

# 冬季咸水冰覆盖对滨海盐渍土的改良效果研究\*

林叶彬<sup>1,2</sup> 顾卫<sup>1†</sup> 许映军<sup>1</sup> 陶军<sup>1</sup> 卜丹阳<sup>1,2</sup>

(1 地表过程与资源生态国家重点实验室(北京师范大学),北京 100875)

(2 民政部/教育部减灾与应急管理研究院,北京 100875)

**摘要** 滨海盐渍土盐度变化存在明显的季节性,地下水埋深浅、矿化度高是造成滨海地区冬-春季土壤积盐的主要原因。台田-浅池农业生态系统的构建,既可抬高土壤耕作面,又能形成开阔的水体。利用冬季浅池中自然冻结形成的咸水冰覆盖台田,其融水可实现对台田土壤盐分的淋洗,防止返盐。台田覆冰后,又在冰面设置了无覆盖、芦苇秆覆盖和无无纺布覆盖 3 种处理,以调节冰体融化速度。实验过程中监测冰体融化前后及融化过程中台田 0~100 cm 土层含水率与盐度变化。结果表明,冬季咸水冰覆盖不仅抑制了土壤的返盐,还能降低部分盐度,增加土壤含水率。冰面无覆盖条件下,覆冰融化迅速,土壤含水率在短时间内大量增加,洗盐效果明显,但持续时间较短。覆盖处理减少了蒸发,可延缓覆冰融化,延长脱盐时间。与芦苇秆覆盖相比,无纺布覆盖条件下,融冰速率适中,土壤脱盐效果最佳。3 种处理方式下,覆冰融尽时 0~20 cm 土层含水率分别增加 44.5%、42.8% 和 68.5%,土壤脱盐率分别为 44.4%、47.0% 和 72.4%。土壤墒情的改善与盐度的降低为作物的种植创造了良好的条件,为后续改良方法的顺利实施提供了保障。

**关键词** 滨海盐渍土;咸水冰;台田;洗盐

**中图分类号** S156.4<sup>+</sup>2 **文献标识码** A

渤海湾位于渤海的西部,其沿岸包括河北、天津、山东三省的部分地区。渤海湾沿岸地势平坦,在河流冲积和海水堆积的共同作用下,形成了大范围土层深厚的滨海平原。受海水顶托的影响,渤海湾滨海平原区的地下水位一般为 1.0~2.0 m,矿化度一般在 5 g L<sup>-1</sup> 以上,高者可达 20~30 g L<sup>-1</sup>[<sup>1</sup>]。该地区土壤盐渍化严重,形成了大量的盐碱荒地,仅河北省就有滨海盐碱地 200 km<sup>2</sup> 左右[<sup>2</sup>],是我国北方重要的后备耕地资源。

渤海湾沿岸地区埋藏着丰富的地下咸水。据初步统计,河北省东部沿海地区咸水总量达到 7.17 亿 m<sup>3</sup>[<sup>1</sup>],如果能以简单的方法对这些地下咸水进行脱盐处理,使之成为能被农业生产所利用的新水源,不仅可以解决当地农业用水严重短缺的问题,还可用于改造盐碱荒地,缓解由于滨海新区建设所带来的耕地减少的矛盾。

渤海湾沿岸地区盐碱地改良具有悠久的历史。自宋代起,天津沿海就开始种植水稻改良滨海盐碱地[<sup>3</sup>];20 世纪 60 年代,河北省沿岸的一些国营农场

采取排灌措施改土种稻;本世纪初,山东省沿岸的黄河三角洲地区利用暗管排盐改碱技术与引黄灌溉相结合以改良滨海盐渍土[<sup>4</sup>],这些技术和方法在当地取得了良好的效果。

近年来,由于经济发展迅速,人口急剧增长,淡水资源日益短缺,以水压碱、改土种稻的盐碱地改造方式因缺水而难以为继。致使原有的水田变为旱地,土壤盐渍化程度加剧,生产力显著下降。

为了解决农业缺水和盐渍土改造的问题,Li 等提出了利用苦咸水自然冻结改良盐渍土的方法[<sup>5</sup>]。在冬季抽取地下咸水对盐渍土进行灌溉,咸水受低温作用会在盐渍土表面形成一定厚度的咸水冰层,春季融化时咸水冰层中的浓咸水融化在先、微咸水融化在后,这种梯次入渗对滨海盐渍土具有良好的洗盐作用,可以降低土壤表层(作物根区)的盐分含量,并能保持土壤墒情[<sup>6-7</sup>],为作物生长提供适宜的土壤水分和低盐条件。史培军等在海冰淡化及农业利用技术方面做出了开创性的工作[<sup>8-9</sup>]。冬季采集渤海海面上漂浮的海冰,对其进行脱盐处理,使

\* 国家“863 计划”课题“精细地面灌溉技术与设备”与“海冰资源淡化与利用技术”资助

† 通讯作者, E-mail: weigu@bnu.edu.cn

作者简介: 林叶彬(1981—),男,四川泸州人,博士研究生,主要从事海水资源开发利用与滨海盐渍土改良研究。E-mail: forrestbin@gmail.com

收稿日期: 2010-09-19; 收到修改稿日期: 2011-02-22

其成为可以用于农业灌溉的淡水。这两种方法虽然提出了渤海湾沿岸地区农业用水的新途径,但仍有一些问题尚待解决。咸水冻结灌溉在土壤表面所形成的咸水冰层是一种混合冰层,总盐量并未减少。尽管小于  $15 \text{ g L}^{-1}$  的咸水冰在融化过程中可形成 50% 以上小于  $5 \text{ g L}^{-1}$  的微咸水,但另外 40% 多的高浓度咸水(盐度为  $30 \sim 60 \text{ g L}^{-1}$ )也同时渗入土壤,使得土壤中下层有可能出现盐分累积的趋势。海冰淡化水的盐分含量虽然可以达到国家农业灌溉用水的水质标准,但渤海湾沿岸水深较浅,退潮后可以形成几千米甚至于十几千米长的滩涂。若直接将渤海海冰进行淡化,会大幅度增加海冰采集和运输的成本。

针对上述问题,本文以渤海湾沿岸的河北省黄骅市中捷友谊农场为研究区,通过挖浅池、筑台田的整地方式在盐碱荒地上构建台田-浅池系统。在冬季将浅池内地下咸水冻结而成的咸水冰采集后覆于台田之上,淋洗台田土壤盐分,开展了利用咸水冰改造盐碱荒地的实验研究。

## 1 研究区概况

研究区为位于河北省黄骅市中捷友谊农场十一队的北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室黄骅海冰资源综合实验基地,地理坐标为北纬  $38^{\circ}09' \sim 38^{\circ}39'$ 、东经  $117^{\circ}05' \sim 117^{\circ}49'$ ,平均海拔  $1.5 \text{ m}$ ,至渤海湾的直线距离约  $7 \text{ km}$ 。当地属暖温带半湿润季风气候区,冬春季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年均温  $12.3^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温  $-21.3^{\circ}\text{C}$ , $\geq 0^{\circ}\text{C}$  积温  $4750^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量  $642.9 \text{ mm}$ ,年蒸发量超过  $2159 \text{ mm}$ 。浅层地下水埋藏深度为  $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ ,矿化度可达  $10 \sim 30 \text{ g L}^{-1}$ ,土壤类型主要是滨海潮土、盐化潮土和滨海盐土,质地黏重,渗透率低。已开垦的旱作耕地土壤盐度为  $3 \sim 5 \text{ g kg}^{-1}$ ,未开垦的盐碱荒地土壤盐度为  $10 \sim 17 \text{ g kg}^{-1}$ 。

## 2 实验原理

### 2.1 台田-浅池系统

研究区地下水埋藏浅且矿化度高,地下咸水中的盐分在土壤蒸发和土壤毛管的共同作用下,向土壤表层聚集,这是当地土壤盐渍化的主要成因<sup>[10]</sup>。如果有足够的淡水并配合以灌溉排水措施,可以将土壤耕层范围内的盐度控制在一定范围之内( $3 \sim 5 \text{ g kg}^{-1}$ )。

但在缺乏淡水的情况下,欲减少地下水对土壤盐分累积的影响,可通过降低地下水位,或是抬升地表高度来实现。对于滨海地区而言,地下水含量丰富,简单地抽水不仅很难降低地下水位,还会引起海水倒灌,因此比较适宜的做法是抬升地表高度,即修筑台(条)田。挖土筑台是修筑台田的常用方法,挖土处成为浅池,堆土处成为台田。台田表面通常高于原地表  $1.7 \text{ m}$  以上,这就可以使得耕作土壤表面与浅层地下水之间的距离由原来的  $1.0 \text{ m}$  左右增加至  $2.5 \text{ m}$  以上。地下水对台田表层土壤的影响会因此而减弱,由地下水所带来的土壤盐分累积也会减少,再通过雨水和灌溉用水对土壤盐分的淋洗作用,台田就会逐渐从原来的重盐渍土改造成为盐度适中的可耕作农田。浅池的深度通常在  $1.5 \sim 1.7 \text{ m}$ ,地下水会在此处出露,从台田上流下来的雨水或灌溉水会在此处汇集,因此浅池内可形成一定深度的水面。浅池可作为与台田配套的排水设施,也可以作为水产养殖用水面,如果能对浅池内的水体进行脱盐处理并将其用于台田灌溉,还可以成为台田灌溉用水的蓄水池。台田与浅池的组合,构成了滨海地区粮食种植与水产养殖相结合的台田-浅池系统,为滨海地区盐渍土改造利用和农业可持续发展提供一种新模式。

### 2.2 咸水结冰与咸水冰覆盖洗盐

浅池内的水主要是地下咸水,其盐度变动于  $8.5 \sim 19.0 \text{ g L}^{-1}$  之间。咸水结冰的机理与海冰结冰是一致的<sup>[11]</sup>,当冬季温度降低至咸水冰点( $-0.5 \sim -0.9^{\circ}\text{C}$ )以下时,由于冷却使浅池水体表面薄层产生结晶,生成淡水冰晶。这些冰晶漂浮在咸水表面,并彼此冻结在一起形成冰皮,随着大量冰晶从水中不断浮上水面,冰皮逐渐增厚形成冰层。冰晶在聚集过程中会将一部分卤水(浓咸水)裹挟在冰晶体之间,因此咸水冰是淡水冰晶、卤水、空气和少量固体杂质等组成的固、液两相混合物,主要成分为淡水冰晶。咸水的低温结晶过程使其形成的冰体盐度远低于水体。冬季盐度为  $12.0 \sim 14.0 \text{ g L}^{-1}$  的咸水,冻结而成的咸水冰盐度仅为  $2.8 \sim 3.5 \text{ g L}^{-1}$ ,降低了  $75\% \sim 80\%$ ,从咸水变成了微咸水。

如果将冬季浅池内冻结成的咸水冰采集上来覆盖在台田上,咸水冰内的卤水(占咸水冰体积的  $20\% \sim 30\%$ ,盐度最高可达  $40 \text{ g L}^{-1}$ )受重力作用会沿着冰晶之间的缝隙从冰体流出,而剩下的淡水冰晶(占咸水冰体积的  $70\%$ ,盐度  $1 \text{ g L}^{-1}$  左右)会随着气温的逐渐上升而缓慢融化并渗入土壤,对土壤

盐分产生淋洗作用。即在冬季采集浅池内的咸水冰并将其覆盖在台田上,可以取得与雨水或灌溉水同样的土壤洗盐效果,相当于将土壤洗盐过程从雨季延长至冬季。

### 3 实验方案

#### 3.1 修筑台田-浅池

在研究区修筑三块台田  $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ ,修筑时间分别为 2006 年、2007 年、2008 年。台田高 1.7 m,面积约 1 100 m<sup>2</sup>,台面与浅池水面的面积比约为 1:1.2。实验开始前,每个台田分层土壤的盐度与含水率如表 1 所示。

表 1 实验开始前台田土壤盐度与含水率

Table 1 Salt and water content of soils in raised-beds before the experiment

土层深度 Soil depth (cm)	土壤盐度 Soil salinity (dS m <sup>-1</sup> )			土壤含水率 Soil water content (%)		
	$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_0$	$T_1$	$T_2$
0~20	8.8	11.7	15.6	18.04	17.83	17.66
20~40	7.8	11.7	14.6	19.61	22.42	19.50
40~60	7.8	10.7	16.6	22.28	23.27	20.86
60~80	10.7	12.7	16.6	23.55	23.60	24.17
80~100	9.8	12.7	17.6	24.87	24.01	24.15

注:台田  $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  的修筑时间分别为 2006 年、2007 年、2008 年,下同 Note: Raised-bed  $T_0$ ,  $T_1$  and  $T_2$  was built in 2006, 2007 and 2008, separately. The same below

#### 3.2 覆盖咸水冰

研究区冬季低温期为 3 个月(12 月~2 月),平均气温为 -2.0℃,如果将咸水冰厚度达到 10 cm 作为采冰标准,则每个浅池每年平均可采冰 2.8 次,累计总冰量可达 450 m<sup>3</sup>。2009~2010 年冬季气温低于正常年份,每个浅池产冰量超过 650 m<sup>3</sup>。

咸水冰直接置于空气中时,融化速度较快。冬季无覆盖条件下,40 cm 厚的冰体可在 30 d 内融化

完全。冰体融化过快会影响咸水冰融水对土壤盐分的淋洗效果,因此应采取控温措施减缓冰体的融化速度,从而延长冰体融化的时间,提高土壤洗盐效果。在咸水冰表面铺设覆盖物,可以减少冰体与空气之间的热交换,减缓冰体融化速度。为了比较不同控温措施对咸水冰覆盖土壤洗盐效果的影响,采用芦苇秆和无纺布两种覆盖物覆盖冰体表面,并与无覆盖进行对照。各台田的覆冰量及控温措施设置情况如表 2 所示,其中芦苇秆覆盖厚度为约 3~5 cm。

表 2 控温措施设置情况

Table 2 Temperature controlling measures

台田编号 The number of raised- beds	冰面覆盖方式 Method of mulching on brackish ice	覆盖开 始日期 Date of ice mulching	覆冰融 尽日期 Date the ice mulching completely melted	覆冰历时 Duration of the ice mulch (d)
$T_0$	无覆盖 Without mulching	2010-01-31	2010-03-02	30
	芦苇秆覆盖 Mulching with reed straw	2010-01-31	2010-03-22	50
$T_2$	无纺布覆盖 Mulching with non-woven fabrics	2010-01-31	2010-03-13	41

2010 年 1 月 25 日开始从浅池采集咸水冰并覆盖在台田上,每块台田覆冰量为  $280 \pm 30$  m<sup>3</sup>,覆冰厚度 35 cm 左右,完全融化后,折合水深约 200 mm。1 月 31 日采冰完毕并在冰面上分别覆盖了芦苇秆和无纺布(图 1)。待覆冰完全融化后,在  $T_1$  和  $T_2$  台田上仍保留芦苇秆和无纺布的覆盖,直至春播前再揭开,并进行土地耕翻与平整工作。



图 1 台田覆盖咸水冰

Fig. 1 Mulching of brackish ice on raised-beds

### 3.3 数据采集与样品测试

在台田旁边设置百叶箱和自动温度计,记录实验过程中大气温度的变化,温度数据采集的时间间隔为 1 h。

利用不锈钢土钻进行土壤样品采集,每个台田以“S”形采样方式取 5 个样点,每个点的采样深度为 100 cm,分 5 层,即 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。实验开始前(1月12日)对每个台田进行一次采样,以获得覆冰前各台田分层土壤的盐度与含水率数据。覆冰完成后第 3 天(2月3日),各台田进行第二次样品采集。由于  $T_0$  处理台田表层此时存在积水,地表积水会进入钻孔,影响下层土壤的含水率和盐度。所以此次采样实际上只在  $T_1$  和  $T_2$  处理上进行, $T_0$  处理的第二次采样直至覆冰融尽时(3月2日)才得以完成。此后,土壤样品采集的时间间隔调整为 12 d,直至覆冰完全融化,采样方式保持不变。

土壤水分测定采用重量法(质量法)。将分层采集的土样放入已编号的样品袋,称出总质量  $m_1$ ,再将样品袋连同土样在 105℃ 条件下烘 12 h,冷却后称出质量  $m_2$ ,同时称出样品袋的质量  $m_0$ 。据此算出样品含水率  $\theta_m = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0) \times 100\%$

土壤盐度测定采用电导法<sup>[12]</sup>。将烘干的土壤磨细,过 2 mm 筛。然后将每个台田上同一批次、相

同深度的样品充分混合。称取混合后的土样 40 g,加去离子水 200 ml(1:5 质量比)浸泡 3 min 后放在振荡筛上以  $150 \text{ min}^{-1}$  的频率震荡 5 min,静置至浸提液分层后过滤。用美国 YSI 85 型盐度、电导、溶解氧、温度测量仪测定滤液的盐度和电导率,用仪器显示的读数乘以 5 得出土壤样品的盐度(土壤盐度用电导率表示,仪器准确度为  $\pm 2\%$ )。

## 4 结果与分析

### 4.1 大气温度日变化

台田覆冰后至覆冰全部融化期间大气温度的日变化如图 2 所示。这段时间内,日平均气温的变化幅度为  $-5 \sim 15^\circ\text{C}$ ,日最高气温的变化幅度为  $1 \sim 25^\circ\text{C}$ 。

咸水冰的融化速度主要是受大气温度的影响。冬、春时节,早、晚气温较低,通常是在  $0^\circ\text{C}$  以下,这时冰体仍然维持冻结状态,不会融化;但在中午时分,气温上升较快,平均都在  $1^\circ\text{C}$  以上,冰体会有一部分融化。也就是说,随着气温日变化的进程,冰体在早、晚时分冻结,在中午时分融化,这种冻结-融化的交替出现,使得融水以比较缓慢的速度逐渐地渗入土壤之中。对这种冻融过程起主要作用的是日最高气温。

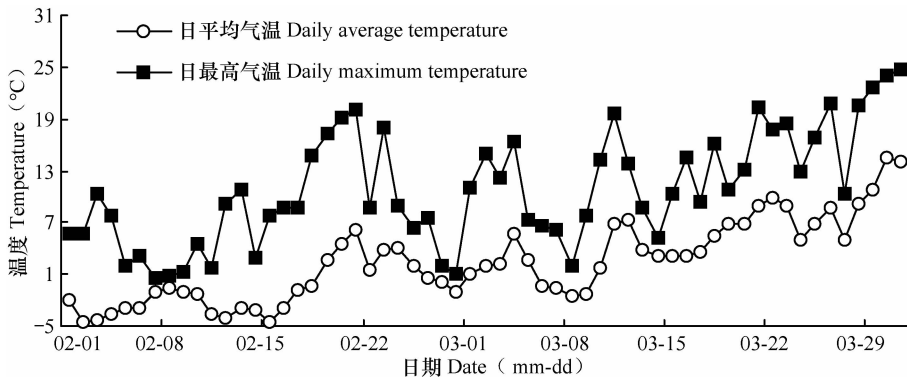


图 2 实验过程中气温变化特征

Fig. 2 Variation of temperature during the experiment

### 4.2 土壤含水率变化

图 3 是覆冰前后各台田土壤含水率的变化情况。覆冰之前,三块台田土壤含水率的规律基本相同,即表层含水率最低,0~20 cm 层在 18% 左右,往下逐渐增大。各台田之间 0~60 cm 层土壤含水率相差较大,但 60~100 cm 层土壤含水率均在 23%~24% 之间,差异较小。

无覆盖的台田(图 3 中  $T_0$ )冰体融化较快,至 3 月 2 日覆冰融尽时,各层土壤含水率均不同程度增加。其中 0~20 cm 最高,达到了 26.06%,往下增加的幅度变小。覆冰融尽 12 d 后(3 月 14 日),40~100 cm 土层含水率均比覆冰融尽时高,随后才开始降低。至 3 月 26 日,0~20 cm 土层含水率略高于覆冰前的值,其余各层也较覆冰前高。

覆盖芦苇秆的台田(图3中 $T_1$ )冰体融化速度最慢,这说明芦苇秆覆盖所产生的保温效果最好。从1月31日覆冰完成至3月22日左右融化完全,共历时约50 d。覆冰初期(2月3日),仅土壤表层20 cm 含水率有所增加,往下各层土壤含水率均无明显变化;覆冰中期(3月2日),各层土壤含水率均有增加,但以0~40 cm 层增加幅度最大;覆冰后期(3月14日),各层土壤含水率达到最高值。至3月26日覆冰融尽时,0~40 cm 土壤含水率有所下降,60~100 cm 相对稳定。

### 4.3 土壤盐度变化

图4是覆冰前后各台田土壤盐度的变化情况。

无覆盖的台田(图4中 $T_0$ ),0~60 cm 土层覆冰前的盐度低于 $10.0 \text{ dS m}^{-1}$ ,60~80 cm 土层盐度最高,可达 $10.7 \text{ dS m}^{-1}$ 。3月2日覆冰融尽时,各层土壤盐度显著降低,尤其是0~20 cm 层,仅 $4.9 \text{ dS m}^{-1}$ ,脱盐率达到了44.3%。即便是盐度

最高的60~80 cm 层,也降到了 $7.8 \text{ dS m}^{-1}$ 。覆冰融尽后12 d(3月14日),土壤表层盐度基本保持不变,20~60 cm 土层略有降低,60 cm 以下略有升高。至3月26日,表层土壤盐度仍无显著变化,但20 cm 以下土层盐度开始增加,20~60 cm 层甚至高于覆冰前的值。

覆盖芦苇秆的台田(图4中 $T_1$ ),土壤盐度变化较无覆盖台田要复杂。覆冰初期(2月3日),0~20 cm 土层盐度显著增加,但往下各土层的盐度基本无变化,与覆冰前相差无几。3月2日,覆冰融水的影响深度已达到60 cm,此时0~40 cm 土层盐度低于覆冰前,40~60 cm 层盐度较覆冰前增加。3月14日,随着融水入渗深度的增加,0~80 cm 土层盐度进一步降低,而80~100 cm 土层盐度变化较小。3月26日覆冰融尽时,表层盐度有所增加,其余各层土壤盐度要略低于3月14日的各层土壤盐度。在整个覆冰-融化的过程中,除了表层(0~

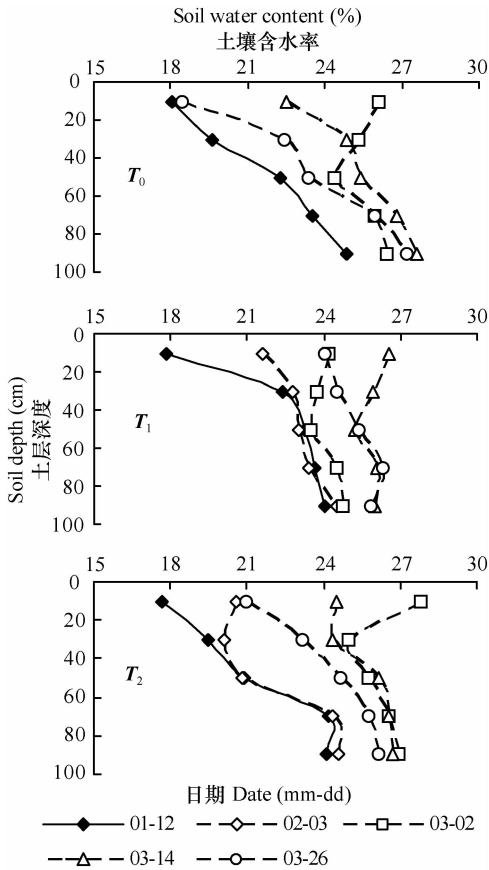


图3 台田土壤含水率变化

Fig. 3 Variation of soil water content on raised-beds

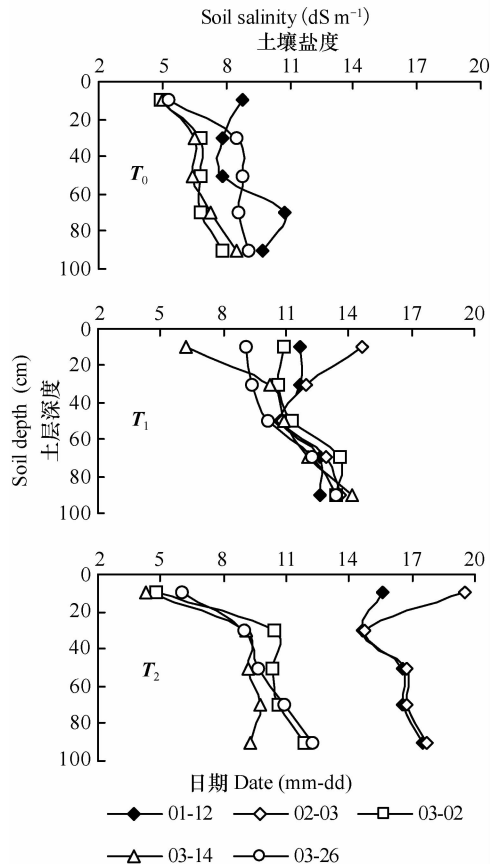


图4 台田土壤盐度变化

Fig. 4 Variation of soil salinity on raised-beds

20 cm) 土壤盐度之外,覆盖芦苇秆的台田其余各土层盐度总体上变化幅度不大。

覆盖无纺布的台田(图 4 中  $T_2$ ),在覆冰初期(2月 3 日),0~20 cm 土层盐度增加,这一特点与覆盖芦苇秆的台田相同。但至 3 月 2 日,0~20 cm 土层盐度迅速降低至  $4.8 \text{ dS m}^{-1}$ ,以下各层盐度降低量也较大。至 3 月 14 日覆冰融尽时,除表层盐度基本未发生变化之外,其余各层又有所下降。覆冰融尽后 12 d(3 月 26 日),0~60 cm 土层盐度略有增加,其中 0~20 cm 增加量明显,往下各土层盐度增量呈递减趋势,60~100 cm 土层盐度基本无变化。与无

覆盖和覆盖芦苇秆的台田相比,在无帆布覆盖条件下,初期台田土壤脱盐效果微弱,后期则非常明显。

#### 4.4 咸水冰覆盖的脱盐效果

在无覆盖、芦苇秆覆盖、无纺布覆盖三种不同冰体控温措施下,台田覆冰灌溉持续的时间分别为 30 d、50 d 和 41 d,平均日灌溉水量分别为 6.7、4.0、4.9 mm。

冰面无覆盖时,覆冰融化速度快,融水量大于入渗量,融冰过程中土壤表层一直有滞留的水分,可以促进土壤表层快速脱盐,但脱盐率比较低,表层土壤脱盐率最高只有 44.4%(表 3 中  $T_0$ )。

表 3 不同覆冰方式下的盐渍土脱盐率

Table 3 Desalinization rate of the soils mulched with ice in different ways

台田编号 The number of raised-beds	土层深度 Soil depth (cm)	初始盐度 Initial salinity ( $\text{dS m}^{-1}$ )	日期 Date (mm-dd)				覆冰融尽时盐度 Termination salinity ( $\text{dS m}^{-1}$ )
			02-03	03-02	03-14	03-26	
$T_0$	0~20	8.8	—	44.4	42.6	40.0	4.9
	20~40	7.8	—	12.5	16.4	-9.4	6.8
	40~60	7.8	—	12.5	17.7	-13.1	6.8
	60~80	10.7	—	36.4	32.3	20.1	6.8
	80~100	9.8	—	20.0	13.2	6.6	7.8
$T_1$	0~20	11.7	-25.0	6.9	47.0	22.3	9.1
	20~40	11.7	-1.9	9.1	12.7	20.0	9.4
	40~60	10.7	-0.5	-5.3	-1.8	5.8	10.1
	60~80	12.7	-2.0	-7.4	4.8	3.5	12.2
	80~100	12.7	-7.3	-5.6	-12.0	-6.0	13.4
$T_2$	0~20	15.6	-25.0	69.5	72.4	61.6	4.3
	20~40	14.6	-1.0	28.4	37.6	38.5	9.1
	40~60	16.6	-1.1	37.8	44.5	42.0	9.2
	60~80	16.6	-0.9	35.9	41.0	34.2	9.8
	80~100	17.6	-0.9	32.5	47.2	30.1	9.3

芦苇秆覆盖条件下,冰体融化缓慢,融水量小于入渗量,水分能被土壤充分吸收,因此土壤各层含水率变化不剧烈,但日灌溉水量的不足制约了脱盐效果的提升。表层土壤脱盐率最高虽然达到了 47.0%(表 3 中  $T_1$ ),但在冰体融尽后,表层土壤出现了较为明显的返盐趋势(表 3 中  $T_1$ )。

无纺布覆盖条件下,既调节了覆冰融化速度,又可使每日融水量与入渗量基本相当。土壤表层脱盐效果最好,脱盐率最高达到了 72.4%,而且在冰体融尽后,表层土壤盐度仍然比较稳定(表 3 中  $T_2$ )。

除了表层土壤脱盐率有所不同,上述 3 种控温

措施下中下层土壤的脱盐率也存在较大差异(表 3)。在无纺布覆盖条件下,不仅表层脱盐率高,而且其余各土层均有稳定的、明显的脱盐,台田土壤整体脱盐效果最佳。在无覆盖和芦苇秆覆盖条件下,仅表层土壤脱盐率高,但其余各层存在积盐风险(脱盐率为负),在覆冰融尽后可能会产生返盐现象。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

1) 将台田-浅池的整地方式与冬季咸水冰覆盖

结合起来,可以使渤海湾沿岸滨海盐渍土在不增加淡水灌溉的条件下实现改造利用。修筑台田相对降低地下水位,减少地下咸水对土壤盐分的供给。冬季采集浅池咸水冰覆盖台田,通过冰体的冻融过程淋洗土壤盐分。

2) 冬季咸水冰覆盖台田表面可以产生明显的盐渍土脱盐效果,随着冰体的融化,大量土壤盐分被排出,在不同的冰体控温条件下(无覆盖、覆盖芦苇秆、覆盖无纺布),台田土壤表层(0~20 cm)脱盐率最高可达到44.4%、47.0%和72.4%;土壤中下层(60~100 cm)脱盐率最高可达到36.4%、4.8%和47.2%。其中以冰体表面覆盖无纺布的土壤脱盐效果最好。

3) 冬季台田表面覆盖咸水冰可以增加土壤墒情,在不同的冰体控温条件下(无覆盖、覆盖芦苇秆、覆盖无纺布),台田0~20 cm土层含水率分别增加44.5%、42.8%和68.5%。

## 5.2 讨论

1) 覆冰后咸水冰中的卤水(浓盐水)在重力作用下流出冰体进入土壤,这在覆冰初期最为明显。图4中 $T_1$ 和 $T_2$ 两种处理的表层土壤盐度(0~20 cm)在2月3日均出现了明显的上升,表3中此时 $T_1$ 和 $T_2$ 两种处理的表层土壤的脱盐率也为-25%,均说明了有外来盐分从土壤表层进入土体。这些盐分虽然可以随着后续冰体融水的渗入被部分地淋洗出土体,但还是会有部分盐分残留在土体之中。要迅速排出这些卤水,需要在修筑台田时设置必要的排水设施。

2) 淋洗盐分仅是盐渍土改造的第一步。对于重黏质滨海盐渍土而言,要想使其成为良田,除了去除土壤盐分之外,还必须要改良土体结构、增加通透性、提高土壤肥力,以利于作物生长<sup>[13]</sup>。本文仅仅是对冬季台田覆冰洗盐效果的初步分析,有关作物生长效果的研究目前正在开展之中。

3) 从浅池中采集咸水冰可以使台田-浅池系统的整体效益得到发挥,但采冰量的多少受冬季气候条件的限制较大。对于台田土壤脱盐而言,冬季覆冰量多少为适宜?连续几年冬季覆冰是否可以达到较为理想的土壤脱盐效果?由于本文研究所用台田的修筑时间不同,土壤初始盐度不同,文中所得出的脱盐效果差异还不能代表普遍的规律,相关工作还有待于今后进行。

4) 研究区春季干旱少雨,覆冰融尽后至春播之间的30~40 d时间里,气温迅速上升、土壤蒸发强

烈。在此期间台田土壤是否会重新积盐,以及如何防止这段时期的土壤积盐以保证冬季台田覆冰土壤洗盐效果,这些问题也还需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 河北省水利厅. 河北省地下水水质调查评价. 1993: 7, 71. Department of Water Resources in Hebei Province. Investigation and assessment of groundwater quality in Hebei Province (In Chinese). 1993: 7, 71
- [2] 李作云, 齐树亭. 河北省盐渍土分类问题刍议. 河北水利专科学校学报, 1990, 1: 54—58. Li Z Y, Qi S T. Discussion on classification of saline soil in Hebei Province (In Chinese). Journal of Hebei Hydraulic Engineering College, 1990, 1: 54—58
- [3] 王斌, 于以舜, 翟乾祥. 天津历代种稻概述. 古今农业, 1989, 2: 11—18. Wang S, Yu Y S, Zhai Q X. An overview of rice planting in Tianjin (In Chinese). Ancient and Modern Agriculture, 1989, 2: 11—18
- [4] 彭成山, 杨玉珍, 郑存虎, 等. 黄河三角洲暗管改碱工程技术实验与研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. Peng C S, Yang Y Z, Zheng C H, et al. Experiment and research on the engineering and technology of hidden drainage pipe in Yellow River Delta (In Chinese). Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006
- [5] Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. Infiltration of melting saline ice water in soil columns: Consequences on soil moisture and salt content. Agricultural Water Management, 2008, 95: 498—502
- [6] Ould Ahmed B A, Inoue M, Moritani S. Effect of saline water irrigation and manure application on available water content, soil salinity, and growth of wheat. Agricultural Water Management, 2010, 97: 165—170
- [7] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐渍土的改良效果研究. 资源科学, 2010, 32(3): 431—435. Guo K, Zhang X M, Li X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil (In Chinese). Resources Science, 2010, 32(3): 431—435
- [8] 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. 自然资源学报, 2002, 17(3): 353—360. Shi P J, Ha S, Yuan Y, et al. The desalinization of Bohai sea ice and its use value as fresh water resource (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 353—360
- [9] 史培军, 顾卫, 王静爱, 等. 海冰资源淡化研究与利用技术开发. 资源科学, 2010, 32(3): 394—404. Shi P J, Gu W, Wang J A, et al. Development of technology for sea ice desalination and utilization of sea ice resources (In Chinese). Resources Science, 2010, 32(3): 394—404
- [10] 王遵亲, 等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993: 256—259. Wang Z Q, et al. Saline soils in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993: 256—259
- [11] 杨国金. 海冰工程学. 北京: 石油工业出版社, 2000: 243—244. Yang G J. Sea ice engineering (In Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 243—244

[12] 林大仪. 土壤学实验指导. 北京:中国林业出版社, 2004: 89—90, 180—181. Lin D Y. Guide to experiments of soil science (In Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2004: 89—90, 180—181

[13] Pang H C, Li Y Y, Yang J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 2009, 96: 1—7

## EFFECT OF MULCHING BRACKISH ICE IN WINTER AMELIORATING COASTAL SALINE SOILS

Lin Yebin<sup>1,2</sup> Gu Wei<sup>1†</sup> Xu Yingjun<sup>1</sup> Tao Jun<sup>1</sup> Bu Danyang<sup>1,2</sup>

(1 *State Key Labrory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

(2 *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China*)

**Abstract** Seasonal variation of salinity is typical of coastal saline soils. High water table and high salinity of the groundwater are considered to be the main cause of salt accumulation in the soil in winter and spring. Fortunately, an agro-ecosystem consisting of raised-beds and shallow pools is expected to be able to solve this dilemma. Raised-beds are built to lower ground water table, and shallow pools provide in winter brackish ice that can be used to mulch the fields. The mulching of brackish ice melts, leaching salt off from raised-beds, thus preventing surfacing of salt. In the experiment, to control melting speed of the ice, three treatments were designed, i. e. no mulching over on the ice layer, mulching with reed straw and mulching with non-woven fabrics. Variations of water content and salinity in the soil of the raised-beds were monitored, before and after melting of the ice and during the process of melting in the experiment. Results show that mulching with brackish water can not only inhibit accumulation of salt, but also decrease salinity and increase water content of the soil. In the treatment of no mulching on ice, the ice melted quickly, raising soil water content quickly in a short time, so its desalinizing effect was notable but not lasting. The treatment of mulching the ice with reed straw reduced evaporation of ice water, and deferred ice melting, thus prolonging desalinizing time. Compared with the foregoing treatment, the treatment of mulching with non-woven fabrics displayed a proper ice melting rate and the best desalinizing effect. In the three treatments at the time the ice mulching completely melted, the water content in the 0 ~ 20 cm soil layer increased by 44.5% , 42.8% and 68.5% , respectively, as against that in the soil without ice mulching and the desalinization rate reached 44.4% , 47.0% and 72.4% , respectively. The improvements in soil moisture and soil salinity create a suitable soil environment for crops, and provide a guarantee for successful implementation of follow-up amelioration of coastal saline soils.

**Key words** Coastal saline soils; Brackish ice; Raised-beds; Salt leaching