

# 地下水浅埋区重度盐碱地不同滴灌 种植年限土壤盐分分布特征<sup>①</sup>

窦超银<sup>1,2</sup>, 康跃虎<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 采用时空替代的研究方法, 研究地下水浅埋区重度盐碱地不同滴灌种植年限 (0、1、2、3 年) 对土壤盐分及不同盐分离子分布的影响, 旨在为采用覆膜滴灌技术进行盐碱地改良提供理论依据。试验结果表明滴灌种植枸杞第 1 年, 土壤盐分变化主要为自上而下被淋洗, 种植 2 年和 3 年土壤年内盐分含量和分布变化相似, 盐分主要分布在土壤表层, 且在枸杞生育期结束时, 剖面土壤含盐量都低于年初水平; 土壤溶液电导率 ( $EC_{1.5}$ ) 与主要离子之间都具有极显著的相关关系, 其中  $Cl^-$  和  $Na^+$  与  $EC_{1.5}$  关系最为紧密;  $HCO_3^-$  与  $EC_{1.5}$  负相关, 相关性随着种植年限的增加而减小;  $Cl^-$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$  在盐分组成中的荷载随种植年限增加而增大; 回归分析表明  $Cl^-$  和  $EC_{1.5}$  之间具有线性关系,  $SO_4^{2-}$  与  $EC_{1.5}$  之间具有对数关系,  $EC_{1.5}$  可以通过  $Cl^-$  和  $SO_4^{2-}$  表达; 利用咸水覆膜滴灌并没有根本改变土壤类型, 但在距滴头水平距离 0~30 cm 范围内土壤含盐量从 13.1 g/kg 降低到 4~6 g/kg, 由盐土脱盐演化为重度盐化土。因此, 采用覆膜滴灌技术明显降低了作物根区盐分含量, 改善了作物根系生长的土壤环境条件。

**关键词:** 覆膜滴灌; 盐碱地; 种植年限; 土壤盐分

**中图分类号:** S156.4

盐渍土的田间水盐运动主要为土面蒸发和降雨及灌溉水入渗两个过程, 在干旱半干旱地区, 由于蒸发强烈, 水盐上行运动占优势, 盐分积存于土壤上层, 尤其地下水浅埋区, 地下水和下层土壤中的盐分随潜水强烈蒸发向根系层、土壤表层运移和累积, 土壤盐渍化严重; 同时, 在土壤盐渍化地区, 一般地下水位越高, 地下水矿化度越大<sup>[1]</sup>, 因此, 传统的淡水灌溉淋洗或开采利用地下水资源可能导致进一步抬高地下水位加重积盐或由于地下水矿化度较高不利于作物生长。但干旱半干旱的西北地区是盐渍土主要分布地带, 改造治理及合理开发利用这些资源, 对改善地区生态环境, 推动区域经济、社会和生态可持续发展具有特别重要意义<sup>[2]</sup>。

滴灌点水源扩散的特点, 使土壤中的盐分离子被淋洗到作物根系分布范围以外, 其小流量、长时间、高频率的灌溉特点可以始终维持较高的土壤基质势来弥补因灌溉水中含盐量增加而降低的土壤渗透势, 使得作物根系分布层的土壤总水势维持在较高的水平, 有利于作物根系吸水<sup>[3-4]</sup>; 覆膜种植具有减少土表蒸

发, 保持土壤水分和抑制盐分向土表运移的作用, 焦艳平等<sup>[5-6]</sup>在宁夏青铜峡金沙湾第三系红土盐碱土上利用覆膜滴灌技术进行盐碱地开发利用, 取得了显著效果, 糯玉米和油葵长势良好, 产量达到周边良田的水平。谭军利等<sup>[7]</sup>进一步对覆膜滴灌盐碱地不同种植年限离子分布进行研究, 结果表明根区土壤化学性质随着种植年限增加逐渐变好, 有利于作物生长。但在本研究区域, 不仅土壤含盐量高, 同时地下水位 (30~40 cm) 和地下水矿化度 ( $\approx 7.3$  g/L) 也长期维持在较高水平, 针对这一复杂的水文地质条件, 本文利用高垄相对降低地下水位, 并将研究区内高矿化度地下水用于覆膜滴灌, 同时对咸水覆膜滴灌不同种植年限土壤盐分含量、组成及分布特征进行分析, 以为地下水浅埋区覆膜滴灌及重度盐碱地开发利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区基本概况

试验在中国科学院地理科学与资源研究所咸水

<sup>①</sup>基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-13) 和中国科学院百人计划项目资助。

\* 通讯作者 (kangyh@igsnrr.ac.cn)

作者简介: 窦超银 (1982—), 男, 江苏如皋人, 博士研究生, 研究方向为农业水土资源高效利用。E-mail: chydou@163.com

滴灌与盐碱地开发利用技术与示范基地进行，该基地位于宁夏回族自治区平罗县灵沙乡何家村（38°59'N，106°45'E），海拔约 1 095 m。地属银川平原引黄灌区的末梢，属典型的温带大陆性气候，全年日照充足，降水量集中，蒸发强烈，空气干燥，温差较大，无霜期短。年平均降水量 178 mm，年平均蒸发量 2 111 mm；年平均气温 9.4℃，年最低平均气温 -21.3℃，年最高平均气温 34.3℃。2008 年作物生育期内降雨及蒸发如图 1 所示。

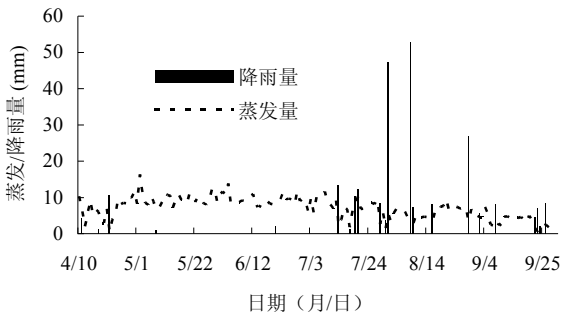


图 1 2008 年作物生育期内降雨量与蒸发量

Fig. 1 Rainfall and evaporation during the growing season in 2008

试验区地势低平，稍有起伏，地下水埋深长期在 30~40 cm 之间，盐分表聚明显，地表有盐霜或结皮。表层（0~10 cm）土壤化学性质如表 1 所示，土壤含盐量为 13.1 g/kg，其中阳离子主要是 Na<sup>+</sup> 离子，占全盐含量的 28%（质量比，下同），阴离子主要是 Cl<sup>-</sup> 和

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子，分别占全盐含量的 35.3% 和 27.9%。土壤属于 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Cl<sup>-</sup> 类重度盐土，pH 呈碱性，土壤质地为粉质土（黏粒约 3.7 g/kg，粉粒约 920 g/kg，砂粒约 76.4 g/kg）。

灌溉水利用当地地下水，化学组成如表 2 所示，可溶性总盐含量（TDS）7.27 g/L，属于矿化度较高的咸水，其中阳离子主要是 Na<sup>+</sup> 离子，占可溶性总盐含量的 30.4%，阴离子主要是 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 离子，分别占可溶性总盐含量的 38.8% 和 20.2%，钠吸附比（SAR）为 29.3 (mmol<sub>c</sub>/L)<sup>0.5</sup>。

1.2 试验设计

试验始于 2006 年，于当年 3 月底起垄并种植枸杞，垄肩宽 0.6 m，高 0.8 m，长 75 m，垄距 3 m，枸杞品种为宁杞一号，行距 3 m，株距 1 m，枸杞种植完毕布置田间毛管，单垄单条毛管且位于垄上中部，垄上覆膜。滴头间距 0.2 m，滴头流量 0.6 L/h。第一次灌水量为平时灌水量的 4 倍左右，约为 16 mm，此后每天灌水 4 mm，上午 8:00 时，下午 18:00 时各灌 1 次，灌水量均为 2 mm/次，为了减轻冬季返盐的不利影响，在枸杞进入休眠期前进行冬灌，冬灌灌水量约 16 mm；第 2 年在枸杞萌芽期前春浇洗盐，灌水量为 16 mm，此后灌水与第 1 年相同；第 3 年枸杞灌溉制度与第 2 年相同。氮肥（尿素）、磷肥（磷酸）、钾肥（硝酸钾）均随水施肥，年使用量分别为 270、67.5、135 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 表层（0~10 cm）土壤含盐量及离子组成

Table 1 Soil salt content and ion composition of surface soil (0~10 cm)

pH	土壤含盐量 (g/kg)	阴离子 (g/kg)				阳离子 (g/kg)			
		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
8.7	13.1	-	0.32	3.66	4.62	0.04	3.67	0.28	0.47

表 2 灌溉水化学性质

Table 2 Chemical properties of irrigation water

pH	TDS (g/L)	阴离子 (g/L)				阳离子 (g/L)			
		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
7.6	7.27	-	0.45	1.47	2.82	0.01	2.21	0.13	0.18

本研究采用时空转换的方法，将时间序列放到空间分布上来。以滴灌种植年限为处理，以尚未开发的盐碱荒地为第 0 年（对照），以当年（2008 年）开发利用的为种植 1 年处理（1a），以前一年（2007 年）开发利用的为种植 2 年处理（2a），以 2006 年开发利用

的为种植 3 年处理（3a）。试验采样时间分别为 2008 年 4 月 15 日（枸杞生育期开始时）和 2008 年 10 月 15 日（冬灌前、枸杞生育期结束时）。取样点分布为距滴头水平距离 0（滴头正下方）、10、20、30、40、50、60、70、80、100、120、150 cm，表层每 10 cm

取一次样, 40 cm 以下土层每 20 cm 取一次样, 80 cm 以下土层每 40 cm 取一次样, 取样深度到潜水位, 约垄下 120 cm 附近。每次采集土样取 3 个重复, 土样取回后立即风干, 碾细过 1 mm 筛并装入自封袋中供分析用。

### 1.3 分析项目及方法

以土水比 1:5 配置土壤溶液, 利用 DDS-11A 电导率仪测定土壤溶液电导率 ( $EC_{1:5}$ ), 文中土壤盐分含量均用  $EC_{1:5}$  值表示。 $HCO_3^-$  采用双指示剂-中和滴定法;  $Cl^-$  采用硝酸银滴定法;  $SO_4^{2-}$  采用 EDTA 间接络合滴定法;  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  用 EDTA 滴定法;  $Na^+$ 、 $K^+$  用火焰光度计法测定。具体分析方法参见文献[8]。

### 1.4 数据分析

采用 Surfer7.0、SPSS16.0 和 Excel2003 软件对数据进行分析。由于取样在垂直方向上间隔距离不一样, 在分析数据时采用加权平均值。加权平均值 =  $\sum(\text{样品含量} \times \text{取样深度} / \text{分析深度})$ , 文中平均值均指加权平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植年限对土壤盐分含量和分布的影响

4 月, 枸杞生育期开始时, 种植 2 年和种植 3 年的试验小区垄中土壤解冻后, 在春季强烈蒸发作用下, 盐分随着水分蒸发向表层土壤运动; 除垄顶覆膜阻碍

了水分蒸发, 抑制了盐分累积外, 垄坡和垄沟盐分表聚明显, 而滴头下方, 作物根系主要分布区域土壤盐分含量较低 (图 2B、C); 种植 1 年处理是采用半挖半填新起的高垄, 垄沟含盐量较大的表层土壤在垄上堆积, 使垄中土壤盐分形成明显的上下分异, 上层土壤含盐量高且受人为扰动影响分布不均, 下层土壤盐分含量低且分布均匀; 垄坡和垄沟土壤在蒸发作用下表层有盐分累积 (图 2A)。

10 月, 枸杞生育期结束时, 剖面土壤盐分含量和分布如图 2D ~ F 所示, 种植 1 年处理上层土壤盐分整体被淋洗到下层土壤中, 滴头下方形成一个以滴头为圆心的椭圆形脱盐区; 种植 2 年和 3 年处理土壤剖面盐分含量相近; 年内盐分含量和分布变化也相似, 年末土壤盐分含量均低于年初水平, 距滴头水平距离 30 cm 范围内 (垄肩下),  $EC_{1:5}$  值接近 2 dS/m, 盐分分布均匀, 水平、垂向变化差异较小, 垄坡和垄沟表层土壤均有盐分表聚。

从表 3 中可以看出, 不同种植年限年初、年末高垄剖面平均含盐量均高出对照土壤, 即高垄相对降低了地下水位, 但是增加了地下水的上升高度, 同时高垄增加了土壤蒸发面积使垄内土壤含盐量增加。而新起高垄 (种植 1 年处理) 由于填方中含有挖方土壤的大量表聚盐分, 剖面含盐量高于已种植土壤。

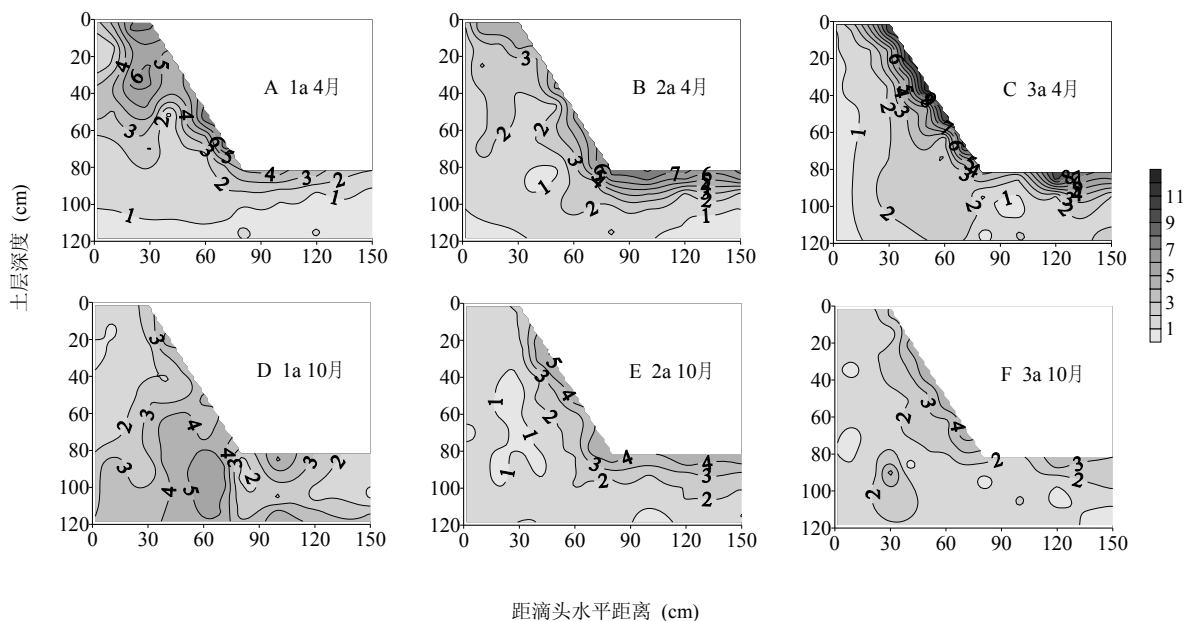


图 2 不同种植年限剖面土壤溶液电导率 (dS/m) 及分布

Fig. 2 Soil electrical conductivity in bed profiles in different planting years

表3 不同种植年限剖面土壤盐分分布特征

Table 3 Characters of soil electrical conductivity in bed profiles in different planting years

取样时间	处理	剖面EC <sub>1.5</sub> 均值 (dS/m)	0~10 cm EC <sub>1.5</sub> 均值 (dS/m)	0~20 cm EC <sub>1.5</sub> 均值 (dS/m)	0~10 cm 含盐占 剖面盐分总量百分数	0~20 cm 含盐占 剖面盐分总量百分数
4月	对照	1.49	4.90	2.74	82.5%	92.3%
	1a	2.32	4.75	3.75	25.6%	40.5%
	2a	2.09	5.21	4.03	31.1%	48.1%
	3a	2.30	6.52	4.51	35.4%	49.0%
10月	对照	1.22	2.98	1.92	61.2%	78.9%
	1a	2.42	2.82	2.52	14.6%	26.1%
	2a	1.62	3.48	2.93	26.8%	45.1%
	3a	1.69	2.96	2.47	21.9%	36.5%

年初, 对照撂荒土壤、种植1年、2年和3年处理土壤表层0~10 cm层EC<sub>1.5</sub>均值分别为4.90、4.75、5.21和6.52 dS/m, 0~10 cm土层土壤含盐分别占剖面盐分总量的82.5%、25.6%、31.1%和35.4%; 4种处理表层0~20 cm层EC<sub>1.5</sub>均值分别为2.74、3.75、4.03和4.51 dS/m, 土壤含盐占剖面盐分总量的92.3%、40.5%、48.1%和49.0%。可见, 由于对照未作处理, 荒地地下水稳定在30~40 cm, 盐分主要集中在地表形成盐霜和盐结皮, 而20 cm以下土层盐分没有明显累积, 土壤含盐量较低, 仅占0~40 cm土层盐分的7.7%; 起垄种植后, 种植1年处理由于起垄时人为影响, 表层土由挖方处0~40 cm土层土壤混合构成, 土壤盐分低于对照土壤, 随着水盐在灌溉过程中的不断向表层迁移, 表层土壤盐分含量随种植年限增加而加剧; 虽然种植3年处理剖面平均含盐量高于2年处理, 但从表3和图2可以看出, 盐分的增加主要在土壤表层, 在作物根系分布区域土壤含盐量并没有随种植年限增加而增大<sup>[9]</sup>。

年末, 3种植年限处理在降雨和灌溉淋洗后土

壤表层0~10 cm和0~20 cm土层土壤盐分和盐分占剖面总盐含量的百分数与年初相比均有不同程度的下降; 种植2年处理土壤表层0~10 cm和0~20 cm土层土壤含盐和盐分占剖面总盐含量的百分数均高于种植3年处理, 这主要是由于盐分被连续降雨淋洗到表层以下土层后, 种植3年处理的枸杞冠径(1.47 m)、株高(1.23 m)大于种植2年处理的枸杞冠径(1.26 m)、株高(1.05 m), 稍长、稍粗和叶片面积等也高于种植2年处理, 土壤蒸发低于种植2年处理, 土壤返盐缓慢。枸杞生育期结束后土壤很快进入冻结期, 3年种植处理中盐分的这一分布为下一年春季爆发性积盐提供了条件<sup>[10]</sup>。

## 2.2 不同种植年限对土壤盐分离子组成的影响

通过对EC<sub>1.5</sub>与土壤盐分主要离子相关分析可知, 除种植3年处理EC<sub>1.5</sub>与HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>显著相关外, 枸杞生育期前后各年限处理EC<sub>1.5</sub>与主要离子之间都具有极显著的相关关系, 其中Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>与土壤盐分关系最为紧密, 相关系数均在0.9以上; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>与EC<sub>1.5</sub>负相关, 且相关性随着种植年限的增加而减小(表4)。

表4 土壤溶液电导率(EC<sub>1.5</sub>)与主要离子相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil electrical conductivity and major ions

取样时间	处理	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
4月	1a	-0.618**	0.959**	0.810**	0.930**	0.888**	0.410**	0.978**
	2a	-0.577**	0.959**	0.776**	0.900**	0.892**	0.892**	0.927**
	3a	-0.262*	0.963**	0.816**	0.938**	0.941**	0.939**	0.944**
10月	1a	-0.408**	0.956**	0.866**	0.806**	0.564**	0.579**	0.911**
	2a	-0.349**	0.974**	0.885**	0.796**	0.837**	0.849**	0.963**
	3a	-0.275*	0.972**	0.850**	0.826**	0.921**	0.855**	0.956**

注: \*\*表示 p<0.01 显著相关; \*表示 p<0.05 显著相关。

土壤盐分离子组成主成分分析结果表明：不同种植年限处理枸杞生育期前后第一、第二和第三主成分累积贡献率均大于 90%。主成分I中， $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、

$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  都有较高的荷载， $\text{K}^+$  在种植 1 年后也具有较高的荷载； $\text{HCO}_3^-$  在主成分I中荷载为负值，但经过滴灌灌溉后，在主成分II中荷载最大（表 5）。

表 5 土壤盐分主成分因子荷载  
Table 5 Load factors of principal components of soil salt

变量	1a 主成分			2a 主成分			3a 主成分		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$\text{HCO}_3^-$	-0.768 (-0.266)	0.186 (0.798)	0.586 (0.537)	-0.692 (-0.566)	0.706 (0.801)	0.140 (0.169)	-0.326 (-0.358)	0.945 (0.929)	-0.007 (0.089)
$\text{Cl}^-$	0.948 (0.887)	0.012 (0.318)	0.197 (-0.284)	0.922 (0.912)	0.163 (0.283)	-0.319 (-0.214)	0.982 (0.945)	0.052 (-0.012)	-0.111 (0.265)
$\text{SO}_4^{2-}$	0.864 (0.938)	-0.190 (-0.047)	-0.051 (-0.004)	0.871 (0.942)	-0.103 (0.031)	0.395 (0.144)	0.839 (0.891)	0.061 (0.172)	0.540 (-0.289)
$\text{Mg}^{2+}$	0.932 (0.885)	-0.016 (-0.093)	0.222 (-0.067)	0.954 (0.889)	0.117 (-0.014)	0.070 (0.387)	0.968 (0.890)	0.012 (0.113)	-0.053 (-0.334)
$\text{Ca}^{2+}$	0.934 (0.775)	-0.082 (-0.481)	-0.003 (0.204)	0.953 (0.931)	0.100 (-0.039)	0.149 (0.102)	0.963 (0.949)	0.085 (0.070)	-0.084 (0.086)
$\text{K}^+$	0.475 (0.767)	0.868 (-0.394)	-0.131 (0.350)	0.960 (0.936)	0.097 (-0.029)	0.099 (-0.042)	0.960 (0.933)	0.051 (0.017)	-0.114 (-0.006)
$\text{Na}^+$	0.962 (0.849)	-0.026 (0.364)	0.173 (-0.300)	0.923 (0.911)	0.139 (0.266)	-0.278 (-0.267)	0.966 (0.941)	0.065 (0.009)	-0.108 (0.277)
方差贡献累积 (%)	54.89 (39.14)	76.01 (75.41)	92.04 (90.36)	40.29 (41.12)	77.05 (74.77)	95.13 (93.26)	64.14 (42.82)	81.11 (77.91)	96.36 (93.30)

注：括号中为 10 月份主成分因子荷载。

枸杞生育期前后，各年限处理主要离子的荷载变化相似，经过灌溉种植后  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  荷载低于年初水平，而  $\text{SO}_4^{2-}$  荷载高于年初水平，说明  $\text{SO}_4^{2-}$  受离子电荷、水化半径和离子浓度以及其他特性影响，被土壤胶体吸附的能力较强，与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  相比，受灌溉和降雨后水分运动的影响较小。

种植年限对主成分的影响主要表现为  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  荷载在枸杞生育期结束时随种植年限增加而增大，可能原因是灌溉水中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  在土壤中累积使  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  荷载增大，同时由于种植过程中灌溉水和降雨的淋洗、作物根系呼吸和根系分泌物等使得土壤 pH 随种植年限增加而降低，而固定态钙镁溶解性因 pH 降低而增大，因此表现出  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  荷载增大<sup>[7]</sup>。

将土壤溶液电导率 ( $\text{EC}_{1:5}$ ) 与土壤主要盐分离子回归统计，得到标准多元回归方程：

在枸杞生育期开始时（4月）：

$$\text{种植 1 年处理：} \text{EC}_{1:5} = 0.13x_2 + 2.08x_4 + 0.88x_7$$

$$R^2 = 0.989 \quad (1)$$

$$\text{种植 2 年处理：} \text{EC}_{1:5} = 0.49x_2 + 0.55x_3 - 0.09$$

$$R^2 = 0.949 \quad (2)$$

$$\text{种植 3 年处理：} \text{EC}_{1:5} = 0.63x_2 + 0.50x_3$$

$$R^2 = 0.974 \quad (3)$$

在枸杞生育期结束时（10月）：

$$\text{种植 1 年处理：} \text{EC}_{1:5} = 0.56x_2 + 0.45x_3$$

$$R^2 = 0.987 \quad (4)$$

$$\text{种植 2 年处理：} \text{EC}_{1:5} = 0.54x_2 + 0.48x_3 + 0.09$$

$$R^2 = 0.994 \quad (5)$$

$$\text{种植 3 年处理：} \text{EC}_{1:5} = 0.57x_2 + 0.43x_3 - 0.101$$

$$R^2 = 0.977 \quad (6)$$

式中， $x_1, x_2, \dots, x_7$  分别代表  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  含量。

通过回归模型对自变量的筛选，种植 1 年处理年初时  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  进入模型，这是因为新盐分主要受自然条件下土壤盐分组成影响，试验区多为钠镁

质氯化物-硫酸盐及硫酸盐-氯化物,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  与含盐量相关系数最大, 而经过种植的土壤仅有  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  进入模型, 再次说明经过灌溉和降雨淋洗后盐分组成荷载发生变化,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{EC}_{1:5}$  相关系数较大, 且可以作为主要变量在回归方程中一定程度上代替其他离子。

### 2.3 不同种植年限对代表性离子的影响

根据以上分析可知土壤中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{EC}_{1:5}$  之间具有极显著相关关系, 在盐分主成分中荷载较大, 且可以利用  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量为变量一定程度上代替其他离子表征土壤含盐量, 因此研究土壤中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量变

化在研究土壤盐分离子时具有代表性, 对土壤含盐变化的机理分析有重要意义。

对枸杞生育期前后不同处理土壤样本  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量  $\text{EC}_{1:5}$  的关系进行统计分析 (图 3、4)。由图 3、4 可知: 不同种植年限土壤中  $\text{Cl}^-$  含量与  $\text{EC}_{1:5}$  之间都存在线性相关关系,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量与  $\text{EC}_{1:5}$  之间存在对数相关关系。相关关系式可以表示为:

枸杞生育期开始时 (4月):

$$\begin{aligned} \text{种植 1 年处理: } S_{\text{Cl}^-} &= 1.499\text{EC}_{1:5} - 0.210 \quad R^2 = 0.943; \\ S_{\text{SO}_4^{2-}} &= 1.146\text{LnEC}_{1:5} + 0.569 \quad R^2 = 0.864 \\ \text{种植 2 年处理: } S_{\text{Cl}^-} &= 1.605\text{EC}_{1:5} - 0.707 \quad R^2 = \end{aligned} \quad (7)$$

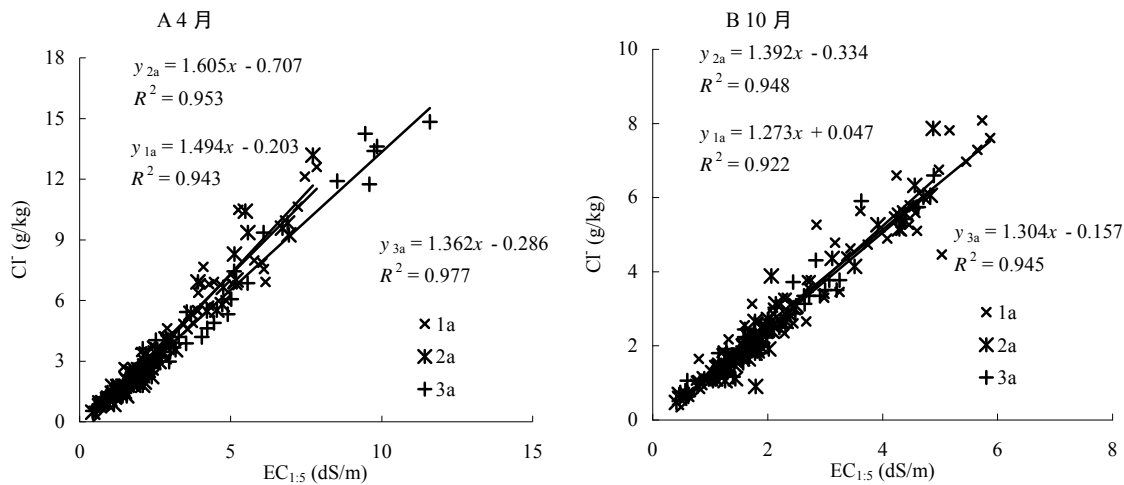


图 3 土壤溶液电导率与  $\text{Cl}^-$  含量的关系

Fig. 3 Relationships between soil electrical conductivity and chlorine

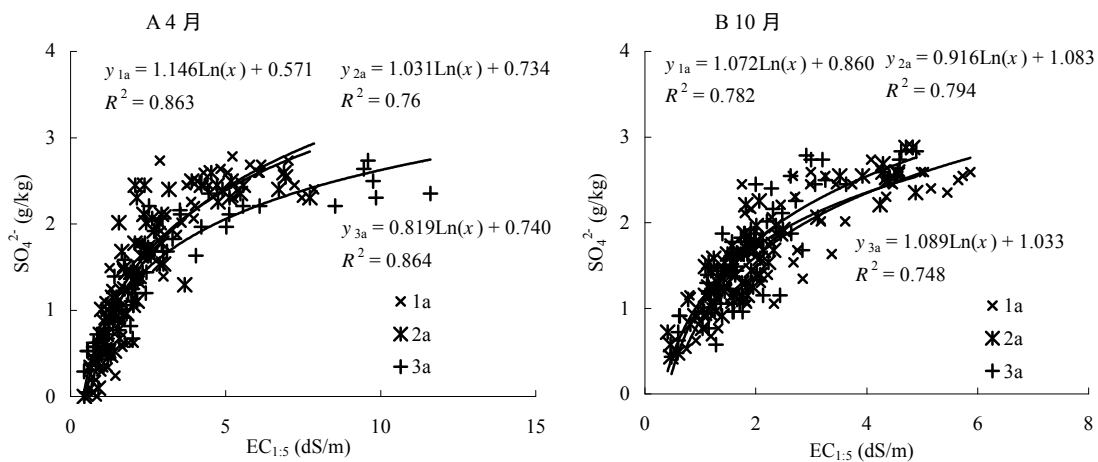


图 4 土壤溶液电导率与  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的关系

Fig. 4 Relationships between soil electrical conductivity and sulfate

$$0.953; S_{SO_4^{2-}} = 1.031 \ln EC_{1.5} + 0.734 \quad R^2 = 0.760 \quad (8)$$

$$\text{种植 3 年处理: } S_{Cl^-} = 1.362 EC_{1.5} - 0.286 \quad R^2 = 0.977;$$

$$S_{SO_4^{2-}} = 0.819 \ln EC_{1.5} + 0.740 \quad R^2 = 0.864 \quad (9)$$

枸杞生育期结束时 (10月):

$$\text{种植 1 年处理: } S_{Cl^-} = 1.273 EC_{1.5} + 0.047 \quad R^2 = 0.922; S_{SO_4^{2-}} = 1.072 \ln EC_{1.5} + 0.860 \quad R^2 = 0.782 \quad (10)$$

$$\text{种植 2 年处理: } S_{Cl^-} = 1.392 EC_{1.5} - 0.334 \quad R^2 = 0.948;$$

$$S_{SO_4^{2-}} = 0.916 \ln EC_{1.5} + 1.083 \quad R^2 = 0.794 \quad (11)$$

$$\text{种植 3 年处理: } S_{Cl^-} = 1.304 EC_{1.5} - 0.157 \quad R^2 = 0.945;$$

$$S_{SO_4^{2-}} = 1.089 \ln EC_{1.5} + 1.033 \quad R^2 = 0.748 \quad (12)$$

式中,  $S_{Cl^-}$  为  $Cl^-$  含量 (g/kg);  $S_{SO_4^{2-}}$  为  $SO_4^{2-}$  含量 (g/kg);  $EC_{1.5}$  为土壤含盐量 (dS/m)。

$Cl^-$  含量与  $EC_{1.5}$  的线性相关关系, 说明  $Cl^-$  及其代表的具有同性质的离子在土壤中的变化与土壤盐分具有相似的变化规律,  $Cl^-$  在土壤中的分布与图 2 中盐

分分布相似, 造成不同种植年限  $Cl^-$  在土壤中含量与分布差异的原因即土壤盐分含量和分布差异的原因。

$SO_4^{2-}$  含量与  $EC_{1.5}$  的对数相关关系表明在土壤盐分含量较低时,  $SO_4^{2-}$  含量与土壤含盐量近似线性关系, 土壤盐分含量较高时,  $SO_4^{2-}$  含量变化较小, 即  $SO_4^{2-}$  迁移速度低于盐分累积速度。不同种植年限土壤  $SO_4^{2-}$  含量及分布如图 5 所示。

从图 5 中可以看出  $SO_4^{2-}$  在土壤剖面分布与含盐量分布 (图 3) 相近,  $SO_4^{2-}$  与含盐量的对数关系则表现在积盐区  $SO_4^{2-}$  与表层以下土壤  $SO_4^{2-}$  含量差异较小。种植 1 年处理土壤  $SO_4^{2-}$  主要分布在新垄上层土壤中, 垄沟表层土壤  $SO_4^{2-}$  有一定累积, 经过 1 年种植处理,  $SO_4^{2-}$  整体下移, 年末时, 滴头下方脱盐区内  $SO_4^{2-}$  含量明显降低, 含量在 0.8 ~ 1.2 g/kg 之间; 种植 2 年处理和种植 3 年处理  $SO_4^{2-}$  分布具有土壤盐分分布表聚性的特点, 剖面  $SO_4^{2-}$  含量相近, 且年末  $SO_4^{2-}$  含量均高于年初水平。

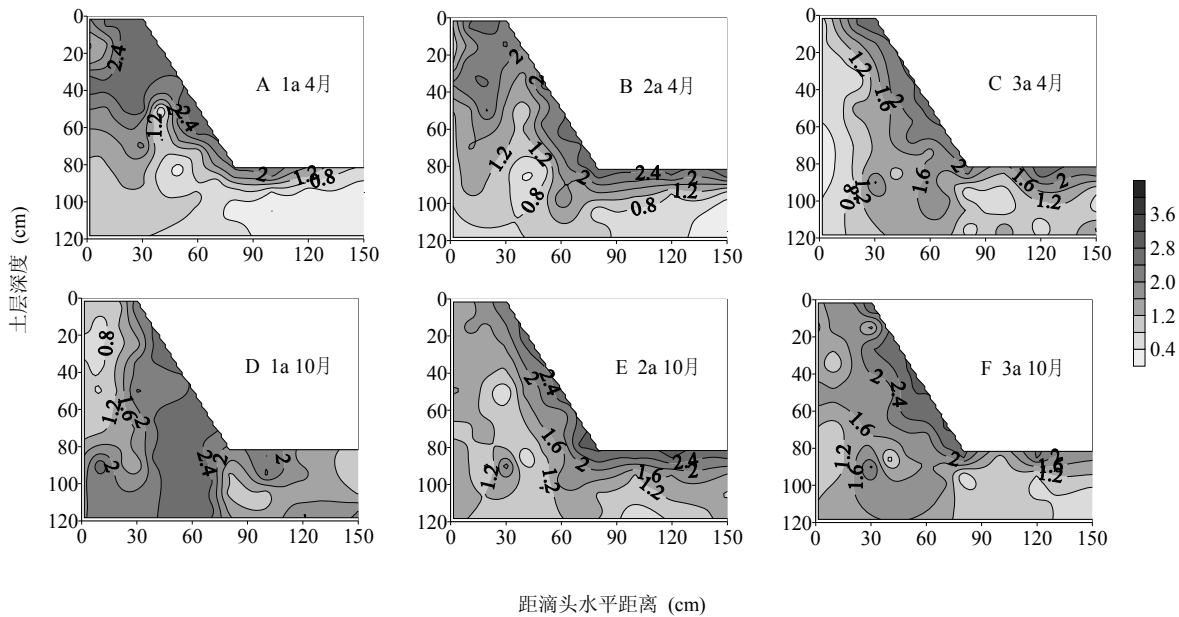


图 5 不同种植年限剖面土壤  $SO_4^{2-}$  含量 (g/kg) 及分布

Fig. 5 Contents and distributions of sulfate in bed profiles in different planting years

在枸杞生育期结束时, 各处理土壤在起垄后分别经过了 1、2 和 3 年种植, 剖面  $SO_4^{2-}$  含量为 1.54、1.32 和 1.42 g/kg, 说明在种植的前两年, 原土壤中的  $SO_4^{2-}$  被淋洗的量多于因咸水灌溉和地下水上升蒸发积盐累积的  $SO_4^{2-}$ , 土壤中  $SO_4^{2-}$  含量减小, 降低到一定含量后,  $SO_4^{2-}$  累积量多于淋洗量,  $SO_4^{2-}$  开始增加。但是, 表层  $SO_4^{2-}$  含量并没有随种植年限增加而增大, 种植 2 年土壤表层 0 ~ 10 cm 和 0 ~ 20 cm 土层  $SO_4^{2-}$  含量分

别为 2.26、1.93 g/kg (年初) 和 2.30、2.04 g/kg (年末), 种植 3 年处理分别为 2.04、1.74 g/kg (年初) 和 2.19、1.90 g/kg (年末), 均低于种植 2 年土壤, 可能因为作物随种植年限的增加, 根区土壤环境改变, 抑制了  $SO_4^{2-}$  的运移, 同时, 试验区叶面积的增加减小了土壤蒸发, 减缓了  $SO_4^{2-}$  表聚。

#### 2.4 不同种植年限对土壤类型的影响

土壤类型的动态变化反映了自然和人为条件对土

壤盐渍化的影响, 可用于了解盐渍土的演化方向, 从而采取对策。一般以耕作层(表层 0~20 cm)范围内土壤盐分含量及其他参数作为土壤类型的分类指标, 虽然滴灌条件下盐分运动和分布具有其自身特点, 但本文仍主要根据土壤环境对作物生长影响划分土壤类型, 以植物根系活动层, 即表层 0~20 cm 范围内土壤为研究对象, 选用土壤  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 、土壤含盐量和钠吸附比(SAR)分别从土壤化学类型、盐度和碱度对土壤类型的变化进行分析<sup>[11]</sup>。

土壤经过 1、2 和 3 年覆膜滴灌种植后, 表层 0~20 cm 土壤  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 、土壤含盐量和 SAR 值列于表 6 中, 同期对照撂荒地地表层 0~20 cm 土壤  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 、

土壤含盐量和 SAR 值分别为 0.33、6.7 g/kg 和 10.8 ( $\text{mmol}_c/\text{L}$ )<sup>0.5</sup>, 属于  $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^-$  型。土壤经过 1~3 年种植后, 土壤  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  均小于 1 (表 6), 土壤类型并没有从根本上发生转变, 仍属于  $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^-$  型。但在持续灌溉和降雨淋洗的过程中, 由于  $\text{SO}_4^{2-}$  迁移速度低于  $\text{Cl}^-$ , 土壤  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  平均值随着种植年限增加而增大, 分别为 0.44、0.47 和 0.53, 尤其在距滴头水平距离 0~30 cm 范围内土壤被长期持续滴灌淋洗变化更为明显, 且比值高于其他不同水平位置, 种植 3 年后  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  值最大达到 0.93, 接近于 1, 最终可能会转化成  $\text{Cl}^--\text{SO}_4^{2-}$  型, 从而减小较高浓度  $\text{Cl}^-$  对作物的伤害<sup>[12]</sup>。

表 6 土壤  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  比值、土壤含盐量和 SAR 在表层土壤 (0~20 cm) 中的变化  
Table 6 Changes of ratio  $\text{Cl}^-$  to  $\text{SO}_4^{2-}$ , soil salt content and SAR in soil of upper layers (0~20 cm)

距滴头 水平距离 (cm)	$\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$			土壤含盐量 (g/kg)			SAR ( $\text{mmol}_c/\text{L}$ ) <sup>0.5</sup>		
	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a
0	0.52	0.58	0.78	4.4	5.0	4.0	8.8	5.8	6.9
10	0.43	0.68	0.93	4.0	5.5	5.6	10.4	6.2	7.7
20	0.50	0.87	0.76	4.7	4.8	6.1	9.4	6.5	7.9
30	0.49	0.48	0.58	8.8	7.9	8.0	13.3	7.5	11.7
40	0.53	0.30	0.42	10.9	12.9	13.0	10.9	14.7	18.9
50	0.60	0.29	0.45	8.6	12.6	13.8	8.4	13.7	16.8
60	0.46	0.37	0.46	10.9	10.5	13.1	10.6	12.8	17.6
70	0.33	0.35	0.42	13.4	13.4	13.3	16.7	12.4	19.0
80	0.38	0.46	0.56	6.8	9.6	6.0	11.4	9.6	13.1
100	0.31	0.44	0.40	14.2	7.7	5.8	21.2	9.1	14.0
120	0.29	0.42	0.31	10.6	9.9	9.7	19.5	9.8	15.2
150	0.39	0.38	0.26	5.1	9.5	10.0	12.3	11.6	16.8
平均值	0.44	0.47	0.53	8.5	9.1	9.0	12.7	10.0	13.8

表层土壤含盐量变化受种植年限影响较小, 不同种植年限处理滴灌种植后土壤含盐量在水平方向有着相同的变化规律, 说明咸水滴灌 1 年后盐土类型基本稳定, 水平 0~20 cm 土壤经过滴灌洗盐和覆膜抑制盐分上行, 土壤含盐量在 4~6 g/kg 之间, 垄坡、垄沟大于 6 g/kg, 即滴头附近土壤由盐土脱盐演化为重度盐化土, 而 20 cm 以外仍属于盐土。SAR 值变化与土壤含盐量变化相似, 滴头附近 20 cm 范围内 SAR 值减小, 垄坡和垄沟表层土壤 SAR 值较高, 其中垄坡 (40~70 cm) 表层土壤 SAR 随种植年限增加而明显增大。

### 3 结论与讨论

通过以上分析发现, 高垄相对降低了地下水位, 但增加了地下水的上升高度和土壤蒸发面积, 垄内土

壤含盐量增加, 咸水覆膜滴灌改变了盐分在剖面的分布。种植 1 年土壤盐分主要为自上而下被淋洗, 在滴头下方形成一个以滴头为圆心的椭圆形脱盐区; 种植 2 年和 3 年土壤年内盐分含量和分布变化相似, 在枸杞生育期开始时, 盐分均向表层土壤累积, 在枸杞生育期结束时, 剖面土壤含盐都低于年初水平。

相关分析表明, 枸杞生育期前后各年限处理土壤含盐量与主要离子之间都具有极显著的相关关系, 其中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  与土壤盐分关系最为紧密;  $\text{HCO}_3^-$  与土壤含盐量负相关, 且相关性随着种植年限的增加而减小。种植年限对土壤盐分离子组成有一定影响, 主要表现为  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  荷载在枸杞生育期结束时随种植年限增加而增大; 而回归分析则表明  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  可以作为主要变量在回归方程中一定程度上代替其他



离子,其中  $\text{Cl}^-$  含量与土壤总盐量之间都存在线性相关关系,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量与土壤总盐量之间存在对数相关关系。

虽然利用咸水覆膜滴灌并没有从整体上改变土壤  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-$  重度盐碱地这一土壤类型,但在长期滴灌淋洗作用下,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  值随着种植年限的增加而增大,尤其在距滴头水平距离 0~30 cm 范围内土壤被长期持续滴灌淋洗变化更为明显,且该区域范围内土壤经过滴灌洗盐和覆膜抑制盐分上行后,土壤含盐量由 13.1 g/kg 降低到 4~6 g/kg,由盐土脱盐演化为重度盐化土。

由此可见,覆膜滴灌技术改变了土壤盐分在剖面的分布,改善了作物根系生长的土壤环境条件,因此,地下水浅埋区重度盐碱地可以利用覆膜咸水滴灌技术加以利用。当然,本研究基于 3 年试验结果之上,所得结论有一定局限性,还需要进一步研究和验证。

#### 参考文献:

- [1] 李聪敏,王彦兵.宁夏引黄灌区耕地土壤盐渍化现状及影响因素调查研究.地下水,2007,29(3):41-44
- [2] 李彬,王志春,孙志高,陈渊,杨福.中国盐碱地资源与可持续利用研究.干旱地区农业研究,2005,23(2):154-158
- [3] Blaine RH, Hutmacher RB, May DM. Drip irrigation of tomato and cotton under shallow saline ground water conditions. Irrigation and Drainage Systems, 2006, 20: 155-175
- [4] Tanwar BS. Saline water management for irrigation. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). New Delhi, India, 2003: 58-59
- [5] 焦艳平,康跃虎,万书勤,刘伟,董锋.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.干旱地区农业研究,2007,25(6):144-151
- [6] 焦艳平,康跃虎,万书勤,孙泽强,刘伟,董锋.干旱区盐碱地滴灌土壤基质势对土壤盐分分布的影响.农业工程学报,2008,24(6):53-58
- [7] 谭军利,康跃虎,焦艳平,孙泽强,刘伟,董锋,李克文.不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征.农业工程学报,2008,24(6):59-63
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析.3版.北京:中国农业出版社,2000
- [9] 罗廷彬,任葳,李彦,王宝军,鲍士旦.咸水灌溉条件下干旱区盐渍土盐分变化研究.土壤,2006,38(2):166-170
- [10] 王雪梅,柴仲平,塔西甫拉提·特依拜,龚爱谨,程红梅.干旱区土壤盐渍化及影响因子分析—以渭干河-库车河三角洲为例.土壤,2009,41(3):477-482
- [11] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土.北京:科学出版社,1999
- [12] 李法虎.土壤物理化学.北京:化学工业出版社,2007

## Characteristics of Soil Salinity Distribution in Saline-Sodic Soil with Shallow Water Table Under Mulch-Drip Irrigation in Different Planting Years

DOU Chao-yin<sup>1,2</sup>, KANG Yue-hu<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To provide the theory basis for the reasonable exploitation and sustainable utilization of saline-sodic soil by mulch-drip irrigation, the effect of mulch-drip irrigation on soil salinity in saline-sodic soil with shallow water table was studied. The method of time-space transformation was used to find out the characteristics of soil salinity distribution in saline-sodic soil planted for 1a, 2a and 3a, at the same time, the uncropped saline waste land adjacent to the experimental site was taken as the control (CK). The results showed that salt was leached downwards at the first planting year; the content and distribution of soil salt were similar at the second and third year of which soil electrical conductivity ( $\text{EC}_{1.5}$ ) was less than the first year; the correlations between  $\text{EC}_{1.5}$  and the major ions were significant at the 0.01 level,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  were the most significant one while  $\text{HCO}_3^-$  is the negative one and decreased as the planting year increased. Principal component analysis indicated that the load of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , and  $\text{Na}^+$  increased with planting years. Regression analysis showed that  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  could be used as major variations to express soil electrical conductivity; an apparently linear correlation was observed between  $\text{Cl}^-$  and  $\text{EC}_{1.5}$  while a logarithmic correlation between  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{EC}_{1.5}$ . Though the type of soil did not change markedly under mulch-drip irrigation with saline water, soil within 30 cm to the drip line evolved from saline soil to heavy salt affected soil. It can be concluded that mulch-drip irrigation changes the distribution of soil salts and improves the soil environment for root growth, so it can be used to ameliorate and sustainably utilize the saline-sodic soil with shallow water table.

**Key words:** Mulch-drip irrigation, Saline-sodic soil, Planting year, Soil salt