

# 冬季咸水结冰灌溉后土壤水盐运移规律的初步研究

李志刚<sup>1,2</sup>, 刘小京<sup>1</sup>, 张秀梅<sup>1</sup>, 孙家灵<sup>1</sup>, 牛振<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所, 农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 在河北省海兴县对冬季利用苦咸水结冰灌溉盐碱地进行了大田试验。2005 年冬季以试验区地下苦咸水 (15 g/L), 采用 3 种灌溉水量 (90, 135, 180 mm) 对盐碱地进行结冰灌溉, 以不作处理的小区为对照 (CK)。结果表明, 由于冰层对土体冻融过程的抑制和冰层融化时发生水盐分离而产生的淡水对表层土壤盐分的淋洗的双重作用, 次年春季处理小区 0~10 cm 土层土壤脱盐效果明显, 3 个处理的脱盐率分别为 13.1%, 74.0%, 80.8%, 180 mm 灌溉水量处理效果最好; 而 CK 小区的表层土壤表现为积盐, 积盐率为 39.4%。春季冰层融化后大水量处理 0~100 cm 土壤的含盐量也明显小于 CK。

**关键词:** 滨海盐土; 冬季结冰; 咸水; 盐碱地改良

中图分类号: S156.4+2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2008)增刊-0187-06

## A Primary Study on the Reclamation of Coastal Saline Soil with Freezing Irrigation of Saline Water in Winter

LI Zhigang<sup>1,2</sup>, LIU Xiaojing<sup>1</sup>, ZHANG Xiurui<sup>1</sup>, SUN Jialing<sup>1</sup>, NIU Zhen<sup>1,2</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology,

Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A field experiment was conducted to investigate the effect of freezing irrigation with saline water in winter on the dynamics of soil salinity and moisture in coastal saline soil. Four irrigation amounts (0, 90, 135 and 180 mm) with the shallow brackish groundwater (15 g/L) were exploited in this experiment in winter. Results showed that top soil layer was well desalinized with freezing irrigation in the next spring when soil freezing layer thawed. The desalinizing ratio is 12.7%, 73.8% and 80.9% in 90, 135 and 180 mm irrigation treatments, respectively. However the no irrigation treatment showed intensive salinization in spring. The possible reason is that the ice layer restrains the freezing and thawing process of the saline soil and the leaching effect of fresh water produced from the melted saline ice.

**Key words:** Coastal saline soil; Freezing action in winter; Brackish water; Saline soil reclamation

土壤盐渍化问题是制约干旱、半干旱地区农业发展的重要因素之一<sup>[1]</sup>。土壤盐渍化与地貌类型、成土母质、地下水位水质等有关, 同时受气候条件的影响, 在我国北方具有明显的季节性变化<sup>[2]</sup>。在河北省滨海平原区, 受海相与陆相的作用, 加之海拔较低, 地下水位较高且水质较差, 土壤盐渍化严重。由于受季风气候影响, 该区春季降雨较少, 土壤蒸发强烈, 土壤处于积盐阶段, 影响作物的播种和生长; 而夏季降雨量大且集中, 土壤处于淋盐阶段, 可适当种植一些作物; 到秋季降雨量减少, 地表覆盖降低, 土

壤又复积盐, 但不如春季强烈; 冬季随土壤水的冻结, 盐分随水分运移至土壤上层, 春季融化时积累于土壤表层, 呈隐蔽的积盐过程。有研究表明, 在我国北方冬季和春季土壤的冻融是土壤盐渍化的重要原因<sup>[3,4]</sup>。在表土温度低于 0℃时, 表土开始冻结, 此时表土温度明显低于心底土, 在产生温度梯度的情况下, 水分向冻层方向移动, 同时冻层以下土层中及地下水中的盐分向冻层中累积, 整个冻层的土壤含盐量明显增加。冻结期的土壤剖面可分为冻结层、似冻层和非冻层 3 个部分。冻层的消融是在冻层的

收稿日期: 2008-03-07

基金项目: 河北省“十一五”农业科技攻关项目 (0622011D); 国家“863”项目资助 (2006AA100206)

作者简介: 李志刚 (1981-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 主要从事区域生态恢复方面的研究。

通讯作者: 刘小京 (1966-), 男, 河北宁晋人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事盐碱区农业可持续发展理论与技术研究。

上下同时进行,处于中间的未解冻土层起了隔水作用,由于表土水分蒸发,上部消融层的土壤水分向上运动消耗于蒸发,土壤含水量逐渐减小,而冻结期间累积于该土层中的盐分也随之迅速向表土累积,使表土含盐量急剧增加(返浆返盐现象)。下部消融层内土壤水分则向下渗流补给地下水,该层次中的盐分则随着消融水的下渗,向下部土层或地下水中移动<sup>[3-5]</sup>。

根据土壤水盐运移规律,国内外提出了许多盐碱地治理改良措施,采用灌排淋洗,降低地下水位的水利工程措施是盐碱地治理最有效的方法。但是由于受淡水资源短缺的制约,目前这一措施很难实施。

为解决淡水资源短缺的问题,有研究提出,在我国北方可以利用海冰制备淡水<sup>[6]</sup>。由于利用海冰制备淡水存在设备、储运等技术和成本问题,我们设想是否能够就地利用丰富的地下咸水资源,结合土壤水盐运移规律,在冬季通过咸水结冰淡化灌溉改良盐碱地。即利用北方滨海平原地下咸水与冬季冷资源并存的特点,充分利用季节温度的变化规律,在冬季低温条件,以地下咸水对盐碱地进行结冰灌溉,使盐碱地表覆盖冰层从而影响土体内部的冻融过程,减缓土体内因冻融作用而产生的潜在积盐过程,并利用春季冰层融化时发生水盐分离产生的淡水对土壤的淋洗作用,从而达到改良盐碱地的目的。本研

究就是基于上述设想,在河北省滨海平原冬季利用咸水结冰灌溉改良盐碱地的初报。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

本试验设在河北省海兴县。海兴县位于河北省东南部,为滨海平原,地势低洼平坦,土壤多为滨海盐土,中度以上盐渍化土壤或盐土分布面积较广,盐荒地较多;该县属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 12.1℃,1 月份平均气温-4.5℃,极端最低气温-19.9℃,初霜冻多出现在 10 月下旬,终霜冻多出现在 4 月中旬。海兴县年降水量为 582.3 mm,四季分布不均,主要集中在 6-8 月份,降水量为 430.4 mm,占年降水量的 74%,冬季降水量极少,占全年降水量的 5%~7%。

该地区代表重度盐渍化区(滨海盐土区),土壤盐分在组成上主要以氯化物为主,Cl<sup>-</sup>占阴离子总量的 70%~80%,Na<sup>+</sup>是主要的阳离子之一,盐分组成在剖面上垂直变异明显,试验区土壤含盐量情况如表 1 所示。地下水水位为 0.9~1.5 m,随着季节而有一定的变化。6-8 月份雨季地下水水位较高,达到 1.0 m 左右,在春季干旱时期一般在 1.4 m 左右,且地下水的矿化度较高,含盐量在 7~27 g/L。

表 1 试验地土壤盐分状况

Tab. 1 The salinity level of soil in study area

深度/ cm Depth	全盐量 Salt content	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup>
0~ 10	1.951	0.017	1.061	0.161	0.049	0.059	0.604
10~ 20	0.757	0.023	0.401	0.056	0.016	0.017	0.244
20~ 40	0.700	0.033	0.332	0.081	0.010	0.012	0.232
40~ 60	0.651	0.025	0.342	0.044	0.011	0.013	0.216
60~ 80	0.673	0.022	0.358	0.045	0.013	0.015	0.220
80~ 100	0.696	0.022	0.368	0.050	0.014	0.015	

### 1.2 试验设计与管理

本试验在 2005 年冬季进行,日平均气温低于 0℃以后(12 月 11 日)开始灌水。设 3 个灌水量结冰灌溉处理:90 mm(T1)、135 mm(T2)和 180 mm(T3),以不作处理小区作对照(CK);每个处理重复 4 次,共 16 个小区,随机区组排列。

试验前平整小区,小区长 5 m、宽 4 m,各小区之间设置宽 1 m、高 0.5 m 的田垄,以防测渗和互溢。试验用水含盐量为(15±0.037)g/L。为保证灌水均匀结冰,采用分次灌水,即每天灌少量水,直至 2005 年 12 月 17 日达到各试验设计要求。

### 1.3 数据获得

2005 年 12 月 10 日用土钻在各个小区分 0~10、

10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 6 个层次取得初始土样。2006 年 2 月 20 日土壤及地表冰层完全融通后起,每 20 d 按相同的层次取土 1 次,至 2006 年 3 月 30 日共取土 3 次。对取得的土样测定含水量和含盐量。

土壤含水量以烘干法测得;对烘干土样按土水比 1:5 浸提液进行盐分含量测定;盐分离子组成用滴定法测得;土壤含盐量为阴阳离子含量之和。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分变化

图 1 表示各试验小区土壤含水量变化情况。处理前各个小区的初始土壤含水量差异较小,各处理

0~ 10 cm 土层的含水量均在 23% ~ 24% ( 图 1-a) 。而在 2006 年 2 月 20 日即土壤融通初期( 图 1-b) , CK 由于无冰层覆盖, 表现出经过冬季冻融土壤含水量变化的一般现象, 即强烈的蒸发作用使得 0~ 20 cm 土壤含水量降低, 而 40 cm 以下土壤含水量则由于冻层的消融以及地下水的上移而明显增大。而 3 个结冰灌溉处理由于冰层覆盖厚度的不同, 土壤含水量变化表现出一定的差异: 由于冰层融化后的消融水进入表层土壤, 使得 0~ 10 cm 土层的含水量明显大于 CK, 且大小与灌水量成正比: CK 为 22. 73%, T1 为 24. 38%, T2 为 24. 78%, T3 为 25. 13%。深层土

壤水分的变化与冰层对土壤冻融过程的影响有关, 过程较为复杂。一般条件下, 土壤在冻结时水分由高温处向低温处运动, 使冻结层含水量较高, 而深层含水量较低<sup>[2, 3]</sup>。根据有关研究<sup>[7]</sup>, 由于覆盖对其下土体的保温作用, 土壤温度变化较小, 水分由高温处向低温处移动的活动减弱, 从而使冻结层融化时水分含量降低。故我们推断本试验中 3 个处理在 40~ 80 cm 土层土壤含水量明显小于对照的原因在于冰层覆盖条件限制了深层土壤水或者地下水向此层的运动。

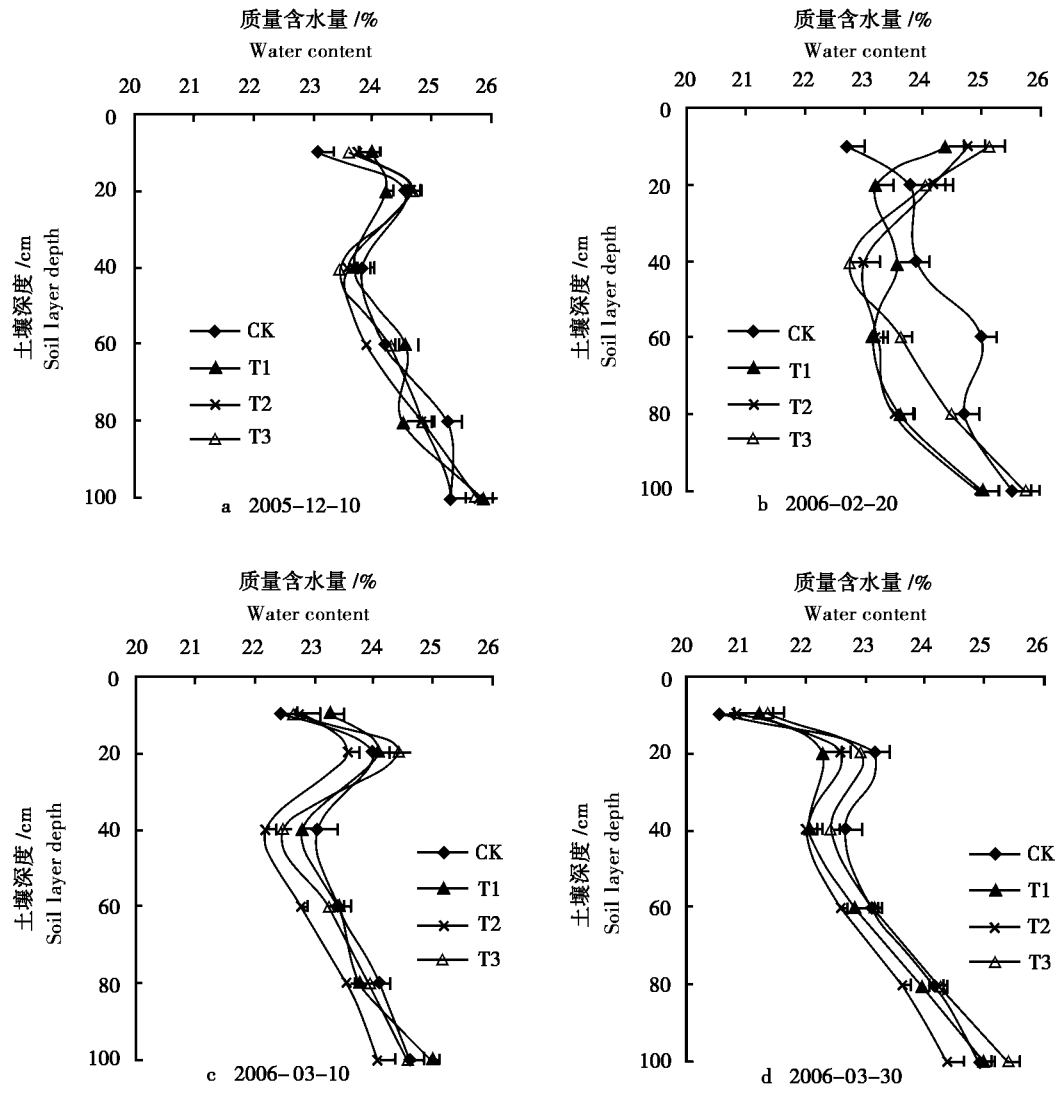


图 1 各处理土壤质量含水量剖面变化情况

Fig.1 Variation of soil water content before/ after treatment

春季土壤水蒸发作用强烈, 2006 年 3 月 10 日, 3 个结冰灌溉处理小区 0~ 10 cm 土层土壤含水量表现出逐渐减小的趋势( 图 1-c) , 至 3 月 30 日时, 处理与 CK 小区各个层次土壤含水量已无明显差异( 图 1-d) , 均表现出表层 0~ 10 cm 土壤含水量明显减小, 0~ 40 cm 以下土层土壤的含水量随土壤深度的

增加而增加。

## 2.2 土壤盐分变化

图 2 表示各小区土壤含盐量剖面的变化情况。对处理前、后各小区土壤含盐量数据的统计分析结果表明, 处理前各小区、各层次含盐量无显著差异( 图 2-a) , 而处理后( 2006 年 2 月 20 日) , 各小区 0~

10 cm 层次的变化最明显: 对照的土壤含盐量显著增加, 由 1.95% 增加到 2.72%, 积盐率为 39.5%, 表明未经结冰灌溉处理的土壤表层表现为积盐。而 T1,T2,T3 3 个处理则均显著降低:T1 由 1.58% 降低

到 1.38%, 脱盐率为 12.7%; T2 由 1.26% 降低到 0.33%, 脱盐率为 73.8%; T3 由 1.78% 降低到 0.34%, 脱盐率为 80.9%, 脱盐率随灌水量的增加而增加。

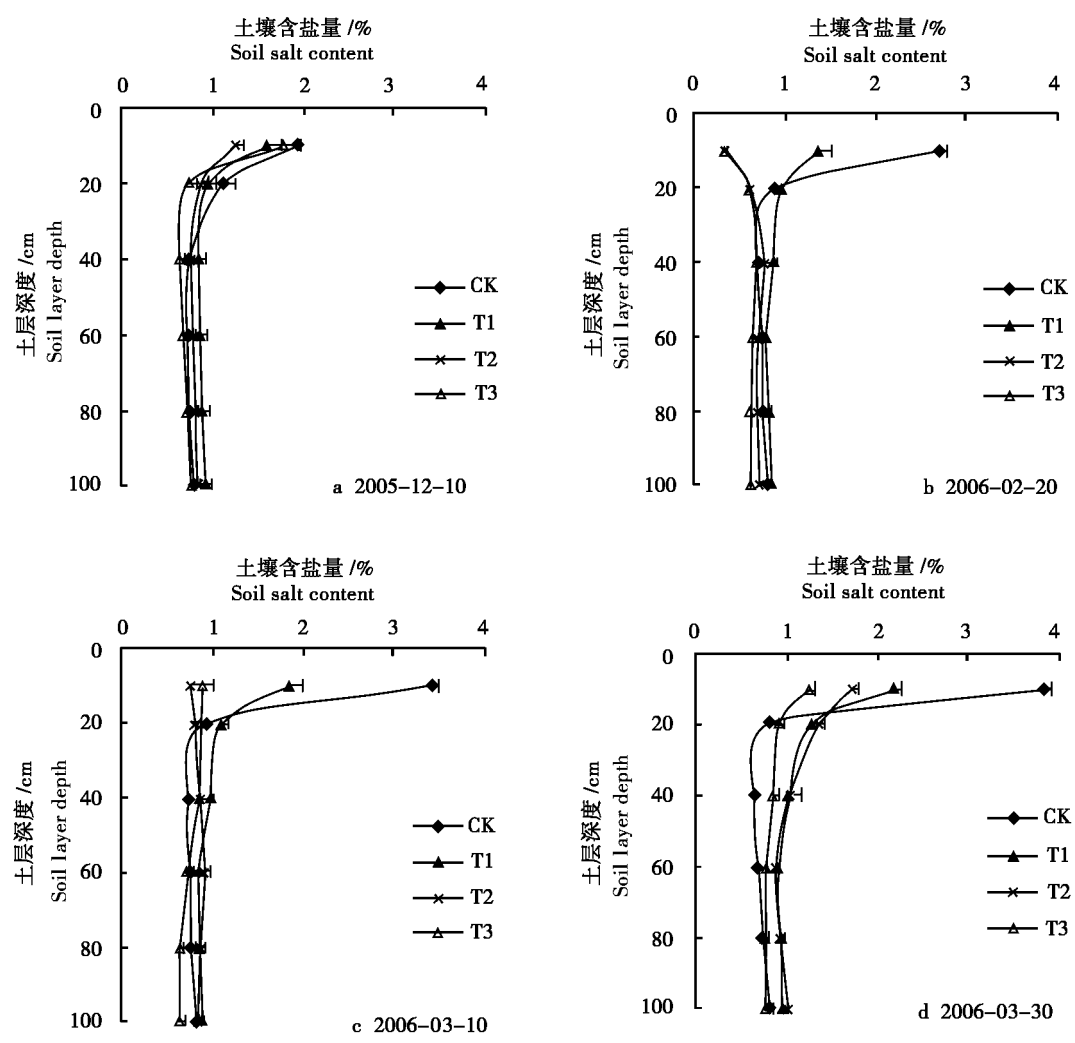


图 2 各处理土壤含盐量剖面变化

Fig. 2 Variation of soil salt content profiles before/ after treatment

表 2 处理前、后含盐量差值(处理后- 处理前)

Tab. 2 The difference of soil salt content between before and after treatment

处理 Treatments	土层深度/ cm Soil layer depth						0~ 100
	0~ 10	10~ 20	20~ 40	40~ 60	60~ 80	80~ 100	
CK	0. 767	- 0. 218a	- 0. 049a	0. 017	- 0. 006b	- 0. 008c	0. 503
T1	- 0. 208c	0. 012	0. 034	- 0. 082a	- 0. 082a	- 0. 063b	0. 389c
T2	- 0. 929b	- 0. 254a	0. 006	- 0. 077a	- 0. 129a	- 0. 110a	- 1. 493b
T3	- 1. 440a	- 0. 155a	0. 049	- 0. 051a	- 0. 118a	- 0. 132a	- 1. 847a

注: - . 代表脱盐, 对脱盐的处理含盐量差值采用 LSD 新复极差法进行平均数比较, 同一栏内不同字母表示在 p< 0. 05 水平不同处理之间存在显著差异。

2006 年 2 月 20 日各处理各层次的含盐量与 2005 年 12 月 11 日相比的减小(增加) 值的统计分析结果(表 2) 表明, CK 小区在 0~ 10、40~ 60 以及 0~

100 cm 土层均表现为显著积盐, 其中表层 0~ 10 cm 积盐作用最为强烈, 积盐率为 39.5%; 1 m 土体内总体也表现为积盐, 积盐率 8.33%, 这一结果也证明

了冬季冻融作用引起了盐碱地隐蔽积盐。而 3 个处理则在 0~100 cm 土体内总体表现为脱盐, 脱盐率分别为 6.48%、28.35% 和 34.87%, 不同的是: T1 处理在 10~20 和 20~40 cm 2 个层次表现出轻微的土壤积盐现象; 而 T2 和 T3 处理则只表现在 20~40 cm 处积盐, 且积盐率也不大, 分别只有 0.7%、7.8%, 说明冰层对盐碱地冻融积盐过程具有明显的抑制作用; 其中 0~10 及 0~100 cm 土层 T3 小区土壤的脱盐效果最为显著, 表明采用咸水结冰灌溉盐碱地的方法后, 土壤的脱盐效果随灌水量的增加而增加。

从图 2c 和图 2d 可以看出, 表层土壤盐分是迅速增加的, 这是由于春季土壤水蒸发强烈, 使得下部土壤盐分随水分的上移而在表层聚集, 整个上部土层的土壤含盐量较 2 月 20 日均有所增加。到 3 月 30 日, CK 的表层土壤含盐量增加到 3.98%, 3 个处理的上部土壤含盐量也有明显增加。

相关研究显示, 如果土壤中的含盐量为 0.1%~0.3%, 不耐盐的作物可能遭受盐害, 影响作物的生长; 当土壤中含盐量达到 0.3%~0.6% 时, 则一般农作物生长发育受到不同程度的抑制, 其中有些农作物因受盐害会先后死亡; 当土壤中含盐量超过 1.0% 时, 则一般农作物不能生长, 变为不毛之地<sup>[8]</sup>。T2、T3 处理后 0~10 cm 土层含盐量均为 0.3% 左右, 这个盐浓度允许一部分耐盐作物正常发芽, 加上较好的水分条件, 作物完全可以安全地渡过发芽期及苗期。

但是从图 2 也可以看出, 由于春季强烈的蒸发, 这个淡化的环境不会持续很长的时间, 所以应该采取一些农艺技术措施来保持这个淡化的环境。目前来说, 通过秸秆、地膜及硬壳覆盖等措施已被证明有减小土壤水分蒸发及减缓春季土壤返盐的作用。因此, 在盐碱地采取了结冰灌溉的改良方法后, 在春季冻层完全融化后, 应及时采取覆盖或者其他一些措施, 并适时地播种具有一定耐盐性的农作物, 使其正常发芽。而后, 随着夏季的到来, 雨水将逐渐增多, 雨水的淋洗作用会使土壤盐分保持在较低水平, 同时水分也比较充足, 这样作物即可完成整个生育期, 而获得较高的产量。

0~100 cm 土体平均含盐量随时间的变化情况 (图 3) 表明, 处理前各小区 0~100 cm 土体的平均含盐量并无显著差异。而处理后 CK 与 T1 处理仍无显著差异, 但二者与 T2、T3 处理则表现出明显差异, T2、T3 小于 CK、T1; 随着土壤的返盐, 到 3 月 30 日, T2 处理 0~100 cm 土壤含盐量明显增加, 而 T3 也表现为返盐但仍与 CK、T1、T2 存在显著的差异。

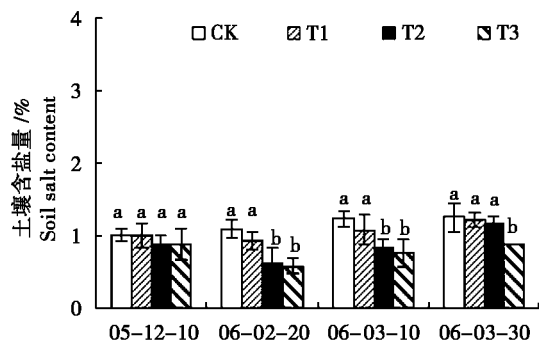


图 3 0~100 cm 土壤含盐量随时间变化

Fig. 3 Variation of soil salt content of the 0-100 cm layer

一般来说, 以咸水进行灌溉时, 水量越大带入土壤的盐分也就越多, 而本试验的结果中 0~100 cm 土壤含盐量却随水量的增加而减小, 呈负相关关系, 主要的原因是: CK 由于没有冰层的覆盖而表现出冬季隐蔽性的、春季爆发性的积盐现象; 而 3 个处理由于采取了咸水结冰灌溉的方式使土壤表层覆盖了冰层, 冰层的覆盖影响了土体内部的冻融过程, 抑制了下部土壤的盐分由于较大的温差而引起的随水分的上移, 从而抑制了因冻融作用而产生的隐蔽性的积盐现象; 同时春季冰层的融化发生水盐分离产生一部分淡水, 并且产生的淡水量随水量的增加而增加, 这部分淡水对上部土壤的盐分有淋洗作用, 使得春季冰层和土体完全融通后, 上层土壤的含盐量明显小于 CK; 而春季 CK 和处理小区土壤均由于土壤水的强烈蒸发而返盐, 而处理则由于淋洗后的土壤含盐量的基础值较小而表现出 0~100 cm 土壤含盐量小于 CK。

### 3 结论与展望

经过对本试验的结果进行分析, 可以得到以下结论:

冬季采用咸水结冰灌溉盐碱地的方法后, 次年春季使得上层土壤的含水量较高而含盐量明显降低。

冰层的覆盖影响了冬季土壤内部的冻融过程, 对冬季潜在的积盐过程有一定的抑制作用, 且冰层融化后发生水盐分离而产生一定的淡水, 这些淡水对土壤上层的盐分具有较好的淋洗作用。

一般来说, 咸水灌溉时, 水量越大, 带入土壤的盐分也越多。但对于本试验, 在一定范围内, 1 m 土体内盐分的总含量不会因冬灌水量的增加而增加, 相反, 表现出负相关的关系。我们初步推断, 水量越大冰层越厚, 其覆盖保持地温的效果越明显, 对土壤冬季潜在积盐过程的抑制效果也越明显, 同时春季融化后产生淡水越多, 对上层土壤盐分淋洗效果越

好。

本方法还可以看作是缺少淡水资源地区咸水及微咸水利用的一种新方法。咸水或微咸水采用冬季结冰灌溉的方法, 不会造成春季土壤含盐量过高, 再使用少量淡水淋洗盐分, 就可以为作物提供较好的水分条件, 并达到节约淡水的目的。但如果长期使用这种方法, 应注意做好排水工作, 防止土壤次生盐碱化的发生。

本研究改变了常规的盐碱地土壤的冻融变化规律, 相应的土壤水、热、盐变化情况有待深入研究, 同时对灌水水质、水量阈值及灌水时期等有待进一步探讨。

参考文献:

[1] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2202, 33(6): 449- 455.

[2] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[3] 张殿发, 王世杰. 土地盐碱化过程中的冻融作用机制

[J]. 水土保持通报, 2000, 20(6): 14- 17.

[4] 岳汉森. 土壤在冻融过程中水- 热- 盐耦合运移数学模型之初探[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 308- 313.

[5] 方汝林. 土壤冻结、消融期水盐动态的初步研究[J]. 土壤学报, 1982(2): 164- 172.

[6] 史培军, 哈 斯, 袁 艺, 等. 渤海海冰作为淡水资源: 脱盐机理与可利用价值[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 353- 360.

[7] 李伟强, 雷玉平, 张秀梅, 等. 硬壳覆盖条件下土壤冻融期水盐运移规律研究[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 251- 257.

[8] 王生力, 裘平一, 冯朝军. 盐渍土资源综合利用的可持续发展观[J]. 北京地质, 2001, 13(3): 21- 24.

[9] 冯永军, 陈为峰, 张蕾娜, 等. 滨海盐渍土水盐运动室内实验研究及治理对策[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 38- 42.

[10] Dianfa Zhang, Wang Shijie. Mechanism of freeze thaw action in the process of soil salinization in northeast China [J]. Environment Geoloty, 2001, 41: 96- 100.