文章编号:1000-7601(2020)04-0084-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.04.11

不同灌水处理对滨海盐碱地土壤阳离子组成及玉米干物质累积的影响

王 航[1],周青云[1,2],张宝忠[2,3],马 波[1,2],尹林萍[1,2]

(1.天津农学院水利工程学院,天津 300384;2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100083;
3.国家节水灌溉北京工程技术研究中心,北京 100083)

摘 要:采用田间试验对不同灌水处理灌水后玉米地(天津滨海盐碱地)0~60 cm 土层土壤 K^+/Na^+、Ca^{2+}/Na^+及玉米干物质累积量进行研究,共设计 4 个处理,分别为 LI_{10}(常规滴灌,灌水 10 mm)、LI_{20}(常规滴灌,灌水 20 mm)、FI_{10}(膜下滴灌,灌水 10 mm)和 FI_{20}(膜下滴灌,灌水 20 mm)。结果表明:灌水后不同灌水方式下灌水量较大的处理 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+均大于灌水量较小的处理,且均表现出 0~20 cm 土层 K^+/Na^+较大,40~60 cm 土层 K^+/Na^+较小;相同灌水量下膜下滴灌处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+均较大,灌水后不同灌水处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+差异较小,变化范围为 0.10~0.22;FI_{20}处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+和 Ca^{2+}/Na^+大于其他处理,分别达到 0.78 和0.22;随着灌水次数的增多,LI_{20}和 FI_{10}处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+和 Ca^{2+}/Na^+均逐渐增大,LI_{10}处理则均逐渐减小;灌水后各处理之间 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+和 Ca^{2+}/Na^+差异均达显著水平;全生育期干物质累积量与其对应的 0~20 cm 土层 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$二次拟合相关系数均达 0.90 以上,相同 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$下,FI_{20}处理干物质累积量始终最大,LI_{10}处理始终最小;$(K^+/Na^+)/Ca^{2+}>1.72$ 时,各处理干物质累积量均随 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$的增大而增大。

关键词:盐碱地;灌水方式;膜下滴灌;土壤阳离子;玉米;干物质累积量

中图分类号:S156.4+2 **文献标志码**:A

Effects of different irrigation treatments on cationic composition of soil and dry matter accumulation of maize in coastal saline-alkali area

WANG Hang[1], ZHOU Qingyun[1,2], ZHANG Baozhong[2,3], MA Bo[1,2], YIN Linping[1,2]

(1. *College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin* 300384, *China*;
2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100083, *China*;
3. *National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to investigate the effects of different irrigation treatments on the soil cation composition of the coastal saline-alkali land in Tianjin, a field experiment was carried out to investigate the variation of K^+/Na^+, Ca^{2+}/Na^+ in the 0~60 cm soil and dry biomass accumulation in maize after irrigation. Four different treatments were designed, LI_{10}(conventional drip irrigation, 10 mm), LI_{20}(conventional drip irrigation, 20 mm), FI_{10}(drip irrigation under mulch, 10 mm), and FI_{20}(drip irrigation under mulch, 20 mm), respectively. The results showed that the K^+/Na^+ in 0~60 cm soil layer with higher irrigation amount were higher than those with lower irrigation amount under different irrigation treatments. The K^+/Na^+ in the 0~20 cm soil layer was greater, while the K^+/Na^+ in the 40~60 cm soil layer was lower. The Ca^{2+}/Na^+ ratio was higher in all soil layers of 0~60 cm under mulch drip irrigation with the same irrigation amount, while there was no significant difference among all soil layers of 0~60 cm under different irrigation treatments, with a range of 0.10~0.22. The ratios of K^+/Na^+ and Ca^{2+}/Na^+ in 0~20 cm soil layer treated with FI_{20} were much higher than those in other treatments, reaching 0.78 and 0.22, respectively. With

收稿日期:2020-05-15 **修回日期**:2020-05-25

基金项目:国家自然科学基金(51609170);国家重点研发计划(2019YFC0409203);天津市研究生科研创新项目(2019YJSS101)

作者简介:王航(1997-),男,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail:1845196651@qq.com

通信作者:周青云 (1980-),女,山西运城人,副教授,硕士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术方面的研究。E-mail:zhouqyand@126.com

increasing irrigation times, K^+/Na^+ and Ca^{2+}/Na^+ in 0~20 cm soil layer treated with LI_{20} and FI_{10} were gradually increased, while the treatment with LI_{10} gradually decreased. After irrigation, K^+/Na^+ and Ca^{2+}/Na^+ differences in 0~60 cm soil layers reached significant levels. The dry biomass accumulation in the whole growth period and the correlation coefficient of the 0~20 cm soil layer $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ secondary fitting were all above 0.90, under the same $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ condition, the dry matter accumulation in FI_{20} treatment always reached the maximum and that in LI_{10} treatment was always at the minimum. When $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}>1.72$, the dry matter accumulation of each treatment increased with the increase in $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$.

Keywords: saline-alkali soil; irrigation method; drip irrigation under mulch; soil cation; maize; dry matter accumulation

土壤盐渍化已成为制约我国滨海地区农业可持续发展和生态稳定的重要因素[1]。膜下滴灌为盐碱土的开发利用提供了一种有效的灌水方式,是改善滨海盐碱土比较成功的技术之一。滴灌是局部灌溉,距离滴头较近的范围内,水分充足而盐分较少,形成脱盐区[2],可为作物提供一个水、肥、盐、热环境适宜的生长条件,促进作物生长发育,提高作物产量和水分利用率。

盐碱土对作物生长的危害,不仅来自于耕作层土壤较高的盐分浓度,也来自于盐分离子组成的差异[3]。各类盐分离子的物理和化学特性存在差异,盐分离子之间相互影响、相互作用,盐碱土壤中不同水溶性离子比例对作物生长发育产生重要影响。探求膜下滴灌条件下土壤中离子比例变化规律,揭示土壤剖面上盐分离子的分异特征,对全面掌握土壤盐渍化程度、类型以及对作物的危害有重要意义[4],可为盐渍化土壤的综合治理、改良以及高效利用提供科学依据。

K^+和 Na^+均为单价阳离子,灌水后土壤中大量的 K^+和 Na^+以游离态的形式存在,土壤中水溶性 Na^+较多是造成土壤盐碱化的重要因素。由于降水、灌溉和土壤蒸发的作用,土壤水分入渗状态的交替变化强烈影响各种离子的物理和化学变化[5],Na^+的水化顺序大于 K^+[6],灌水后 Na^+更容易随水分迁移,K^+主要通过扩散作用在土壤中迁移[7]。一般认为,土壤盐分的不利影响与 Na^+毒性相关,这促使人们对其进行了大量研究[8-9]。然而,Na^+浓度的增大总是伴随着暴露于盐(NaCl)胁迫下的植物 K^+损失,土壤中的 Na^+诱导作物根系细胞中的 K^+外流,从而产生 Na^+毒性[10-11],影响作物产量。K^+和 Na^+化学性质不同,与土壤胶体的结合能不同,由于伊利石的存在,K^+对土壤胶体的亲和力大于 Na^+[12],作物对其吸收程度也不同,故 K^+和 Na^+对环境变化的敏感性不同,因此,灌水后盐分离子迁移的次序不同,土壤中 K^+/Na^+比例也不尽相同,通过灌水处理提高根系层土壤的 K^+/Na^+可成为降低根系层 Na^+毒性的一种有效手段。

Ca^{2+}是土壤质量的重要标志,Ca^{2+}在穿过土壤时会与土壤基质发生反应,致使其在土壤水溶液中溶解或沉淀,滴灌对土壤质量的重要影响就是加速了土壤脱 Ca^{2+},使土壤颗粒分散,影响土壤物理状态[13]。已有研究者发现单一盐类比复盐(多种盐并存)的危害要大,即植物在多盐类平衡溶液中要比处在单一盐类或不平衡的混合盐溶液(单盐毒害)中能承受更高的渗透压力。Kopittke[14]进行豇豆根系短期溶液培养研究发现,在含有 K^+的盐渍化培养液中加入 Ca^{2+}可以显著降低 Na^+的毒性作用;Cachorro 等[15]研究表明在盐渍化培养基中增大 Ca^{2+}浓度可降低菜豆根系的 Na^+毒性。灌水淋洗 Na^+的同时也会淋洗掉 Ca^{2+},而 Ca^{2+}的存在可以降低土壤的 Na^+毒性,通过灌水处理提高根系层土壤的 Ca^{2+}/Na^+可成为降低根系层 Na^+毒性的一种有效手段。

大量学者[8-9]针对 Na^+单盐对作物的毒害作用进行了研究,也有学者[14-15]对改善培养液中 K^+、Na^+及 Ca^{2+}比例从而改善 Na^+对作物的毒害作用进行了研究,但是国内外学者对田间条件下不同灌水方式对滨海盐碱地 K^+/Na^+以及 Ca^{2+}/Na^+的影响及作物干物质累积量与 K^+、Na^+和 Ca^{2+}关系的研究少见报道。因此,本研究主要探讨不同灌水处理土壤剖面 Ca^{2+}/Na^+和 K^+/Na^+的变化规律以及 Ca^{2+}和 K^+在减轻 Na^+毒性方面的效果。

1　材料与方法

1.1　试验地基本情况

田间试验于玉米生育期(2018 年 5—8 月)进行,试验区位于天津市津南区葛沽镇(N38°98′,E117°38′),该区地处华北平原东北部,海河流域下游,属海积与河流冲积形成的平原区,为典型盐碱化地区。多年平均降水量 556.4 mm,多集中在 6—8

月,年平均蒸发量为 1 809.6 mm,年平均日照时数 2 659.0 h,年平均无霜期 206 d,地下水埋深为 1 m,1 m 土层土质多为粘壤土。

1.2 试验设计

试验设置 4 个处理,分别为灌水量 10 mm 常规滴灌处理(LI_{10})、灌水量 20 mm 常规滴灌处理(LI_{20})、灌水量 10 mm 膜下滴灌处理(FI_{10})、灌水量 20 mm 膜下滴灌处理(FI_{20}),玉米全生育期内 2 次灌溉灌水量及灌溉定额见表 1。春玉米(郑丹 958)的种植模式如图 1 所示,行距为 60 cm,株距为 30 cm,滴灌带间距为 60 cm,滴头间距为 30 cm;灌溉方式为常规滴灌和膜下滴灌,覆膜方式为一膜两管两行半覆膜,膜宽为 80 cm,滴头布置在玉米茎秆处,滴头流量为 1.38 L·h^{-1}。各处理沿玉米行距方向距植株水平距离为 30 cm 处取样,深度分别为 0~20、20~40、40~60 cm,每个处理 3 次重复;玉米全生育期内灌水量、降水量、日均气温及参考作物蒸散量如图 2 所示,试验地阳离子成分本底值及土壤物理特性如表 2 所示。

1.3 土壤阳离子及玉米干物质量测定

在实验室将土样自然风干后过 1 mm 土壤标准筛,取水土比为 5∶1 的土壤浸提液,用火焰分光光度计(FP 640)测定土壤水溶性 Na^+、K^+ 浓度,用 EDTA 络合滴定法测定土壤水溶性 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度。每个处理取 6 株长势均匀、具有代表性的玉米植株,样品处理干净后,置烘箱 105℃杀青 30 min 后 80℃烘干至恒重,称量其干物质累积量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行整理;运用 IBM SPSS Statistics 24 统计软件进行二因素方差分析;相关图表制作采用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2017 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理灌水前后土壤剖面离子比变化

2.1.1 K^+/Na^+ 由图 3、图 4 和图 5 可知,灌水后不同灌水方式下灌水量较大的处理 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+ 均大于灌水量较小的处理,且均表现出 0~20 cm 土层 K^+/Na^+ 较大,40~60 cm 土层 K^+/Na^+ 较小,灌水量较小的处理则规律不明显。第 1 次灌水后,4 个处理均表现出 0~20 cm 土层 K^+ 浓度显著高于 20~60 cm 土层,K^+ 浓度显著增大导致 K^+/Na^+ 较大;FI_{20} 处理 0~40 cm 土层 K^+/Na^+ 较大,FI_{10} 和 LI_{20} 处理 0~40 cm 土层 K^+/Na^+ 较小,Na^+ 浓度相对较大,土壤盐渍化较为严重。第 2 次灌水后,LI_{20} 和 FI_{20} 处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+ 显著大于 20~60 cm 土层,LI_{10}、LI_{20} 和 FI_{20} 处理随深度加深均表现出先减小后增大,FI_{10} 处理则逐渐减小。

表 1 玉米全生育期灌水处理

Table 1 Maize irrigation treatment in the whole growth period

处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount/mm		灌溉定额 Irrigation quota/mm	灌水时间 Irrigation time (m-d)
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage		
LI_{10}	10	10	20	06-22、07-06
LI_{20}	20	20	40	
FI_{10}	10	10	20	
FI_{20}	20	20	40	

表 2 试验地土壤阳离子成分本底值及土壤物理特性

Table 2 Background value of cationic composition and soil physical properties

土层深度/cm Soil depth	Ca^{2+} /(g·kg^{-1})	Mg^{2+} /(g·kg^{-1})	Na^+ /(g·kg^{-1})	K^+ /(g·kg^{-1})	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm^{-3})	饱和含水率 Saturated water content /(cm^3·cm^{-3})	田间持水率 Field water holding rate /(cm^3·cm^{-3})
0~20	0.198	0.053	1.648	0.450	1.42	0.45	0.25
20~40	0.155	0.057	1.571	0.237	1.69	0.42	0.27
40~60	0.150	0.062	1.512	0.231	1.16	0.49	0.26

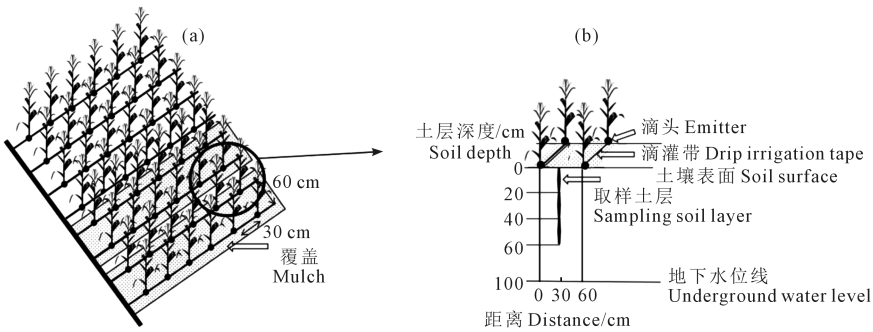

图 1 田间试验平面布置(a,水平;b,垂直)

Fig.1 Field test layout (a, horizontal; b, vertical)

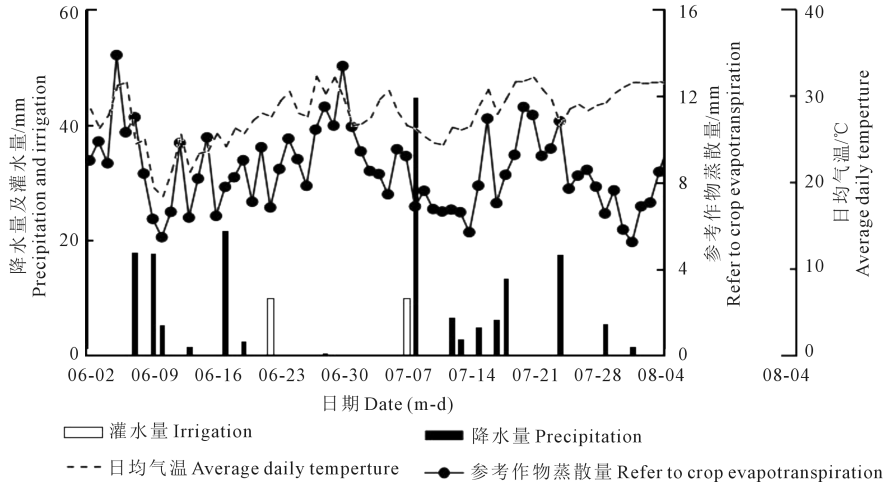

图 2　玉米全生育期内灌水量、降水量、日均气温及参考作物蒸散量

Fig.2　Irrigation amount, precipitation, average daily air temperature and reference crop evapotranspiration during the whole growth period of maize

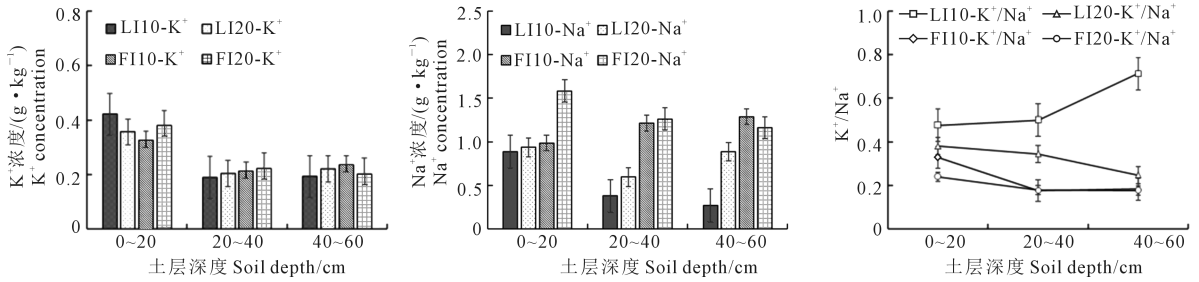

图 3　灌水前土壤剖面 K^+、Na^+和 K^+/Na^+

Fig.3　K^+, Na^+ and K^+/Na^+ in soil profile before irrigation

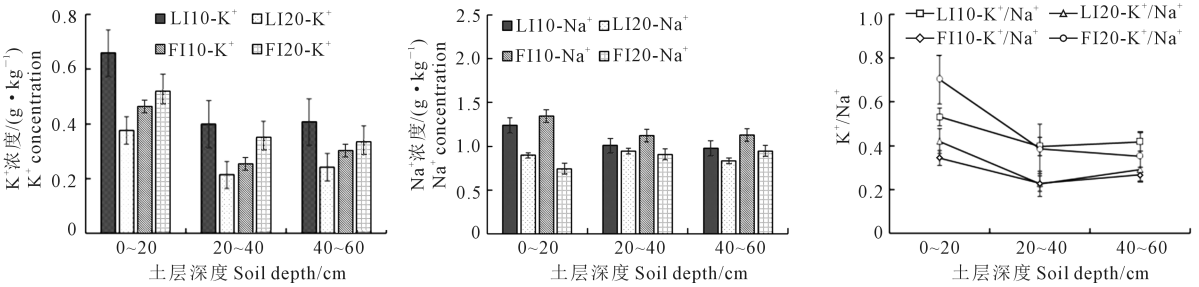

图 4　第 1 次灌水后土壤剖面 K^+、Na^+和 K^+/Na^+

Fig.4　K^+, Na^+ and K^+/Na^+ in soil profile after the first irrigation

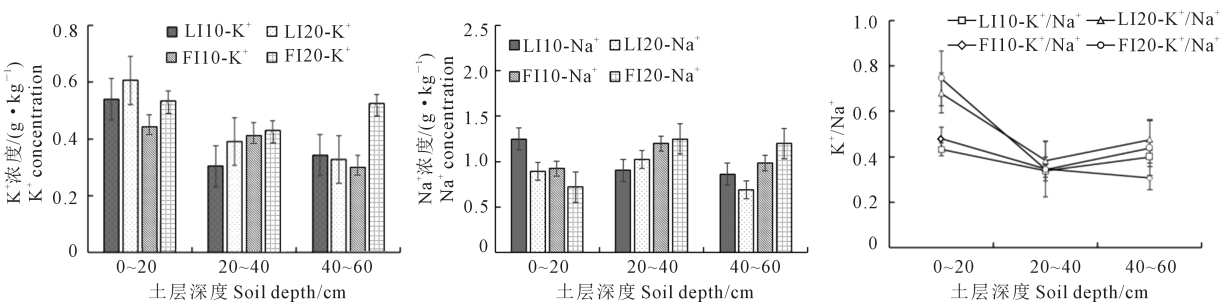

图 5　第 2 次灌水后土壤剖面 K^+、Na^+和 K^+/Na^+

Fig.5　K^+, Na^+ and K^+/Na^+ in soil profile after the second irrigation

2.1.2 Ca^{2+}/Na^{+} 由图 6、图 7 和图 8 可知,灌水前后膜下滴灌处理 Ca^{2+}/Na^{+}随深度加深均先减小后增大,常规滴灌处理则规律不明显;灌水后膜下滴灌处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^{+}均较大,不同灌水处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^{+}差异较小,在 0.10~0.22。第 1 次灌水后 FI_{20}处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^{+}均显著大于其他处理;LI_{10}和 LI_{20}处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}/Na^{+}较灌水前均显著减小,其中 LI_{10}处理降幅较大;第 2 次灌水后 4 个处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}/Na^{+}均无明显变化,FI_{20}处理 20~40 cm 土层 Ca^{2+}/Na^{+}小幅减小,LI_{10}处理 20~40 cm 土层 Ca^{2+}/Na^{+}小幅增大;LI_{20}处理 40~60 cm 土层 Ca^{2+}/Na^{+}小幅增大。

2.2 不同灌水处理对土壤剖面离子比的影响

2.2.1 K^{+}/Na^{+} 由图 3、图 4 和图 5 可知,灌水前不同灌水处理 0~20 cm 土层 K^{+}/Na^{+}表现出 LI_{10}处理>LI_{20}处理>FI_{10}处理>FI_{20}处理,灌水后 FI_{20}处理 K^{+}/Na^{+}显著增大,FI_{10}处理增幅较小,LI_{10}和 LI_{20}处理变化不明显;灌水前不同灌水处理 20~60 cm 土层 K^{+}/Na^{+}表现出 LI_{20}处理>FI_{10}处理>FI_{20}处理,灌水后则表现出 FI_{20}处理>LI_{20}处理>FI_{10}处理,较大的灌水量提高了 20~60 cm 土层 K^{+}/Na^{+},膜下滴灌增幅较大;随着灌水次数的增多 LI_{20}和 FI_{10}处理 0~20 cm 土层 K^{+}/Na^{+}逐渐增大,LI_{10}处理则逐渐减小,FI_{20}处理则一直保持较大的 K^{+}/Na^{+},达到 0.78。LI_{10}处理由于灌水量少,灌水对各土层 K^{+}和 Na^{+}淋洗程度较

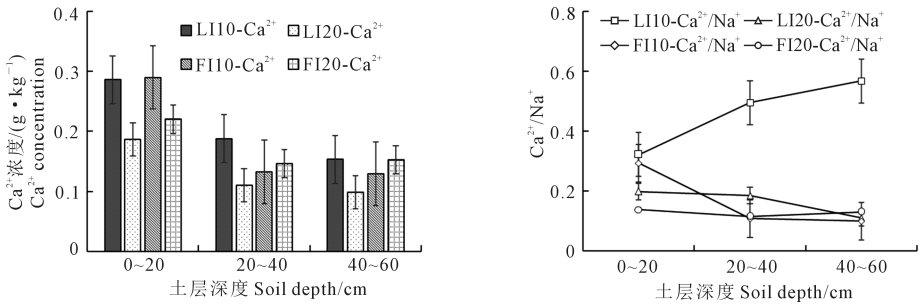

图 6 灌水前土壤剖面 Ca^{2+}和 Ca^{2+}/Na^{+}

Fig.6 Ca^{2+} and Ca^{2+}/Na^{+} in soil profile before irrigation

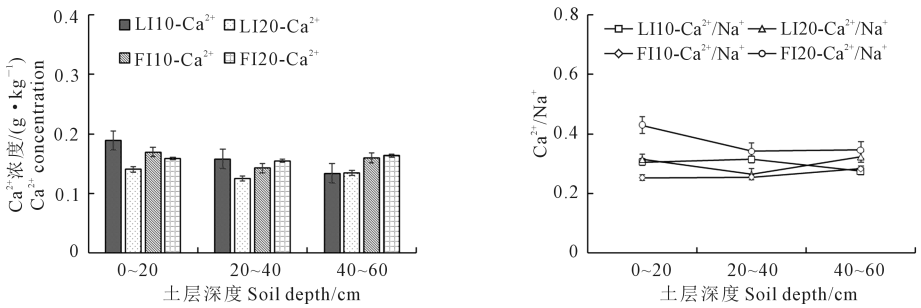

图 7 第 1 次灌水后水土壤剖面 Ca^{2+}和 Ca^{2+}/Na^{+}

Fig.7 Ca^{2+} and Ca^{2+}/Na^{+} in soil profile after the first irrigation

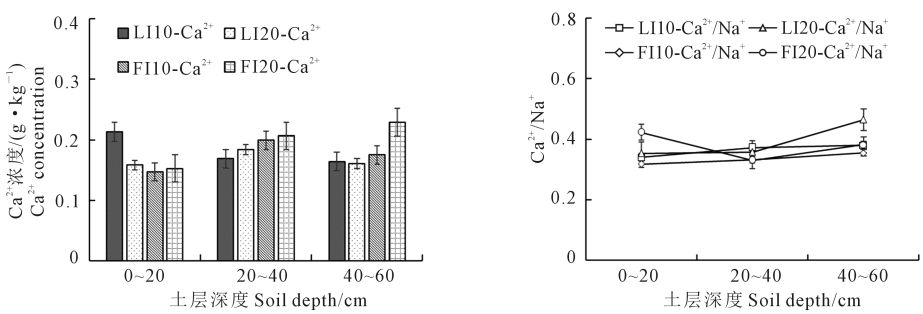

图 8 第 2 次灌水后土壤剖面 Ca^{2+}和 Ca^{+}/Na^{+}

Fig.8 Ca^{2+} and Ca^{2+}/Na^{+} in soil profile after the second irrigation

弱,研究区域地下水位较高且由于土壤蒸发较为强烈,各土层 K^+ 和 Na^+ 浓度均增大,灌水前 LI_{10} 处理各土层 K^+/Na^+ 较大,LI_{10} 处理灌水后各土层仍然表现出较大的 K^+/Na^+。

第 1 次灌水后 4 个处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+ 变化范围较大,为 0.3~0.8,20~40 cm 和 40~60 cm 土层变化范围较小,分别为 0.2~0.4 和 0.3~0.5。第 1 次灌水后,常规滴灌处理 K^+ 和 Na^+ 随土壤水分蒸发向上迁移,LI_{10} 和 LI_{20} 处理 0~60 cm 土层 K^+ 和 Na^+ 浓度均不同程度增大,土壤剖面 0~20 cm 土层 K^+ 和 Na^+ 浓度均达到最大,灌水前后土壤中 K^+ 和 Na^+ 均存在表聚现象;灌水后 LI_{10} 和 LI_{20} 处理 20~40 cm 土层 K^+ 和 Na^+ 增幅较大,而 FI_{10} 和 FI_{20} 处理 20~40 cm 土层 Na^+ 浓度均减小,膜下滴灌处理下灌水对 20~40 cm 土层 Na^+ 产生了有效淋洗,灌水量越大淋洗效果越明显。FI_{10} 和 FI_{20} 处理 20~40 cm 土层 K^+ 浓度均增大,灌水量越大 K^+ 增幅越大,K^+/Na^+ 也越大。

第 2 次灌水后 4 个处理 0~20 cm 和 40~60 cm 土层 K^+/Na^+ 范围较大,分别为 0.4~0.7 和 0.3~0.5,20~40 cm 土层 K^+/Na^+ 变化范围较小,为 0.3~0.4,相较第 1 次灌水有所增大;0~20 cm 土层 K^+/Na^+ 表现出 FI_{20} 处理>LI_{20} 处理>FI_{10} 处理>LI_{10} 处理,较大的灌水量有利于提高 0~20 cm 土层土壤 K^+ 浓度,从而提高 K^+/Na^+,灌水量较小的处理 0~20 cm 土层 K^+ 浓度均减小,其中 LI_{10} 处理降幅较大。20~60 cm 土层 K^+/Na^+ 均表现出 LI_{20} 处理>FI_{20} 处理>LI_{10} 处理>FI_{10} 处理,LI_{20} 处理 K^+/Na^+ 显著增大,第 2 次灌水之后降雨量增大,对常规滴灌处理 20~60 cm 土层土壤 Na^+ 淋洗程度较大,导致 K^+/Na^+ 显著增大。

2.2.2　Ca^{2+}/Na^+　由图 6、图 7 和图 8 可知,灌水前不同灌水处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 表现出 LI_{10} 处理>FI_{10} 处理>LI_{20} 处理>FI_{20} 处理,灌水后 FI_{20} 处理 Ca^{2+}/Na^+ 显著增大,达到 0.22,LI_{10} 处理则显著减小,仅为 0.17。灌水后 LI_{20} 和 FI_{20} 处理 0~60 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 均先减小后增大,LI_{10} 和 FI_{10} 处理 0~60 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 均逐渐增大,较大的灌水量将表层较多的 Na^+ 淋洗到 20~40 cm 土层,导致 20~40 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 较小;较小的灌水量对表层 Na^+ 淋洗程度较弱,0~60 cm 土层 Na^+ 浓度逐渐减小导致 Ca^{2+}/Na^+ 逐渐增大,FI_{20} 处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 远远大于 LI_{20} 处理和 FI_{10} 处理,膜下滴灌处理下较大的灌水量对表层土壤 Na^+ 产生有效淋洗,充分降低了土壤 Na^+ 毒性。LI_{10} 处理各土层土壤初始 Ca^{2+} 浓度较大,较小的灌水量对各土层 Ca^{2+} 淋洗程度较弱,导致 LI_{10} 处理灌水后 0~60 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 均大于 LI_{20} 处理。

第 1 次灌水后 4 个处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+} 浓度均下降,膜下滴灌处理和常规滴灌处理灌水量较大时 0~20 cm 土层 Ca^{2+} 浓度降幅较小,较大的灌水量提高了土壤中 Ca^{2+} 的溶解性,导致灌水对 0~20 cm 土层 Ca^{2+} 淋洗程度较弱。第 1 次灌水后 FI_{20} 处理 20~60 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+ 均显著增大,其中 20~40 cm 土层增幅较大,FI_{10} 处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+ 则变化不明显,灌水后 FI_{20} 处理显著降低了 20~60 cm 土层 Na^+ 浓度,导致 Ca^{2+}/Na^+ 显著增大,FI_{10} 处理 20~60 cm 土层 Ca^{2+} 和 Na^+ 变化幅度均不明显,所以 Ca^{2+}/Na^+ 变化不明显。1 次灌水后 LI_{10} 处理灌水量少,土壤蒸发强烈,导致 Ca^{2+} 和 Na^+ 均出现表聚现象,由于 Na^+ 更容易随水分蒸发向上迁移,导致 LI_{10} 处理 0~60 cm 各土层 Na^+ 浓度显著增大,Ca^{2+}/Na^+ 均显著减小。由于灌水前 LI_{10} 处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+} 浓度均较大,达到 0.15~0.29 g·kg^{-1},经过 1 次灌水的淋洗后,LI_{10} 处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+} 浓度降幅均较大。

第 2 次灌水后 LI_{20} 和 LI_{10} 处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+} 浓度均增大,FI_{10} 和 FI_{20} 处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+} 浓度均减小,FI_{10} 处理 20~40 cm 土层 Ca^{2+} 浓度增大,FI_{20} 处理减小;FI_{10} 和 FI_{20} 处理 40~60 cm 土层 Ca^{2+} 浓度均增大,其中 FI_{20} 处理增幅较大。膜下滴灌处理下随着灌水次数和灌水量的增大,土壤剖面水溶性 Ca^{2+} 浓度和淋洗深度逐渐增大。

2.3　不同灌水处理对土壤离子比的影响因素分析

为进一步分析不同灌水量和灌水方式与 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 的关系,对 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 分别与灌水量和灌水方式进行二因素方差分析(表 3 和表 4)。方差分析结果表明,第 1 次灌水后不同灌水方式下不同灌水量之间 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+ 差异达显著水平;第 2 次灌水后同一灌水方式下不同灌水量之间 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+ 差异达显著水平。第 1 次灌水后不同灌水方式下不同灌水量之间 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+ 差异达显著水平;第 2 次灌水后不同灌水量和不同灌水方式之间 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+ 差异均不显著。

表 3 灌水后土壤中 K^+/Na^+ 分别与灌水量和灌水方式的二因素方差分析

Table 3 Two-factor variance analysis of K^+/Na^+ in the soil after irrigation and irrigation amount and irrigation method, respectively

指标 Indicator	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	*F*	*P*
第 1 次灌水后 After the first irrigation	灌水量 Irrigation amount	0.003	1	0.003	0.223	0.108
	灌水方式 Irrigation method	0.000	1	0.000	0.000	0.166
	灌水量×灌水方式 Irrigation amount×Irrigation method	0.085	1	0.085	6.046	0.039
	误差 Error	0.113	8	0.014	–	–
	总变异 Total variation	1.937	12	–	–	–
第 2 次灌水后 After the second irrigation	灌水量 Irrigation amount	0.049	1	0.049	2.516	0.041
	灌水方式 Irrigation method	0.000	1	0.000	0.010	0.923
	灌水量×灌水方式 Irrigation amount×Irrigation method	0.000	1	0.000	0.004	0.954
	误差 Error	0.155	8	0.019	–	–
	总变异 Total variation	2.602	12	–	–	–

表 4 灌水后土壤中 Ca^{2+}/Na^+ 分别与灌水量和灌水方式的二因素方差分析

Table 4 Two-factor variance analysis of Ca^{2+}/Na^+ in soil after irrigation and irrigation amount and irrigation method, respectively

指标 Indicator	变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	*F*	*P*
第 1 次灌水后 After the first irrigation	灌水量 Irrigation amount	0.002	1	0.002	9.026	0.017
	灌水方式 Irrigation method	0.000	1	0000	1.005	0.346
	灌水量×灌水方式 Irrigation amount×Irrigation method	0.002	1	0.002	8.269	0.021
	误差 Error	0.002	8	0.000	–	–
	总变异 Total variation	0.293	12	–	–	–
第 2 次灌水后 After the second irrigation	灌水量 Irrigation amount	0.001	1	0.001	2.222	0.174
	灌水方式 Irrigation method	0.000	1	0.000	0.809	0.395
	灌水量×灌水方式 Irrigation amount×Irrigation method	0.000	1	0.000	0.107	0.752
	误差 Error	0.003	8	0.000	–	–
	总变异 Total variation	0.409	12	–	–	–

注：$P<0.05$ 差异显著。

Note: $P<0.05$ indicate significant difference.

2.4 不同灌水处理下玉米植株干物质累积量与根系层离子比的关系

土壤 K^+/Na^+ 影响着作物的耐盐性，对作物的干物质累积产生重要影响，提高盐渍化土壤中的 Ca^{2+} 浓度可以有效降低 Na^+ 毒性，但土壤中 Ca^{2+} 浓度过高时会抑制作物的生长[15]，通过建立作物干物质累积与根系层土壤 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ 的关系式可定量分析根系层土壤 K^+/Na^+ 和 Ca^{2+} 浓度对干物质累积的影响，从而为合理施用 Ca^{2+} 肥提供理论基础。

各个生育期玉米的根系主要分布在 0～20 cm 土层，0～20 cm 土层 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ 对作物干物质量的累积产生重要影响。分别对每个处理玉米全生育期干物质累积量与其对应的 0～20 cm 土层 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ 进行二次拟合（见图 9），结果显示 4 个处理拟合相关系数均达 0.90 以上，相关系数 FI_{20} 处理>LI_{20} 处理>LI_{10} 处理>FI_{10} 处理；各处理干物质累积量与 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ 均随生育期进程而逐渐增

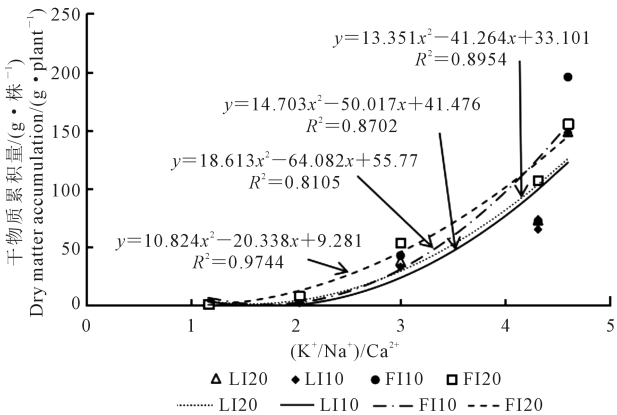

图 9 不同灌水处理玉米植株干物质累积量与土壤中 $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ 的关系

Fig.9 Relationship between dry matter accumulation of maize and $(K^+/Na^+)/Ca^{2+}$ in soil under different irrigation treatments

大;作物全生育期内相同(K^+/Na^+)/Ca^{2+}下,FI_{20}处理干物质累积量始终最大,LI_{10}处理始终最小。(K^+/Na^+)/Ca^{2+}>1.72 时,各处理干物质累积量均随(K^+/Na^+)/Ca^{2+}的增大而增大;1.3<(K^+/Na^+)/Ca^{2+}<2.7 时,FI_{20}和 LI_{20}处理干物质累积量较大,FI_{10}和 LI_{10}处理干物质累积量较小,较大的灌水处理有利于作物干物质积累;(K^+/Na^+)/Ca^{2+}>2.7 时,FI_{20}和 FI_{10}处理干物质累积量较大,LI_{20}和 LI_{10}处理干物质累积量较小,相同灌水量下覆膜处理有利于作物干物质累积。

3　讨　论

灌水后 4 个处理土壤 K^+/Na^+沿深度加深均表现出先减小后增大的趋势,作物根系主要分布于 0~20 cm 土层[16],20~40 cm 土层 K^+迁移至 0~20 cm 土层以满足作物生长的需求,导致 20~40 cm 土层 K^+浓度较小;Na^+水化顺序大于 K^+,灌水后更容易受到灌水的淋洗,0~20 cm 土层 Na^+淋洗到 20~40 cm 土层,水溶性 Na^+浓度增大导致交换性 K^+浓度下降,降低水溶性 K^+浓度,与刘秀梅[17]的研究结果相似。灌水为作物生长创造了良好的根际环境,作为作物养分循环的主导元素,K^+更容易在作物主要根系层 0~20 cm 土层内集聚[18]。第 1 次灌水后,LI_{10}和 FI_{10}处理 0~20 cm 土层 Na^+浓度均显著增大,灌水量较小时对 0~20 cm 土层 Na^+淋洗程度较弱,这段时间未降水且日均气温较高,土壤蒸发强烈导致 LI_{10}处理 Na^+随土壤水分蒸发向 0~20 cm 土层迁移较多,但由于 LI_{10}处理 K^+向 0~20 cm 土层迁移程度更大,所以 LI_{10}处理具有较大的 K^+/Na^+;FI_{10}处理一方面由于灌水对 Na^+淋洗较少,另一方面由于 0~20 cm 土层 K^+浓度增大导致土壤胶体表面 K^+和 Na^+交换作用强烈,交换性 Na^+转化成水溶性 Na^+较多,导致 FI_{10}处理 Na^+浓度增大,由于 FI_{10}处理 K^+浓度增幅较小,所以 FI_{10}处理 K^+/Na^+较小。虽然 LI_{10}处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+较大,但是由于其 Na^+浓度较大,且灌水量较少,Na^+对作物的毒害作用较大导致灌水后玉米植株干物质量最小;FI_{20}处理灌水对 Na^+淋洗程度较大,土壤中较大的 K^+/Na^+减小了 Na^+对作物生长的毒害作用,所以作物干物质量累积较大。

土壤蒸发较强烈时常规滴灌处理表层土壤容易积盐,由于灌水量有限,仅将表层土壤盐分淋洗到 20~40 cm 土层,导致常规滴灌处理 20~40 cm 土层出现明显的盐分积累。LI_{10}处理一方面由于灌水量较小,较大的土壤蒸发使得表层土壤积聚大量 K^+和 Na^+,另一方面较小的灌水量对 20~40 cm 土层较多的 K^+淋洗程度较小,导致 K^+/Na^+较大。膜下滴灌处理 0~20 cm 土层 K^+浓度较大,20~40 cm 土层的 K^+通过扩散作用向 0~20 cm 土层(作物根区)聚集能力较弱[19],所以 20~40 cm 土层 K^+浓度较大。FI_{10}和 FI_{20}处理 20~40 cm 土层水溶性 Na^+浓度均减小,所以交换性 Na^+也减少,导致交换性 K^+转换成水溶性 K^+,使得 20~40 cm 土层水溶性 K^+浓度增大,与刘秀梅[17]的研究结果相似。膜下滴灌处理 20~40 cm 土层土壤含水量较大、温度较高,有利于土壤胶体交换性盐基离子的相互转化。

两次灌水后,膜下滴灌处理 Ca^{2+}/Na^+沿深度加深均先减小后增大,常规滴灌处理则变化规律不一致,膜下滴灌处理土壤保墒作用明显,两次灌水虽然对 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}和 Na^+淋洗效果不一致,但是有利于维持灌水后土壤剖面稳定的 Ca^{2+}/Na^+,Ca^{2+}和 Na^+对维持土壤团聚体的稳定性有重要作用,土壤剖面稳定的 Ca^{2+}/Na^+为作物生长创造适宜的环境。两次灌水后,膜下滴灌处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}浓度均减小,但 FI_{20}处理第 1 次灌水后 40~60 cm 土层 Ca^{2+}浓度最大且增幅较小,第 2 次灌水后 40~60 cm 土层 Ca^{2+}浓度最大且增幅较大,说明灌水后 FI_{20}处理将较多的 Ca^{2+}淋洗到 40~60 cm 土层,也可能是由于较大的灌水量提高了 40~60 cm 土层 Ca^{2+}的溶解性。第 2 次灌水后,常规滴灌处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}浓度均增大,膜下滴灌处理 0~20 cm 土层 Ca^{2+}浓度均减小,由于膜下滴灌处理对土壤表层保墒效果显著,灌水对表层土壤 Ca^{2+}淋洗作用较强;常规滴灌处理随着气温的回升和土温的增大,土壤微生物环境得到明显改善,植物根系活动所释放的有机酸和酶类物质对土壤中 $CaCO_3$产生活化作用,使得土壤中的 Ca^{2+}浓度不断增大[20],由于表层土壤含水率较低,导致灌水对 Ca^{2+}的淋洗作用较弱。

大多研究者均发现适当提高盐渍化土壤中的 Ca^{2+}浓度可以有效降低 Na^+毒性[15],但土壤中 Ca^{2+}浓度过高时会抑制作物的生长[21-22]。玉米生育期前期根、茎生长较旺盛,对 Ca^{2+}的需求量较大[19],根系层 Ca^{2+}浓度较大时有利于干物质量的累积。随着生育期进程植株叶片为了维持干旱胁迫和盐胁迫条件下基质中较高浓度的 K^+而对根系层土壤中 K^+的需求量较大[19],Ca^{2+}浓度较大时影响作物对 K^+的吸收,所以(K^+/Na^+)/Ca^{2+}越小,即 Ca^{2+}相对浓度较大,作物干物质累积量越少,这与朱义等[22]的研究结果相似;(K^+/Na^+)/Ca^{2+}较小时,Na^+相对浓度较大,较大的灌水有利于改善根际环境,减小 Na^+毒

性,促进作物干物质累积;(K^+/Na^+)/Ca^{2+}较大时,Ca^{2+}相对浓度较小,覆膜处理有利于增温保墒,改善作物根际环境,促进干物质累积。

土壤中的 Mg^{2+}对作物的生长发育至关重要,但在盐碱地中过高的 Mg^{2+}浓度对作物的生长产生伤害[23],本研究区土壤中 Mg^{2+}浓度 0.02~0.1 g·kg^{-1},约占总盐分浓度的 1.5%,但其对作物生长的伤害不容忽视。不同灌水处理对 Mg^{2+}和其他阳离子之间的相互作用的影响以及这种作用对作物生长的伤害机制仍需深入研究。

4 结 论

1)相同灌水方式下 0~60 cm 各土层均表现出灌水量越大 K^+/Na^+越大;灌水后 LI_{20}和 FI_{20}处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+较大,40~60 cm 土层 K^+/Na^+较小,FI_{20}处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+显著增大,FI_{10}处理增幅较小,LI_{10}和 LI_{20}处理变化不明显;随着灌水次数的增多 LI_{20}和 FI_{10}处理 0~20 cm 土层 K^+/Na^+增大,LI_{10}处理则减小,FI_{20}处理则一直保持较大的 K^+/Na^+,达到 0.78。

2)灌水前后膜下滴灌处理 Ca^{2+}/Na^+随深度加深均先减小后增大,常规滴灌处理则规律不明显;不同灌水处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+差异较小,均为 0.10~0.22;灌水后膜下滴灌处理 0~60 cm 各土层 Ca^{2+}/Na^+均较大,FI_{20}处理 Ca^{2+}/Na^+显著增大,达到 0.22。膜下滴灌处理将表层较多的 Na^+淋洗到 20~40 cm 土层,导致 20~40 cm 土层 Ca^{2+}/Na^+较小,灌水量越大,表层土壤 Na^+淋洗程度越明显。

3)灌水后不同灌水方式下不同灌水量之间 0~60 cm 各土层 K^+/Na^+和 Ca^{2+}/Na^+差异均达显著水平。

4)全生育期干物质累积量与其对应的 0~20 cm 土层(K^+/Na^+)/Ca^{2+}二次拟合相关系数均达0.90以上,相同(K^+/Na^+)/Ca^{2+}下,FI_{20}处理干物质累积量始终最大,LI_{10}处理始终最小;(K^+/Na^+)/Ca^{2+}>1.72 时,各处理干物质累积量均随(K^+/Na^+)/Ca^{2+}的增大而增大。

参 考 文 献:

[1] 宫宾.不同地区的滨海盐碱地园林绿化技术对比研究[C]//IFLA 亚太区,中国风景园林学会,上海市绿化和市容管理局.2012 国际风景园林师联合会(IFLA)亚太区会议暨中国风景园林学会 2012 年会论文集(下册).上海:中国风景园林学会,2012:272-276.

[2] 吕殿青,王全九,王文焰,等.膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J].土壤学报,2002,39(6):794-801.

[3] Eshel Bresler, Brian L. McNeal, Daivd L. Carter. Saline and sodic soils[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982:167-181.

[4] 刘文全,于洪军,徐兴永.莱州湾南岸土壤剖面盐分离子分异规律研究[J].土壤学报,2014,51(6):1213-1222.

[5] Ozturk H S, Ozkan I. Effects of Evaporation and Different Flow Regimes on Solute Distribution in Soil[J].Transport in Porous Media, 2004, 56(3): 245-255.

[6] Stevenson F J. Humus Chemistry: Genesis, Composition, reactions [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1982:198-206.

[7] Du Y J, Hayashi S, Liu S Y, et al. Experimental study of migration of potassium ion through a two-layer soil system[J]. Environmental Earth Sciences, 2005, 48(8): 1096-1106.

[8] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008,59:651-681

[9] Hanin M, Ebel C, Ngom M, et al. New insights on plant salt tolerance mechanisms and their potential use for breeding[J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7:1787.

[10] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(6): 371-379.

[11] Gupta B, Huang B R. Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular haracterization[J]. International Journal of Genom, 2014,(7):1-8.

[12] Jalali M, Arian T M, Ranjbar F, et al. Selectivity coefficients of K, Na, Ca, and Mg in binary exchange systems in some calcareous soils [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2): 80-93.

[13] 郭全恩,王益权,南丽丽,等.不同溶质及矿化度对土壤溶液盐离子的影响[J].农业工程学报,2019,35(11):105-111.

[14] Kopittke P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: Alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1): 353-362.

[15] Cachorro P, Ortiz A, Cerda A, et al. Implications of calcium nutrition on the response of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity[J]. Plant and Soil, 1994, 159(2):205-212.

[16] 杨青华,高尔明,马新明.不同土壤类型对玉米根系干重变化及其分布的影响[J].土壤通报,2001,(5):238-240.

[17] 刘秀梅,王渌,王华田,等.磁化微咸水灌溉对土壤交换性盐基离子组成的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):266-271.

[18] 张玉革,梁文举,姜勇,等.不同利用方式对潮棕壤交换性钾钠及盐基总量的影响[J].土壤通报,2008,(4):816-821.

[19] 李春俭.高级植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,2008:136-138.

[20] 周丽,王玉刚,李彦,等.盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响[J].干旱区地理,2013,36(2):285-290.

[21] Yeo A R, Flowers T J. The absence of an effect of the Na/Ca ratio on sodium chloride uptake by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. New Phytologist, 1985,99(1):81-90.

[22] 朱义,何池全,杜玮,等.盐胁迫下外源钙对高羊茅种子萌发和幼苗离子分布的影响[J].农业工程学报,2007,23(11):133-137.

[23] 郭全恩,王益权,南丽丽,等.灌水定额对旱区苹果园土壤水盐再分布的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1863-1870.