

咸水结冰灌溉结合改良剂对滨海盐土的改良作用*

程文娟¹ 潘洁¹ 肖辉¹ 陆文龙^{2**} 王立艳¹

(1. 天津市农业资源与环境研究所 天津 300192; 2. 天津市农业科学院 天津 300192)

摘 要 冬季咸水结冰灌溉是将冬季自然冷资源与滨海盐碱地区丰富的咸水资源相结合, 通过自然结冰使咸淡分离, 再利用结冰融化时咸水先流出淡水后流出会对土壤起到一定的洗盐作用的原理, 对盐碱地进行改良。本文通过大田试验, 研究了冬季咸水结冰灌溉及改良剂对天津滨海盐碱地水盐运移的影响。结果表明, 通过咸水结冰灌溉能降低根层土壤含盐量, 且灌溉水量与土壤含水量呈正相关。冬季咸水结冰灌溉初期可能会引起土壤碱化, 但随着冰层融化及时间的推移, 各处理的碱化趋势会逐渐削弱。在滨海盐土施用磷石膏能够降低 HCO_3^- 含量, 增加 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 含量, 有效降低 Cl^- 、 Na^+ 在总盐分中的比例, 且磷石膏施用量越大, 根层土壤的 pH 越低、保水能力越强 ($7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷石膏 $> 4\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷石膏); 施用磷石膏和大水量的咸水结冰灌溉都能很好地促进柽柳生长, 且咸水冬季结冰灌溉和施用磷石膏配合 ($1\ 350\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 结冰灌溉 + $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷石膏) 效果最好。因此, 咸水结冰灌溉配合改良剂应用可有效改良滨海盐土, 改善因咸水结冰灌溉而带来的土壤碱化问题, 为早期植物萌发生长提供有利条件。

关键词 滨海盐碱地 咸水结冰灌溉 磷石膏 土壤改良 柽柳

中图分类号: S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)04-0778-05

Effect of combined frozen saline water irrigation and soil amendment on coastal saline land reclamation

CHENG Wen-Juan¹, PAN Jie¹, XIAO Hui¹, LU Wen-Long², WANG Li-Yan¹

(1. Tianjin Institute of Agricultural Resources and Environment, Tianjin 300192, China; 2. Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300192, China)

Abstract Frozen saline water irrigation (FSWI) in winter is a kind of irrigation that utilizes natural cold conditions and abundant saline water. Natural melting of frozen brackish water separates salt from soil via salt water leaching that leaves behind fresh water, leading to saline soil desalinization. In accordance with water desalinization via freezing and thawing of saline water, a field experiment was conducted to study the principle of water and salt transfer following FSWI and soil amendment application. The results showed that FSWI in winter reduced rhizosphere soil salinity. The amount of irrigation water was positively correlated with soil moisture. FSWI caused soil alkalization in initial stage of saline water ice melt, although this trend gradually weakened with ice melt under different treatments. Application of phosphogypsum decreased soil HCO_3^- content, increased soil SO_4^{2-} and Ca^{2+} contents, and effectively reduced ratios of Cl^- and Na^+ in total salt content. With increasing phosphogypsum application rate, rhizosphere soil pH decreased while soil water retention capacity increased ($7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ phosphogypsum $> 4\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ phosphogypsum). High FSWI along with phosphogypsum application enhanced the growth of Chinese tamarisk. The best treatment combination was FSWI in winter at $1\ 350\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ saline water + $7\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ phosphogypsum. Combined FSWI and phosphogypsum application improved coastal saline land reclamation efficiency. It also amended soil alkalization induced by FSWI and provided favorable conditions for early seed germination and plants growth.

Key words Coastal saline land, Frozen saline water irrigation, Phosphogypsum, Soil amendment, Chinese tamarisk

(Received Feb. 7, 2011; accepted May 3, 2011)

* 国家科技支撑计划项目(2009BADA3B04)资助

** 陆文龙(1964~), 男, 博士, 研究员, 主要从事盐碱区水土利用及生态恢复研究。E-mail: tjwllu@yahoo.com.cn

程文娟(1982~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物营养及盐碱地水土资源高效利用研究。E-mail: wenjuan_cheng@hotmail.com

收稿日期: 2011-02-07 接受日期: 2011-05-03

据联合国教科文组织和粮农组织的不完全统计,世界盐碱土的总面积约占世界土地总面积的 10%,而我国盐碱土的面积相当于耕地的 1/3。中国科学院南京土壤研究所公布在我国西北、东北及滨海地区的盐碱荒地和盐碱障碍耕地总面积超过 3 000 万 hm^2 ,其中具有农业利用潜力的近 1 300 万 hm^2 ,占我国耕地总面积的 10%以上。近期可开展农业利用的盐碱土地面积达 667 万 hm^2 ,挖掘潜力巨大。

天津市地处华北平原东北部海河流域下游,为退海之地,海拔 2~5 m,年降雨量 570~690 $\text{mm}^{[1]}$ 。农业耕地 44.52 万 $\text{hm}^2^{[2]}$,盐渍化耕地的总面积占 54.51%,为 24.27 万 hm^2 。天津市地下淡水资源有限,但咸水资源面积近 9 000 km^2 ,其中浅层地下咸水分布面积近 7 000 $\text{km}^2^{[3]}$ 。土壤盐碱化和淡水资源短缺是制约当地农业发展的重要因素^[4]。如何利用咸水资源改良盐碱地,提供植物所需水分,成了当前研究的热点。

冬季咸水结冰灌溉是一种新兴的盐碱地改良方法,此方法是将冬季自然冷资源与滨海盐碱地区丰富的咸水资源相结合,通过自然结冰,使咸淡分离,再利用结冰融化时咸水先流出,淡水后流出的原理,对土壤起到一定的洗盐作用。李志刚等^[5-6]提出利用自然冷资源,进行冬季咸水结冰灌溉,通过咸水结冰冻融实现咸淡水分离,进而改良盐碱地。研究表明咸水结冰灌溉虽将一部分盐分带入土壤,但在 1 m 土体表现为脱盐^[6];土柱模拟试验表明,利用 15 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的咸水结冰灌溉,可使土壤表层有很好的脱盐效果^[6]。

我国内陆盐碱地属于碳酸钠型,如何控制盐碱地继续朝向重度盐碱地发展,并恢复土壤植被生态系统是天津盐碱地改良研究的一个重点。王文杰等^[7]研究表明,土壤改良剂聚丙烯酸(PAA)与碱土混合在阻盐剂阻隔下,土壤 pH 与盐分变化较小。有研究表明在施加钙源石膏辅助下,盐碱地的改良效果有明显提升,改良剂改良后的盐碱土在种子发芽率、发芽指数、活力指数等指标均有所上升^[8]。

咸水结冰改良盐碱地的研究报道不多,主要集中在模拟试验及融化初期的水盐运动^[9]。针对咸水结冰灌溉配套措施,及从结冰融化到雨季之前,植物萌发生长关键时期的水盐运移研究均少见报道。本文研究咸水结冰灌溉配合土壤改良剂磷石膏对滨海盐碱地的改良效果,探讨咸水结冰灌溉及其相应的配套措施处理下土壤水盐变化规律,以期对咸水结冰灌溉条件下的植物种植提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验设在天津市大港区苏家园,北纬 38°37',

东经 117°14'。该地区属温带大陆性季风气候,滨海冲积平原,全年平均气温 12 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 7 个月。年降雨量 570~690 mm ,分布不均,70%集中在 6~8 月份,年均蒸发量 1 100 mm 。地下水位 0.9~1.5 m,土壤盐渍化严重。试验所用改良剂为电厂废弃物酸性磷石膏, pH 为 4.3。试验田土壤属轻质壤土,盐碱类型属 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 型,其中 Cl^- 占全盐的 41.15%, Na^+ 占 20.29%, SO_4^{2-} 占 14.83%。试验田土壤盐碱情况(2009 年 11 月 3 日)见表 1 和表 2。

表 1 试验田各层土壤全盐及 pH
Table 1 Soil salt content and pH of the experimental field

| 土层 Soil layer (cm) | 0~10 | 10~20 | 20~40 | 40~60 | 60~80 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全盐 Salt content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 0.479 | 0.337 | 0.341 | 0.353 | 0.339 |
| pH | 8.29 | 8.45 | 8.48 | 8.45 | 8.48 |

表 2 试验田基础土样离子组成
Table 2 Soil ion composition of the experimental field

| 离子 Ion | CO_3^{2-} | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | K^+ |
|--|--------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|------------------|---------------|--------------|
| 含量 Content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | — | 0.079 | 1.749 | 0.732 | 0.277 | 0.169 | 1.080 | 0.052 |

1.2 试验设计

试验小区长 5 m、宽 4 m,面积 20 m^2 ,对应处理撒施磷石膏后平整小区,使磷石膏与土均匀混合。各小区之间设置宽 1 m、高 0.5 m 的田垄,以防测渗和互溢,并在日平均最高气温在 0 $^{\circ}\text{C}$ 以下时(2010 年 1 月 12 日)进行咸水灌溉,使其迅速结冰,灌溉水含盐量 $10\pm 0.14\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 7.80。2010 年 3 月 17 日覆膜,4 月 2 日选择长势一致的 1 年生柽柳进行移栽种植。

试验设灌溉水量和磷石膏使用量 2 个因素,每个因素 2 个水平。共设 5 个处理,分别为 CK: 对照(不灌水、不施改良剂处理); T1: 1 350 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 结冰灌溉; T2: 1 350 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 结冰灌溉+4 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷石膏; T3: 1 350 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 结冰灌溉+7 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 磷石膏; T4: 1 800 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 结冰灌溉。每个处理重复 4 次,共 20 个小区,随机区组排列。

1.3 样品采集及分析

土壤样品的采集是在土壤及地表冰层完全融通后,分别于 3 月 12 日、4 月 7 日、5 月 12 日和 6 月 13 日分 5 层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm)采集土壤样品;室内分析土壤含水量、pH、电导率和离子组成等;分别于 6 月 13 日、7 月 16 日和 8 月 16 日测量柽柳株高。

电导率的测定采用电导率仪法,土壤含水量测定采用烘干质量法,土壤 pH 测定采用玻璃电极法,水溶性盐测定采用质量法,钙、镁含量测定用 EDTA 滴定法,钾、钠含量测定采用火焰光度法,碳酸根和重碳酸

根测定采用双指示剂中和滴定法, 氯离子测定采用硝酸银滴定法, 硫酸根测定采用 EDTA 间接滴定法。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 DPS 数据处理系统进行数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 咸水结冰灌溉结合磷石膏施用对滨海盐土土壤含水量的影响

从图 1 可以看出, 各处理土壤含水量有明显变化, 咸水结冰灌溉水量越大, 表层土壤含水量越高。咸水结冰融化早期(3 月 12 日), T1、T4 分别比对照高 20.17%和 24.51%, 即 $T4 > T1 > CK$; 结冰灌溉各处理在 0~40 cm 土层含水量与对照差异均达到显著水平, 0~20 cm 差异达极显著水平。随着时间的推移, 各土层含水量的差异逐渐减小, 到 4 月 7 日时, 各处理表层(0~10 cm)与对照之间的差异达显著水平, T4 差异极显著; 在 40~80 cm 土层不同处理土壤含水量之间差异均不显著。

滨海盐土在咸水冬季结冰灌溉处理后施用磷石膏能够对土壤起到一定保水作用(图 1)。在同一咸水灌溉量下($1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$), 第 1 次(3 月 12 日)采集 0~10 cm 土壤样品的土壤含水量为 $T3 > T2 > T1 > CK$, 且 T3、T2 表层土壤含水量分别比 T1 高 2.43%及 3.36%, 比对照高 21%和 25%; 随时间推移, 各处理各土层之间的差异逐渐减小, 4 月 7 日 T3、T2、T1 与对照之间的差异均不显著。

2.2 咸水结冰灌溉结合磷石膏施用对滨海盐土电导率、土壤离子组成及 pH 的影响

从图 2 可以看出, 咸水结冰灌溉 T4 处理能够起到

很好的降盐作用, 表层(0~10 cm)电导率比对照低 14.7%, 差异达到显著水平, 其他土层也均低于对照(图 2a)。咸水结冰灌溉融水入渗后虽然能够显著降低土壤含盐量, 但由于春季蒸发量大, 4 月 7 日表层土壤前期盐分聚集速度远高于对照(图 2b)。之后表层土壤盐分增速逐渐变缓, 此时对照开始迅速返盐, 到 5 月 12 日(图 2c)T4、T1 与 CK 之间表层盐分差异已经不明显。

从图 2 可以看出, 施用磷石膏增加了土壤表层的电导率。3 月 12 日 T3、T2 表层(0~10 cm)土壤电导率分别比 T1 高 21.01%和 17.07%, 差异均达到显著水平, T2 与 T3 之间差异不显著; 其他土层随时间推移, 各处理电导率逐渐上升, 施用磷石膏处理与对照之间始终差异显著。20 cm 以下各土层随时间推移电导率有上升趋势, 但各处理之间差异不显著。虽然咸水结冰灌溉条件下施用磷石膏会提高滨海盐土土壤全盐含量, 表层(0~10 cm)土壤离子成分分析结果表明(表 3), 随着时间推移电导率(全盐)的提高主要是由于硫酸根和钙离子含量提高所致。施用磷石膏能够降低 HCO_3^- 含量, 增加 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 含量, T2、T3 与 T1 之间差异均达到显著水平; 施用磷石膏也能增加 Mg^{2+} 的含量, 但 T2、T3 与 T1 之间的差异并不显著。施用磷石膏对 Cl^- 、 Na^+ 及 K^+ 影响不大, T2、T3 与对照 T1 之间差异不显著。

从表 3 可以看出, 从 3 月 12 日到 6 月 13 日, 各处理离子含量除 HCO_3^- 外均呈现上升趋势, 以 Cl^- 、 Na^+ 增加值最高, 增加值分别占总增加值的 60%和 20%左右。施用磷石膏虽然不能降低 Cl^- 和 Na^+ 的绝对含量, 但能有效降低 Cl^- 和 Na^+ 在总盐分中的比例, 其中 T3 处理的 Cl^- 含量比例比对照降低 10%~16%, Na^+ 含量比例比对照降低 15%~27%。

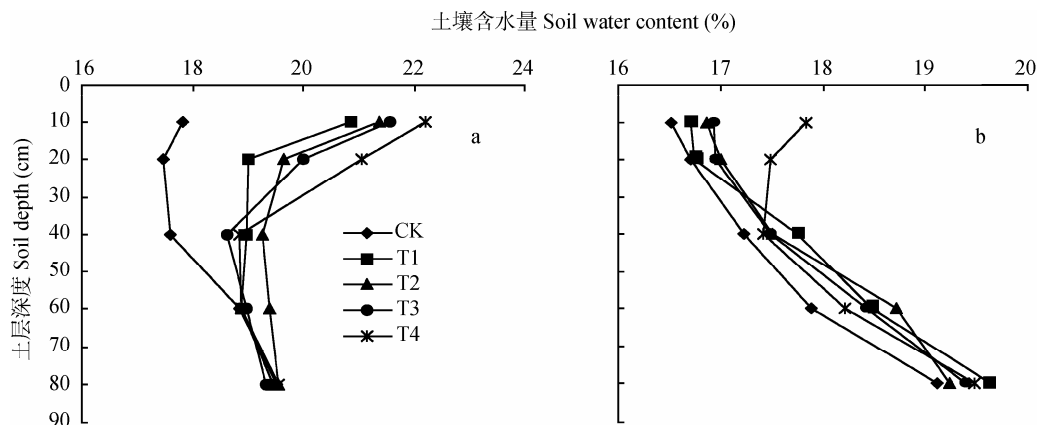


图 1 不同处理下 3 月 12 日(a)和 4 月 7 日(b)土壤含水量随土层深度变化

Fig. 1 Changes of soil water contents with soil depth on March 12 (a) and April 7 (b) under different treatments

CK: 对照(不灌水、不施改良剂处理); T1: $1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 结冰灌溉; T2: $1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 结冰灌溉+ $4\ 500\ kg \cdot hm^{-2}$ 磷石膏; T3: $1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 结冰灌溉+ $7\ 500\ kg \cdot hm^{-2}$ 磷石膏; T4: $1\ 800\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 结冰灌溉。下同。CK: No irrigation without phosphogypsum; T1: $1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$ saline water freezing-irrigation without phosphogypsum; T2: $1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$ saline water freezing-irrigation with $4\ 500\ kg \cdot hm^{-2}$ phosphogypsum; T3: $1\ 350\ m^3 \cdot hm^{-2}$ saline water freezing-irrigation with $7\ 500\ kg \cdot hm^{-2}$ phosphogypsum; T4: $1\ 800\ m^3 \cdot hm^{-2}$ saline water freezing-irrigation. The same below.

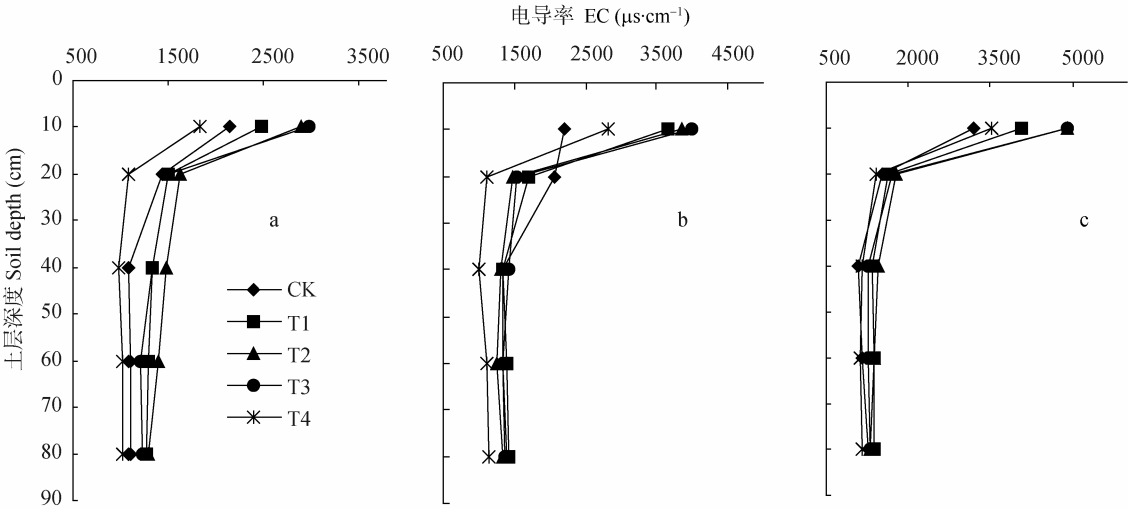


图 2 不同处理下 3 月 12 日(a)、4 月 7 日(b)和 5 月 12 日(c)土壤电导率随土层深度变化
Fig. 2 EC changes with soil depth on March 12 (a), April 7 (b) and May 12 (c) under different treatments

表 3 施用磷石膏对咸水结冰灌溉下的盐土离子组成的影响

| Table 3 Effect of application of phosphogypsum on ion composition of soil under frozen saline water irrigation | | g·kg ⁻¹ | | | | | | | |
|--|-----------|--------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 时期(月-日) | 处理 | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ²⁻ |
| Time (month-day) | Treatment | | | | | | | | |
| 03-12 | T1 | 0.003 6a | 0.173 3a | 0.038 3b | 0.029 8a | 0.323 3a | 0.108 7b | 0.007 2a | — |
| | T2 | 0.003 8a | 0.170 0a | 0.077 2ab | 0.039 2a | 0.361 3a | 0.168 6a | 0.006 7ab | — |
| | T3 | 0.004 8a | 0.164 0a | 0.118 4a | 0.043 7a | 0.352 3a | 0.199 3a | 0.006 3b | — |
| 06-13 | T1 | 0.004 6a | 0.277 8a | 0.071 7b | 0.068 0a | 0.651 2a | 0.155 9b | 0.006 1a | — |
| | T2 | 0.004 6a | 0.266 0a | 0.098 0b | 0.071 4a | 0.630 0a | 0.175 7ab | 0.005 7ab | — |
| | T3 | 0.005 8a | 0.275 5a | 0.175 6a | 0.085 2a | 0.687 1a | 0.212 7a | 0.005 3b | — |

“—”表示未检出，同列同一时间不同小写字母表示经 LSD 法多重比较在 $P<0.05$ 水平上差异显著。“—” mean undetectable. Different small letters in the same time of one column mean significant difference at $P<0.05$.

从图 3 可以看出，咸水结冰灌溉条件下，早期灌溉水量越大，土壤表层(0~10 cm)pH 越高，初期土壤有碱化趋势，但随着时间的推移各处理 pH 均有不同程度降低。不同灌溉水量表现不同，在 6 月 13 日只有 T3 处理的 pH 较对照有明显降低。在咸水结冰灌溉条件下施用磷石膏可以有效降低根层土壤 pH，pH 高低顺序为 T1>T2>T3，3 月 12 日 T3、T2 分别比 T1 低 1.77%及 1.28%。6 月 13 日各处理土壤 pH 分别比对照降低-1.5%、-1.0%和 0.9%；差异均达到显著水平，T2 与 T3 之间差异不显著。各处理土壤 pH 随时间的变化并不明显，但施改良剂的处理与对照间差异始终达到显著水平。因此，咸水结冰灌溉配合磷石膏能显著降低滨海盐土表层土壤的 pH，且使用量越大，pH 越低。

施用磷石膏可降低盐土脱盐过程中的碱化趋势，其主要原因为：磷石膏呈酸性，可中和部分土壤碱性；磷石膏的主要成分硫酸钙与土壤中的碳酸氧根、碳酸根离子发生反应，生成碳酸氢钙和碳酸钙，致使土壤 pH 下降；另外，磷石膏中的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、

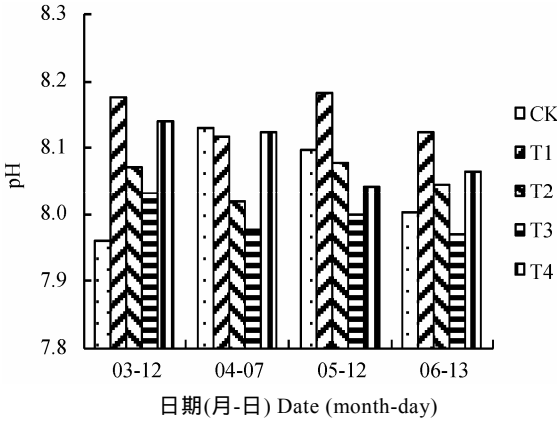


图 3 不同处理下滨海盐土 pH 的变化
Fig. 3 Change of pH in the surface coastal saline soil under different treatments

Mg^{2+} 能增加土壤絮凝能力，形成较大空隙，进而增加土壤的团粒结构。施用磷石膏显著降低了土壤中钠吸附比(SAR)，因而减小了土壤黏粒弥散能力，抑制了土壤板结，增大了土壤的透水空隙、渗透能力和水力传导能力^[10-11]，为植物的萌发和生长提供了有利条件，对土壤改良意义很大。

2.3 咸水结冰灌溉结合磷石膏施用对柽柳生长的影响

不同调控措施对柽柳生长的影响见图 4。从图中可以看出,所有改良处理株高均比对照高,6~8 月柽柳株高的顺序均为 $T_3 > T_4 > T_2 > T_1 > CK$,且随时间变化各处理之间差异越来越明显。结冰灌溉处理中,灌溉水量越大效果越好,表现为 $T_4 > T_1$ 对照,且 T_4 与 CK 之间差异达显著水平。施用磷石膏处理的柽柳株高大于不施磷石膏处理,且与对照之间的差异达显著水平。结冰灌溉与施用磷石膏结合的处理优于单独灌溉的处理, $T_2 > T_1$, $T_3 > T_4$ 。因此,施用磷石膏和大水量的结冰灌溉均能很好地促进柽柳的生长,在咸水冬季结冰灌溉处理下施用磷石膏配合效果更佳。

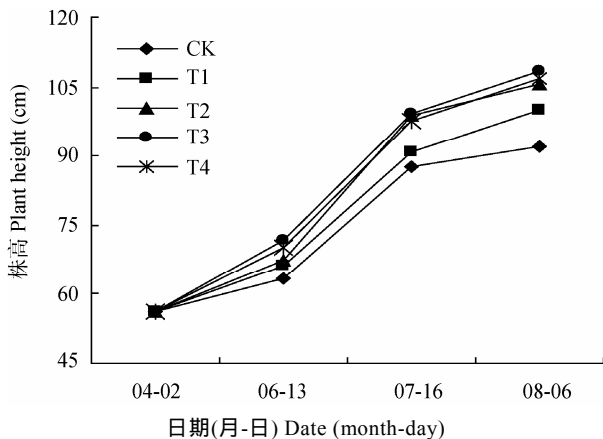


图 4 咸水结冰灌溉配合磷石膏施用对柽柳生长的影响效果

Fig. 4 Effect of frozen saline water irrigation and phosphogypsum application on growth of Chinese tamarisk

3 结论

综上所述,冬季利用咸水结冰灌溉结合磷石膏处理滨海盐土,可以改善滨海盐土的土壤板结、离子毒害等土壤碱化问题,为早期植物萌发生长提供有利条件,有效解决了因滨海盐碱土造成的土地资源利用率和农业生产力低下等问题。同时在天津验证了冬季咸水结冰灌溉能够降低土壤含盐量,且灌溉水量越大淋盐效果越明显的观点^[5,9,12]。

土壤盐碱化的本质是土体中含有过高的可溶性盐分,或者土壤中 Na^+ 饱和度过大,对植物和土壤微生物形成毒害,同时使土壤的结构遭到破坏,造成土壤结构板结、通透性差等劣质的土壤性质;同时可溶性盐分过高必定要对植物营养元素产生胁迫,使盐碱土不能给植物提供正常的水、肥、气和热等条件;再加上盐碱成分的生物毒害,使得植物不能正常生长,甚至死亡。本研究证明咸水结冰灌溉结合磷石膏施用处理滨海盐土,可降低土壤表层的 pH、 HCO_3^- 含量及 Cl^- 和 Na^+ 在总盐分中的比例,增

加 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量;且磷石膏施用量与表层土壤的 pH 呈负相关、与土壤保水能力呈正相关。从结冰融化到雨季之前是植物萌发生长的关键时期,在土壤改良剂对土壤的改良作用影响下采用咸水结冰灌溉处理对滨海盐土植物生长的促进作用明显。

土地资源的萎缩和防治盐碱化需要大量淡水,对我国可持续性发展战略的实现是一个很大的潜在威胁。当前全球土地盐碱化呈现逐步加重趋势,全球盐碱地正以每年 100~150 万公顷的速度增长。我国目前环境、资源等压力也在不断增大,再加上近年来城镇占地、工业占地逐步扩大。咸水结冰灌溉结合改良剂在滨海盐碱地改良中的应用,不仅有利于开发利用滨海土地资源,而且可在节约有限的淡水前提下,充分利用咸水资源改造利用滨海盐碱地,对缓解土地压力、增加后备耕地储备、保障粮食安全具有重要意义。

致谢 项目在设计及实施过程中,中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心刘小京研究员、天津市农业资源与环境研究所高贤彪研究员、王正祥研究员提出了很多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。同时在土壤分析过程中,得到天津市农业资源与环境研究所彩虹老师的大力帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 天津市土壤普查办公室. 天津土种志[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1990: 1-15
- [2] 天津市统计局. 2007 天津统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007: 28-29
- [3] 李建华, 刘仲齐. 天津滨海地区可持续发展的生态建设策略[J]. 天津农业科学, 2008, 14(6): 1-5
- [4] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [5] 李志刚, 刘小京, 张秀梅, 等. 冬季咸水结冰灌溉后土壤水盐运移规律的初步研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(S1): 187-192
- [6] 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[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 498-502
- [7] 王文杰, 贺海升, 祖元刚, 等. 施加改良剂对重度盐碱地盐碱动态及杨树生长的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2272-2278
- [8] 贺海升, 王文杰, 朱虹, 等. 盐碱地土壤改良剂施用对种子萌发和生长的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5338-5346
- [9] 叶海燕, 王全九, 刘小京. 冬小麦微咸水灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 27-32
- [10] 陈志鸿, 胡勇军, 郭继勋. 生物、化学改良对重度盐碱化草地土壤水分特征影响的比较研究[J]. 东北师范大学学报: 自然科学版, 2002, 34(3): 92-97
- [11] 陆文龙, 毛建华, 潘洁, 等. 磷石膏农用机理及利用途径的研究初报[J]. 农业环境保护, 1995, 14(2): 80-83
- [12] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 咸水结冰灌溉与覆膜对滨海盐土水盐动态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 180-183