌溉对玉米干物质的积累过程影响显著。玉米生育后期,露地和灌水量小的处理干物质累积速度较快,植物体内 Na<sup>+</sup>质量较高,盐胁迫抑制了玉米生长发育,生殖生长与营养生长不协调,在生育后期营养生长仍很旺盛,造成抽穗期以后干物质质量积累总量增加较快,但经济产量降低,与龚江等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。盐胁迫下植物能够通过扩大生长量以平衡盐胁迫对根系吸收功能的损伤<sup>[19]</sup>。

根冠比(R/S)是在环境因素作用下,经过植物体内许多基本变化过程及自我适应、自我调节,最终表现出的综合指标,也是反映植物根系与地上部分生长协调的重要指标。盐碱地种植玉米,覆盖和灌溉措施可以减少植株体内 Na<sup>+</sup>质量,植物处于轻度盐胁迫,生物量分配比例的改变有助于植物适应环境,提高抗盐性,覆盖和灌溉措施能促进作物生长发育和丰产早熟<sup>[20-21]</sup>。

覆膜与适量灌溉玉米的有效穗数、穗粒数和百粒重均较不覆膜和灌水少的处理有较大增加。覆膜栽培方式可提高作物产量29.4%~112.4%<sup>[22]</sup>。

通过以上分析,盐分胁迫影响作物生长,植物体盐分离子质量显著影响作物干物质质量的积累过程,引入盐分因子,建立干物质累积曲线,可更加准确地体现盐分对植株生长的抑制作用。

本文仅用 2 a 的试验数据进行了玉米干物质模型的建立和验证,下一步还需加强试验数据的采集积累,完善模型的参数研究和模型的适用性研究。

# 4 结 论

1)覆膜和灌溉对玉米盐分离子质量的变化影响显著;显著减少了根部  $\text{Na}^+$  吸收质量,成熟期 FI20 处理比 LI10 小 56%,根系对于  $\text{Na}^+$  的截留能力较强,从而减少了盐分对叶片的伤害;玉米  $\text{K}^+$  吸收的主要植株部位为茎部,显著增大了  $\text{K}^+$  的积累质量,成熟期 FI20 处理比 LI10 高 24%,提高了植物的耐盐性;玉米叶部  $\text{Ca}^{2+}$  质量最高,显著增加了  $\text{Ca}^{2+}$  质量,苗期 FI20 处理比 LI10 高 96%,促进了作物幼根的生长和根毛的形成,改善了玉米体内的离子平衡,减轻盐胁迫作用;玉米叶部  $\text{Mg}^{2+}$  质量最高,显著增加了叶部  $\text{Mg}^{2+}$  质量,拔节期 FI20 处理比 LI10 高 136%,增强了植株叶片的光合作用,从而增强植株的耐盐性。

2)玉米地上部和根系干物质重均随着生育期的延长而增加,覆膜和灌溉改变了植物体内盐分离子质量,对玉米生物量的积累影响较大,覆膜且灌水量大的 FI20 处理植株的生物量最大,成熟期 FI20 处理比 LI10 大 1%~46%;对玉米根冠比(R/S)有显著影响,使生物量分配比例显著改变,FI20 处理植株的根冠比较小,成熟期根冠比(R/S)FI20 处理比 LI10 小 48%~52%。

3)采用 Logistic 曲线建立 2017 年干物质生长模拟方程,引入了盐分离子修正系数,拟合方程显著。利用 2018 年玉米试验数据对建立的玉米干物质盐分离子修正模型进行了验证,各个处理的拟合曲线与其实测值都较接近,符合 Logistic 曲线的变化规律;建立的干物质生长模型能够较好的模拟盐碱地玉米干物质的累积过程。

4)对不同处理的玉米产量因素(玉米的有效穗数、穗粒数和百粒重)进行对比研究。覆膜且灌水量大的 FI20 处理植株的产量最大。

综上,覆膜和灌水定额为 20 mm 的 FI20 处理对植株的盐离子调节作用最显著,提高了玉米的耐盐性,改变了生物量的分配比例,获得了适当的干物质累积量,产量最高。

## 参 考 文 献:

[1] 王倩姿,王玉,孙志梅,等.腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J].应用生态学报,2019,30(4):1227-1234.

[2] 张浩,郑云普,叶嘉,等.外源钙离子对盐胁迫玉米气孔特征、光合作用和生物量的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):923-930.

[3] 李广鲁,王文果,陈志新,等.钙对盐胁迫下冰叶日中花不同器官离子含量和根部  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  吸收的影响[J].植物科学学报,2018,36(2):282-290.

[4] 李春宏,郭文琦,张培通,等.土壤盐胁迫降低后甜高粱的补偿生长和盐离子分布特征[J].中国生态农业学报,2016,24(5):637-642.

[5] 王汐妍,裘波音,刘玉姣,等.盐胁迫对不同耐盐性棉花幼苗生长与生理及无机离子器官分布的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2017,43(3):273-280.

[6] 周鹏,张敏.盐胁迫对灌木柳体内离子分布的影响[J].中南林业科技大学学报,2017,37(1):7-11.

[7] 王传娟,张彦群,王建东,等.东北典型区覆膜滴灌春玉米节水增产的光合生理响应[J].农业工程学报,2019,35(24):90-97.

[8] 靳亚红,杨树青,张万锋,等.秸秆与地膜覆盖方式对咸淡交替灌溉模式下水盐调控及玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料,2020,(2):198-205.

[9] 孙博,解建仓,汪妮.不同秸秆覆盖量对盐渍土蒸发、水盐变化的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):246-250.

[10] 王曼华,陈为峰,宋希亮,等.秸秆双层覆盖对盐碱地水盐运动影响初步研究[J].土壤学报,2017,54(6):85-93.

[11] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.

[12] 焦艳平,康跃虎,万书勤,等.干旱区盐碱地覆膜滴灌条件下土壤基质势对糯玉米生长和灌溉水利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):144-151.

[13] 齐广平.膜下滴灌条件下盐碱地根-水-盐耦合机理研究[D].兰州:甘肃农业大学,2007.

[14] 崔党群.Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J].数理统计与管理,2005,24(1):112-115.

[15] 董平国,王增丽,温广贵,等.不同灌溉制度对制种玉米产量和阶段耗水量的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(9):822-828.

[16] 张逸迪,俞双恩,高世凯,等.先旱后涝胁迫下水稻茎蘖及株高动态响应[J].排灌机械工程学报,2018,36(1):77-81.

[17] Murungu F S, Chiduzi C, Muchaonyerwa P, et al. Mulch effects on soil moisture and nitrogen, weed growth and irrigated maize productivity in a warm-temperate climate of South Africa [J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(1):58-65.

[18] 龚江,吕宁,茹思博,等.滴灌条件下盐分对棉花养分及盐离子吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(3):670-676.

[19] 刘雅辉,王秀萍,刘广明,等.滨海盐土区 4 种典型耐盐植物盐分离子的积累特征[J].土壤,2017,49(4):782-788.

[20] Wang T C, Wei L, Wang H Z, et al. Responses of rainwater conservation, precipitation-use efficiency and grain yield of summer maize to a furrow-planting and straw-mulching system in northern China [J]. Field Crops Research, 2011, 124(2):223-230.

[21] Jing M, Li Q K, Cheng X G. Spring maize soil water evaporation variation and its cumulative evaporation under different mulching material at arid region[J]. Advanced Materials Research, 2012, 518-523:4649-4652.

[22] Li F M, Wang J, Xu J Z, et al. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(1):9-20.