

DOI: 10. 11766/trxb201304220197

咸水结冰灌溉下覆膜时间对滨海盐土水盐运移的影响*

郭 凯^{1,2} 张秀梅¹ 刘小京^{1†}

(1 中国科学院农业水资源重点实验室,中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心,石家庄 050021)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要 连续 3 年对咸水结冰灌溉和地膜覆盖下的滨海盐土水盐动态进行了研究,试验设结冰灌溉条件下融水入渗后覆膜(MI)、播种期覆膜(SI)和无覆膜(NI),以及灌前秋季覆膜(无结冰灌溉,AN)和对照(无结冰灌溉无覆膜,CK)5 个处理,播种作物为棉花。结果表明:咸水结冰灌溉后,随着咸水冰层的融化,地表冰层含盐量和钠吸附比(SAR)均逐渐降低。相同土壤深度的土壤含盐量随着灌溉年限的延长而逐年降低,2006、2007 和 2008 年冬灌前土壤表层(0~20 cm)盐分含量分别为 19.8、15.4 和 12.4 g kg⁻¹。结冰灌溉融水入渗完成后 0~40 cm 土层的土壤含盐量均被淋洗至 4 g kg⁻¹ 以下。融水入渗后 9 d 内进行地膜覆盖抑盐效果较好。各个处理中,咸水结冰灌溉结合地膜覆盖(MI)土壤脱盐效果最好,其棉花出苗率和籽棉产量也最高,为 63.78% 和 3 200 kg hm⁻²,其次为 AN、SI、NI 和 CK 处理。经过长期(3 年)结冰灌溉后,秋季进行覆膜也可获得较高产量,其棉花出苗率和产量分别为 59.63% 和 2 600 kg hm⁻²,但如果没有覆膜措施或覆膜较晚,依然不能获得理想的产量。

关键词 咸水结冰灌溉;覆膜时间;水盐动态

中图分类号 S273.4;S156.4 **文献标识码** A

受水文地质和气候条件的影响,河北省滨海区面临着土壤盐碱化程度高、淡水资源匮乏等现实问题。土壤盐分在水分运动的驱动下,呈现出随降雨和蒸发的变化而变化的规律。冬季土壤冻融和春季土壤水分蒸发导致春季又土壤盐碱化最为严重^[1-6]。春季又是农作物播种出苗和生长发育的关键时期,由于返盐严重,加之淡水资源缺乏,农业生产在该地区受到限制^[7]。

虽然滨海区淡水资源匮乏,但地下咸水十分丰富,有很大的利用潜力^[8]。研究表明,利用适当水质和水量的咸水进行灌溉可一定程度上保证作物生长^[9-10]。但长时间咸水灌溉后,仍需要一定量淡水的淋洗,以减少盐分在作物根层积累,不致对作物造成盐分胁迫,导致减产^[11-12]。据调查,滨海区咸水矿化度水平普遍较高,平均约 7~22 g L⁻¹^[7],不能直接应用于农业灌溉。史培军等^[13]在渤海湾利用海冰获取淡水,并利用海冰水灌溉农作

物^[14-15],为海冰资源化利用提供了一条新的途径。考虑到海冰资源直接应用到农业灌溉还存在许多技术和成本上的问题,我们提出了冬季直接利用咸水灌溉结冰改良盐碱地的方法,即冬季利用当地地下咸水灌溉盐碱地,在低温作用下,咸水形成冰层,由于不同含盐量咸水冰的冰点不同,融化时先融化的高含盐量咸水先入渗,后融化的微咸水和淡水入渗对土壤盐分具有淋洗作用^[7,12]。室内试验和田间试验表明,利用矿化度为 10 g L⁻¹、水量为 1 800 m³ hm⁻²的咸水对滨海盐土进行结冰灌溉,可显著降低土壤盐分^[16-20]。之后配合使用地表覆盖措施,结合后续的降雨使土壤盐分保持在较低水平,可保证作物正常生长。采用该项措施,当年就可获得较好的改良效果。

由于河北省滨海区春季降雨量少、蒸发量大,当春季咸水冰完全融化入渗后,必须配合抑盐措施,如地表覆盖,以防止水分强烈蒸发而导致的土

* 国家自然科学基金项目(51179188,31101096)和国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02)资助

† 通讯作者,刘小京(1966—),男,河北宁晋人,研究员,从事缺水盐渍区水土资源高效利用研究。E-mail: xjliu@sjiam.ac.cn

作者简介:郭 凯(1983—),男,山东东阿人,博士研究生,从事盐碱区水土资源高效利用研究。E-mail: gkking001@163.com

收稿日期:2013-04-22;收到修改稿日期:2013-10-10

壤返盐。因此,本文研究了长期咸水结冰灌溉下土壤水盐动态变化规律及不同覆膜时间对土壤水盐动态和棉花生长的影响,以期对咸水结冰灌溉的农业利用提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省海兴县小山乡的滨海重盐碱地,北纬 $37^{\circ}56'10''$ 至 $38^{\circ}17'31''$,东经 $117^{\circ}18'33''$ 至 $117^{\circ}50'57''$ 。该区地势低洼平坦,土壤为滨海盐土,地下水埋深在 $0.4 \sim 2$ m 之间,其中最深发生在 6 月上旬,最浅发生在 8 月下旬。气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 12.1°C ,1 月份平均气温 -4.5°C ,极端最低气温 -19.9°C ,初霜冻多出现在 10 月下旬,终霜冻多出现在 4 月中旬,土壤冻融期出现在 12 月中旬至 2 月下旬;年均降雨量约为 580 mm,其中 2009 年的降雨量为 624 mm,7~9 月降雨量为 418 mm,占总降雨量的 67%;年蒸发量为 1 400 mm,其中最大蒸发量发生在 6 月,约 194 mm。试验区前期开挖了排水渠,建立了条田,但由于淡水资源匮乏、地下水埋深浅且矿化度高等原因,土壤含盐量依旧很高,很多地方仍然是不毛之地。

1.2 试验设计

本试验设置在该地区重盐碱地的条田上,条田宽度为 15 m,长度为 450 m,四周为排水沟。冬季结冰灌溉的咸水来自于条田周围的排水沟中,矿化度为 $7 \sim 22 \text{ g L}^{-1}$ 。冬季进行结冰灌溉时,排水沟中水的矿化度约为 $10 \sim 15 \text{ g L}^{-1}$ 。2006—2008 年进行了

咸水结冰灌溉和地膜覆盖试验,每年 1 月份当气温低于 -5°C 时进行咸水灌溉,灌水量为 180 mm ($1\ 800 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$),3 年灌水的矿化度均在 12 g L^{-1} 左右。灌水后在地表形成冰层,约 2 月下旬融水基本完全入渗,此时进行了地膜覆盖,并于 4 月下旬播种棉花,约 10 月下旬棉花完成收获。

2009 年在以上试验基础上,设置了不同地膜覆盖时间的试验,以研究多年结冰灌溉(3 年)下不同覆盖时间对土壤水盐动态的影响。试验处理为咸水冰入渗完成后覆膜(MI,2009 年 2 月 25 日)、播种期覆膜(SI,2009 年 4 月 25 日)和无覆膜(NI),以及不进行结冰灌溉处理的秋季覆膜(AN,2008 年 10 月 25 日),以无灌溉无覆膜(CK)为对照。每个处理设 3 次重复,随机区组设计。试验设置的小区长和宽度均为 4.5 m,小区之间以宽度和高度均为 30 cm 的田垄隔开。各小区用埋深为 1 m 的塑料膜隔,以防止灌溉过程中的水分侧渗。为保证灌水均匀结冰,采用分次灌水方法,即每天灌少量水,直至达到灌水量要求。4 月 25 日播种棉花,品种为鲁棉 28 号。

1.3 样品采集与分析

2009 年结冰灌溉前,对土壤含盐量和灌溉水质进行调查,灌溉水含盐量为 12.15 g L^{-1} ,离子组成以氯化钠为主(表 1)。该区土壤 1 m 土层土壤质地均匀,为粉质壤土。灌水前土壤各层次离子组成和含盐量见表 1,其中阳离子以钠离子为主,阴离子以氯离子为主。咸水结冰灌溉后,咸水在地表冻结成约 20 cm 厚度的咸水冰,此后咸水冰逐渐融化入渗,在此过程中,每 7 天对冰层进行取样,取冰面积约为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,深度为冰上表层直至地表,重复 3 次。

表 1 灌水前土壤和灌溉水的离子组成

Table 1 Chemical properties of the soil before irrigation and the irrigation water

样品 Sample	土层 Soil layer (cm)	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	SAR	含盐量
										Salt contents (g kg^{-1})
土壤 Soil	0~20	—	0.28	6.89	1.71	0.45	0.42	4.09	10.5	13.84
	20~40	—	0.31	4.28	0.74	0.16	0.20	2.68	10.5	8.36
	40~60	—	0.32	3.88	1.11	0.14	0.18	2.67	11.1	8.30
	60~80	—	0.30	3.94	0.69	0.17	0.18	2.46	9.9	7.74
	80~100	—	0.31	4.21	0.73	0.19	0.22	2.55	9.4	8.22
灌溉水 ¹⁾ Irrigation water		0.08	0.40	7.99	0.72	0.20	0.53	2.24	18.7	12.15

1) 单位: g L^{-1} Unit: g L^{-1}

冰样提取后至于室内,使其自然融化,并对融水进行盐分测定,以分析咸水冰融化过程中,地表残余冰层盐分的变化。在整个试验阶段,每30天采集一次土壤样品,取土深度为100 cm,每20 cm取土一层,进行土壤水分和盐分测定。为分析入渗后春季土壤的返盐情况,在春季融水入渗完成后,对结冰灌溉无地膜覆盖的地块,进行密集取样,每10天取土一次,直至2009年4月1日。种植棉花后,分别对其出苗率和产量进行调查。在棉花收获期,调查单位平方米的棉花植株数量,并且进行植株取样,对棉花植株的根、茎、叶干物质和含盐量进行测定,调查株数为5株。

土壤含水量为质量含水量,用烘干法测得。土壤样品经过风干、磨碎后按土水比为1:5的浸提液进行测定,土壤盐分离子组成利用离子滴定法测得,土壤总含盐量为阴阳离子含量的加和。棉花植株通过烘干、磨碎后利用蒸馏水浸提,后进行盐分测定,测定方法与土壤含盐量的测定方法相同。

1.4 数据分析

在忽略蒸散和径流带走的盐分条件下,土壤盐分均衡分析依据下式计算^[10]。式中 ΔS 为土壤盐分的变化量(kg hm^{-2}); S_1 为最初的土壤盐分总量(kg hm^{-2}); S_i 为单位面积灌溉水中盐分总量(kg hm^{-2}); S_E 为收获期土壤盐分总量(kg hm^{-2}); S_p 为单位面积收获期植物吸收的盐分总量(kg hm^{-2})。

$$\Delta S = S_1 + S_i - S_E - S_p \quad (1)$$

土壤脱盐率 E (%)由以下公式进行计算:

$$E = \Delta S \times 100\% / (S_1 + S_i) \quad (2)$$

S_1 和 S_E 可由以下公式计算得出:

$$S = s \times d \times a \times \rho \quad (3)$$

式中, S 为某一土层和深度下土壤盐分总量(kg hm^{-2}); s 为土壤盐分平均含量(g kg^{-1}); d 为土壤深度(m); a 为土地面积(hm^2); ρ 为土壤容重(g cm^{-3}),1 m土体的平均容重约为 1.45 g cm^{-3} 。

S_i 可由下式计算获得:

$$S_i = s_i \times v \quad (4)$$

式中, s_i 为灌溉水盐分含量(g L^{-1}); v 为灌溉水量(m^3)。

S_p 可由下式确定

$$S_p = (w_1 \times S_1 + w_s \times s_s + w_r \times S_r) \times p \times a / 1000 \quad (5)$$

式中, w_1 为每株棉花叶子的平均质量(kg hm^{-2}); s_1 为叶子的平均含盐量(g kg^{-1}); w_s 为每株棉花茎的平均质量(kg hm^{-2}); s_s 为棉花茎的平均含盐量($\text{g$

kg^{-1}); w_r 为每株棉花根的平均质量(kg hm^{-2}); s_r 为棉花根的平均含盐量(g kg^{-1}); p 为单位面积的棉花株数(株 hm^{-2}); a 为种植面积(hm^2)。

运用SPSS16.0统计软件进行数据统计和分析,用one-way ANOVA进行方差分析,采用Duncan法进行样本平均数的差异显著性进行多重比较。图表制作利用sigma plot 12.5作图软件进行作图。

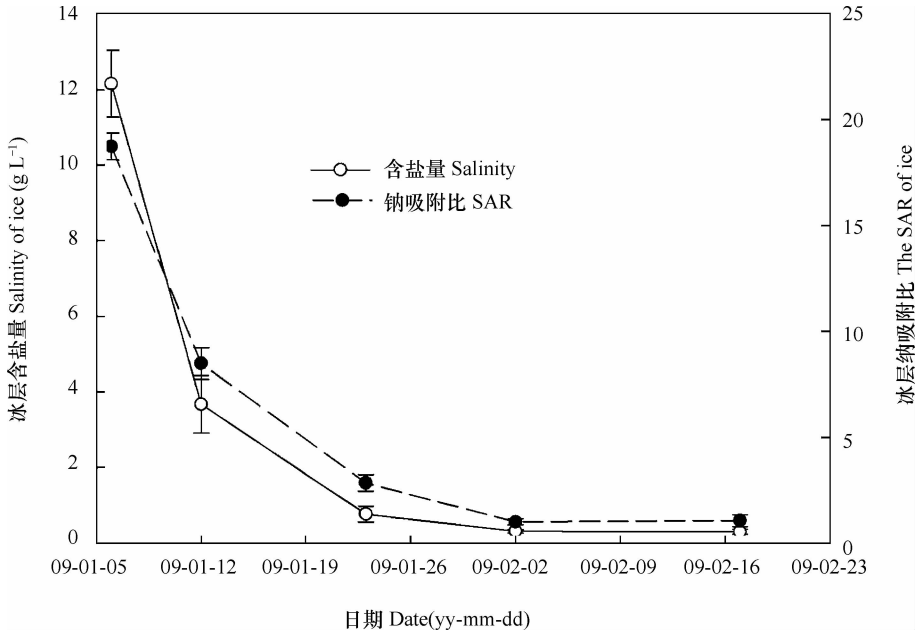
2 结果

2.1 咸水结冰灌溉后咸水冰融化过程中冰层盐分变化

咸水冻结后,咸水冰中的盐分以盐胞的形式存在,在咸水冰融化过程中,盐胞在重力的作用下迁移,出现了咸水冰融化过程中的咸淡水分离,融水质随时间而变化。图1显示了地表咸水冰融化过程中,地表咸水冰层矿化度及钠吸附比(SAR)随冰层融化时间的变化,其中SAR是评价灌溉水质的重要指标,SAR越高表明水中的钠离子比例也越高^[8]。随着咸水冰的融化,咸水冰层的矿化度和SAR均逐渐降低,其中冰层含盐量由最初的 12.15 g L^{-1} 降低至最后的 0.03 g L^{-1} ,SAR则由最初的18.7降低至最后的1.07。在2009年1月12日,冰层含盐量和SAR分别降低至 3.6 g L^{-1} 和8.5,此时测定的残余冰层水量约在100 mm左右,这基本达到了微咸水的灌溉水质标准和水量要求,对土壤有较好的淋洗效果^[21-22];随着咸水冰的进一步融化,融水的含盐量和SAR进一步降低,入渗后可使土壤盐分进一步得到淋洗。

2.2 2006—2008年咸水结冰灌溉条件下土壤(0~20 cm)盐分的变化特征

图2为3年咸水结冰灌溉和地膜覆盖与对照土壤盐分和降雨的变化关系,咸水结冰灌溉和覆膜处理表层(0~20 cm)土壤盐分含量显著低于对照。相同时期,该层次土壤盐分含量逐年降低,2006、2007和2008年咸水结冰灌溉前土壤盐分含量分别为19.8、15.4和 12.4 g kg^{-1} 。至棉花播种期,各年土壤土壤含盐量均降低至 4.0 g kg^{-1} 以下,这保证了棉花正常出苗。后续降雨可保证棉花整个生育期正常生长,并能获得较好的产量^[7,16]。对照地块的土壤表层盐分受水分运动驱动呈现夏季土壤盐分淋洗而其他季节盐分积累的变化特征。因此,咸水结冰灌溉和地膜覆盖为盐碱区咸水利用和土壤改良提供了有效途径。



注:误差线为标准差,下同 Note: The bars are the standard deviation. The same below

图 1 咸水冰层融化过程中冰层盐分和 SAR 的变化

Fig. 1 Variation of ice salinity and SAR during the saline ice melting

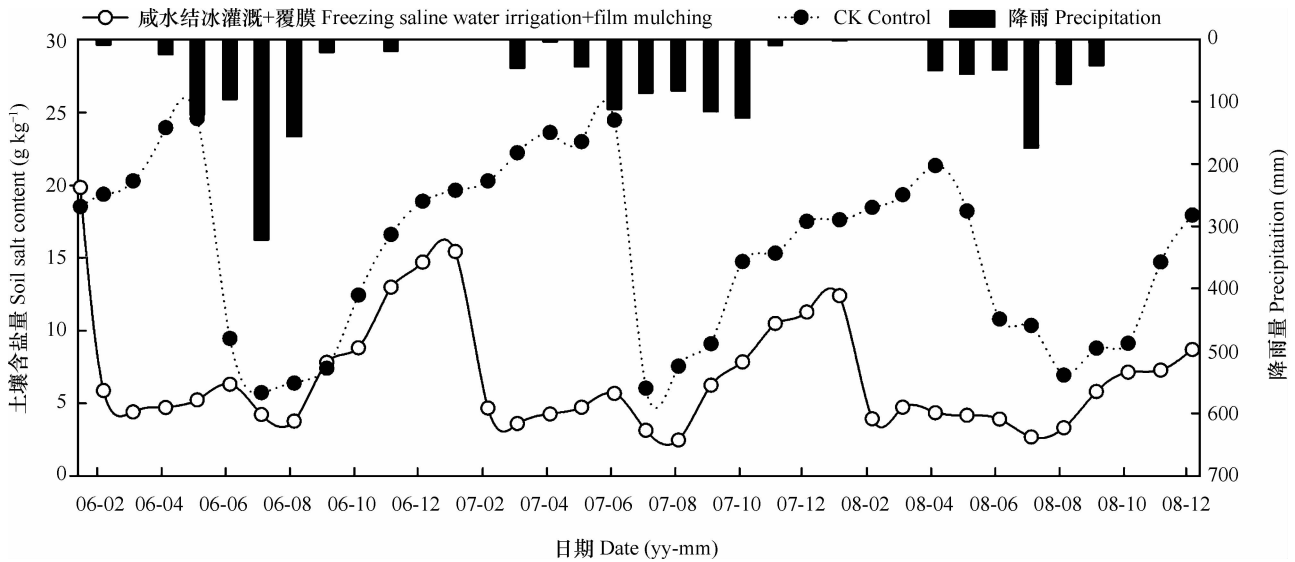


图 2 2006 - 2008 年咸水结冰灌溉条件下土壤表层盐分(0 ~ 20 cm)动态变化和降雨的关系

Fig. 2 Dynamics of soil salts in the upper soil layer (0 ~ 20 cm) under freezing saline water irrigation and precipitation from 2006 to 2008

在以上基础上,本试验开展了咸水结冰灌溉下不同时间覆膜对土壤水盐季节动态和对作物(棉花)生长影响的试验研究。

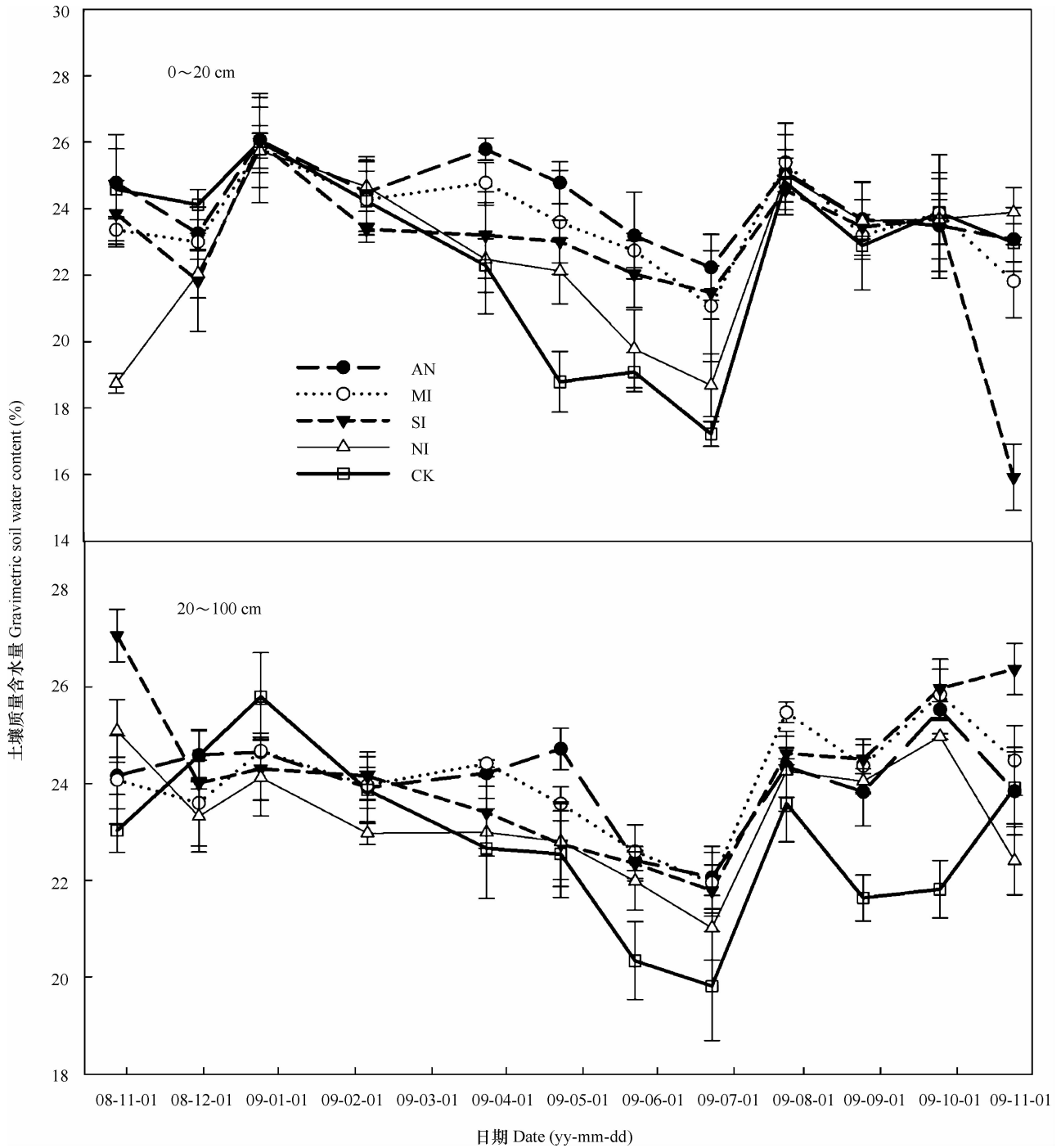
2.3 长期结冰灌溉下覆膜时间对土壤水盐动态的影响

2.3.1 土壤水分动态 土壤水分因受降雨、蒸发和灌溉等因素的影响呈现出一定的变化规律^[1]。如图 3 所示,2008 年秋季至咸水冰融化入渗,各处

理表层土壤水分变化基本一致。2008 年秋季随着降雨量逐渐减少,表层土壤水分含量逐渐降低。后随着气温降低,土壤出现冻结,土壤水分在温度梯度驱动下,向冻层集结,使冻层土壤水分含量逐渐升高^[3],至 2009 年 1 月 1 日,各处理表层土壤含水量达 28%。灌溉前至咸水冰融化入渗后,由于土壤冻结作用和融水的入渗,各处理表层土壤水分在 24%~36% 之间,处理之间土壤水分含量差异不显

著。此后各处理表层土壤水分含量出现差异,春季表层土壤含水量由小到大的处理依次为 AN、MI、SI、NI 和 CK。至棉花播种期,处理 MI、SI、AN、NI 和 CK 的表层(0~20 cm)土壤含水量分别为 23.6%、

23%、24.8%、22.1%和 18.8%。此后,随着雨季的来临,各处理表层土壤含水量受降雨影响迅速升高,并保持在 24%~26% 水平。至 2009 年下旬,随着降雨的逐渐减少,表层土壤水分呈现下降趋势。



注:MI,结冰灌溉+入渗完成后覆膜;SI,结冰灌溉+播种覆膜;NI,结冰灌溉+播种无覆膜;AN,不结冰灌溉+秋季覆膜;CK,无灌溉无覆膜。下同 Note: MI, Freezing saline water irrigation + Mulching after infiltration; SI, Freezing saline water irrigation + Mulching when sowing; NI, Freezing saline water irrigation + Non-mulching when sowing; AN, Non-freezing saline water irrigation + Mulching in autumn; CK, Non-freezing saline water irrigation + Non-mulching. The same below

图3 不同时间覆膜处理的土壤水分季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of the soil water in the treatments of different mulching time treatments

深层土壤(20~100 cm)水分随时间呈现出与表层水分类似的变化趋势,但较表层土壤水分变化平缓。冬季,该层次土壤水分含量也逐渐升高,这表明在冬季土壤冻结作用下,该层次土壤水分得到了1 m以下土体水分或地下水的补给。春季融水入渗后,各处理在该层次的土壤水分呈下降趋势。在棉花播种期,处理MI和AN的土壤含水量高于其他处理,分别为23.8%和24.6%。此后,CK的土壤含水量均显著低于其他处理,其他处理则没有显著差异。

2.3.2 土壤盐分动态 无覆盖条件下,咸水冰融化入渗后,土壤表层盐分含量显著上升,由融水入渗完成时的 2.8 g kg^{-1} ,上升至棉花播种时的 7.9 g kg^{-1} ,每天增加 0.127 g kg^{-1} (图4)。以棉花苗期耐盐阈值的土壤含盐量 4 g kg^{-1} 为标准确定覆膜时间^[23],入渗完成后9 d内进行覆膜,可使土壤盐分含量保持在棉花正常出苗的盐分水平上。

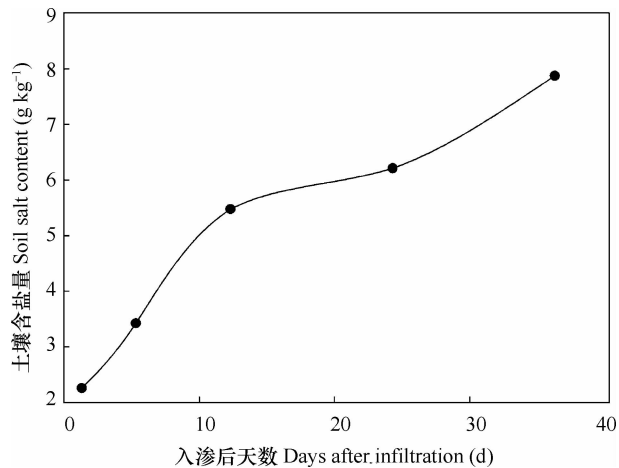


图4 咸水冰融水入渗后土壤表层返盐情况

Fig. 4 Accumulation of soil salts after freezing saline water irrigation

冬季由于土壤冻结,土壤盐分在水分运动的驱动下,向冻层迁移^[3,5],表层土壤积盐较为强烈,由最初的 10.8 g kg^{-1} 升高至 14.9 g kg^{-1} ,而秋季覆膜在冬季一定程度上缓解了由于土壤冻结而导致的积盐^[4],土壤表层(0~20cm)盐分含量由最初的 9.7 g kg^{-1} 升高至 10.5 g kg^{-1} (图5)。咸水结冰灌溉后,土壤盐分迅速下降,咸水结冰灌溉和秋季覆膜的土壤盐分含量分别由最高的14.9和 10.5 g kg^{-1} 降低至3.4和 4.7 g kg^{-1} ,其原因在于咸水冰覆盖和融水入渗等作用抑制了土壤蒸发和淋洗了土壤盐分。而无灌溉的地块,由于土壤冻融和春季强烈蒸发,土壤积盐严重,相同时间段CK的表层土壤盐分含量由 10.6 g kg^{-1} 升高至 12.9 g kg^{-1} 。因

此,咸水结冰灌溉改变了土壤盐分固有的季节变化,变春季土壤积盐为脱盐;另外,在多年咸水结冰灌溉基础上,秋季覆膜也具有良好的土壤盐分抑制效果。

咸水冰融化入渗后,土壤盐分受覆膜时间的影响呈现出不同的动态变化。春季,各处理土壤盐分含量由小到大依次为 $\text{MI} < \text{AN} < \text{SI} < \text{NI}$,由于没有覆盖措施,CK的含盐量高于其他处理,并随土壤水分蒸发逐渐升高。由此可见,结冰灌溉后及时进行地膜覆盖是防止土壤返盐的关键。在棉花播种期,MI、AN、SI和NI处理的表层土壤盐分分别为3.2、4.0、7.7和 9.4 g kg^{-1} ,而CK的土壤含盐量高达 10.8 g kg^{-1} 。

深层(20~100 cm)土壤含盐量的动态变化与表层基本一致,但没有表层变化剧烈。灌前,各处理中该层次的土壤盐分略有增加,这表明存在1 m以下土体和地下水中的盐分向上层土壤迁移。咸水结冰灌溉至融水入渗后,由于春季土壤水分强烈蒸发,CK处理在该土层的盐分有所增加,导致1 m土体均出现积盐,其他处理该层次中的土壤盐分在该时期有所降低。此后土壤盐分受降雨和蒸发的驱动而呈随时间不同的变化趋势。覆膜时间同样也影响着深层土壤盐分的动态变化,相同时期不同处理土壤盐分含量由小到大分别为 $\text{MI} < \text{AN} < \text{SI} < \text{NI} < \text{CK}$ 。

2.4 1 m 土体盐分均衡分析

由式(1)分析了咸水结冰灌溉后至棉花收获期不同覆膜时期下土壤盐分的收支情况。 $\Delta S > 0$ 时,说明最终的土壤总盐量小于初始的土壤总盐量,土壤处于脱盐状态。 $\Delta S < 0$ 时,土壤总盐量增加,土壤积盐。 $\Delta S = 0$ 时则土壤盐分达到平衡。

计算结果表明,相对于1 m土层土壤总盐量,作物收获所带出的盐量极少,可忽略不计(表2)。棉花收获期时,雨季刚过,7~9月降雨量约为418 mm,占到了全年降雨量的67%,此时土壤盐分处于淋洗状态, ΔS 均为正值,降雨的淋洗使土壤和灌溉水中的盐分被淋洗至深层土壤和地下水。相同降雨和蒸发条件下,处理之间土壤盐分的变化量和脱盐率(E)依然存在差异,脱盐率由大到小的处理顺序为 $\text{MI} > \text{SI} > \text{AN} > \text{NI} > \text{CK}$ 。秋季覆膜后,由于灌前土壤盐分总量低于其他处理,AN处理的脱盐效率处于中间位置,而咸水结冰灌溉后不进行覆膜处理,土壤盐分脱盐率较低,但仍然高于对照。

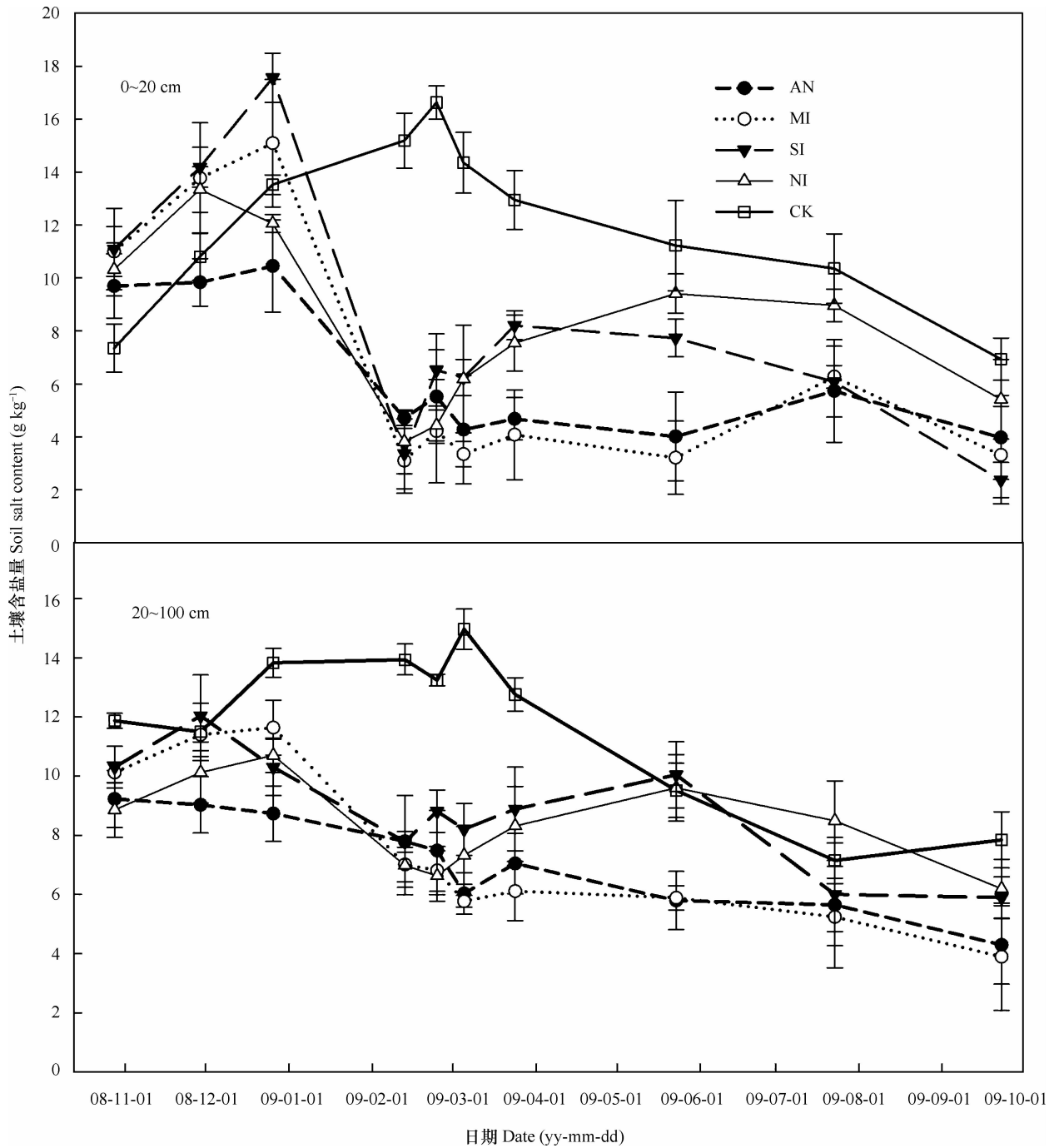


图 5 不同时间覆膜处理的盐分动态

Fig. 5 Dynamics of soil salt in the different mulching time treatments

表 2 1 m 土体土壤盐分均衡计算结果

Table 2 Analysis of soil salt balance in 1 m soil profile

处理 Treatment	S_i (kg hm ⁻²)	S_l (kg hm ⁻²)	S_g (kg hm ⁻²)	S_p (kg hm ⁻²)	ΔS (kg hm ⁻²)	E (%)
AN	0	127 000	59 000	102.0	68 000	53.5
MI	21 900	173 000	53 000	123.0	142 000	72.9
SI	21 900	165 000	73 000	62.0	114 000	59.9
NI	21 900	154 000	85 000	14.8	91 000	51.7
CK	0	193 000	107 000	0	86 000	44.6

2.5 不同时间覆膜对棉花生育期0~40 cm土壤盐分及棉花生长的影响

表3为棉花各生育期0~40 cm土壤含盐量的变化。MI处理的棉花各生育期土壤含盐量最低,其次为AN处理,而SI、NI和CK均显著高于棉花的耐盐阈值(4 g kg^{-1})^[23],这也导致各处理棉花

出苗率和产量的差异。棉花出苗率和籽棉产量最高为MI处理,分别为63.78%和 $3\ 200 \text{ kg hm}^{-2}$ 。AN处理虽未进行咸水结冰灌溉,但棉花出苗率仍然达到59.63%,籽棉产量达 $2\ 600 \text{ kg hm}^{-2}$ 。其他处理由于土壤含盐量较高,产量均较低,甚至造成绝收。

表3 不同时间覆膜处理的0~40 cm土壤含盐量、棉花的出苗率和产量

Table 3 The soil salt contents of 0~40 cm soil layer, cotton emergence ratio and seed cotton yield in different mulching time treatments

处理 Treatment	播种期 Sowing stage	土壤含盐量 Soil salt content (g kg^{-1})			收获期 Harvest stage	出苗率 Emergence ratio (%)	籽棉产量 Seed cotton yield (kg hm^{-2})
		生长期 Growing stage	开花吐絮期 Anthesis and boll opening stage	收获期 Harvest stage			
AN	4.5d	4.6c	4.1c	5.4b	59.63a	2 600b	
MI	3.2c	4.5c	3.5c	5.6b	63.78a	3 200a	
SI	8.6b	9.4b	3.2c	5.9b	49.63b	1 600c	
NI	8.0b	9.8b	6.4b	8.9a	23.33c	380d	
CK	12.8a	11.5a	7.4a	9.2a	0.99c	0e	

以上结果表明,咸水结冰融水入渗后及时地膜覆盖可明显控制土壤在低盐环境,保证棉花出苗和生长,并获得理想的产量;且在多年咸水结冰灌溉的基础上,秋季覆膜也可降低春季耕层(0~40 cm)土壤盐分含量,并获得较好的棉花产量。

3 讨论

咸水结冰灌溉是应对滨海区土壤盐碱化和淡水资源不足的有效措施。其原理是利用咸水结冰冻融淡化获得一定量的微咸水和淡水,这部分水的人渗对土壤盐分有一个较好的淋洗作用^[5]。结冰灌溉后,地表咸水冰层逐渐融化,融水的含盐量和SAR等指标均随冰层的融化逐渐降低,这与前期室内试验结果基本一致^[24]。室内利用含盐量为 10 g L^{-1} 和水量为 180 mm ($1\ 800 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$)的咸水进行结冰融水入渗滨海重盐碱土(风干土含水量为2.2%),其入渗速率要快于低含盐量咸水和淡水,同时其表层(0~20 cm)土壤脱盐率在90%以上^[20,25]。田间试验利用 12 g L^{-1} 左右的咸水对盐碱土进行结冰灌溉后,也对土壤具有显著的脱盐效果,并且当年就可获得较好的改良效果^[7,16]。当结冰融水入渗完成后,土壤受春季蒸发的影响而强烈返盐(图4),因此必须及时地进行地表覆盖,以保持表层土壤的低盐水平。地膜覆盖可抑制土壤蒸发和

提高地温,同时通过土壤蒸发回流水分对土壤盐分有一定的淋洗作用^[26-28]。在秋季进行地膜覆盖可缓解冬季低温对土壤的冻结作用,减少盐分向冻层迁移,并抑制春季土壤返盐。本试验秋季覆膜处理的土壤抑盐效果、作物的出苗及产量等仅次于咸水结冰灌溉和覆膜处理,其原因在于连续3年结冰灌溉降低了土壤基础盐分,在以上基础上进行秋季覆膜,可取得较好土壤抑盐效果和棉花产量。

咸水结冰灌溉改变了滨海区土壤水盐固有的季节动态,为春季土壤盐分的淋洗创造了条件,使作物顺利地度过盐敏感期,同时后续降雨的淋洗作用可保证作物正常生长,实现了盐分在地下水和土壤之间的周年循环。但长期冬季咸水结冰灌溉对区域水盐平衡的影响还有待进一步验证。

4 结论

咸水结冰灌溉后,咸水冰层的矿化度和SAR均随冰层的融化逐渐降低。春季冰层融化入渗后,9 d内进行覆膜可有效地控制土壤返盐。经过3年结冰灌溉和地膜覆盖,同一时期(灌溉前)表层土壤盐分降低了约37.4%。咸水结冰灌溉下,不同处理措施的保持土壤水分和脱盐效果依次为融冰后覆膜>秋季覆膜>播种期覆膜>无覆膜处理>对照。棉花播种期,0~40 cm土层含盐量最低为融冰覆膜处

理,其次为秋季覆膜处理,而播种期覆膜处理、无覆膜处理和对照均显著高于棉花的耐盐阈值,最终影响到棉花的播种出苗和产量。

参考文献

- [1] 王遵亲,等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993. Wang Z Q, et al. Salt-affected soil in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1993
- [2] 杨劲松. 中国盐碱土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837—845. Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837—845
- [3] 张殿发, 郑琦宏. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究. 地理科学进展, 2005, 24(4): 46—55. Zhang D F, Zheng Q H. Simulation of water-salt movement law under the freeze-thawing condition (In Chinese). Progress in Geography, 2005, 24(4): 46—55
- [4] 陈军锋, 郑秀清, 邢述彦, 等. 地表覆膜对季节性冻融土壤入渗规律的影响. 农业工程学报, 2006, 22(7): 18—21. Chen J F, Zheng X Q, Xing S Y, et al. Influence of plastic film mulching on infiltration into seasonal freezing-thawing soil (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 18—21
- [5] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析. 水科学进展, 2002, 13(3): 298—302. Guo Z R, Jing E C, Nie Z L, et al. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period (In Chinese). Advances in Water Science, 2002, 13(3): 298—302
- [6] 方生, 陈秀玲. 华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响. 土壤学报, 2005, 42(5): 730—736. Fang S, Chen X L. Influence of atmospheric precipitation on soil leaching and desalinization in the North China Plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(5): 730—736
- [7] 李志刚, 刘小京, 张秀梅, 等. 冬季咸水结冰灌溉对土壤水盐运移的初步研究. 华北农学报, 2008, 23(增): 187—192. Li Z G, Liu X J, Zhang X M, et al. Primary research of freezing saline water irrigation on soil water and salt movements (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(Suppl.): 187—192
- [8] 郜洪强, 费宇红, 雒国忠, 等. 河北平原地下咸水资源的效应分析. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 53—56. Gao H Q, Fei Y H, Luo G Z, et al. Effect analysis of saline groundwater utilization in Hebei plain (In Chinese). South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(2): 53—56
- [9] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 599—603. Pang H C, Yang J S, Yan H J. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 599—603
- [10] 马文军, 程琴娟, 李良涛, 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(1): 73—80. Ma W J, Cheng Q J, Li L T, et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 73—80
- [11] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 等. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用. 灌溉排水, 2002, 21(4): 73—78. Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, et al. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation (In Chinese). Irrigation and Drainage, 2002, 21(4): 73—78
- [12] 王艳娜, 侯振安, 龚江, 等. 咸水资源农业灌溉应用研究进展与展望. 中国农学通报, 2007, 23(2): 393—397. Wang Y N, Hou Z A, Gong J, et al. Development and expectation of utilization of saline water resources in agriculture irrigation (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(2): 393—397
- [13] 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—359. 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—359
- [14] 谢利昕, 赵欣, 李凭力, 等. 海冰水灌溉对玉米产量影响的研究. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 68—70. Xie L X, Zhao X, Li P L, et al. Study on the yield of corn irrigation with sea ice melt-water (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5): 68—70
- [15] 吴之正, 顾卫, 许映军, 等. 海冰水灌溉对土壤盐分和玉米产量的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 166—170. Wu Z Z, Gu W, Xu Y J, et al. Effect of irrigation with sea ice water on soil salinity and corn yield (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 166—170
- [16] 郭凯, 张秀梅, 刘小京, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究. 资源科学, 2010, 32(3): 431—435. Guo K, Zhang X M, Liu 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
- [17] 车升国, 林治安, 赵秉强. 咸水结冰灌溉对盐化潮土盐基离子剖面迁移规律的影响. 水土保持学报, 2001, 25(4): 88—93. Che S G, Lin Z A, Zhao B Q. Effects of agricultural irrigation by melting saline water ice on soil salt and ion movement under fluvo-aquic soils (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 88—93
- [18] 肖辉, 潘洁, 程文娟. 咸水结冰灌溉与覆膜对滨海盐土水盐动态的影响. 水土保持学报, 2011, 25(1): 180—188. Xiao H, Pan J, Cheng W J. Effect of freezing irrigation with saline water and covering on the water and salt dynamic of coastal saline soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 180—188
- [19] 隆小华, 倪妮, 金善钊, 等. 北方滨海盐碱地冬季咸水结冰灌溉对菊苣生长及离子分布的影响. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 161—165. Long X H, Ni N, Jin S Z, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on growth and ion distribution of *Helianthus tuberosus* in north coastal saline soil (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(1): 161—165
- [20] 郭凯, 陈丽娜, 张秀梅, 等. 不同钠吸附比的咸水结冰融水

- 入渗后滨海盐土的水盐分布. 中国农业生态学报, 2011, 19 (3): 506—510. Guo K, Chen L N, Zhang X M, et al. Water and salt distribution in coastal saline soil after infiltration of melt-water of saline water ice with different sodium adsorption ratio (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19 (3): 506—510
- [21] 肖振华, 万洪富, 郑莲芬. 灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响. 土壤学报, 1997, 34(3): 272—285. Xiao Z H, Wan H F, Zheng L F. Effect of irrigation water quality on soil chemical characteristics and crop growth (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3): 272—285
- [22] 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗性质的影响研究. 干旱区农业研究, 2008, 26(1): 231—236. Wu Z D, Wang Q J. Study on impact of sodium adsorption and chemical properties and ratio of saline water on soil physical infiltration characteristics (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 231—236
- [23] 杨华, 夏士军, 蔡立旺, 等. 盐碱棉区棉花抗盐研究及植棉途径探索. 江西棉花, 2007, 29(4): 3—5. Yang H, Xia S J, Cai LW, et al. Research on cotton salt resistance and explore plant cotton ways in salty cotton area (In Chinese). Jiangxi Cotton, 2007, 29(4): 3—5
- [24] 郭凯, 刘小京. 咸水结冰融化过程中水质与水量的变化规律初步研究. 灌溉排水学报, 2013, 32(1): 56—60. Guo K, Liu X J. The primary research on the variation of melted water quality and quantity during saline ice melting (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1): 56—60
- [25] 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 (4): 498—502
- [26] 赵名彦, 丁国栋, 郑洪彬, 等. 覆盖对滨海盐碱土水盐运动及对刺槐生长影响的研究. 土壤通报, 2009, 40(4): 751—755. Zhao M Y, Ding G D, Zheng H B, et al. A study on effect of different ground covers on water and salt movement and *Robinia pseudoacacia* growth in marine saline-alkaline soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 751—755
- [27] 张振华, 严少华, 胡永红. 覆盖对滨海盐化土水盐运动和大麦产量影响的研究. 土壤通报, 1996, 27(3): 136—138. Zhang Z H, Yan S H, Hu Y H. The research on the effect of mulching on soil water, salt movement and the yield of barley (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(3): 136—138
- [28] 毕远杰, 王全九, 雪静. 覆盖及水质对土壤水盐状况及油菜产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(增1): 83—89. Bi Y J, Wang Q J, Xue J. Effects of ground coverage measure and water quality on soil water salinity distribution and helianthus yield (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2010, 26(Suppl. 1): 83—89

EFFECT OF TIMING OF PLASTIC FILM MULCHING ON WATER AND SALT MOVEMENTS IN COASTAL SALINE SOIL UNDER FREEZING SALINE WATER IRRIGATION

Guo Kai^{1,2} Zhang Xiumei¹ Liu Xiaojing^{1†}

(1 Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A three-year field experiment was carried out to explore effects of timing of plastic film mulching and freezing saline water irrigation (FSWI) on salt and water dynamics in coastal saline soil and cotton growth. The experiment was designed to have five treatments, that is, mulching after ice melt percolation (MI), mulching after sowing with FSWI (SI), no mulching with FSWI (NI), mulching in autumn without FSWI (AN) and no mulching without FSWI (CK). Results show that in the plot with FSWI, ice melt decreased salt content and soil adsorption ratio (SAR) in the surface frozen soil layer gradually from 12.15 g L⁻¹ and 18.7 to 0.03 g L⁻¹ and 1.07, respectively. During the three years of FSWI, the soil salt content in the surface soil layer decreased year by year according to the measurement at the same time period. In 2006, 2007 and 2008, the soil salt content in the top soil (0~20 cm) before FSWI was 19.8, 15.4 and 12.4 g kg⁻¹, respectively. In the plots after freezing saline water irrigation, all the water and salt from irrigation and large number of water and salt from soil was leached to the soil layer below 1m. Soil salts came back quickly after the melt percolated down the profile. So mulching 9 days after melt percolation would obtained a better effect of preserving soil water and inhibiting return of soil salt. The effect of Treatment MI was the best, and so was its effect on seed germination rate and seed cotton yield, which was 63.78% and 3 200 kg hm⁻², respectively. The treatment was followed by Treatments

AN, SI, NI and CK, in effect. After the three years of FSWI, Treatment AN also obtained a high germination rate of 59.63% and a high yield of 2 600 kg hm⁻² in the fourth year though when there was no freezing saline water irrigation. While in the plots of no mulching or later mulching, no ideal yield was obtained even though they received FSWI in all the three consecutive years.

Key words Freezing saline water irrigation; Timing of mulching; Soil water and salt dynamics

(责任编辑:卢 萍)