

# 蓄排水条件下盐碱地土壤盐分运移特征研究

李娟<sup>1,2,3</sup>, 韩霖昌<sup>1,3</sup>, 张 扬<sup>1,3</sup>, 李晓明<sup>1</sup>, 张卫华<sup>1,3</sup>, 董起广<sup>1,3</sup>, 雷 娜<sup>1,3</sup>

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075)

**摘 要:**为检验蓄水和排水处理下盐碱地土壤盐分的变化情况及盐分运移规律,于2009年在陕西富平设置试验模型,分析在两种处理下0—160 cm土层土壤中盐分的变化趋势。结果表明:蓄水处理下0—160 cm土层的平均土壤湿度较排水处理高,能有效提高土壤中含水量,满足作物生长需求。分析了土壤中可溶性固形物(TDS)、阴离子( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )、阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )含量的剖面分布及土壤pH值变化,并且利用主成分分析法分析了土壤盐分与各离子间关系,得出蓄水处理有效降低土壤表层的盐分,加速土壤耕作层脱盐,土壤质量明显改善,即蓄水处理下盐碱地治理效果显著。

**关键词:**盐碱地; 蓄水; 排水; 土壤盐分; 盐分离子

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0116-05

## Move Characteristics of Soil Salinity in Saline-Alkali Land Under Impounding and Draining Conditions

LI Juan<sup>1,2,3</sup>, HAN Jichang<sup>1,3</sup>, ZHANG Yang<sup>1,3</sup>, LI Xiaoming<sup>1</sup>, ZHANG Weihua<sup>1,3</sup>, Dong Qiguang<sup>1,3</sup>, LEI Na<sup>1,3</sup>

(1. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China;

2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of

Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources of China, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** To test the variation and move of soil salinity in saline-alkali land under impounding and draining treatments, an experimental model was conducted in Fuping County, Shaanxi Province, 2009. The variation of soil salinity in 0—160 cm soil depth under the two treatments was observed. Results showed that the average soil water content under impounding treatment was 4.47% higher than that under draining treatment with the same water yield, which means that the impounding treatment can help improve soil moisture to support the crop growth. The profile distributions of soil soluble solids (TDS), anion ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) and cation ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) contents and the variation of soil pH were also measured. Principal component analysis (PCA) was used to examine the relationship between the soil salinity and its ions. The results showed that the impounding treatment could significantly decrease the surface salinity of soil and accelerate the desalination of topsoil, and finally, the soil quality was improved significantly, demonstrating that the impounding treatment had the remarkable effect on soil salinity management.

**Keywords:** saline-alkali land; storage condition; drainage saline land; soil salinity; salt ions

随着世界人口增长与土地需求之间的矛盾日益尖锐,如何合理利用有限的土地资源和增加土地资源已经成为世界各国关注的首要问题<sup>[1-3]</sup>。目前盐碱地是一个巨大的土地资源,开发利用潜力很大,如何治理土壤盐碱化是当今农业面临的严重问题之一<sup>[4-9]</sup>。

在农业生产中,盐渍化土壤是低产土壤,是建设高产稳产田的障碍,特别是近代灌溉事业中存在土壤次生盐渍化的威胁<sup>[10]</sup>。国内外盐碱地的综合治理包

括物理、水利、化学和生物改良等多种技术和方法。在国内主要采用水利改良,即“淡水压盐、排水洗盐”的模式,“以排为主”的做法使区域内盐分减少。传统盐碱地治理技术运行成本大,还浪费了水资源,一定程度可造成对下游水体的污染<sup>[11-16]</sup>。

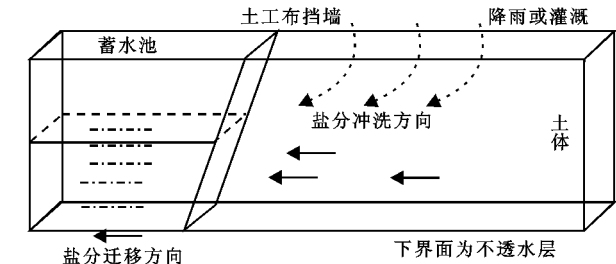
陕西省富平县与蒲城县交界的卤泊滩,属古卤阳湖干枯、抽黄河和抽渭河灌区末端的低洼地,是天然和人工逐步形成的重度盐碱地。卤泊滩土壤主要由

中度盐土和重度盐化潮土组成,另有苏打盐土呈斑状分布于滩内。韩霁昌等<sup>[17]</sup>提出传统盐碱地治理以蓄为主,建立健全灌排系统,蓄淡压盐、灌水洗盐、排掉碱水,并结合陕西卤泊滩综合治理工程提出了盐碱地治理的“改排为蓄、水地共处、和谐生态”的新模式。本研究将针对蓄水和排水条件下,在富平试验基地设置模拟试验,分析不同处理下土壤盐分的变化,不同剖面深度土层含盐量及主要阴阳离子含量的变化,对各处理进行综合系统研究及进行各盐分离子的相关性分析,为盐碱地的合理开发利用及和谐生态治理研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验站概况

试验设置于富平试验基地,位于陕西省渭南市富平县杜村镇褚塬村。该区属暖温带半湿润气候区,年均降雨量 472.97 mm,7—9 月份降雨量占全年降雨量



的 49%,年蒸发量 1 000~1 300 mm,无霜期 225 d,年平均气温 13.4℃,夏季最高气温 41.8℃,冬季最低气温 -22℃,年光能辐射总量 518.6~535.0 kJ/cm<sup>2</sup>。

1.2 试验设计

本试验于 2009 年 10 月实施,为了模拟卤泊滩试验区土地状况,自制试验装置,尺寸为 23.0 m×1.5 m×2.0 m(长×宽×高),用砖混结构水泥浇筑制成。试验装置包括两部分,即蓄水部分(排水部分)和试验土槽。一端为水槽蓄水(排水),中间段为土槽。水体与土之间用土工布挡住,防止土壤进入水面,为保证试验结果,装置各界面做防水处理。试验处理设为蓄水处理和排水处理两种,蓄水处理是在水沟里放入定量水,利用水体—土壤之间的主导作用——弥散作用,控制土壤盐分的运移;排水处理则利用大水漫灌,利用水体—土壤间的对流作用排水洗盐,且蓄水与排水处理每次所用水量相同,各处理下盐分运移及变化如图 1 所示。

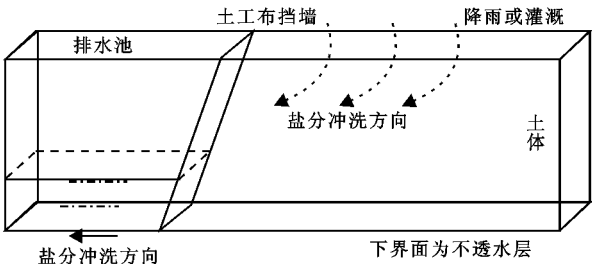


图 1 蓄水与排水处理土壤盐分运移示意图

试验土样选自卤泊滩地区盐碱土,卤泊滩原状土取土为每间隔 30—40 cm 分层取土。土样经碾压、粉碎、风干、过筛(5 mm),填装自制试验土槽。据西北农林科技大学测试中心 2009 年对试验区开发土壤的检测数据显示:土壤有机质平均含量 0.70%,全盐量平均 0.77%,pH 值平均为 9.33,Cl<sup>-</sup> 平均含量为 0.37%,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 平均含量为 0.08%,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 平均含量为 0.06%。

1.3 测定项目与方法

于 2013 年 9 月棉花收获以后,在上述两个处理中,每块试验田选 6 个取样点,采用土钻采集 0—160 cm 土壤,取样间隔为 20 cm,通过室内试验分析 0—160 cm 土壤各项指标。测定指标及方法如表 1 所示。

表 1 试验测定指标及方法

测定项目	方法
水分	烘干法
总盐量	蒸干法
pH 值	pH 计
钙离子	EDTA 络合滴定法
氯离子	AgNO <sub>3</sub> 滴定法
硫酸根离子	茜素红法
重碳酸根离子	双指示剂中和法
钠离子、钾离子	火焰光度计法

1.4 数据计算及统计分析

用 Excel 2007 处理,数据统计分析采用 DPS 7.05 软件进行分析,运用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 蓄排水处理下 0—160 cm 土层土壤湿度比较

在 2013 年 6 月对蓄水和排水处理进行灌溉,灌水量一致,同年 9 月棉花收获期测定 0—160 cm 土壤水分,蓄排水处理下秋闲期土壤贮水量如图 2 所示。蓄水和排水处理下 0—160 cm 土层土壤湿度变化趋势一致,在 0—60 cm 土层。土壤湿度减小,在 60—160 cm 土层,土壤湿度增加。蓄水处理 0—160 cm 土层的平均土壤湿度较排水处理高 4.47%,处理间无显著差异。试验结果表明:相同的水量,不同的处理,经过长时间水分运移、蒸发及利用,蓄水处理下土壤水分稍高于排水处理,且田间土壤不易发生板结。

2.2 土壤可溶性固形物质量分数的变化特征分析

蓄水与排水处理下,棉田 0—160 cm 土层土壤中可溶性固形物(TDS)的剖面分布情况见图 3。蓄水处理

理下的土壤 TDS 质量分数明显高于排水处理,且随着土壤深度的增加无明显变化,处理及层次间差异不显著。蓄水处理下 0—160 cm 土层平均土壤 TDS 质量分数分别为 0.906, 0.487 g/kg, 在 0—40, 40—100, 100—160 cm 土层, 土壤 TDS 质量分数呈现上层最小, 而后依次增加的现象, 在 100—160 cm 土层, 土壤 TDS 质量分数最高, 较 0—40 cm 土层分别增加 14.98%,

15.59%。这与两种处理下土壤水的运移方式有关, 蓄水处理下, 水分一般是从土壤中层进入土体, 会呈向上与向下两个方向运动, 带动土壤盐分也向两个方向运动。排水处理下, 水分由地表进入土壤, 由于盐碱地表易发生板结, 减少蒸发, 土壤盐分主要随水分向下运动; 试验数据表明不同蓄排水处理对土壤盐分的影响深度可能在 60 cm 以下, 能有效减少土壤含盐量。

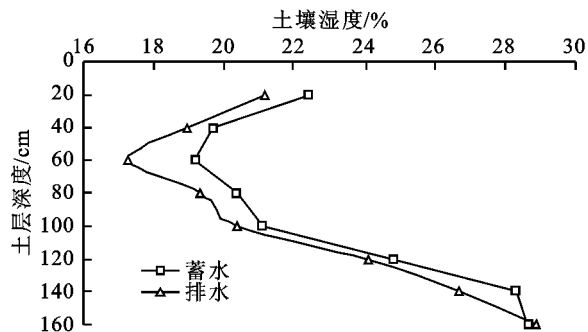


图 2 蓄水与排水处理下 0—160 cm 土层土壤湿度比较

### 2.3 土壤主要盐离子变化特征分析

样品中  $\text{CO}_3^{2-}$  很少被检出, 且土壤中  $\text{Mg}^{2+}$  分布规律性较差, 多数样品未检出, 因而这里仅对其余 6 种主要离子进行分析。

2.3.1 主要阴离子变化特征分析 不同处理方式下, 棉田 0—160 cm 土层土壤主要阴离子平均质量分数的剖面分布见图 4。在 0—160 cm 土层, 蓄水和排水处理下土壤  $\text{HCO}_3^-$  平均质量分数分别为 0.019,

0.018 g/kg, 且呈现下层平均值最高, 中层次之, 上层最低; 各处理及各土层之间差异不显著 ( $p < 0.05$ )。  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  质量分数表现趋势相似, 且蓄水处理明显小于排水处理, 在 60—100 cm 土层, 蓄水处理下土壤中  $\text{Cl}^-$  平均质量分数最低, 在 60—100 cm 土层, 蓄水处理土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  平均质量分数较排水处理减少 55.87%, 试验数据表明蓄水处理在土体中层脱盐效果明显。

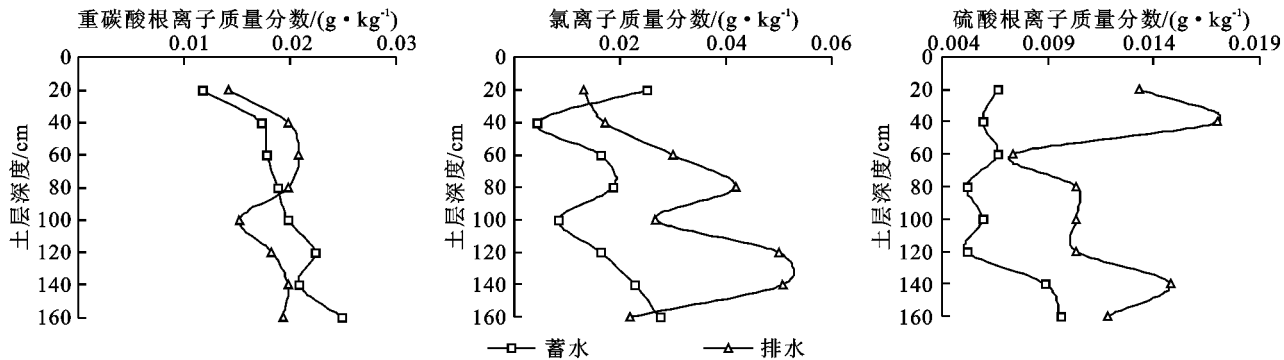


图 4 蓄水与排水处理下 0—160 cm 土层土壤主要阴离子质量分数剖面分布

2.3.2 主要阳离子变化特征分析 不同处理方式下, 棉田 0—160 cm 土层土壤主要阳离子平均质量分数的剖面分布见图 5。蓄水和排水处理下, 0—160 cm 土层土壤中  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  平均质量分数表现趋势一致, 均为蓄水处理高于排水处理, 处理间及各土层间差异不显著 ( $p < 0.05$ )。土壤中  $\text{K}^+$  平均质量分数最低值出现在 120—160 cm 土层, 且排水处理较蓄水处理低, 蓄水和排水处理下, 0—160 cm 土层土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  平均质量分数分别为 0.077, 0.069 g/kg。在 0—160 cm 土层, 蓄水和排水处理下土壤  $\text{Na}^+$  平均质量分数分布与  $\text{HCO}_3^-$  相似, 且呈现下层平均值最高、

中层次之, 上层最低。钾是作物的主要营养成分, 蓄水处理下, 土壤中  $\text{K}^+$  的质量分数较高, 可有效为作物生长提高养分, 同时  $\text{K}^+$  不是造成土壤总盐质量分数差异的主要因素, 但是  $\text{Na}^+$  质量分数高容易造成土壤结构的破坏, 所以在作物种植期要注意田间管理。

### 2.4 土壤 pH 变化分析

蓄排水处理方式下, 各土层土壤 pH 变化情况如表 2 所示。蓄水处理下各土层的 pH 值均小于排水处理各土层。在 0—40 cm 土层, 蓄水处理下土壤 pH 平均值较排水处理降低 12.41%, 由表 4 可以看

出,不同处理下,土壤 pH 值均呈中、下层高,上层低的趋势,较正常耕地略微偏高,但对棉花耐碱植物的生长基本没有影响<sup>[20]</sup>,且处理间在各层次的差异均

不显著,说明两种处理方式对土壤 pH 值的影响较小。蓄水处理与传统的排水处理相比较,可有效降低土壤层的 pH 值。

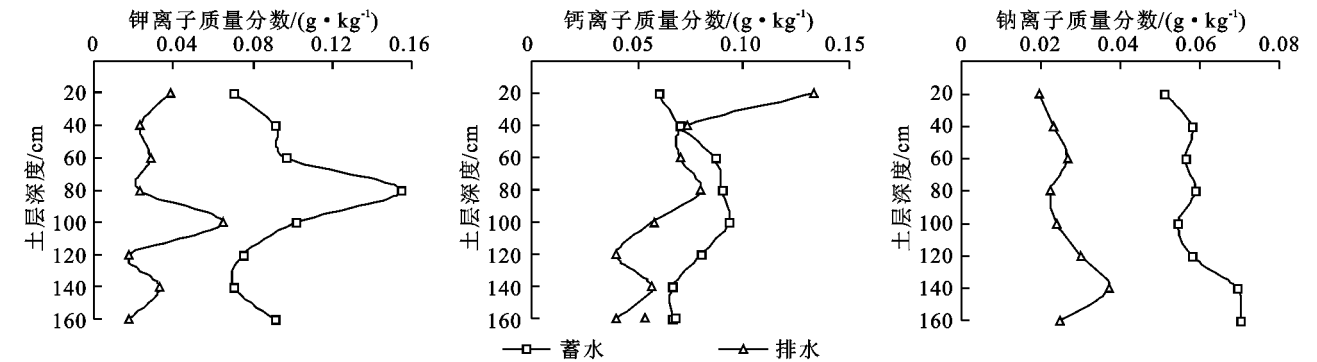


图 5 蓄水与排水处理下 0—160 cm 土层土壤主要阳离子质量分数剖面分布

表 2 蓄排水处理下各土层土壤 pH 值比较

土层 深度/cm	蓄水处理			排水处理		
	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值
20	8.92	8.59	9.48	9.69	9.42	10.11
40	8.99	8.67	9.62	9.82	9.57	9.95
60	8.96	8.67	9.36	9.86	9.48	10.09
80	8.91	8.65	9.29	9.99	9.66	10.12
100	9.02	8.68	9.21	9.81	9.49	10.07
120	9.03	8.71	9.49	9.83	9.62	10.15
140	8.52	8.58	8.81	10.09	9.52	10.18
160	8.77	8.72	8.85	9.94	9.82	10.15

2.5 土壤盐分与主要离子差异分析

为了进一步分析引起土壤盐分分布差异的原因,检验蓄排水处理下土壤盐分的变化情况,对土壤盐分及其组成进行统计分析,各处理的盐分及其组成的主要统计特征见表 3。可见,土壤盐分以重碳酸盐和硫

酸盐为主。对各盐分离子与总盐间关系的多元线性回归分析表明,仅  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  两种离子与总盐的相关系数( $R^2$ )较高,达到了 0.966 1。

从表 4 可以看出,阴阳离子间的相关系数比较大。为此,采用主成份法提取公共因子。表 5 为前 3 个主要公共因子的成分矩阵。

表 3 土壤盐分及主要离子描述性统计量 g/kg

项目	蓄水处理		排水处理	
	均值	标准偏差	均值	标准偏差
总盐	5.519	1.212	8.507	3.110
$\text{Cl}^-$	0.007	0.001	0.012	0.001
$\text{HCO}_3^-$	0.019	0.001	0.018	0.003
$\text{SO}_4^{2-}$	0.018	0.005	0.032	0.014
$\text{Ca}^{2+}$	0.077	0.005	0.069	0.014
$\text{K}^+$	0.094	0.054	0.031	0.023
$\text{Na}^+$	0.595	0.128	0.259	0.129

表 4 主要离子间相关矩阵

离子	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
$\text{Cl}^-$	1.000	-0.174	0.690	-0.410	-0.716	-0.807
$\text{HCO}_3^-$	-0.174	1.000	-0.142	0.587	0.343	0.447
$\text{SO}_4^{2-}$	0.690	-0.142	1.000	0.141	-0.040	-0.286
$\text{Ca}^{2+}$	-0.410	0.587	0.141	1.000	0.707	0.724
$\text{K}^+$	-0.716	0.343	-0.040	0.707	1.000	0.892
$\text{Na}^+$	-0.807	0.447	-0.286	0.724	0.892	1.000

由表 5 可知,公共因子 1 主要取决于  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  的贡献,重点则受  $\text{Cl}^-$  的影响,而公共因子 2 则主要取决于  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  的贡献;这表明虽然当地盐分以重碳酸盐和硫酸盐为主,但影响盐分分布差

异的主要离子为  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ 。对蓄排水处理下 3 个主要公共因子进行层次间比较,结果表明:对于 60—100 cm 土层,盐分可能会发生聚集,并没排出土体,可能会存在盐分后期富集或者发生次生盐化的威胁。

表 5 成分矩阵

因子	$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
公共因子 1	0.9637	-0.8362	0.8948	0.787	-0.3453	0.5614
公共因子 2	-0.0025	0.5154	0.1632	0.5126	0.8742	0.331
公共因子 3	-0.1299	0.161	-0.3331	0.0317	-0.3334	0.7441

3 结论

传统排水洗盐就是灌入淡水,使土壤中各种状态

的盐分溶解于水中,强调冲洗和对流作用下,盐分溶解于水中随着水分的下渗被带至深层并经排水系统排至承泄区。盐碱地洗盐脱盐的过程实质就是土壤

中溶质迁移土壤中溶质迁移的物理过程,包括:对流、溶质分子扩散、机械弥散过程、土粒与土壤溶液界面处的离子交换吸附作用。传统排水洗盐就是灌入淡水,使土壤中各种状态的盐分溶解于水中,强调冲洗和对流作用<sup>[18]</sup>,而蓄水洗盐过程主要是进行弥散作用。本试验研究表明:蓄水条件下,田间土壤湿度明显高于排水处理下,土壤水分增加则土体不容易发生板结,有利于作物生长需求,这与韩霁昌等<sup>[19]</sup>研究结果一致。蓄水处理盐分减少主要是通过弥散作用,排水处理盐分减少通过对流作用,土壤中的盐分、pH值和离子含量都较试验初期减少,说明蓄水处理脱盐效果较排水处理较好。影响蓄水和排水处理下土壤盐分分布的主要盐分离子为  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , 蓄水处理土壤  $\text{Na}^+$  的质量分数较高,不利于土壤结构的改善和作物的生长发育,这与宰松梅等<sup>[20]</sup>研究结论相似。

蓄水处理主要依据蓄水池水位、浓度不断变化和水体与相邻土壤盐分的动态平衡,对盐碱土壤可以实现循环加速压盐。从客观、自然条件分析,随着降雨、灌溉退水、地下水位等的自然变化,蓄水沟水位时高时低,每年多次交替变化,当蓄水沟水位高时水中盐碱浓度低;水位低时浓度高,这样从上到下,在水盐交换过程中,逐步实现向下压盐,从而改变了土壤中盐分的垂直分布,保证了土壤中耕作层盐碱浓度减少,向良性发展,且不影响上层土壤,从而达到“不排而蓄”,和谐地治理盐碱地,且减少了生物、化学和物理方法治理所带来的人力、物力和财力的投入,更减少了对土壤水体的二次污染和危害,应用前景广阔<sup>[9]</sup>。

国内对盐碱地治理研究多集中于不同治理措施的比较与盐碱地生态恢复效应研究<sup>[21]</sup>,对于蓄水和排水处理下的土壤盐分变化规律的研究,国外对盐碱地治理主要研究集中在如何控制排水和农业非点源污染<sup>[22]</sup>,蓄水处理较少,且本试验属于初步阶段,孙博等<sup>[23]</sup>研究了土壤—水体水盐运移,深入分析了蓄水条件下盐分减少后盐分去向。韩霁昌等<sup>[24]</sup>研究表明蓄水后,土壤中有有机质含量逐渐增大,土壤质量明显提高。本试验研究尚未结束,因只涉及0—160 cm土壤,对蓄水处理下水体盐分监测及底层土壤指标研究缺失,对试验各要素的定量及相关分析深度不够,将继续通过对该试验模型的研究,监测水盐动态体系,对土壤水土分布、运移规律及土壤质量进行长期研究分析,以逐步完善研究成果。

#### 参考文献:

[1] 李韵珠,李保国. 土壤溶质运移 [M]. 北京:科学出版社,1999.

- [2] 石元春. 盐渍土的水盐运动 [M]. 北京:北京农业大学出版社,1986.
- [3] 尤文瑞. 盐渍土水盐动态的研究 [J]. 土壤学进展,1984,12(3):1-14.
- [4] 郑金丰,陈水新. 干旱地区发展节水农业与土壤盐碱化防治 [J]. 中国农村水利水电,2000(10):26-27.
- [5] 杨建强,罗先香. 土壤盐渍化与地下水动态特征关系研究 [J]. 水土保持通报,1999,19(6):11-15.
- [6] 吕殿青. 入渗与蒸发条件下土壤水盐运移的研究 [J]. 水土保持研究,1999,6(2):62-67.
- [7] 廖兴其. 世界农田排水概谈 [J]. 垦殖与稻作,1998(3):39.
- [8] 苏玉明. 土地盐碱化成因的定量分析 [J]. 水利水电技术,2002,33(5):28-31.
- [9] 李彬,王志春,孙志高,等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究 [J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):1-5.
- [10] 杨朝飞. 中国土地退化及防治对策 [J]. 中国环境科学,1997,17(2):108-112.
- [11] 刘建刚,罗纨,贾忠华,等. 从水盐平衡的角度分析控制排水在银南灌区实施的可行性 [J]. 农业工程学报,2005,21(4):43-45.
- [12] 岳卫峰,杨金忠,童菊秀,等. 干旱地区灌区水盐运移及平衡分析 [J]. 水利学报,2008,39(5):623-628.
- [13] 杨光滢. 内蒙河套平原盐碱地水盐运动研究 [J]. 林业科学,1999,35(4):107-110.
- [14] 吕殿青,王全九,王文焰,等. 一维土壤水盐运移特征研究 [J]. 水土保持学报,2000,14(4):91-94.
- [15] 王全九,王文焰. 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.
- [16] 王亮,罗纨. 宁夏银南灌区稻田控制排水试验研究 [D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [17] 韩霁昌,解建仓,朱记伟,等. 陕西卤泊滩盐碱地综合治理模式研究 [J]. 水利学报,2009,40(3):372-377.
- [18] 吴晔. 陕西创造盐碱地整理新模式 [N]. 中国国土资源报,2008-6-27(1).
- [19] 韩霁昌,解建仓. 陕西卤泊滩盐碱地综合治理的和谐生态模式研究与实践 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,2008.
- [20] 宰松梅,仵峰,温季,等. 不同滴灌方式对棉田土壤盐分的影响 [J]. 水利学报,2011,42(12):1496-1503.
- [21] 李凤霞,王学琴,郭永忠,等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响 [J]. 水土保持研究,2012,19(6):13-18.
- [22] Santa-Cruz A, Acosta M, et al. Short-term salt tolerance mechanisms in differentially salt tolerant tomato species [J]. Plant Physiology and Biochemistry,1999,37(1):65-71.
- [23] 孙博,汪妮,解建仓. 蓄水条件下土壤—水体水盐运移的室内试验 [J]. 沈阳农业大学学报,2009,40(2):245-247.
- [24] 韩霁昌,解建仓,王涛,等. 陕西卤泊滩盐碱地“改排为蓄”后盐碱指标试验观测明 [J]. 农业工程学报,2009,25(6):59-64.