

# 设施灌溉条件下不同次生盐渍化土壤盐分离子迁移特征\*

李卫 郑子成 李廷轩 余海英 曾礼

(四川农业大学资源环境学院, 雅安 625014)

**【摘要】** 通过在设施灌溉条件下的室内土柱模拟试验,研究了灌水对不同次生盐渍化水平设施土壤盐分离子迁移特征的影响。结果表明:Ca<sup>2+</sup>与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在灌水后5~15 d表现出随时间的推移剖面分布呈“双峰”特性,随着次生盐渍化水平的升高, Ca<sup>2+</sup>与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>淋洗速度变慢同时其返盐时间也较迟。地下水对K<sup>+</sup>迁移影响不显著,使得K<sup>+</sup>在灌水后剖面分布呈“单峰”特性,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在所有次生盐渍化水平下一次性灌水很难将其淋洗出耕层。从环境因素看, Ca<sup>2+</sup>在土层的表层和底层以及灌水后期都表现出与水分和温度较好的耦合效应,并且两者对Ca<sup>2+</sup>运移具有协同作用。K<sup>+</sup>在0~20 cm土层运移主要受水分的影响,而30~50 cm土层主要受温度的影响,从灌水时间看,在灌水后5~15 d内主要受温度影响,而灌水20 d后主要受水分影响。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>不论从土层还是时间看主要受水分的影响较大。

**关键词:** 设施土壤 水盐运移 水热耦合 次生盐渍化

**中图分类号:** S625.5; S156.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)05-0092-08

## Effects of Salt Ions Transport on Different Levels of Secondary Salinization Soil under Greenhouse Irrigation

Li Wei Zheng Zicheng Li Tingxuan Yu Haiying Zeng Li

(College of Resource and Environment Science, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

### Abstract

The salt ions distribution at different levels of secondary salinization of greenhouse soil under the same irrigation was investigated through soil columns in lab. The results were as follows: Ca<sup>2+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were showed “double peaks” feature on the distribution profile in the irrigation of 5 ~ 15 d. With the increased level of secondary salinization, Ca<sup>2+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were leached more slowly while the return of salt time later. Migration of groundwater on the K<sup>+</sup> had no significant effect. The K<sup>+</sup> ions showed a “single peak” feature on the distribution profile after irrigation. The SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> was difficult to be leached out of topsoil under all the degree of secondary salinization. Factors from the environmental perspective, Ca<sup>2+</sup> in the soil surface and bottom were prominent with a good coupling effect of air temperature, soil moisture content and soil salt content, and both of the Ca<sup>2+</sup> transport had a synergistic effect. K<sup>+</sup> transport in 0 ~ 20 cm soil layers affected mainly by water, while the 30 ~ 50 cm soil layers mainly influenced by temperature, the time from the irrigation point of view, in 5 ~ 15 d after irrigation affected by temperature, but after 20 d affected mainly by water, while the 30 ~ 50 cm soil layer mainly influenced by temperature, the time from the irrigation point of view, in 5 ~ 15 d after irrigation affected by temperature, but 20 d after irrigation affected mainly by water. Whether from the soil or the time, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> transport was influenced mainly by water.

**Key words** Greenhouse soil, Water and salt transport, Water heat coupling, Secondary salinization

收稿日期: 2010-07-14 修回日期: 2010-10-08

\* 国家自然科学基金资助项目(40901138)

作者简介: 李卫, 硕士生, 主要从事设施土壤水盐运移研究, E-mail: liwei20043772@163.com

通讯作者: 李廷轩, 教授, 博士生导师, 主要从事设施土壤质量演变趋势研究, E-mail: litinx@263.net

## 引言

设施土壤由于受其特殊棚室环境(水分淋洗作用弱、蒸发量大、地下水位升高等)和人为水肥管理措施(大量施用化肥和有机肥)的共同影响,导致土壤性质以及盐分组成和分布都与露地土壤存在较大差异。并且设施栽培现在尚无一套与之相适应的土肥管理措施,长期的设施栽培会带来土壤酸化、板结、次生盐渍化等问题<sup>[1-4]</sup>。

最常见的解决积盐问题方式是灌水洗盐<sup>[5-7]</sup>。通过灌水对土壤盐分离子影响程度的研究,发现 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Na}^{+}$ 在整个土壤剖面上呈此消彼长的变化规律<sup>[8]</sup>,灌水洗盐能减少硝态氮的积累<sup>[9]</sup>,但随着蒸发时间的延长,硝态氮逐渐向表层迁移<sup>[10-12]</sup>。有研究表明,层状土钾离子的迁移主要受水分累积的影响<sup>[13]</sup>。也有报道, $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 受离子电荷等影响被土壤胶体吸附的能力较强,受灌溉水分运动较小<sup>[14]</sup>。但是目前对于盐分离子的迁移研究主要集中在灌水方式、灌水水质以及对作物产量和品质影响方

面,而对在设施栽培环境水热耦合作用下盐分离子动态变化研究报道较少。因此本文采用室内土柱模拟的方法,就灌水量对不同次生盐渍化水平设施土壤主要盐分离子迁移进行研究,以期为设施土壤水肥管理措施,确定最适灌水量和灌溉方式以及为设施土壤次生盐渍化的监测和防治提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 土样的采集与制备

采样地点选择在设施栽培分布较为集中的四川双流县永安镇牧马坪。该地区设施蔬菜种植为茄子、辣椒和番茄为主。每年每个温室有机肥年施用量高达 $19.5 \text{ t/hm}^2$ ,其中施用化肥主要以尿素、过磷酸钙和硫酸钾为主。地下水位为60 cm。采集土样时分0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层采集,同时取相邻的露地土壤作为对照。大棚种植始于2001年,土样采集于2009年。土样分为两部分:一部分风干备用;另一部分用于土壤基本理化性质的测定(表1)。

表1 供试土壤基本理化性质

Tab.1 Basic properties of the soils tested

土壤	层次/cm	各级颗粒质量分数/%			质地	容 积 密 度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	pH 值	阳离子交换量 / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	田间持水量 /%
		0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm					
设施土壤	0~20	35.0	30.5	34.5	壤质粘土	1.28	6.06	11.72	37.75
	20~40	25.8	33.2	41.0	壤质粘土	1.42	6.14	15.24	40.32
	40~60	26.0	35.0	39.0	壤质粘土	1.51	6.14	14.62	42.37
露地土壤	0~20	24.0	34.0	42.0	壤质粘土	1.09	5.85	16.45	39.31
	20~40	26.0	32.5	41.5	壤质粘土	1.32	6.29	16.02	41.58
	40~60	25.5	33.0	41.5	壤质粘土	1.30	6.32	15.27	40.55

### 1.2 试验处理

土柱模拟试验在四川农业大学科研教学园区标准温室内进行,灌水量根据前期研究和当地设施蔬菜需水量的平均水平确定为1000 mL。基于实地调查和研究区次生盐渍化程度,设定了0.755、1、2和

4 g/kg 4个次生盐渍化水平,同时以露地土壤作为对照(CK)。其中0.755 g/kg为供试土样本底值(表2),其他3个水平在此基础上进行级配。级配原则根据供试的设施土壤0~20 cm盐分组成比例,其中阳离子以 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{K}^{+}$ 为主,阴离子以 $\text{NO}_3^{-}$ 和

表2 供试土壤盐分离子在土壤剖面的含量分布

Tab.2 Distribution of salt content in the profile of the soils tested

土壤	层次/cm	mg/kg							
		$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^{+}$	$\text{Na}^{+}$	$\text{NO}_3^{-}$	$\text{HCO}_3^{-}$	$\text{Cl}^{-}$	$\text{SO}_4^{2-}$
设施土壤	0~20	258.7	56.6	102.8	118.4	154.7	10.4	13.1	40.5
	20~40	105.2	58.9	42.1	98.7	51.5	6.8	14.0	23.3
	40~60	96.0	46.2	35.1	100.8	23.6	5.9	13.5	20.8
露地土壤	0~20	65.3	8.0	61.4	33.4	57.1	2.7	10.6	2.4
	20~40	45.7	4.0	52.7	83.2	37.2	9.5	10.2	3.1
	40~60	65.3	12.8	47.3	114.2	11.5	3.8	8.9	10.8

$\text{SO}_4^{2-}$  为主,4种离子占全盐质量分数 73.71%,因此级配溶质选用的是  $\text{CaSO}_4$  和  $\text{KNO}_3$ ,溶质比例根据含量最大的阴阳离子  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  质量比 1:1.71 加入。每个水平设置 3 个重复。

### 1.3 土柱设计

试验装置由土柱、马氏瓶和 Hydra 土壤水分/盐分/温度测试仪 3 部分组成。土柱采用高 60 cm,截面 15 cm × 15 cm 的有机玻璃。土柱底部设有石英砂反滤层和排气孔;地下水位埋深 60 cm,蓄水层厚度 4 cm,马氏瓶用于供水和控制水位,供应水源为蒸馏水;土柱两侧由表层向下 Z = 5、10、20、30、40 和 50 cm 开圆形取样孔,其半径为 4 cm,用于埋设 Hydra 土壤水分/盐分/温度测试仪与采集土壤。

土柱填充采用经自然风干,过 20 目筛后混合均匀的土壤,初始体积含水率为  $0.097 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,按照实测容密度分层填装,在填充 0 ~ 20 cm 土层时,将级配好的溶质与供试土壤充分混合均匀。为了使填土均一,采用容密度随机实测法,即以 5 cm 为单位分层填土,并按一定强度夯实一次,在填入下一层土壤时,把上一层表面刨毛,使得相邻两层土壤紧密接触,确保土壤水盐运移的连续。

土柱填充完毕后第 2 天进行灌水,灌水完毕后每天 12:00(气温较高点)和 18:00(气温较低点)进行水分监测,盐分监测在灌水后 5、10、15、20 和 25 d 采土分析,为了保证采土后水盐运移的延续性,每次采土均采集一个完整的土柱。整个试验观测 25 d<sup>[15]</sup>。

### 1.4 测定项目与方法

田间持水量、机械组成、pH 值均采用常规方法测定<sup>[16]</sup>,土温、含水率由 Hydra 土壤水分/盐分/温度测试仪直接测定,主要盐分离子待测液均采用无  $\text{CO}_2$  去离子水,按土水比 1:5 提取,振荡 5 min,离心过滤所得, $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  采用双指示剂中和滴定法, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  采用离子色谱法测定, $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  分别采用火焰光度计和原子吸收分光光度法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 设施土壤主要阳离子迁移特征

#### 2.1.1 灌水对设施土壤 $\text{Ca}^{2+}$ 迁移的影响

由图 1 可知,灌水后设施土壤  $\text{Ca}^{2+}$  含量均大于同时的露地土壤。其中设施土壤  $\text{Ca}^{2+}$  变化主要集中在 0 ~ 20 cm 和 30 ~ 50 cm 土层,灌水后前 15 d,不同次生盐渍化水平的设施土壤的  $\text{Ca}^{2+}$  都随水向下运动,灌水后 5 d 主要在土层 10 cm 处聚集,灌水

后 10 d 迁移到土层 20 cm,并都表现出随次生盐渍化水平的升高  $\text{Ca}^{2+}$  累积程度也逐步加剧的趋势。而灌水后 15 d 不同次生盐渍化水平的设施土壤  $\text{Ca}^{2+}$  仍聚集在 20 cm 土层,但各个水平之间的差异在逐步减小。在灌水后 20 d 时,0.755、2 g/kg 的盐渍化水平的  $\text{Ca}^{2+}$  表聚明显。灌水后 25 d 时,4 g/kg 的盐渍化水平的  $\text{Ca}^{2+}$  开始向上迁移。以上分析表明,随着次生盐渍化水平的提高, $\text{Ca}^{2+}$  淋洗速度变慢其返盐时间也有较迟的趋势。出现以上变化的原因主要是土壤水溶液中溶解了不同浓度的盐分离子,而盐分离子和水分子之间存在吸力,降低了土壤水的土水势。在高温高湿的设施环境中,蒸发量大,此时蒸发面可看作完全的半透膜。因此在设施环境中土壤水运动不能忽视溶质势的作用,次生盐渍化水平越高,溶质势就越大,土壤水分运动就越慢,因而钙离子的淋洗速度越慢;而在灌水后期,由于  $\text{Ca}^{2+}$  带正电荷且水合离子半径大,很容易被土壤胶体吸附,次生盐渍化水平越高,被土壤吸附的  $\text{Ca}^{2+}$  越多,返盐时间也就越迟。

地下水在毛管水上升力和温度梯度的作用下逐渐向上运动,在灌水后 10 d, $\text{Ca}^{2+}$  在剖面的分布呈现出“双峰”现象,而灌水后 25 d,“双峰”变成“单峰”,并且溶质峰较灌水初期变宽,表明表层灌水向下迁移与地下水向上迁移的钙离子相连接。

#### 2.1.2 灌水对设施土壤 $\text{K}^+$ 迁移的影响

由图 2 可知,灌水后设施土壤  $\text{K}^+$  的变化主要集中在 0 ~ 20 cm 土层,灌水后 5 d 主要在土层 10 cm 处聚集,灌水后 10 d 迁移到土层 20 cm,并都表现出随次生盐渍化水平的升高, $\text{K}^+$  累积程度也逐步加剧的趋势,其差异达到显著水平。而灌水 20 d 后不同次生盐渍化水平的设施土壤  $\text{K}^+$  仍聚集在 20 cm 土层,其剖面分布呈现相对稳定的状态。灌水后 25 d 时,所有盐渍化水平的  $\text{K}^+$  开始向上迁移。以上分析表明,不同次生盐渍化水平下, $\text{K}^+$  淋洗速度以及返盐时间趋于一致,表现出很好的水盐一致性。出现以上变化的原因主要是  $\text{K}^+$  是一价离子,其水合离子半径比  $\text{Ca}^{2+}$  小,被土壤胶体吸附能力较弱,随水迁移能力更强,其次由表 1 可知,供试土壤阳离子交换量处于中等水平,设施土壤中大量的  $\text{Ca}^{2+}$  通过阳离子交换作用将吸附在胶体表面的  $\text{K}^+$  置换到溶液中,此时  $\text{K}^+$  的迁移不仅包括土体的本底值,还包括土壤胶体中释放出来的  $\text{K}^+$ ,导致各次生盐渍化水平返盐时间的差异减小。

地下水对  $\text{K}^+$  迁移影响不显著。在灌水后 25 d 内,各次生盐渍化水平  $\text{K}^+$  在剖面的分布均呈现出

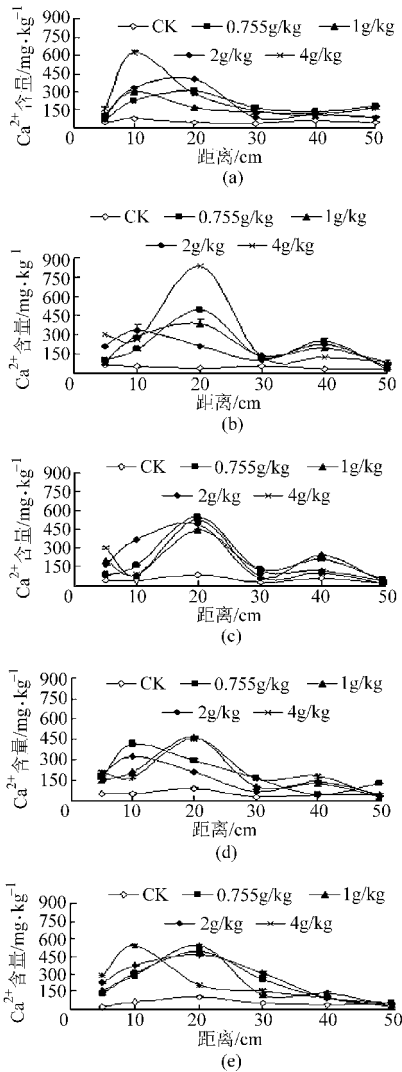


图1 不同次生盐渍化水平土壤 Ca<sup>2+</sup> 的剖面分布  
 Fig. 1 Distribution of different levels of Ca<sup>2+</sup> in secondary salinization of the soil profile  
 (a) 灌水后 5 d (b) 灌水后 10 d (c) 灌水后 15 d  
 (d) 灌水后 20 d (e) 灌水后 25 d

“单峰”现象, 出现以上情况的原因主要是设施栽培在高温高湿的环境中, 昼夜温差较大, 地下水影响的土壤会出现干湿交替的现象, 频繁的干湿交替使土壤溶液浓度增加, K<sup>+</sup> 容易到交换位置上, 增加了渗入层间空隙的机会, 层间收缩会促进钾的固定。其次供试土壤质地黏重, 本身固钾能力也强。

## 2.2 设施土壤主要阴离子迁移特征

### 2.2.1 灌水对设施土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 迁移的影响

由图3可知, 0.755、1和2 g/kg 3个次生盐渍化水平 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 迁移在灌水后 5 d 溶质峰到达 20 cm 处, 并在灌水后前 15 d 保持相对稳定的分布状态, 在灌水后 20 d 出现表聚趋势。而 4 g/kg 次生盐渍化水平 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在灌水后 10 d 溶质峰才到达 20 cm, 并在灌水后 25 d 才向上运动, 其他 3 个次生盐渍化水平表现出淋洗速度较慢且其返盐时间较迟的特征。

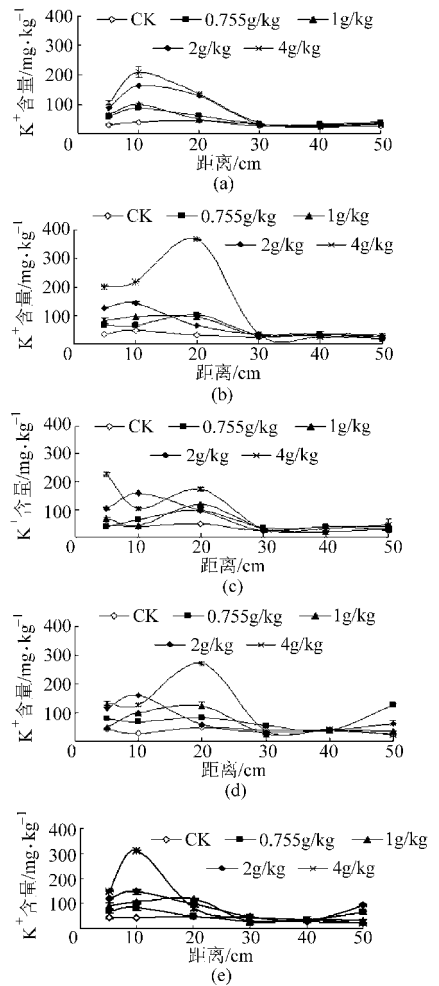


图2 不同次生盐渍化水平土壤 K<sup>+</sup> 的剖面分布  
 Fig. 2 Distribution of different levels of K<sup>+</sup> in secondary salinization of the soil profile  
 (a) 灌水后 5 d (b) 灌水后 10 d (c) 灌水后 15 d  
 (d) 灌水后 20 d (e) 灌水后 25 d

在地下水的影响下, 灌水后 10 d NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在剖面的分布呈现出“双峰”现象, 灌水后 15 d 后出现“单双峰交替”现象, 主要原因是当地下水到达土层 30 cm 处时, 水分自身重力和毛管水上升力达到平衡, 此时温度梯度对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 影响较大, 设施栽培环境下昼夜温差较大, 地下水影响的土壤会出现干湿交替的现象, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 带一价负电荷, 其本身化学性质稳定, 不易被土壤胶体吸附, 容易随水分运动。因此出现与表层灌水淋洗的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 相接和分离交替的结果。其次由于当地下水埋深为 60 cm, 属于较浅埋深, 较浅的地下水有利于反硝化产生, 在厌氧条件下, 在较浅土层有机质含量较高, 反硝化潜势越大, 当地下水为到达 30 cm 时, 反硝化作用会降低 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度。

### 2.2.2 灌水对设施土壤 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 迁移的影响

由图4可知, 在灌水后 5 d 所有次生盐渍化水平下 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 溶质峰到达 10 cm 处, 而后 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 迁移速度变慢, 整个灌水期间内各个次生盐渍化水平的

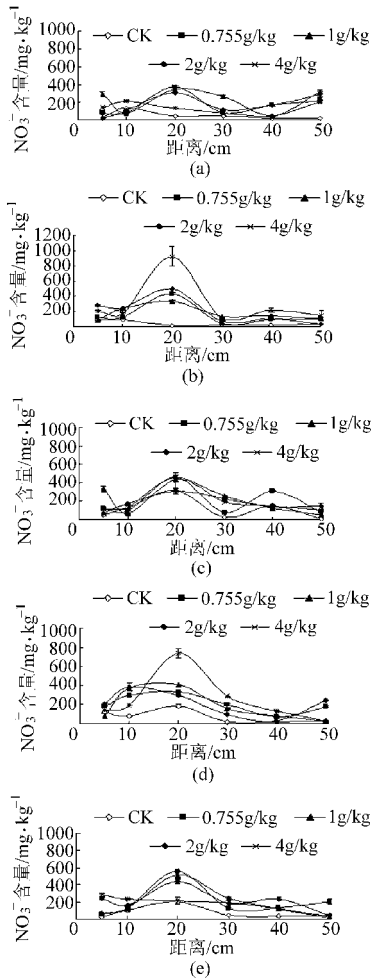


图3 不同次生盐渍化水平土壤  $\text{NO}_3^-$  的剖面分布

Fig.3 Distribution of different levels of  $\text{NO}_3^-$  in secondary salinization of the soil profile

(a) 灌水后 5 d (b) 灌水后 10 d (c) 灌水后 15 d  
(d) 灌水后 20 d (e) 灌水后 25 d

$\text{SO}_4^{2-}$  都在 10~20 cm 之间交替变化,且各个处理之间差异不显著。主要是表层灌水方式属于一次性输入,而  $\text{SO}_4^{2-}$  受离子电荷等的影响,土壤水分再分布对其迁移影响较小。以上分析表明,根据当地蔬菜的需水量进行灌水,并不能将  $\text{SO}_4^{2-}$  淋洗出耕层,而当耕层  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度过高时土壤会出现酸化现象,从而影响作物生长,成为设施农业生产限制因子。

地下水对  $\text{SO}_4^{2-}$  迁移影响较大,在灌水后 10 d  $\text{SO}_4^{2-}$  在剖面的分布呈现出“双峰”现象,主要原因是地下水供水属于连续性输入方式,在水分供应充足时, $\text{SO}_4^{2-}$  仍然能够随水迁移。表层灌水向下淋洗的  $\text{SO}_4^{2-}$  与地下水向上迁移的  $\text{SO}_4^{2-}$  没有相接。

### 2.3 温度、土壤水分对盐分离子迁移的耦合效应分析

在设施环境中,盐分离子运移不仅受到土壤水分的影响,还受到蒸发量、温度等多种环境因子的综合作用。因此根据试验设计,将监测的土壤水分、温度和土壤各层次盐分离子含量以及时间分别进行多

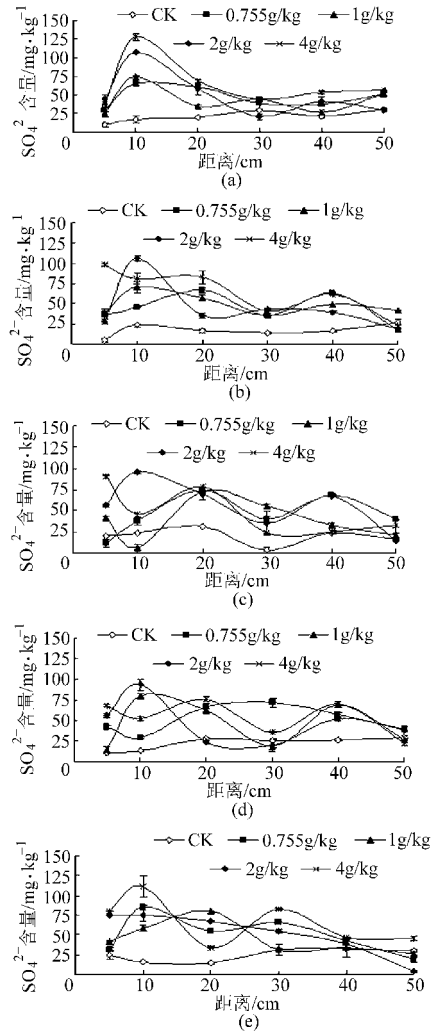


图4 不同次生盐渍化水平土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  的剖面分布

Fig.4 Distribution of different levels of  $\text{SO}_4^{2-}$  in secondary salinization of the soil profile

(a) 灌水后 5 d (b) 灌水后 10 d (c) 灌水后 15 d  
(d) 灌水后 20 d (e) 灌水后 25 d

元回归,寻求其耦合效应。

由表 3 和表 4 可知,不同盐分离子在不同层次与时间受水分和温度影响程度是不同的。DPS 多元回归方程的假设检验与偏回归系数假设检验表明,  $\text{Ca}^{2+}$  在土层的表层和底层以及灌水后期都表现出与水分和温度较好的耦合效应,并且两者对  $\text{Ca}^{2+}$  运移具有协同作用。  $\text{K}^+$  在 0~20 cm 土层运移主要受水分的影响,而 30~50 cm 土层主要受温度的影响,从灌水时间看,在灌水后 5~15 d 主要受温度影响,而灌水后 20 d 后主要受水分影响。  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  不论从土层还是时间来看主要受水分影响较大。

从回归方程看出,  $\text{Ca}^{2+}$  在 5 cm 和 50 cm 土层既是累积层又是脱钙层,但土壤水分和温度对其影响的作用相反,5 cm 土层变量  $X_1$  的偏回归系数为正值,  $X_2$  的偏回归系数为负值,当土壤含水率较低、气温升高时,该土层  $\text{Ca}^{2+}$  含量降低,脱去的  $\text{Ca}^{2+}$  用于

其下土层  $\text{Ca}^{2+}$  的累积;当土壤含水率较高、气温较低时,将其下层土壤的  $\text{Ca}^{2+}$  累积于该层。50 cm 土层变量  $X_1$  的偏回归系数为负值,表明当土壤含水率降低时,该土层  $\text{Ca}^{2+}$  含量降低;当土壤含水率升高时,该土层的  $\text{Ca}^{2+}$  会下移进入地下水。 $\text{K}^+$  在 30 ~ 50 cm 土层耦合效应分析表明, $\text{K}^+$  的迁移只与温度达到显著水平,说明地下水对  $\text{K}^+$  迁移影响不显著。温度的升高, $\text{K}^+$  的含量降低,对  $\text{K}^+$  的固定能力增强;温度降低, $\text{K}^+$  的含量增加,对  $\text{K}^+$  的固定能力减弱。 $\text{NO}_3^-$  在 0 ~ 20 cm 土层变量  $X_1$  的偏回归系数为负值,当土壤含水率较低,该土层  $\text{NO}_3^-$  含量增加;反之亦然,表明  $\text{NO}_3^-$  随水迁移性强。 $\text{SO}_4^{2-}$  在 5 cm 土层的耦合效应分析看出,表层灌水对  $\text{SO}_4^{2-}$  的迁移影响不显著,表明根据当地的灌水量  $\text{SO}_4^{2-}$  很难被淋洗出耕层。

表3 不同土层设施土壤盐分离子水热耦合效应分析 ( $n=16$ )

Tab.3 Coupling effects of water and thermal on different layers of greenhouse soil salt ions

盐分离子	土层/cm	逐步回归方程	$r$
$\text{Ca}^{2+}$	5	$Y=241.03+320.41X_1-6.16X_2$	0.5904*
	50	$Y=269.81-850.64X_1+4.64X_2$	0.7090**
$\text{K}^+$	5	$Y=59.32+286.56X_1$	0.7765**
	10	$Y=185.08-523.06X_1$	0.6623**
	20	$Y=232.03-1491.61X_1$	0.5555*
	30~50	$Y=52.34-0.99X_2$	0.3225*
$\text{NO}_3^-$	5~20	$Y=930.01-732.47X_1$	0.7765**
$\text{SO}_4^{2-}$	5	$Y=48.94+128.09X_1$	0.6170*
	50	$Y=123.24-308.16X_1$	0.5858*

注:Y为盐分离子含量(mg/kg); $X_1$ 为土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $X_2$ 为土壤温度( $^{\circ}\text{C}$ ),下同。

表4 不同时间设施土壤盐分离子水热耦合效应分析 ( $n=24$ )

Tab.4 Coupling effects of water and thermal on different time of greenhouse soil salt ions

盐分离子	时间/d	逐步回归方程	$r$
$\text{Ca}^{2+}$	20	$Y=-3779.68-529.46X_1+244.417X_2$	0.7732**
	25	$Y=-1861.04-805.94X_1+145.72X_2$	0.6782**
$\text{K}^+$	5	$Y=-1370.25+58.13X_2$	0.4870*
	15	$Y=-895.86+46.54X_2$	0.6441**
	20	$Y=274.09-236.60X_1$	0.4754*
	25	$Y=139.09-277.47X_1$	0.5366*
$\text{NO}_3^-$	15~20	$Y=492.15-669.84X_1$	0.5313**
	25	$Y=-3491.20+240.74X_2$	0.4986*

### 3 讨论

#### 3.1 设施灌水对盐分离子返盐时间的影响

在设计灌水量下,不同次生盐渍化设施土壤除  $\text{SO}_4^{2-}$  以外,其他盐分离子在灌水 15 ~ 20 d 后出现盐分表聚的趋势,盐分离子运动都出现了拐点。因此 15 ~ 20 d 灌一次水对于抑制设施土壤返盐是比较合适的。赵良菊等<sup>[17]</sup>从可溶性养分方面得出春小麦最适宜灌水量为  $500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,巨龙等<sup>[18]</sup>研究表明,从作物产量方面考虑得出半干旱地区冬小麦的最佳淡水灌溉量是  $1535 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,分返青、拔节和抽穗 3 个时期进行灌溉,每次灌溉水量换算成本试验的尺度灌水量分别为 1200 mL 和 1125 mL,均与本试验设计的灌水量相当,研究表明,大田灌水后 60 d 出现返盐现象<sup>[18]</sup>,返盐时间明显迟于本试验的 15 ~ 20 d。造成这种差异的原因可能是在设施栽培条件下其蒸发量远大于露地土壤,同时缺乏降雨的淋洗也是导致设施土壤返盐较快的因素之一;其次是种植作物后,作物的根系对盐分的吸收也会延缓土壤返盐的时间。由于本研究是在室内有限尺度的土柱中进行,探讨了无作物种植条件下设施土壤主要盐分离子的运动规律,与田间的实际条件存在着一定的差异,在田间的实际应用还有待进一步研究。

#### 3.2 设施灌水对盐分离子淋洗效果的影响

设施栽培中,次生盐渍化的实质是化肥过量所产生的“肥害”。由于当地施用化肥主要以尿素、过磷酸钙和硫酸钾为主。因此带入了  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  4 种离子,造成这些盐分离子在耕层土壤的大量累积。根据当地作物需水量设计的灌水量,不同次生盐渍化设施土壤盐分离子淋洗情况是不同的。 $\text{Ca}^{2+}$  表现出与水分运动的一致性,这与焦艳平<sup>[14]</sup>等的研究不一致。由图 2 看出,在灌水 5 ~ 15 d 表现出耕层含钙量迅速降低,主要是本研究灌水方式采用一次性灌水,在高湿度土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  以离子形态存在与土壤溶液中,含有  $\text{Ca}^{2+}$  的土壤溶液在向下运移的过程中不断溶解土壤中的固体钙,增加其浓度,而到灌水 20 d 后,土壤含水率降低时,不同次生盐渍化水平  $\text{Ca}^{2+}$  迁移能力表现出差异。主要由于后期没有水源的补充,灌水后期湿润峰的高浓度溶液将会因次生盐渍化水平差异运移能力表现出不同。有研究表明, $\text{Ca}^{2+}$  的大量累积会增加 P 的固定,降低 P 的有效性<sup>[19]</sup>。从本试验看出, $\text{Ca}^{2+}$  并没有完全淋洗出耕层,可能会阻碍作物对 P 的吸收。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  是影响设施土壤质量的主要离子,在设施土壤中的大量累积存在较大的环境风险。本试验看出, $\text{NO}_3^-$  淋洗后主要集中在 20 cm 土层,没有

和地下水相接。因此在设计的灌水量条件下,  $\text{NO}_3^-$  不会对地下水产生污染,但是  $\text{NO}_3^-$  在耕层的累积会引发作物的生理障碍,影响作物品质。 $\text{SO}_4^{2-}$  是引起设施土壤酸化主要离子之一,本试验表明,一次性灌水很难有效地将  $\text{SO}_4^{2-}$  带出耕层,而连续性的地下水供给却能将深层的  $\text{SO}_4^{2-}$  迁移到耕层,这与谭军利等<sup>[20]</sup>的研究相近。有研究表明,灌水后土壤可溶性养分含量的峰值在 20 cm 处,有利于作物根系吸收养分,对防止肥分损失、提高肥效和地下水的富营养化有利<sup>[17]</sup>,但本研究表明,在相近的灌水量下,土壤盐分离子未被完全淋洗出耕层,存在极大的次生盐渍化风险。因此,从防治次生盐渍化角度而言,应该加大灌水量,1 000 mL 可以作为灌水洗盐的下限,上限应以盐分离子不进入地下水为宜。

## 4 结论

(1)在设计的灌水量下,  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{NO}_3^-$  离子在灌水后 5 ~ 15 d 表现出随时间的推移剖面分布表现出“双峰”的特性,并随着次生盐渍化水平的升高溶质

峰也逐步增加的趋势。灌水后 20 d, 0.755 g/kg 和 1 g/kg 两个水平  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{NO}_3^-$  出现向上迁移的趋势。灌水后 25 d, 2 g/kg 和 4 g/kg 两个水平出现表聚现象。

(2)地下水对  $\text{K}^+$  迁移影响不显著,使得  $\text{K}^+$  在灌水后剖面分布呈现“单峰”的特性,在灌水 25 d, 所有次生盐渍化水平均出现表聚现象。 $\text{SO}_4^{2-}$  在所有次生盐渍化水平下一次性灌水很难将其淋洗出耕层,而连续性的地下水供给却能将深层的  $\text{SO}_4^{2-}$  迁移到耕层,  $\text{SO}_4^{2-}$  长期滞留耕层土壤有造成土壤酸化的风险。

(3)从环境因素来看,  $\text{Ca}^{2+}$  在土层的表层和底层以及灌水后期都表现出与水分和温度较好的耦合效应,并且两者对  $\text{Ca}^{2+}$  运移具有协同作用。 $\text{K}^+$  在 0 ~ 20 cm 土层运移主要受水分影响,而 30 ~ 50 cm 土层主要受温度的影响,从灌水时间看,在灌水后 5 ~ 15 d 主要受温度影响,而灌水后 20 d 后主要受水分的影响。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  不论从土层还是时间看主要受水分的影响较大。

## 参 考 文 献

- 王学军. 日光温室土壤次生盐渍化分析[J]. 北方园艺, 1998(3): 12 ~ 13.  
Wang Xuejun. Analysis of soil secondary salinization in greenhouse[J]. Northern Horticulture, 1998(3): 12 ~ 13. (in Chinese)
- 余海英, 李廷轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 571 ~ 576.  
Yu Haiying, Li Tingxuan, Zhou Jianmin. Salt in typical greenhouse soil profiles and its potential environmental effects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 571 ~ 576. (in Chinese)
- 余海英, 李廷轩. 辽宁设施栽培土壤盐分累积变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 80 ~ 83.  
Yu Haiying, Li Tingxuan. Evolution of salt accumulation in greenhouse soil in Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 80 ~ 83. (in Chinese)
- 余海英, 李廷轩, 周健民. 设施土壤盐分的累积, 迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 642 ~ 650.  
Yu Haiying, Li Tingxuan, Zhou Jianmin. Salt accumulation, translocation and ion composition in greenhouse soil profiles [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 642 ~ 650. (in Chinese)
- 王绪奎, 陈光亚. 设施农业中的土壤问题及对策[J]. 江苏农业科学, 2001(6): 39 ~ 42.  
Wang Xukui, Chen Guangya. Problems and countermeasures on the soil of greenhouse [J]. Agricultural Sciences Jiangsu, 2001(6): 39 ~ 42. (in Chinese)
- 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析及防治措施[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(3): 241 ~ 247.  
Wu Fengzhi, Zhao Fengyan, Liu Yuanying. On the reasons of continuous cropping obstacles in vegetable facility gardening [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2000, 31(3): 241 ~ 247. (in Chinese)
- 郑子成, 李廷轩, 何淑勤, 等. 设施土壤生态问题及其防治措施的研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 18 ~ 20.  
Zheng Zicheng, Li Tingxuan, He Shuqin, et al. Research of ecological problems and countermeasures on the soil of greenhouse [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(1): 18 ~ 20. (in Chinese)
- 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 64 ~ 69.  
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 64 ~ 69. (in

Chinese)

- 9 杨建军,沈根祥,姚政,等. 灌水洗盐对设施农业中土壤养分的影响[J]. 上海农业学报,2004,20(2):63~66.  
Yang Jianjun, Shen Genxiang, Yao Zheng, et al. Effect of watering and salt leaching on soil nutrient in agriculture under structure [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2004, 20(2):63~66. (in Chinese)
- 10 袁巧霞,武雅娟,朱端卫. 温室表层土壤硝态氮运移的水、热耦合效应研究[J]. 水土保持学报,2008,22(4):111~115.  
Yuan Qiaoxia, Wu Yajuan, Zhu Duanwei. Effects of moisture and temperature on  $\text{NO}_3\text{-N}$  transport in greenhouse soil under steady vaporization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4):111~115. (in Chinese)
- 11 曹红霞,康绍忠,何华. 灌水频率对地下水埋深较浅土壤中溴和硝态氮迁移的影响[J]. 农业环境科学学报,2003,22(4):420~424.  
Cao Hongxia, Kang Shaozhong, He Hua. Effects of irrigation frequency on movement of bromide and nitrate in soil with shallow groundwater table[J]. Journal of Agro-environment Science, 2003, 22(4):420~424. (in Chinese)
- 12 王晓英,货明荣,刘永环,等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):685~694.  
Wang Xiaoying, Huo Mingrong, Liu Yonghuan, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):685~694. (in Chinese)
- 13 沈冰,乔云峰,黄领梅,等. 有沙层土柱中钾离子运移的试验研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(2):127~132.  
Shen Bing, Qiao Yunfeng, Huang Lingmei, et al. Experimental study on  $\text{K}^+$  transport in soil column with sand layer [J]. Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For.: Nat. Sci. Ed., 2005, 33(2):127~132. (in Chinese)
- 14 焦艳平,康跃虎,万书勤,等. 干旱区盐碱地滴灌土壤基质势对土壤盐分分布的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(6):53~58.  
Jiao Yanping, Kang Yuehu, Wan Shuqin, et al. Effect of soil matrix potential on the distribution of soil salt under drip irrigation on saline and alkaline land in arid regions [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6):53~58. (in Chinese)
- 15 曾礼. 设施土壤水盐运移特性研究[D]. 雅安:四川农业大学,2009.  
Zeng Li. Characteristics of soil water and salt movement of greenhouse soil [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 16 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- 17 赵良菊,肖洪浪,李新荣,等. 灌水量对土壤水肥分布与春小麦水分利用效率的影响[J]. 中国沙漠,2005,25(2):256~261.  
Zhao Liangju, Xiao Honglang, Li Xinrong, et al. Effect of different irrigation quota on water nutrient distribution in soil profile and water use efficiency of spring wheat[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2):256~261. (in Chinese)
- 18 巨龙,王全九,王琳芳,等. 灌水量对半干旱区土壤水盐分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(1):86~90.  
Ju Long, Wang Quanjiu, Wang Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1):86~90. (in Chinese)
- 19 Grattan S R, Grieve C M. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae, 1999, 78(1~4):127~157.
- 20 谭军利,康跃虎,焦艳平,等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. 农业工程学报,2008,24(6):59~63.  
Tan Junli, Kang Yuehu, Jiao Yanping, et al. Characteristics of soil salinity and salt ions distribution in salt-affected field under mulch-drip irrigation in different planting years[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6):59~63. (in Chinese)