

祁通, 黄建, 孙阳讯, 等. 滴灌条件下盐渍土盐分淡化区形成过程中离子运移特征[J]. 土壤与作物, 2021, 10(1): 47–59.  
QI T, HUANG J, SUN Y X, et al. Characteristics of salt ion transport during the period of low salt area development in saline soil under drip irrigation[J].  
Soils and Crops, 2021, 10(1): 47–59.

# 滴灌条件下盐渍土盐分淡化区形成过程中 离子运移特征

祁通<sup>1</sup>, 黄建<sup>1</sup>, 孙阳讯<sup>2</sup>, 徐菲<sup>1</sup>, 张玉铃<sup>2</sup>, 王金鑫<sup>1</sup>, 王新勇<sup>1</sup>

(1. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所\农业部西北绿洲农业环境重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830091;  
2. 新疆喀什地区岳普湖县农业技术推广中心, 新疆岳普湖 844400)

**摘要:** 为了探究滴灌条件下盐渍土壤盐分淡化区形成过程中水盐及离子运动规律, 通过土柱滴灌模拟试验分析了土壤水分、盐分及离子的分布特征及随时间的变化关系。结果表明: 土壤总盐分及各个离子随着滴灌水的运移而运动, 先进行横向运移, 再进行纵向移动, 当滴灌时间为 15 h (滴水量 16.2 L·桶<sup>-1</sup>) 时, 在 0~30 cm 区域内形成稳定的椭圆型离子淡化区, 淡化区边缘形成了约 10 cm 宽的集盐区。在整个运动过程中, 表层 0~20 cm 土层总体上脱盐速率的大小顺序为  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{总盐分} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 。同时, 表层土壤总盐分、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  的浓度与滴灌时间的函数关系更加符合倒数模型, 滴灌后盐分淡化区内土壤的盐分类型由硫酸盐-氯化物型转变为氯化物-硫酸盐型。

**关键词:** 滴灌; 盐渍化土壤; 盐分淡化区; 盐离子

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 2095–2961 (2021) 01–047–13

DOI: 10.11689/j.issn.2095–2961.2021.01.005

## Characteristics of salt ion transport during the period of low salt area development in saline soil under drip irrigation

QI Tong<sup>1</sup>, HUANG Jian<sup>1</sup>, SUN Yangxun<sup>2</sup>, XU Fei<sup>1</sup>, ZHANG Yuling<sup>1</sup>, WANG Jinxin<sup>1</sup>, WANG Xinyong<sup>1</sup>

(1 Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences/Ministry  
of Agriculture Northwest Oasis Key Laboratory of Agricultural Environment, Urumqi 830091, China;

2 Agricultural Technology Extension Center of Yuepuhu County, Yuepuhu 844400, China)

**Abstract:** Aiming to understand the movement of water, salt and ions during the low salt area development in salinity soil under drip irrigation, we analyzed the distribution characteristics of soil moisture, salinity and ions and their relationship with time by a soil column drip irrigation simulation experiment. The results showed that soil total salinity and ions moved transversely first and then longitudinally with drip irrigation. When drip irrigation time was 15 h (drip water 16.2 L/barrel), a stable elliptical ion desalination zone was formed in 0–30 cm depth region, and a salt collection area with a width of about 10 cm was formed at the edge of the desalination area. In the whole process of movement, desalination rate at 0–20 cm surface soil layer was in an order of  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{total salinity} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ . At the same time, the functional relationship between the concentration of total salt,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  and drip irrigation time was more consistent with the reciprocal model. After drip irrigation, the soil salt type in the desalination area changed from sulfate–chloride type to chloride–sulfate type.

**Key words:** drip irrigation; heavy salinized soil; light salt area; salt ions

## 0 引言

新疆盐渍化耕地面积为  $1.62 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占耕地总面积的 32.07%<sup>[1]</sup>, 土壤盐渍化是制约新疆灌溉农

收稿日期: 2020–04–18; 修回日期: 2020–06–04.

基金项目: 国家重点研发计划课题“岳普湖盐碱地资源化利用模式及产业示范(2016YFC0501408)”; 国家自然科学基金“滴灌条件下重盐渍化棉田土壤盐分淡化区形成机制及调控(41461049)”; 国家自然科学基金(31660606)。

第一作者简介: 祁通(1982–), 男, 甘肃武威, 硕士, 副研究员, 盐碱土壤改良与利用. E-mail: tong1982mm@163.com.

业可持续发展的主要因素。根据新疆土壤盐化分级标准<sup>[2]</sup>0~30 cm土壤中含盐量在0.9%~1.3%为中度盐化土壤,作物减产20%~50%;含盐量在1.3%~1.6%为重度盐化(高盐)土壤,作物减产50%~80%,其中中重度盐渍化耕地面积为 $3.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,约占盐渍化耕地的1/4<sup>[1]</sup>。目前中重度盐渍土的治理主要调整土壤中的水盐平衡,通过大量的淡水洗盐及压盐,借助排水系统将盐分排出灌区,这种模式对灌区的水资源与下游的生态造成了巨大影响。

新疆膜下滴灌技术在盐碱地的实践表明,将覆膜种植技术与滴灌节水技术结合起来,抑制土壤盐分的上移,而且在滴灌的淋洗作用下,剖面土壤内的盐分定向重分布,形成了脱盐区、稳定区与积盐区,因而滴灌具有调控盐渍化耕地土壤盐分的作用<sup>[3]</sup>,可以为作物主根生长创造一个盐分淡化区<sup>[4-5]</sup>,这就为重盐渍化耕地的利用提供了新的研究思路和方法。研究发现,滴灌后盐渍化土壤垂直方向0~40 cm形成盐分淡化区<sup>[6-7]</sup>,盐分被淡化的过程包括2个方面,一是总盐分的淡化,二是盐分离子的淡化,盐分淡化区的形成实质上是土壤盐分离子迁移和分异的结果。

土壤水分是土壤盐分运移的载体,伴随着水分的入渗,土壤盐分在三维空间内发生运移,表现出表层土壤淋洗脱盐,而由于不同盐分离子随水淋洗的速率不相同<sup>[8]</sup>。虽然盐分淡化区内总盐分有很明显的下降,但部分离子可能并未被淋洗下去,同时,在这个过程中盐分离子的组成也会发生改变。以往的研究只集中在滴灌参数<sup>[4-5,7-11]</sup>、种植年限<sup>[12-15]</sup>等对总盐分的变化方面,而对于盐离子的研究主要为棉田生育期内土壤盐分离子分布结果方面<sup>[14-16]</sup>,并未系统阐明非种植条件下滴灌过程中离子的运动规律。本研究以重盐碱土壤为研究对象,利用土柱模拟试验,研究滴灌条件下土壤盐分淡化区形成过程中盐分离子运动和分布特征,为淡盐化耕层构建,合理利用重盐渍化土壤提供理论依据,进一步完善水盐调控理论具有重要的理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自新疆喀什地区岳普湖县色也可乡盐渍化棉田,土壤为砂质壤土(表1),土壤平均含盐量为 $80.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表2),属于硫酸盐-氯化物型的重度盐渍化土壤。对采集的土壤,进行风干过2 mm筛,并进行充分掺拌混均,备用。

表1 土壤粒径分析

Table 1 Soil particle size analysis

土壤类型		砂粒	粉粒	粘粒
Soil type		Sand	Silt	Clay
类别	名称	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
Type	Name			
砂土	砂质壤土	0.6912	0.246	0.0628
Sand soil	Sandy loam soil			

表2 土壤盐分及盐分离子含量(单位 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 2 Soil salt and salt ion contents

总盐	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
Total salt								
80.55	-	0.372	17.98	35.83	3.839	1.301	1.00	25.8

## 1.2 研究方法

试验为无作物土柱模拟试验, 在室内进行。土柱为亚克力材料定制的直径 50 cm, 高 60 cm 上下无底的圆柱型桶, 按干容重  $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  分层均匀装土 (每装土 5 cm 高度, 用粗木棍均匀压实磨平), 装土高度 55 cm, 装土量约  $140 \text{ kg}\cdot\text{桶}^{-1}$ <sup>[9]</sup>, 开展土柱模拟实验 (图 1)。设置 12 个土柱, 每个柱子按照设定的时间进行破坏性取样, 取样后不再滴水, 不做重复。

试验采用扬程 15 m 的水泵进行加压滴灌, 设置压力表, 滴灌带直径  $\phi 16 \text{ mm}$  滴头为内镶嵌式, 间距为 40 cm, 滴头流量  $1.08 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  (新疆天业公司)。每个桶由 1 个滴头供水, 滴头固定在桶顶中心位置 (图 1)。灌溉用水为饮用纯净水 (矿化度  $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  以下), 用 1 L 量筒测量滴头出水量来控制灌溉量, 通过压力表控制滴灌压力。

从滴灌开始后记录滴灌时间, 在滴灌时间达到 1 h, 2 h, 3 h, 5 h, 7 h, 11 h, 15 h, 20 h 时, 以及结束滴灌后 5 h (即滴灌后 25 h)、10 h (30 h) 时, 分别选择一个土柱立即进行取样。取样方法: 使用直径为 2 cm 的采样器分别在不同水平方向上采集横向距滴头 (桶中心) 0、5 cm、10 cm、15 cm 和 20 cm 处的土壤样品, 采样深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 和 40~50 cm。

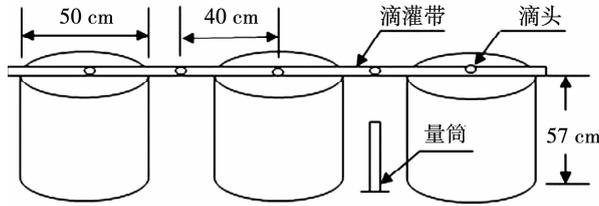


图 1 土壤模拟实验装置

Fig. 1 Soil simulation experimental device



图 2 实验现场与取样图

Fig. 2 Field sampling diagram

## 1.3 样品测试

测试土样土壤含水量、总盐、电导率、pH 值、及  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、

Na<sup>+</sup>离子含量。土壤含水量采用烘干法测定,土壤浸提液用1:5土水比提取,电导率的测定用电导仪,盐分离子Na<sup>+</sup>用火焰光度计法测定,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>用标准H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>滴定法测定,Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>用EDTA络合滴定法测定,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>用紫外分光光度计测定,Cl<sup>-</sup>用标准硝酸银滴定法测定<sup>[16]</sup>。

#### 1.4 盐分及离子脱盐速率的计算

通过计算单位时间内盐分及离子的脱盐速度,研究土壤盐分及离子的运移速率,V为盐分和离子脱盐速率,计算公式如下,

$$v = \frac{C_0 - C_t}{\Delta t}$$

式中:C<sub>0</sub>为初始浓度值;t为滴灌时间;C<sub>t</sub>为滴灌时间t时的浓度;Δt为时间差值。

#### 1.5 数据处理

用Microsoft Office工具Excel 2017进行数据整理;Sufer13进行插值分析、栅格运算、空间分析及分布图的制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分分布特征

从图3可以看出,在垂直方向上,在滴灌2h(滴水量2.16L·桶<sup>-1</sup>)后,湿润锋达到20cm处;滴灌5h(滴水量5.4L·桶<sup>-1</sup>)后,土壤水分达到25cm处;滴灌7h(7.56)后,土壤湿润锋达到25~30cm处;滴灌9h(滴水量9.72L·桶<sup>-1</sup>)后,土壤湿润锋达到35cm处;滴灌到11h(滴水量11.9L·桶<sup>-1</sup>)时,土壤湿润锋还维持在35cm处;滴灌20h(滴水量21.4L·桶<sup>-1</sup>)后,土壤湿润锋才到达40cm处;滴灌结束后5h时,土壤湿润锋维持在40~45cm处。随着滴灌时间的推移,土壤水分开始以20cm·h<sup>-1</sup>的最大速度运移,但达到20cm时,运动速率开始降低,当土壤水分到达35cm时运动速度降至最低1cm·h<sup>-1</sup>。

在水平方向上,在滴灌1h后,土壤湿润锋到达10cm处;滴灌2h后,土壤湿润锋可达到20cm处,10cm处土壤含水量继续增加;在滴灌5h后,土壤湿润锋超过20cm,继续向桶边缘扩散,10cm处含水量达到饱和,不再增加,15cm处含水量趋于达到饱和状态,数量增加缓慢,20cm处土壤含水量继续增大;当滴灌到7h时,20cm处土壤含水量趋于饱和,数量增加缓慢;当滴灌到9h时,20cm处土壤含水量不在增加。在重盐渍化土壤条件下,随着滴灌时间的推移,土壤水分先向下移动,后向着水平方向移动,当横向方向上土壤水分趋于饱和状态后,土壤水分向下运动。

### 2.2 土壤盐分的分布特征

由图4可以看出,在垂直方向上,在滴灌到1h时,土壤盐分在0~5cm处下降幅度较大;滴灌到2h时,0~5cm处出现盐分相对较低区域即盐分淡化区,10cm处盐分开始下降;当滴灌3h(滴水量3.24L·桶<sup>-1</sup>)时,盐分淡化区持续扩大至8cm附近,而15cm处盐分浓度增加,出现盐分累积层;当滴灌到5h时,0~5cm处盐分浓度趋于稳定不再降低,5~10cm盐分继续下降,盐分淡化区持续扩大10cm附近;当滴灌到9h(滴水量9.72L·桶<sup>-1</sup>)时,5~10cm处盐分浓度趋于稳定,15cm盐分开始下降,盐分淡化区持续扩大至15cm处,盐分累积层开始下移至20~25cm处;当滴灌时间达到15h(滴水量16.2L·桶<sup>-1</sup>)时,10~15cm盐分浓度趋于稳定不再降低,22cm处盐分浓度开始下降,盐分淡化区持续扩大至20cm处,盐分累积层下移至22~30cm;当滴灌时间达到20h(滴水量21.6L·桶<sup>-1</sup>)时,土壤0~15cm的盐分浓度趋于稳定不再降低,盐分淡化区持续扩大至22cm处,盐分累积层下移至30~35cm;当滴水结束5h时,即滴灌后25h时,土壤0~15cm的盐分浓度趋于稳定不再降低,盐分淡化区维持在25cm处,盐分累积层下移至35cm以下;当滴水结束10h,即滴灌后30h时,土壤15cm处的盐分浓度趋略有升高,盐分淡化区维持在25cm处,盐分累积层下移至40cm处。

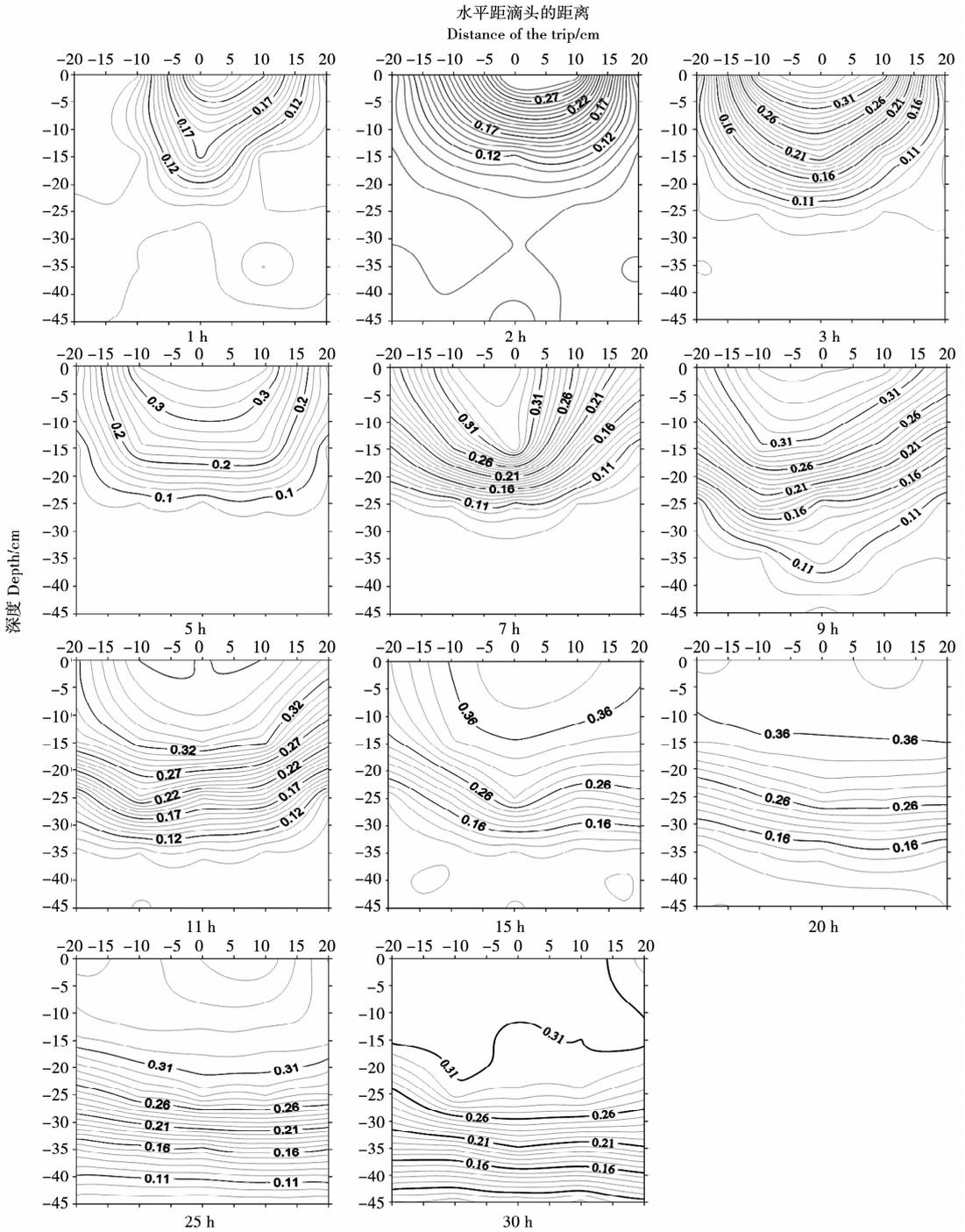


图 3 不同时间内土壤质量含水量的分布特征 (单位:%)

Fig. 3 Distribution characteristics of soil moisture contents in different time periods

在水平方向上，滴灌 1 h 时，距离滴头中心位置土壤盐分含量大幅度下降；滴灌 3 h（滴水量 3.24 L·桶<sup>-1</sup>）时，距离滴头 10 cm 位置土壤盐分含量开始下降，在滴头附近位置形成一个土壤盐分相对低的区域。滴灌 5 h（滴水量 5.4 L·桶<sup>-1</sup>）时，距离滴头 15 cm 位置土壤盐分含量开始下降，低盐分区域持续扩大，距离滴头 15 cm 位置土壤盐分含量开始下降，低盐分区域持续扩大至 10 cm 处；滴灌 11 h（滴水量 11.9 L·桶<sup>-1</sup>）时，距离滴头 20 cm 位置土壤盐分含量开始下降，低盐分区域持续扩大至 15 cm 处。在重盐渍化土壤条件下，随着滴灌时间的推移，土壤盐分先向下移动，后向着水平方向移动，当横向方向上土壤水分趋于饱和状态后，土壤盐分向下运动。

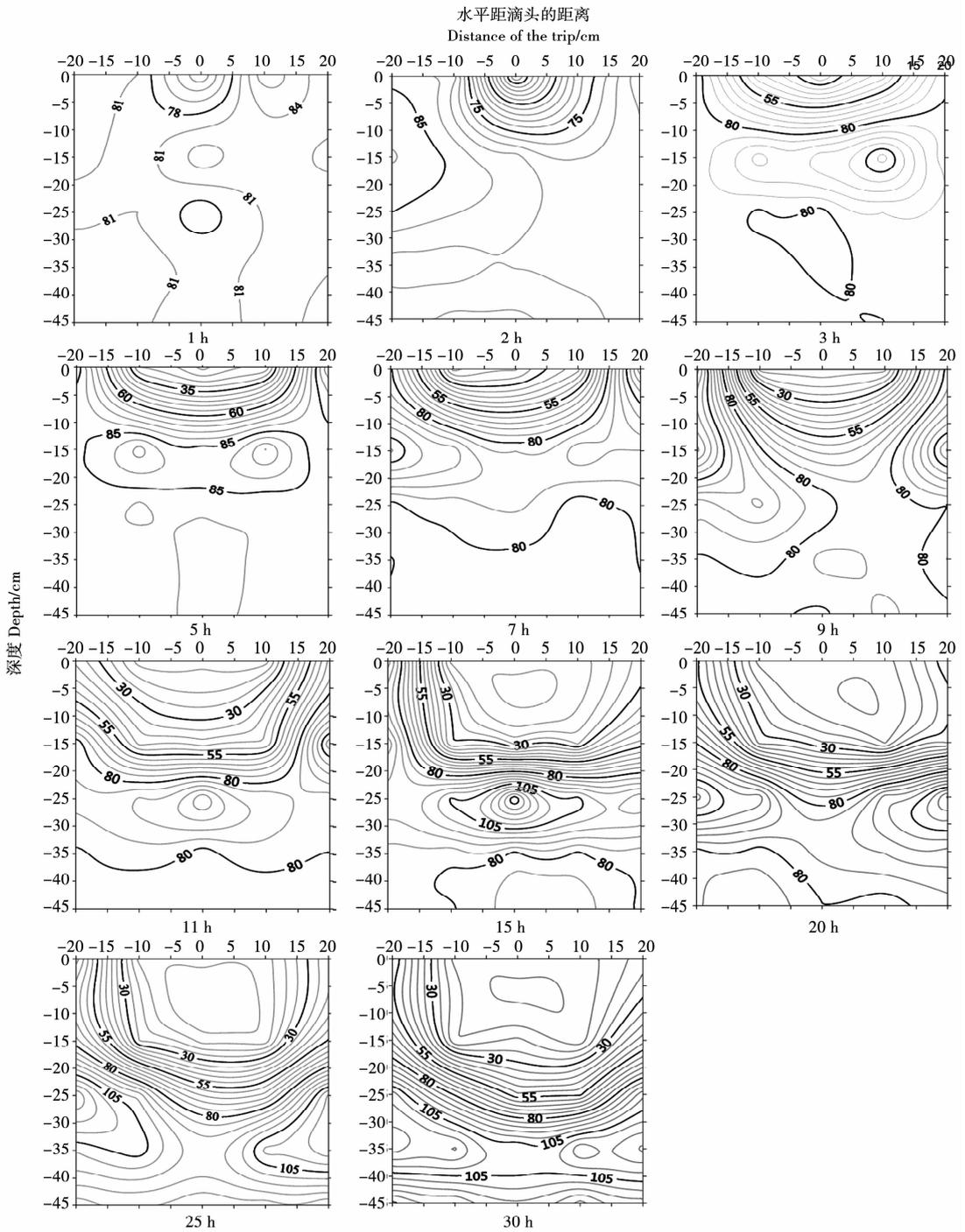


图4 不同时间内土壤总盐分的分布特征 (单位:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig. 4 Distribution characteristics of soil salinities in different time periods

从图5可以看出, 滴头中心位置0~10 cm 土层总盐分含量从滴水后开始下降, 随着滴灌时间的增加, 土壤盐分持续下降, 直至9 h (滴水量  $9.72 \text{ L}\cdot\text{桶}^{-1}$ ) 时达到最低浓度, 并趋于稳定状态。10~20 cm 土层总盐分含量, 在滴灌开始时快速增加, 到3 h 时增加的最大浓度, 之后开始下降到15 h (滴水量  $16.2 \text{ L}\cdot\text{桶}^{-1}$ ) 时浓度达到最低并不再降低。10~20 cm 土层总盐分含量, 在滴灌开始时也呈现缓慢增加的趋势, 到15 h 时, 浓度最高, 之后盐分浓度开始下降。而30~40 cm 土层和40~50 cm 土层总盐分含量, 从滴灌开始到20 h (滴水量  $21.4 \text{ L}\cdot\text{桶}^{-1}$ ) 时基本没有变化, 20 h 后盐分开始缓慢增加。这说明在垂直方向上, 土壤盐分随着灌水时间的增加, 从上到下被淋洗到下层, 最终在表层可以形成一个相对较低的盐分淡化区。

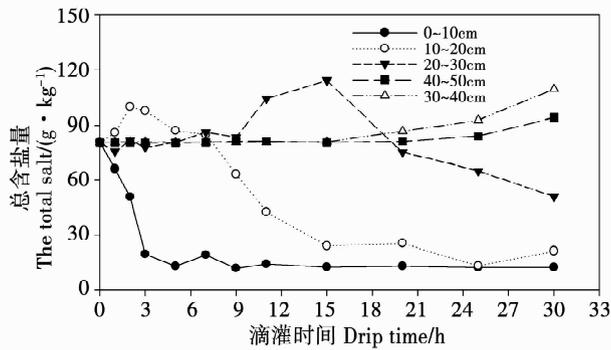


图 5 滴头中心位置不同土层土壤含盐分随时间的变化

Fig. 5 Variation of soil salinity over time in the stratified soil at the center of the drip head

### 2.3 土壤盐分离子分布特征

不同时间内盐分离子的分布特征如图 6 和图 7 所示。在重度盐分条件下，随着滴灌时间的推移， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  离子在整个滴灌过程中，水平方向和垂直方向上都有明显的变化规律。

滴灌后 1 h 后，7 种离子中只有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子在距离滴头中心横向 5 cm 纵向 5 cm 处的边缘处浓度有所增加，形成一个高浓度半圆峰，内部形成一个较小的淡化区域。滴灌后 5 h（滴水量  $5.4 \text{ L} \cdot \text{桶}^{-1}$ ）后，7 种离子低浓度区域进一步扩大，高浓度峰扩大到横向 15 cm 纵向基本维持 10 cm 处， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子横向移动距离大于纵向移动距离。滴灌后 9 h（滴水量  $9.72 \text{ L} \cdot \text{桶}^{-1}$ ）后，7 种离子在高浓度峰线进一步向下移动，此时，横向距离以达到 20 cm 处，纵向距离也基本达到 20 cm 附近，但  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等横向移动放缓，纵向移动加速， $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子纵向移动的速度还是比较缓慢。滴灌后 15 h 后，各种离子的高浓度半圆峰扩大到横向 20 cm 纵向 25 cm 处，低浓度区域也相应的增加，此时可以明显的看以滴头为中心半径 10 cm 左右的半圆形低浓度的离子淡化区。当滴灌时间 20 h 以后，随着灌水时间的增加，灌水量也增加，7 种离子被较大幅度的淋洗，低浓度区域已经扩展到 20 cm 土层以下，各种离子高浓度半圆峰纵向已下降到 30 cm 以下区域。在整个运移过程中 0~20 cm 土层中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子的浓度的下降幅度约有 30%，远远低于  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  的 60% 下降幅度，这一方面说明了  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  的运移速率要高于  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子。

在垂直方向上， $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  离子随着滴灌时间的增加，0~30 cm 土层离子浓度逐渐降低， $\text{Cl}^-$  在 0~30 cm 形成盐离子浓度相对较低的淡化区域，在 35 cm 以下形成离子浓度相对较高的累积层。而  $\text{SO}_4^{2-}$  在 0~25 cm 形成盐离子浓度相对较低的淡化区域，在 30 cm 以下形成离子浓度相对较高的累积层。说明， $\text{Cl}^-$  的运移速率要大于  $\text{SO}_4^{2-}$  离子。由于这种离子运移的差异，离子进行了重新分布，土壤盐分组成发生了变化，0~30 cm 土层土壤盐分由硫酸盐-氯化物型转变为氯化物-硫酸盐型。

### 2.4 土壤脱盐速度变化

在滴孔中心位置表层（0~20 cm）土壤盐分及离子的浓度相对较为稳定，利用已有数据计算了（0~10 cm）土层盐分（盐离子）脱盐速率（图 8）。从图 8 中可以看出，随着滴灌时间的增加，土壤总盐分及  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  的脱盐率变化呈现先快速增加，达到最大值后，再逐渐缓慢降低，最后趋于稳定。当滴灌时间为 3 h 时，总盐分 and 各个离子脱盐速率均达到了最大值，其中  $\text{Cl}^-$  的脱盐速率最大为每小时 31.7%，总体上脱盐速率的大小顺序为  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{总盐分} > \text{SO}_4^{2-}$ 。当滴灌时间为 15 h 时，总盐 and 各个离子的脱盐速率趋于稳定，变化很小，这说明，当滴灌时间达到 15 h（滴水量  $16.2 \text{ L} \cdot \text{桶}^{-1}$ ）时，表层土壤盐分基本达到了最大脱盐水平。

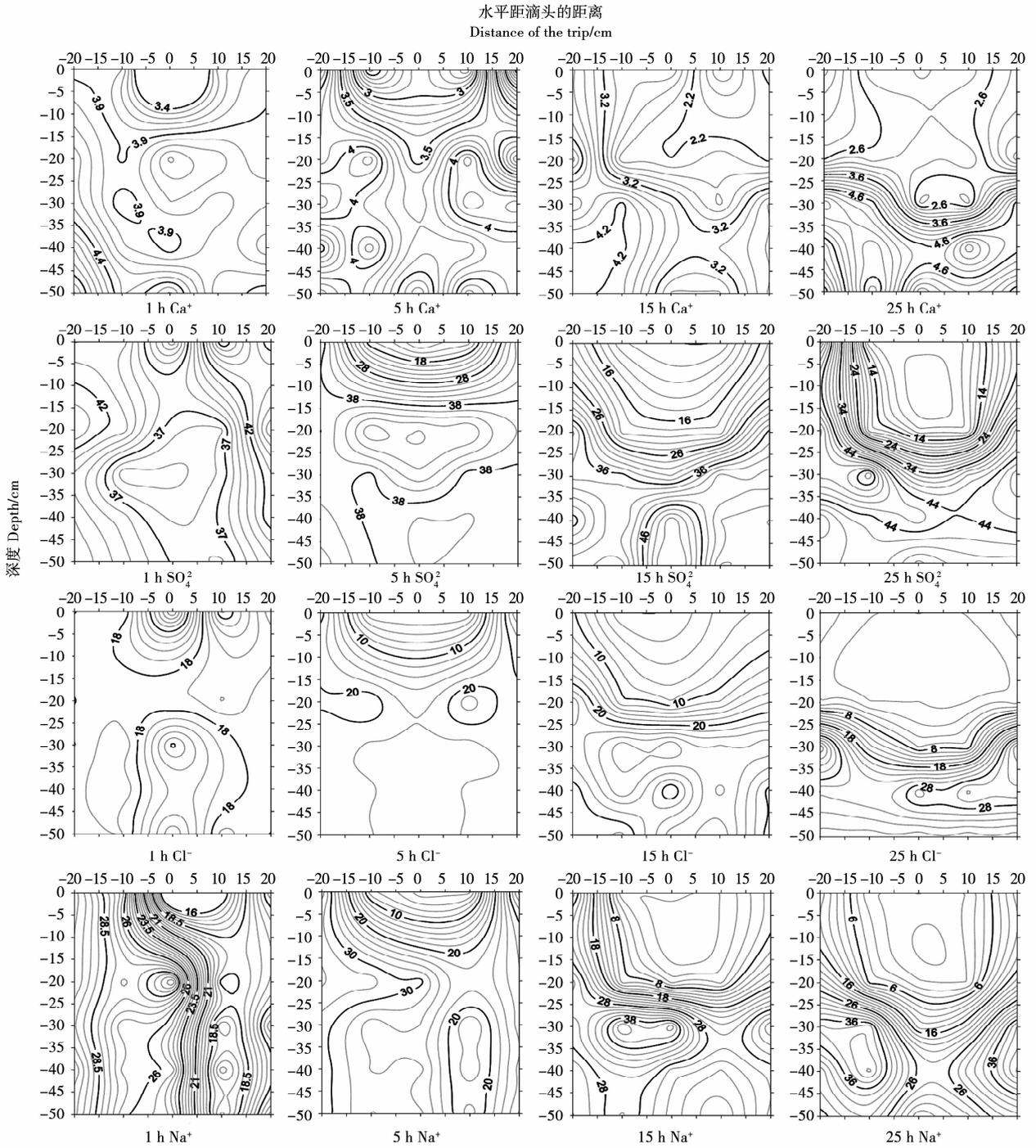


图6 不同时间内盐分离子的分布特征 I (单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 6 Distribution characteristics of salt ions in different time periods I

## 2.5 土壤盐分浓度的模拟

为了进一步揭示重盐渍土壤盐分运移规律,将滴孔中心位置表层(0~20 cm)土壤盐分及离子浓度与滴灌时间的关系进行了数学模型拟合,分别建立了线性、倒数、二次方程、指数函数模型并进行回归分析(表3)。从表3中可以看出,总盐分、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 的浓度与滴灌时间的函数关系符合倒数、二次方程、指数函数模型,均达到了显著相关( $P < 0.05$ ),但从决定系数值来看,倒数模型的决定系数 $R^2$ 值最大,分别为0.907、0.715、0.924、0.927,并且均达到了极显著水平( $P < 0.01$ ),这说明总盐分、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 的浓度与时间的函数关系更加符合倒数模型。表层土壤总盐分、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 的浓度

随滴灌时间的增大而逐渐变小，趋于无限接近 0 值，盐分在表层土壤中无限接近脱盐状态，但不能完全脱盐。通过倒数函数关系，能计算表层土壤达到目标盐分浓度时，所用的灌水时间或者滴灌用水量，可为重度盐碱地灌溉洗盐提供了技术依据。

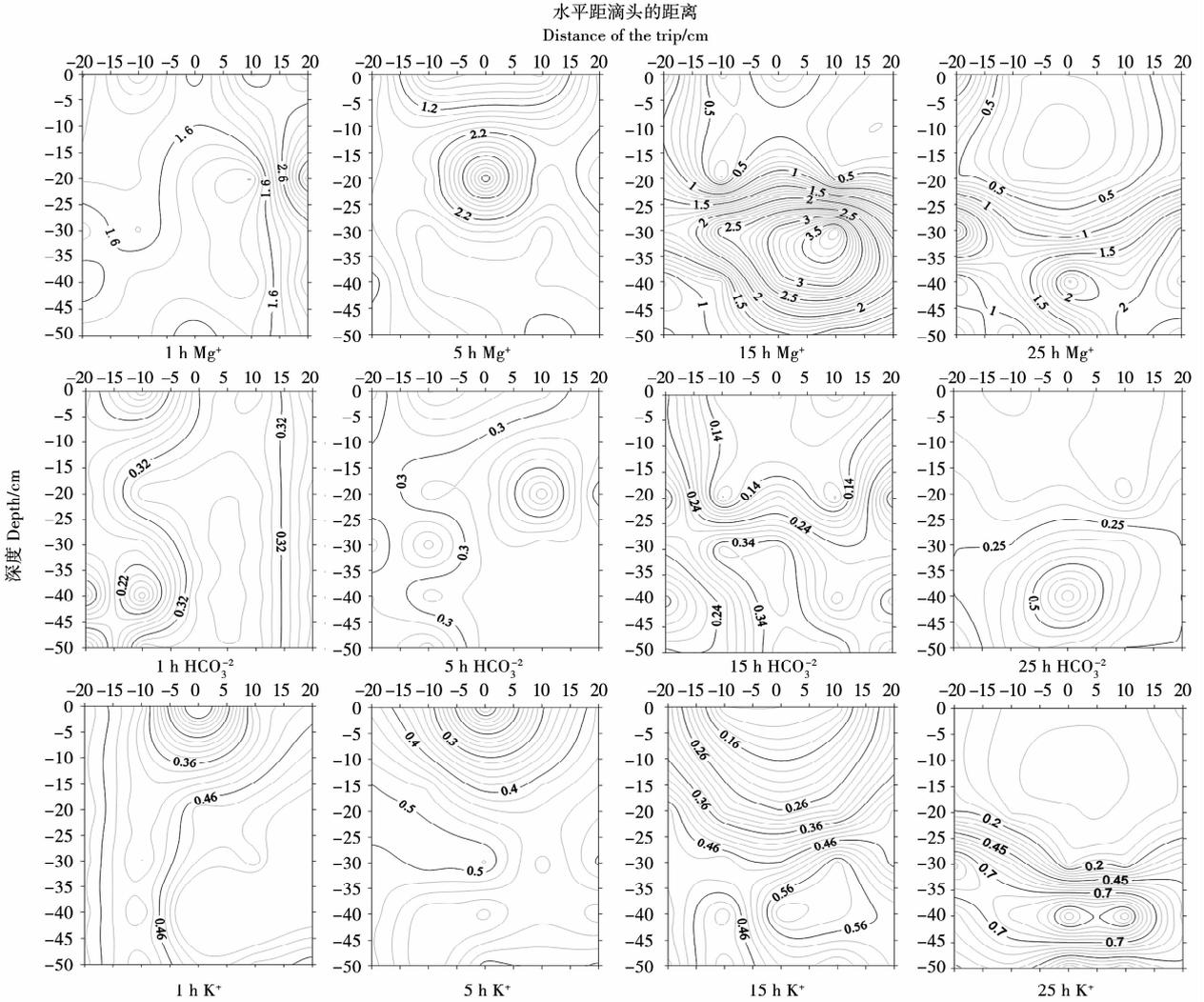


图 7 不同时间内盐分离子的分布特征 II (单位  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig. 7 Distribution characteristics of salt ions in different time periods II

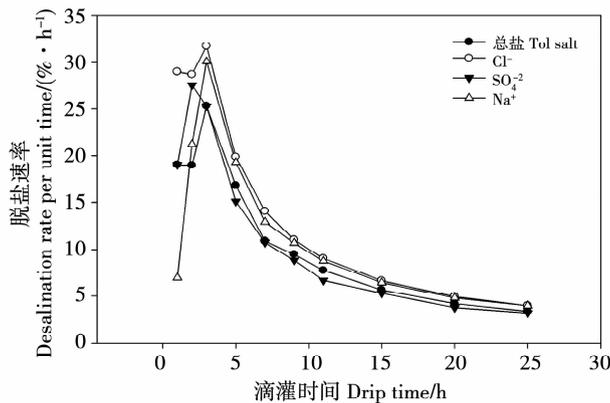


图 8 表层土壤 (0 ~ 20 cm) 总盐和离子随时间的脱盐速率

Fig. 8 Desalination rate of total salts and ions in topsoil (0 ~ 20 cm) with time

表3 盐分浓度与滴灌时间的回归模型

Table 3 Regression model of salt concentration and drip irrigation time

方程类型 Equation type		模型显著性检验 Model significance test					参数估计值 Parameter estimate			
		R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Sig.	常数 Constant	b1	b2	
Total salts	线性 Linear equation	0.364	4.584	1	8	0.065	37.241	-1.441	0.194	
	倒数 Reciprocal equation	0.907	78.408	1	8	0.00	7.681	60.906		
	二次 Quadratic equation	0.672	7.168	2	7	0.02	54.816	-6.280		
Cl <sup>-</sup>	指数 Exponential equation	0.428	5.998	1	8	0.04	30.758	-0.051	0.056	
	线性 Linear equation	0.311	3.611	1	8	0.094	6.924	-0.403		
	倒数 Reciprocal equation	0.715	20.038	1	8	0.002	-1.168	16.352		
	二次 Quadratic equation	0.595	5.138	2	7	0.042	12.031	-1.809		
	指数 Exponential equation	0.454	6.642	1	8	0.033	2.100	-0.166		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	线性 Linear equation	0.296	3.371	1	8	0.104	17.417	-0.512	0.066	
	倒数 Reciprocal equation	0.924	97.868	1	8	0.00	6.260	24.215		
	二次 Quadratic equation	0.528	3.918	2	7	0.072	23.425	-2.166		
	指数 Exponential equation	0.367	4.647	1	8	0.063	15.416	-0.033		
Na <sup>+</sup>	线性 Linear equation	0.345	4.206	1	8	0.074	9.944	-0.548	0.072	
	倒数 Reciprocal equation	0.927	101.765	1	8	0.00	-1.537	24.088		
	二次 Quadratic equation	0.619	5.683	2	7	0.034	16.436	-2.336		
	指数 Exponential equation	0.694	18.105	1	8	0.003	7.632	-0.161		

注: sig. 值 <0.05 表示达到显著水平, sig. 值 <0.01 表示达到极显著水平。

Note: sig. <0.05 indicates a significant difference at 0.05 level, and sig. <0.01 indicates a significant difference at 0.01 level.

### 3 讨论

滴灌的水分入渗方式是点源入渗,盐分随水运动,在滴灌的过程中盐分分布主要集中在湿润体的边缘,土壤湿润锋处的盐分积累主要是由上层土壤盐分向下迁移所致,因此,在土壤湿润体内部必然会形成一个盐分浓度较低的淡化区。这一淡化区可以为作物提供较好的生长环境,也是滴灌开发利用盐碱地的主要思路和策略<sup>[13]</sup>。

盐碱土壤盐分淡化区的概念最早是有王全九等<sup>[4]</sup>在研究滴灌条件下土壤水盐运移特征时提出的,根据滴灌后土壤含盐等值线提出了脱盐区和积盐区的概念。通过本试验可以看出,在重度盐渍化土壤条件下,随着灌水时间的增加,灌水量增加,土壤盐分随着土壤水横向和纵向移动,盐分主要集中在湿润峰附近,不同土层盐分呈现先增加后降低的过程,离子也有相似的规律。滴灌开始后不久,盐分和水分开始横向运动,盐离子也以横向移动,在滴灌一定时间后土壤盐分开始在0~10 cm区域形成了一个椭圆形盐分浓度较低的盐分淡化区域,随着滴灌时间的增加这个盐分淡化区逐渐扩大,到灌水结束,盐分淡化区的直径扩大到30 cm,并在30 cm以下形成了约10 cm宽的集盐区。本研究与许多研究结果<sup>[3-7,12]</sup>是相似的,但本研究中盐分淡化区的大小与一些研究结果<sup>[3,7]</sup>有一定差异,这可能与采用的低头流量和土壤质地等有关。本研究所使用的滴灌材料是小流量(1.08 L·h<sup>-1</sup>)的滴灌带,而其他研究是基于大田尺度,所采用的滴灌材料是大流量(2.4~3.2 L·h<sup>-1</sup>)滴灌带,不同的流量,导致不同的出水量,结果会有差异<sup>[5]</sup>。同时,本研究所用的土壤质地为砂质壤土,与上述研究的土壤存在差异,进而影响了盐分运移,关于这方面的研究较少,还需要进一步深入研究。

盐渍化土壤在形成盐分淡化区的过程，其实质是盐分离子随水移动的过程，各种盐分离子随水淋洗的速率并不相同<sup>[8]</sup>。本研究结果表明，表层土壤总盐分和离子脱盐速率的大小顺序为  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{总盐分} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+}$ ，一定程度上说明  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  离子在土壤中随水移动性较强，移动速度要大于其他离子，这与大部分文献报道是一致的<sup>[8,13,15]</sup>。在滴灌 15 h（滴水量  $16.2 \text{ L} \cdot \text{桶}^{-1}$ ）后，土壤横向  $0 \sim 20 \text{ cm}$  纵向  $0 \sim 20 \text{ cm}$ ， $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  浓度下降幅度趋于稳定状态，脱盐率达到 90% 以上，而  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  浓度下降幅度也趋于稳定状态，但脱盐率不足 40%，相对较低。由此看来，盐分淡化区的形成过程离子贡献  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 。

由于离子运移速率的不同，在灌溉过程中土壤盐分离子组成也会发生改变。本研究发现（表 4），滴灌前后不同区域土壤中  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  发生了变化，而  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  的比值表达了不同的盐碱类型，因此，土壤盐分淡化区内（ $0 \sim 30 \text{ cm}$ ）的盐分类型已由硫酸盐 - 氯化物型转变为氯化物 - 硫酸盐型，这与部分文献报道的结果是相似的<sup>[13-15]</sup>。不同离子对作物的作用效果是不一致的，大量研究表明<sup>[17-19]</sup>，高浓度  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  溶液会不同程度的抑制种子的萌发，抑制植物根和茎的生长。本研究结果表明，通过采用滴灌方式能够在耕层形成盐分淡化区，淡化区内盐分淋洗脱盐速率和脱盐率较大的离子是  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  及  $\text{SO}_4^{2-}$ ，这对植物的生长是有利的，尤其是作物苗期的生长，这对于盐碱地的改良利用具有一定的指导意义。由于本试验目的是为了探明滴灌过程中盐分离子的运动过程，选择了盐分较重的盐渍化土壤，未进行作物种植，并未涉及到盐分淡化区构建与作物生长的关系，关于这方面的工作还需要进行进一步研究探讨。同时作物根系对土壤盐分离子也有一定的作用<sup>[16,20]</sup>，影响离子的分布特征，本文只研究了在非种植情况下，滴灌对离子的分布的影响，还需要明确在种植作物后土壤盐分淡化区形成过程中离子的分布特征，研究离子分布与作物根系分布之间的相互关系，探明作物在滴灌条件下的耐盐机理，明确离子对作物的毒害作用，进而为盐渍化的改良利用提供有效的方法。

表 4 滴灌前后土壤盐分  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  的变化Table 4 Changes of soil salinity  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  before or after drip irrigation

横向距离 Transverse distance/cm	深度 Depth/cm	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (N)	
		初始 Initial	25 h
0	-10	1.08	0.02
	-20	1.38	0.04
	-30	1.19	0.46
	-40	1.28	1.78
	-50	1.14	1.40
10	-10	1.19	0.05
	-20	1.44	0.04
	-30	1.31	0.47
	-40	1.28	1.99
	-50	1.41	1.27
20	-10	1.20	0.39
	-20	1.03	0.09
	-30	1.16	1.97
	-40	1.14	1.84
	-50	1.22	1.29

## 4 结 论

土壤总盐分及各个离子随着滴灌水的运移而运动, 先进行横向运移, 再进行纵向移动, 在滴灌一定时间 (5h) 后纵向移动距离大于横向移动距离, 当滴灌时间为 15 h (滴水量  $16.2 \text{ L} \cdot \text{桶}^{-1}$ ) 时, 在  $0 \sim 30 \text{ cm}$  区域内形成稳定的椭圆形离子淡化区, 淡化区边缘形成了约  $10 \text{ cm}$  宽的集盐区。在整个运动过程中, 表层  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层总体上脱盐速率的大小顺序为  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{总盐分} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 。表层土壤总盐分、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$  的浓度与滴灌时间的函数关系更加符合倒数模型, 浓度变化随滴灌时间的增大而逐渐变小, 无限逼近脱盐状态, 滴灌后盐分淡化区内土壤的盐分类型由硫酸盐-氯化物型转变为氯化物-硫酸盐型。

## 参考文献 (References):

- [1] 樊自立, 乔 木, 徐海量, 等. 合理开发利用地下水是新疆盐渍化耕地改良的重要途径 [J]. 干旱区研究, 2011, 28 (5): 737-743.  
FAN Z L, QIAO M, XU H L, et al. Rational groundwater exploitation and utilization, an important approach of improving salinized farmland in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2011, 28 (5): 737-743.
- [2] 新疆维吾尔自治区土壤普查办公室. 新疆土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
Office of Xinjiang Soil Survey. Xinjiang soil [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [3] 杨鹏年, 董新光, 刘 磊, 等. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (12): 90-95.  
YANG P N, DONG X G, LIU L, et al. Soil salt movement and regulation of drip irrigation under plastic film in arid area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (12): 90-95.
- [4] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16 (4): 54-57.  
WANG Q J, WANG W Y, LÜ D Q, et al. Water and salt transport features for salt-affected soil through drip irrigation under film [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16 (4): 54-57.
- [5] 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, 32 (6): 794-801.  
LÜ D Q, WANG Q J, WANG W Y, et al. Factors affecting soil water movement and solute transport for film drip irrigation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 32 (6): 794-801.
- [6] 王雅琴, 刘洪光, 朱拥军, 等. 重盐碱地膜下滴灌土壤盐分运移规律研究 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 19 (3): 58-60.  
WANG Y Q, LIU H G, ZHU Y J, et al. Salinity migration rule under mulching plastic drip Irrigation in heavy salty soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 19 (3): 58-60.
- [7] 弋鹏飞, 虎胆·吐马尔白, 吴争光, 等. 棉田膜下滴灌土壤盐分变化规律研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33 (1): 72-77.  
GE P F, HUDAN T M E B, WU Z G, et al. Research on change law of soil-salt under film drip irrigation in cotton field [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33 (1): 72-77.
- [8] 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 Y P, KANG Y H, WANG S Q, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (6): 53-58.
- [9] 王若水, 康跃虎, 万书勤, 等. 内陆干旱区不同灌溉制度对盐碱地滴灌土壤盐分离子分布的影响 [J]. 土壤通报, 2013, 44 (3): 567-574.  
WANG R S, KANG Y H, WANG S Q, et al. Effect of different irrigation regimes on the distribution of soil salt under drip irrigation on saline and alkaline soil in inland and arid region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (3): 567-574.
- [10] 孙三民, 安巧霞, 乔 英. 灌水量对间接地下滴灌条件下土壤盐分离子空间分布的影响 [J]. 节水灌溉, 2015 (10): 54-56+62.  
SUN S M, AN Q X, QIAO Y. Soil salinity removal affected by irrigation quantity under indirect subsurface drip irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2015 (10): 54-56+62.
- [11] DOU C Y, KANG Y H, WAN S Q, et al. Soil salinity changes under cropping with *Lycium barbarum* L. and irrigated with saline-sodic wa-

- ter [J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (4): 539–548
- [12] 牟洪臣, 虎胆·吐马尔白, 苏里坦, 等. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (7): 18–22.  
MU H C, HUDAN T M E B, SU L D, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (7): 18–22.
- [13] 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 J L, KANG Y H, JIAO Y P, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24 (6): 59–63.
- [14] 宋 楠, 杨思存, 刘学录, 等. 不同种植年限盐碱荒地土壤盐分离子分布特征 [J]. *土壤学报*, 2014, 51 (03): 660–665.  
SONG N, YANG S C, LIU X L, et al. Distribution characteristics of soil salt ions in saline land relative to cultivation history [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 660–665.
- [15] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (10): 67–74.  
LI W H, WANG Z H, ZHENG X R, et al. Soil salinity variation characteristics of cotton field under long-term mulched drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (10): 67–74.
- [16] 郭全恩, 王益权, 马忠明, 等. 植被类型对土壤剖面盐分离子迁移与累积的影响 [J]. *中国农业科学* 2011, 44 (13): 2711–2720.  
GUO Q E, WANG Y Q, MA Z M, et al. Effect of vegetation types on soil salt ions transfer and accumulation in soil profile [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (13): 2711–2720.
- [17] 张国伟, 路海玲, 张 雷, 等. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22 (8): 2045–2053.  
ZHANG G W, LU H L, ZHANG L, et al. Salt tolerance evaluation of cotton (*Gossypium hirsutum*) at its germinating and seedling stages and selection of related indices [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (8): 2045–2053.
- [18] 齐 琪, 马书荣, 徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展 [J]. *分子植物育种*, 2020, 18 (8): 2741–2746.  
QI Q, MA S R, XU W D. Advances in the effects of salt stress on plant growth and physiological mechanisms of salt tolerance [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18 (8): 2741–2746.
- [19] 杨洪坤, 周保平, 王亚明, 等. 盐分对作物生长及氮素营养的影响研究 [J]. *新疆农垦科技*, 2016, 39 (10): 44–47.  
YANG H K, ZHOU B P, WANG Y M, et al. Effects of salinity on crop growth and nitrogen nutrition [J]. *Xinjiang Farm Research of Science and Technology*, 2016, 39 (10): 44–47.
- [20] 田 野, 张焕朝, 方升佐, 等. 盐胁迫下杨树根际系统盐分离子分布特性 [J]. *植物资源与环境学报*, 2003, 12 (3): 11–15.  
TIAN Y, ZHANG H C, FANG S Z, et al. Distribution characteristics of  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  in poplar rhizosphere system under salt stress [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2003, 12 (3): 11–15.