

土壤盐结皮人工培育及其破损程度对土壤蒸发的影响

张建国^{1,2}, 李红伟¹, 李雅菲¹, 李雨诺¹, 马悦¹, 田乐乐¹, 张宇新¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 土壤盐结皮在干旱半干旱区广泛发育, 对地表土壤水文过程具有重要影响, 而外力对盐结皮的机械破损干扰现象普遍存在。该文以塔克拉玛干沙漠流动风沙土为例, 通过室内试验利用不同矿化度(5、10、20和30 g/L)的不同盐溶液(NaCl、Na₂SO₄、CaCl₂、KCl)模拟咸水灌溉下盐结皮的形成发育过程, 根据盐结皮理化性质确定了其最适人工培育条件, 并在此基础上模拟了盐结皮不同破损程度(破损100%、破损50%、破损25%和无破损)影响下的土壤蒸发过程。结果表明: 盐结皮的硬度、抗剪切力、pH值和电导率通常随着灌溉水矿化度的增加而增大, 采用30 g/L NaCl溶液培养盐结皮厚度和硬度均较大; 土壤日蒸发量随盐结皮破损程度的增加而增加, 并随灌水天数呈递减趋势; 土壤累积蒸发量随灌水天数以及破损程度的增加而增大, 盐结皮破损100%的土壤日蒸发量和累积蒸发量与其他各处理之间有显著性差异; 盐结皮对土壤蒸发的累积蒸发抑制效率随灌水时间的延长呈递增趋势, 随破损程度的增加而降低, 盐结皮无破损处理的累积蒸发抑制效率最高达58.84%, 而破损50%的处理最大仅为30.20%。总之, 土壤盐结皮的人工培育在方法上是可行的, 其对土壤水分蒸发具有明显的抑制作用, 且其破损程度对蒸发过程具有显著影响。这对于揭示干旱半干旱区盐渍土壤水文过程和指导水土资源的合理利用具有重要意义。

关键词: 土壤; 盐; 蒸发; 结皮; 人工培育; 理化性质; 破损程度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.13.015

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-13-0138-07

张建国, 李红伟, 李雅菲, 李雨诺, 马悦, 田乐乐, 张宇新. 土壤盐结皮人工培育及其破损程度对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 138-144. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.13.015 <http://www.tcsae.org>

Zhang Jianguo, Li Hongwei, Li Yafei, Li Yunuo, Ma Yue, Tian Lele, Zhang Yuxin. Artificial cultivation of soil salt crust and effects of its damage rate on soil evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(13): 138-144. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.13.015 <http://www.tcsae.org>

0 引言

在气候条件较为干旱的地下水浅埋区, 由于土壤水分的蒸发使得易溶性盐分聚集与地表土壤颗粒结晶胶结形成土壤盐结皮^[1]。盐结皮多形成于降水稀少、蒸发强烈的气候环境^[2], 具有盐分含量高、硬度大、抗风蚀能力强等特点^[3]。此外, 土壤盐结皮在咸水灌溉条件下同样也可以广泛发育, 如塔克拉玛干沙漠公路防护林由于采用高矿化度地下咸水(矿化度范围为2~28 g/L)灌溉形成了盐分含量很高的盐结皮层^[4]。

学者们对于盐结皮的形成发育、影响因素、盐结皮覆盖对植被生长的作用以及其对土壤水分蒸发、土壤风蚀等进行了多方面研究。Langston等^[5]研究发现, 影响土壤风蚀能力的主要因素有盐结皮的硬度、抗剪切能力以及形状大小, 而且其硬度、厚度、抗剪切能力和形状会随盐分类型、含量多少、土壤质地、温度等条件表现出

差异性。张建国等^[6]研究表明, 盐结皮对咸水滴灌防护林土壤蒸发过程具有明显的延缓和抑制作用, 其根本原因在于盐结皮会堵塞土壤孔隙, 阻断毛管作用, 增加水汽向大气扩散的阻力, 并通过增加反照率而降低土表温度进一步降低土壤蒸发。Dai等^[7]发现矿物底物的表面特性和土壤蒸发速率影响析出盐的形态和晶体尺寸, 特别是底物疏水性和低蒸发率会抑制盐的扩散。孔德庸等^[8]通过对罗布泊干盐湖表层盐结皮含水率的季节性变化及吸水特性的研究发现, 盐结皮表层含水率存在一定的差异。也有研究表明地表水分蒸发速率会受到土壤中的盐分类型的影响^[9-11]。

已有相关研究主要集中于自然状态下发育的盐结皮, 也有学者开始对盐结皮进行人工培育, 发现不同盐分形成的盐结皮表面特征存在明显差异^[12]。但是土壤盐结皮在风蚀、野生动物踩踏或人类活动的干扰下很容易发生不同程度的机械破损, 因而难以利用野外采集的盐结皮进行室内模拟试验。探讨盐结皮的人工培育方法, 对于进一步通过模拟试验揭示其影响下的地表过程至关重要。此外, 关于盐结皮机械破损对土壤蒸发过程的影响, 目前未见相关报道。土壤盐渍化和水资源短缺是影响干旱区农业和生态环境可持续发展的主要问题, 且两者往往同时出现。因此, 本文根据塔里木沙漠公路防护

收稿日期: 2019-04-01 修订日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877541、41471222); 中科院水土保持研究所青年人才专项(A315021528); 陕西省大学生科创重点项目(201803141)

作者简介: 张建国, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为土壤水盐运移和荒漠化防治。Email: zhangjianguo21@nwfau.edu.cn

林实际地下水矿化度范围来设置灌溉水矿化度梯度, 根据前人对于盐结皮盐分组成研究以及该区盐分组成来确定模拟盐分类型。通过模拟不同盐分组成的高矿化度咸水灌溉进行土壤盐结皮的人工培育, 以确定人工培育盐结皮的最适水质条件, 然后在此基础上探究了不同破损程度盐结皮影响下的土壤水分蒸发过程。该研究对于进一步认识干旱区盐渍土壤的地表水文过程和指导水土资源的合理利用具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 供试土样

供试土壤为采自于塔克拉玛干沙漠公路防护林 (39°00'N, 84°10'E, 海拔 1 100 m 左右) 的流动风沙土, 养分含量极低, 含盐量为 1.26~1.63 g/kg, 机械组成以细沙与极细沙为主, 自然含水率极低, 仅为 0.02%。供试土样黏粒、粉沙、极细沙、细沙、中沙、粗沙分别占 0.27%、12.35%、52.04%、30.79%、2.12%、2.42%, pH 值为 8.26、电导率为 0.437 mS/cm、容重 1.49、全盐量 1.309 g/kg, 离子组成以 Na^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- 为主。

1.2 试验设计

1.2.1 土壤盐结皮的人工培育

试验于 2017 年 5 月在实验室条件下进行。试验所用的自制微型蒸发器 (micro-Lysimeters, MLS) 由内径为 10.45 cm, 高 25 cm, 底部用塑料薄膜封住的 PVC 管制作而成。首先将供试沙土风干过 1 mm 筛以剔除杂物, 混匀装入 MLS 内, 每桶装土 3 kg。为保持与沙漠公路防护林灌溉水矿化度 (矿化度范围为 2~28 g/L) 的一致性, 并综合考虑盐分组成的影响, 分别用 NaCl、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 和 KCl 共 4 种盐配成不同矿化度梯度 (5、10、20 和 30 g/L) 的咸水, 将同等体积 (1 200 mL) 的咸水均匀喷洒于 MLS 土壤表面, 让其自然蒸发形成盐结皮。每个处理设 3 个重复, 共形成 48 个盐结皮样本。盐结皮培育期间日平均气温 26.8 °C, 日平均相对湿度 48.1%。盐结皮形成后测定结皮厚度、硬度、pH 值、电导率等, 确定硬度和厚度最大的结皮所对应的矿化度和盐分类型为最适培育条件。

1.2.2 土壤蒸发试验

根据盐结皮培育结果, 按照最适培育方案进行盐结皮的人工培育, 待 MLS 内的土壤水分充分蒸发形成盐结皮之后, 人为破损盐结皮, 破损面积分别为 0、25%、50% 和 100%, 每个处理设 3 个重复。将 MLS 底部的塑料薄膜用直径为 0.5 mm 的钢丝均匀穿孔 (20 个) 后, 小心放入盛有淡水的塑料盆内通过底部的小孔上渗进行缓慢灌水, 每个 MLS 灌水 400 mL。灌水完成后每日 08:00 用精度为 0.01 g 的天平称取 MLS 的质量, 持续称质量 12 d。期间每日 08:00、12:00 和 18:00 用温湿度计记录气温和相对湿度, 求三者的日平均值, 土壤蒸发试验期间的空气温湿度如图 1 所示。

1.3 指标测定及计算

利用 MarCal 16 GN 型游标卡尺 (德国马尔, 精度 0.05 mm) 测定结皮厚度, TYD-1 型土壤硬度仪 (浙江托普, 精度 0.01N) 测定结皮硬度, H-4212MH 型土壤剪切测试仪 (北京剑灵, 精度 0.01 kg/cm²) 测定结皮抗剪切

力, 雷磁 PhS-3C 型 pH 计 (上海仪电, 精度 0.01) 测定结皮 pH 值 (体积比水:土=2.5:1)、雷磁 DDS-307A 型电导率仪 (上海仪电, 精度 0.1 mS/cm) 测定结皮电导率 (体积比水:土=5:1)。

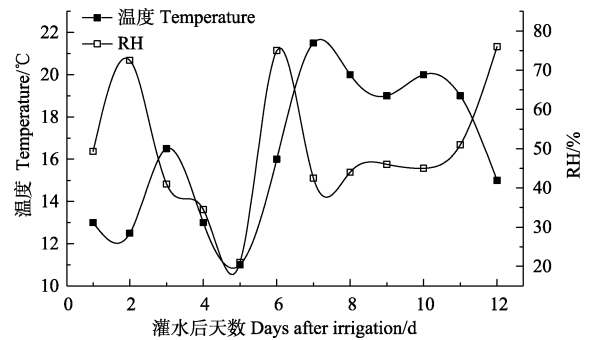


图 1 土壤蒸发试验期间气温和相对湿度(RH)状况

Fig.1 Air temperature and relative humidity (RH) during soil evaporation experiment

MLS 内土壤日蒸发量、累积蒸发量和蒸发抑制效率计算方法^[13]:

$$ED_i = 10 \times (WE_i - WE_{i-1}) / \rho A \quad (1)$$

$$EC_i = \sum ED_i \quad (2)$$

$$A = \pi r^2 \quad (3)$$

$$I = (EC_0 - EC_i) / EC_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中 i 为天数, $i=1,2,3, \dots, 12$ d; ED_i 为第 i 天的土壤日蒸发量, mm; WE_i 为第 i 天 MLS 的总质量, g; EC_i 为第 i 天的土壤累积蒸发量, mm; WE_0 为 MLS 的初始总质量, g; A 为 MLS 内桶截面积, cm²; r 为 MLS 内桶半径, cm; I 为盐结皮对土壤蒸发的抑制效率, %; EC_0 为对照土壤累积蒸发量, mm; ρ 为水的密度 1 g/cm³。

采用 Excel2010 和 SPSS20.0 对数据进行统计分析, 运用 Origin8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 人工培育盐结皮的物理性质

2.1.1 硬度

由图 2 可以看出, 随着灌溉水矿化度的增加, 不同盐分所形成盐结皮的硬度均逐渐增大。除 KCl 外, 其他盐分的盐结皮硬度之间线性关系拟合性较好 ($R^2 > 0.90$, $P < 0.05$), 均呈现出明显的正相关关系, 其中 NaCl 盐结皮斜率最大, Na_2SO_4 盐结皮拟合性最好 ($R^2 = 0.99$)。从表 1 可以看出, 当灌溉水矿化度为 5、10 或 30 g/L 时, 不同盐分所形成盐结皮的硬度之间无显著差异 ($P > 0.05$); 灌溉水矿化度为 20 g/L 时, KCl 所形成的盐结皮硬度显著低于其他 3 种盐分 ($P < 0.05$)。对于同种盐分来说, 当灌溉水矿化度分别为 5、10 和 20 g/L 时, NaCl、 Na_2SO_4 盐结皮硬度无显著性差异 ($P > 0.05$), 而灌溉水矿化度为 30 g/L 时 NaCl 形成的结皮硬度显著高于 5 g/L 时 ($P < 0.05$) 而 Na_2SO_4 形成的结皮硬度显著高于 5 和 10 g/L 时 ($P < 0.05$); 不同浓度 KCl 盐结皮硬度间无显著差异 ($P > 0.05$); CaCl_2 盐结皮在灌溉水矿化度为 20 和 30 g/L 时显著高于 5 g/L, 30 g/L 显著高于 10 g/L ($P < 0.05$)。因此在 5~30 g/L 矿化度范围内, 在 5~30 g/L 矿化度范围内

矿化度对硬度影响达极显著水平 ($P<0.01$), 盐分类型影响达显著水平 ($P=0.02$), 而矿化度和盐分交互对盐结皮硬度影响不显著。比较而言, 矿化度对硬度影响更大盐分类型及灌溉水矿化度对 NaCl 盐结皮硬度的影响最大, 矿化度为 30 g/L 时硬度最大 (24.17 kg/cm^2)。

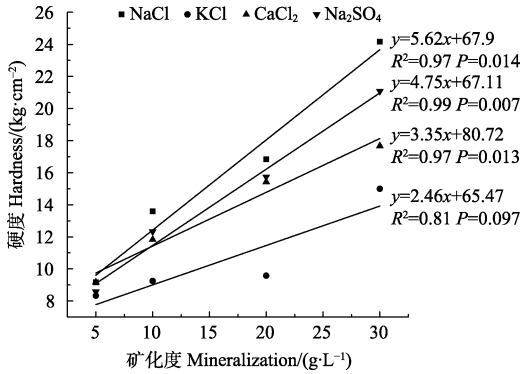


图 2 灌溉水矿化度与盐结皮硬度之间的关系

Fig.2 Relationship between mineralization of irrigation water and hardness of salt crust

表 1 不同盐分类型 (ST) 及矿化度 (MD) 处理下盐结皮的硬度和抗剪切力多重比较结果

Table 1 Multiple comparison results of hardness and shear resistance of salt crusts among different salt type (ST) and mineralization (MD) treatments

MD/ (g L ⁻¹)	硬度 Hardness/(kg·cm ⁻²)				抗剪切力 Shear resistance/(kg·cm ⁻²)			
	NaCl	KCl	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄	NaCl	KCl	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄
5	9.17 Bb	8.33 Ba	9.17 Bc	8.58 Bb	0.77 Bb	1.47 Ba	0.80 Bb	3.03 Ab
10	1.34 Aab	9.25 Aa	11.83 Abc	12.33 Ab	1.82 Bb	1.53 Ba	1.08 Bab	3.30 Ab
20	16.83 Aab	9.58 Ba	15.42 Aab	15.75 Aab	3.30 Ab	3.57 Aa	1.13 Aab	3.50 Ab
30	24.17 Aa	15.00 Aa	17.67 Aa	21.08 Aa	6.73 Aa	4.57 Aa	1.47 Ba	6.68 Aa

注: 不同大写字母表示同一矿化度不同盐分类型处理间差异性显著; 不同小写字母表示同种盐分不同矿化度处理间差异性显著 ($P<0.05$), 下同。
Note: Different uppercase letters indicated significant differences among different salt types at the same concentration; and different lowercase letters indicated significant differences among the same salt treatments with different salinity ($P<0.05$), the same below.

2.1.2 抗剪切力

由图 3 可以看出, 随着灌溉水矿化度的增加, 不同盐分所形成的盐结皮抗剪切力逐渐增大。除 Na₂SO₄ 外, 其他盐分的盐结皮抗剪切力之间线性关系拟合性较好 ($R^2>0.90$, $P<0.05$), 均呈现出明显的正相关关系, NaCl 盐结皮斜率最大, 拟合性最好 ($R^2=0.96$)。由表 1 可以看出,

灌溉水矿化度同为 5、10 g/L 时, Na₂SO₄ 盐结皮抗剪切力显著与高于其他 3 种盐 ($P<0.05$); 灌溉水矿化度同为 20 g/L 时, 4 种盐的盐结皮抗剪切力之间无显著差异 ($P>0.05$); 灌溉水矿化度为 30 g/L 时, NaCl、KCl、Na₂SO₄ 所形成的盐结皮抗剪切力之间无显著性差异 ($P>0.05$), 而 CaCl₂ 所形成的盐结皮抗剪切力显著低于这 3 种盐 ($P<0.05$)。对于同种盐分而言, 随灌溉水矿化度升高, KCl 盐结皮抗剪切力无显著差异 ($P>0.05$); 而 NaCl 和 Na₂SO₄ 盐结皮在灌溉水矿化度为 30 g/L 显著高于 5、10、20 g/L ($P<0.05$), CaCl₂ 盐结皮在 5 g/L 抗剪切力显著低于其他矿化度 ($P<0.05$)。盐分类型和灌溉水矿化度对盐结皮抗剪切力均有一定的影响, 矿化度对 NaCl 盐结皮抗剪切力的影响更为显著, 当矿化度增加到 30 g/L 时抗剪切力最大 (6.73 kg/cm^2)。

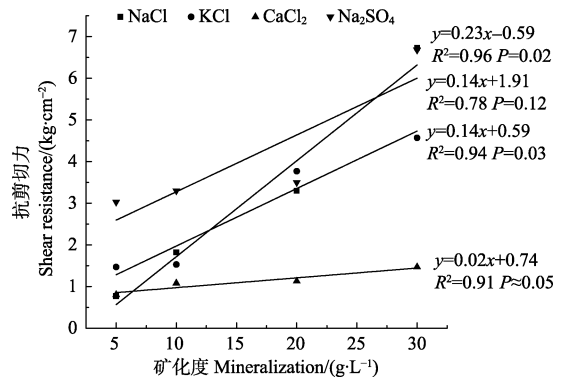


图 3 灌溉水矿化度与盐结皮抗剪切力之间的关系

Fig.3 Relationship between mineralization of irrigation water and shear resistance of salt crust

2.1.3 pH 值

由表 2 可以看出, 对于不同盐分而言, 灌溉水矿化度同为 5、10 g/L 时, CaCl₂ 盐结皮 pH 值显著低于其他 3 种盐分 ($P<0.05$); 灌溉水矿化度为 20、30 g/L 时, 4 种盐所形成的盐结皮 pH 值之间无显著性差异。对于同一种盐分而言, 随灌溉水矿化度升高, KCl、Na₂SO₄ 盐结皮 pH 值无显著性差异; 随灌溉水矿化度升高, NaCl 盐结皮在灌溉水矿化度为 30 g/L 时显著高于 5 g/L; CaCl₂ 盐结皮在灌溉水矿化度为 5 g/L 时 pH 值显著低于 20、30 g/L ($P<0.05$)。在 5~30 g/L 矿化度范围内矿化度和盐分类型对抗剪切力影响达极显著水平 ($P<0.01$), 而矿化度和盐分交互对盐结皮硬度影响不显著 ($P>0.05$)。相对而言, 4 种矿化度下 CaCl₂ 的盐结皮 pH 值均最小, 而 Na₂SO₄ 盐结皮 pH 值均最大, 在矿化度 30 g/L 时最高 (7.86)。

表 2 不同盐分类型 (ST) 及矿化度 (MD) 下盐结皮的 pH 值和电导率关系多重比较结果

Table 2 Multiple comparison results of pH Value and electrical conductivity of salt crusts among different salt type (ST) and mineralization (MD) treatments

MD/(g L ⁻¹)	pH 值 pH value				电导率 Electrical conductivity/(mS·cm ⁻¹)			
	NaCl	KCl	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄	NaCl	KCl	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄
5	6.41 Ab	6.24 Aa	5.59 Bb	6.47 Aa	1.24 ABb	1.42 ABb	0.52 Cb	1.87 Aa
10	7.15 Aab	6.82 Aa	6.01 Bab	7.33 Aa	1.35 Bb	2.13 Aab	0.58 Bb	1.93 ABa
20	7.21 Aab	7.06 Aa	6.56 Aa	7.58 Aa	3.46 Aa	2.47 Bab	0.69 Bb	2.01 Aa
30	7.45 Aa	7.23 ABa	6.65 Aa	7.86 Aa	3.77 Aa	2.68 Aa	0.89 Ca	2.50 Ba

2.1.4 电导率

由表 2 可以看出，同一矿化度下，当灌溉水矿化度为 5 g/L 时，CaCl₂ 盐结皮电导率显著低于其他盐分；灌溉水矿化度为 10 g/L 时，KCl 盐结皮显著高于 NaCl、CaCl₂；灌溉水矿化度为 20 g/L 时，CaCl₂ 与 KCl 显著低于 NaCl 与 Na₂SO₄ 的电导率；灌溉水矿化度为 30 g/L 时，CaCl₂ 与 Na₂SO₄ 显著低于 NaCl 与 KCl 电导率。对于同种盐分，NaCl 盐结皮在灌溉水矿化度为 20 和 30 g/L 时显著高于 5 和 10 g/L；KCl 盐结皮在灌溉水矿化度 30 g/L 时显著高于 5 g/L；CaCl₂ 盐结皮在灌溉水矿化度 30 g/L 时显著高于 5、10 和 20 g/L；而随灌溉水矿化度升高，Na₂SO₄ 盐结皮电导率无显著性差异。不同的盐分类型和灌溉水矿化度的改变对盐结皮电导率均有一定影响 ($P < 0.01$)，其中电导率的最大值为 30 g/L 的 NaCl 盐结皮 (3.77 mS/cm)。

综上所述，室内培育最适盐结皮的方案是选择矿化度为 30 g/L 的 NaCl 进行培育。

2.2 盐结皮破损程度对土壤水分蒸发过程的影响

2.2.1 盐结皮不同破损程度对土壤日蒸发量的影响

由图 4 可以看出，随着灌水天数增加，不同破损程度处理间土壤日蒸发量均逐渐降低，随着破损程度增加土壤日蒸发量也增加。整个灌水过程中，不同破损程度处理的土壤日蒸发量明显低于对照处理（破损 100%）。表明盐结皮的破损会显著降低土壤日蒸发量。前 2 天破损 100% 的处理土壤水分日蒸发量的降低程度远高于其他各处理，第 2 天以后对照土壤水分日蒸发量的下降幅度逐渐减少。第 2 天以后对照土壤日蒸发量的下降幅度逐渐减小。灌水第 5 天以后 4 个处理日蒸发量逐渐接近，不同破损程度的处理日蒸发量均小于 1.00 mm，灌水最后一天不同破损程度处理的盐结皮日蒸发量均达到最低值。

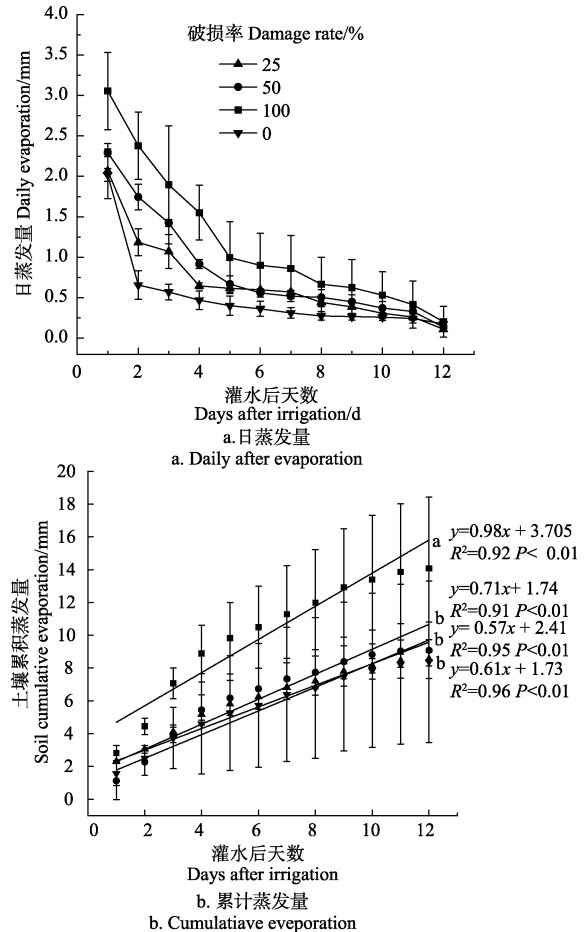
2.2.2 盐结皮不同破损程度对土壤累积蒸发量的影响

从图 4b 可以看出，随灌水天数的增加，各处理土壤累积蒸发量逐渐增大，盐结皮破损 0、25% 和 50% 的土柱累积蒸发量均一直远低于盐结皮破损 100% 的土柱，且随着时间的延长差距越明显。不同破损程度各处理土壤累积蒸发量随灌水后天数呈线性增加趋势，盐结皮覆盖对土壤蒸发的抑制效应明显。随着破损程度的增加，土壤累积蒸发量逐渐增加，从灌水第 4 天开始，土壤累积蒸发量增速变缓。盐结皮无破损的累积蒸发量与破损 0、50% 和 25% 的土柱之间差异显著，最终累积蒸发量分别为 8.38（破损 0）、14.1（破损 100%）、9.08（破损 50%）和 8.55（破损 25%）mm。与对照相比，破损率不同的盐结皮覆盖均会使土壤累积蒸发量显著降低，进而使土壤含水率提高，这有利于土壤水分的保持。

2.2.3 盐结皮破损程度对土壤水分累积蒸发抑制效率的动态影响

蒸发抑制效率是指在土壤蒸发过程中某些指标抑制土壤水分蒸发的能力^[14]。由图 5 可以看出，在初始含水率相同条件下，随破损程度的增加，累积蒸发抑制效率降低，盐结皮破损 50% 的土柱，累积蒸发抑制效率最小。随着灌水天数的增加，盐结皮破损 0、25% 和 50% 的累积蒸发抑制效率均先增加后基本稳定；破损 50% 处理从灌水开始直至灌水第 7 天，累积蒸发抑制效率逐渐增加，灌水第 7 天至灌水最后 1 天，累积蒸发抑制效率基本不变，维持最大值

(30.20%)。其次是破损 25% 处理，累积蒸发抑制效率较高，灌水开始直至灌水第 4 天，累积蒸发抑制效率逐渐增加，灌水第 4 天至灌水最后 1 天，累积蒸发抑制效率基本不变，维持最大值 (44.04%)。盐结皮无破损处理累积蒸发抑制效率最高，从灌水开始直至灌水第 4 天，累积蒸发抑制效率逐渐增加，灌水第 4 天至灌水最后 1 天，累积蒸发抑制效率基本不变。第 7 天达到最大值 (58.84%)。盐结皮覆盖可以明显抑制土壤水分蒸发，起到节水保墒的作用。



注：不同字母表示不同处理间土壤累积蒸发量差异显著 ($P < 0.05$)。 Note: Different letters indicate significant differences in soil cumulative evaporation at 0.05 level among treatments.

图 4 不同破损程度的盐结皮日蒸发量和累积蒸发量的变化 Fig.4 Changes of daily evaporation and cumulative evaporation of salt crusts with different damage rates

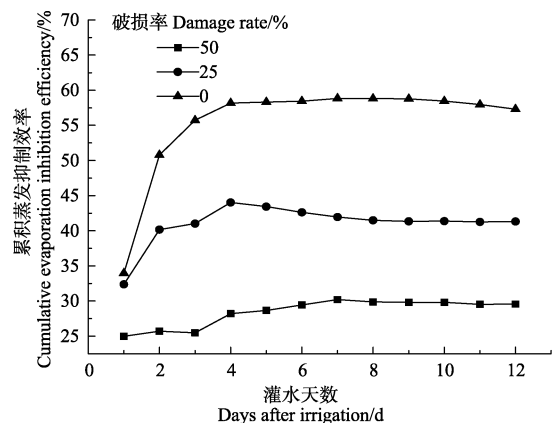


图 5 盐结皮不同破损程度下蒸发抑制效率的动态变化 Fig.5 Change of evaporation inhibition efficiency by salt crust with different damage rates

3 讨论

3.1 灌溉水质对盐结皮理化性质的影响

从本文研究结果来看,不同矿化度对于盐结皮的硬度、抗剪切力、pH值、电导率的影响均较小,盐分类型对盐结皮硬度、pH值影响较大,对抗剪切力、电导率影响较小,矿化度和盐分类型交互对盐结皮的硬度、抗剪切力、pH值、电导率的影响均比较大,其中对于硬度的影响最大。这说明盐结皮的基本理化性质受矿化度和盐分类型共同影响。盐结皮的形成是由于水分和可溶性盐分汇聚在地表后水分蒸发,盐分结晶和土壤颗粒团聚而成,不同盐分形成的盐结皮结晶数量也不同。矿化度同为5、10、30 g/L时不同盐分所形成的盐分结晶数量相差不大,因此各盐结皮硬度之间无显著性差异。20 g/L KCl盐结皮形成的结晶数量较少,因此硬度显著低于其他盐分。随着灌溉水矿化度的增加,晶体几乎会填满土表所有孔隙,同种盐分所形成的盐结皮硬度逐渐增大。不同盐分之间NaCl盐结皮硬度变化最大,灌溉水矿化度30 g/L时不同盐分盐结皮硬度均达到最大。王大环等^[2]利用古尔班通古特沙漠的细沙进行了盐结皮的培育,分析发现随着浓度的增加,Na₂SO₄盐结皮晶体数量增加,硬度增大,本研究结果发现随着矿化度的增加,30 g/L时Na₂SO₄盐结皮硬度显著高于5和10 g/L,与其结果相一致。其抗风蚀能力也会随着硬度的增大而增强。

土壤抗剪切力的大小会受到土壤物理性质的影响^[15],在土壤水分蒸发的过程中,土壤盐溶液逐渐饱和并最终使得不同类型的盐分晶体逐渐析出,从而填满土壤孔隙,从而对抵抗剪切破坏起到一定作用。而且土柱中盐晶体会改变土壤颗粒之间的受力结构,因此会影响到盐结皮的抗压能力^[16]。本研究的结果表明,除KCl之外,其他三种盐分随着矿化度的升高,不同盐分结晶和土壤颗粒形成的土壤内部结构稳定性均增强,因此抗剪切力也逐渐增大。不同盐分之间NaCl盐结皮抗剪切力变化最大,且灌溉水矿化度越高其抗剪切力越大,盐结皮抵抗外力压实和破碎的能力也最强。在矿化度同为20 g/L时不同盐分所形成的盐结皮抗剪切力之间无显著性差异。史东梅等^[17]研究表明,土壤越紧实,抗剪切力越大,更能有效阻止水分的蒸发。

盐分增加可能导致土壤盐渍化。随灌溉水矿化度的增高,同一盐分离子含量的相对比例发生变化,因而会影响其pH值^[18]。本研究结果表明,NaCl盐结皮pH值在30 g/L时显著高于5 g/L,CaCl₂盐结皮20、30 g/L时显著高于5、10 g/L,跟盐的水解能力有关。矿化度为5、10 g/L时,CaCl₂盐结皮pH与其他盐分有显著差异性。郭全恩等^[18]研究发现,土壤pH值与SO₄²⁻、Cl⁻在全盐中的比例呈极显著负相关关系,与Ca²⁺、Na⁺在全盐中的比例呈极显著正相关关系,这与本研究的结果相一致。

土壤盐分、水分、有机质含量、土壤压实度、质地、结构和孔隙率等都不同程度地影响着土壤电导率^[19]。本研究结果表明,矿化度增加对盐结皮电导率有不同程度的影响,同一矿化度下,不同盐分电离的离子不同,导电性存在较大差异;随着矿化度的升高电导率也逐渐增

大。张越等^[20]研究发现盐结皮电导率与灌溉水矿化度均呈线性正相关,与本研究的结果相一致。因此,根据土壤盐结皮人工培育结果,综合分析确定灌溉水矿化度为30 g/L的NaCl溶液为最优盐结皮人工培育条件。

3.2 盐结皮对土壤水分蒸发的影响

不同的气候条件和土壤特性均会影响土壤水分蒸发速率^[21]。此外,土壤水分蒸发速率也会受到土壤水分运移速率以及土壤蒸发面的影响^[22]。而盐结皮的存在改变了土壤蒸发的界面条件。土壤水分蒸发后可溶性盐离子会在地表结晶,这样不仅会使土壤毛管作用阻断,阻碍水汽向大气扩散,同时还会引起地表反照率发生改变而降低土表温度,从而进一步降低土壤蒸发^[13],因此而导致水分蒸发速率变慢,日蒸发量减少。试验开始前灌水补给充分,蒸发初始阶段各处理土壤含水率一致,MLS内土壤表层水吸力较大,加快了盐溶液的上行速率,使得土壤表面盐分大量聚积,土壤水分在毛管力作用下上升到表层而产生稳定的失水过程。也有研究表明由于气温与土体温度差异较大,所以使得土壤表面水气压梯度较大,造成水蒸气从土柱中逐渐向空气中扩散^[23]。不同破损程度的盐结皮土壤水分蒸发损失需要经过一定覆盖面的盐结皮层,如果盐结皮破损程度越大,水分则可以沿毛管上升至土壤表层,该阶段水分蒸发损失较快,日蒸发量较大,土壤累积蒸发量快速增加,土壤水分累积蒸发抑制效率越小。因而破损100%的处理土壤日蒸发量最高,累积蒸发量也最大,而盐结皮无破损处理土壤日蒸发量和累积蒸发量均最小。本研究结果与Shokri-Kuehni等^[24]的研究结果一致。因此盐结皮覆盖可以减少土壤水分蒸发,抑制土壤盐分在表层的积累,起到节水保墒和抑盐的作用。

在蒸发过程中,土柱表层不同破损程度的盐结皮含水率逐渐降低,刚开始日蒸发量较高,损失的土壤水分以毛管水为主,蒸发后期主要以水汽扩散为主,因此日蒸发量缓慢降低,土壤累积蒸发量增加变慢,累积蒸发抑制效率基本不变。Zhang等^[25]研究发现裸地土壤日蒸发量高于有盐结皮覆盖的土壤,随着灌水后天数的增加土壤累积蒸发量逐渐增大。本研究结果与其基本一致。盐结皮破损100%的处理土壤累积蒸发量与其他处理之间有显著性差异,表明土壤累积蒸发量会因盐结皮破损程度的变化而变化,盐结皮覆盖对于保持较高的土壤含水量以及维持干旱区植物的生长具有积极的意义。

在风沙危害极为严重的干旱荒漠区,盐结皮的存在还可以抵抗风蚀危害^[1],有利于旱区植物的生长发育。此外,荒漠地区没有足够的水分满足植物生长需要,而且干旱的气候条件所导致的土壤强蒸发过程会使盐渍化大面积出现。盐结皮含盐量高,它的存在对于植物也是一个潜在威胁^[6]。如何充分发挥盐结皮的保水抑盐功能,降低其危害风险,达到水盐相互协调,有关这方面的问题值得进一步探究。

4 结论

通过室内人工培育土壤盐结皮理化指标的分析,确

定了盐结皮的最适培育方法, 并对其不同破损程度影响下的土壤蒸发过程进行分析, 得出以下主要结论:

1) 土壤盐结皮的人工培育是可行的。随着灌溉水矿化度的升高, 不同盐分所培育的盐结皮硬度、抗剪切力、pH、电导率均有不同程度的增加, 综合分析确定矿化度为 30 g/L 的 NaCl 盐溶液进行盐结皮的人工培育为最适培育条件, 此时培育的结皮的硬度为 24.17 kg/cm², 抗剪切力为 6.73 kg/cm², pH 值为 7.45, 电导率为 3.77 mS/cm。

2) 盐结皮对土壤水分蒸发具有明显的抑制作用, 且随着破损率的增加抑制作用逐渐减弱。日蒸发量随盐结皮破损程度的增加而增加, 并随灌水后天数的增加而逐渐降低; 土壤累积蒸发量随灌水后天数以及盐结皮破损程度的增加而逐渐增加, 不同处理之间土壤累积蒸发量均呈线性递增变化关系; 土壤累积蒸发抑制效率随盐结皮破损程度的增加而降低, 随灌水后天数呈先递增后基本不变, 破损 50% 和无破损在第 7 天达到最大值 (30.20% 和 58.84%), 破损 25% 在第 4 天达到最大值 (44.04%)。

[参 考 文 献]

- [1] 李诚志. 土壤风蚀环境下盐结皮研究及展望[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2018, 35(4): 28-34, 41.
Li Chengzhi. A review: The formation, development and prospect of soil salt crust on the view of soil erosion [J]. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2018, 35(4): 28-34, 41. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王大环, 李诚志, 李沼鹤. Na₂SO₄ 对古尔班通古特沙漠细沙盐结皮特性的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1979-1986.
Wang Dahuan, Li Chengzhi, Li Zhaoti. Na₂SO₄ crust characteristics in fine sand collected in the Gurbantunggut Desert[J]. 2018, 31(11): 1979-1986. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李沼鹤. 几种常见盐分组合对风沙土胶结强度的影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
Li Zhaoti. The Study on The Influence of Several Common Salt Combinations on the Cementation Strength of Aeolian Sandy[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘海东, 刘娇, 赵英, 等. 梭梭和沙拐枣对风沙土壤水热盐动态的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 169-175, 181.
Liu Haidong, Liu Jiao, Zhao Ying, et al. Effects of haloxylonammmodendron and calligonummongolicum on water-heat-salt dynamics in sandy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 169-175, 181. (in Chinese with English abstract)
- [5] Langston G, Neuman M K. An experimental study on the susceptibility of crusted surfaces to wind erosion: A comparison of the strength properties of biotic and salt crusts[J]. Geomorphology, 2005, 72: 40-53.
- [6] 张建国, 徐新文, 雷加强, 等. 极端干旱区咸水滴灌林地盐结皮对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 34-39.
Zhang Jianguo, Xu Xinwen, Lei Jiaqiang, et al. Effects of salt crust on soil evaporation condition with saline-water drip-irrigation in extreme arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [7] Dai S, Shin H, Santamarina J C. Formation and development of salt crusts on soil surfaces[J]. ActaGeotechnica, 2016, 11: 1103-1109.
- [8] 孔德庸, 李保国, 马黎春, 等. 罗布泊干盐湖表层盐壳含水率季节性变化及吸水特征研究[J]. 地球学报, 2016, 37(2): 185-192.
Kong Deyong, Li Baoguo, Ma Lichun, et al. Seasonal change of water absorption capability and moisture content of the top salt-crust in Lop Nur Dry Lake[J]. Journal of Geosciences 2016, 37(2): 185-192. (in Chinese with English abstract)
- [9] 阿不都艾尼·阿不里, 伍靖伟, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 不同含盐量土壤盐分对蒸发的影响试验研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 79-84.
Abdugheni Abliz, Wu Jingwei, Tashpolat Tiyip, et al. The effect of different soil salt contents on evaporation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 79-84. (in Chinese with English abstract)
- [10] Nachshon U, Weisbrod N. Beyond the salt crust: on combined evaporation and subflorescentsalt precipitation in porous media[J]. Transport in Porous Media, 2015, 110: 295-310.
- [11] Nield J M, Wiggs G F S, King J, et al. Climate-surface-pore-water interactions on a salt crusted play an implications for crust pattern and surface roughness development measured using terrestrial laser scanning[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41: 738-753.
- [12] 王大环. 风沙土盐水胶结实验性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
Wang Dahuan. Experimental Study on Saline Cemented Sandy Soil[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张建国, 赵英, 徐新文, 等. 极端干旱区咸水灌溉下流沙压埋的减蒸抑盐效应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1415-1421.
Zhang Jianguo, Zhao Ying, Xu Xinwen, et al. Effect of shifting sand burial on evaporation reduction and salt restraint under saline water irrigation in extremely arid region[J]. Journal of Applied Ecology, 2014, 25(5): 1415-1421. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姜海波, 唐凯, 何新林. 抑制干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 119-124.
Jiang Haibo, Tang Kai, He Xinlin. Experimental study on restraining evaporation of plain reservoirs in arid regions and Study on evaporation model[J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2016, 30(1): 119-124. (in Chinese with English abstract)
- [15] Arulrajah A, Disfani M M, Horpibulsuk S, et al. Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications[J]. Construction & Building Materials, 2014, 58(4): 245-257.
- [16] 陶高粱, 李进, 庄心善, 等. 利用土中水分蒸发特性和微观孔隙分布规律确定 SWCC 残余含水率[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1256-1262.
Tao Gaoliang, Li Jin, Zhuang Xinshan, et al. Determination of the residual water content of SWCC based on the soil moisture evaporation properties and micro pore characteristics[J]. Geotechnical Mechanics, 2018, 39(4): 1256-1262. (in Chinese with English abstract)
- [17] 史东梅, 蒋平, 何文健, 等. 紫色土坡耕地生物埂土壤抗剪强度对干湿作用的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 139-146.
Shi Dongmei, Jiang Ping, He Wenjian, et al. Response of soil shear strength of bio-embankments for slope farmland to drying-wetting effect in Purple Hilly Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 139-146. (in Chinese with English abstract)

- [18] 郭全恩, 南丽丽, 李保国, 等. 灌溉水盐分组成对土壤水盐迁移参数的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 123—128.
Guo Quan'en, Nan Lili, Li Baoguo, et al. Effect of salt ion composition of irrigation water on parameters of soil water and salt movement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 123—128. (in Chinese with English abstract)
- [19] Mentges M I, Reichert J M, Rodrigues M F, et al. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils[J]. Geoderma, 2016, 263: 47—59.
- [20] 张越, 杨劲松, 姚荣江. 咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 388—400.
Zhang Yue, Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Effects of saline ice water irrigation on distribution of moisture and salt content in coastal saline soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 388—400. (in Chinese with English abstract)
- [21] Jana R B, Ershadi A, McCabe M F. Examining the relationship between intermediate-scale soil moisture and terrestrial evaporation within a semi-arid grassland[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(10): 3987—4004.
- [22] Carrier O, Shahidzadeh-Bonn N, Zargar R, et al. Evaporation of water: Evaporation rate and collective effects[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 798: 774—786.
- [23] Hasan A A, Mekheimer K S, Tantawy B E. Magneto-gravitodynamics ability of three dimensional streaming velocities of fluid cylinder under the effect of capillary force[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2018, 15(5): 174—181.
- [24] Shokri-Kuehni, Salomé M S, Vetter T, et al. New insights into saline water evaporation from porous media: Complex interaction between evaporation rates, precipitation and surface temperature[J]. Geophysical Research Letters, 2017:5504—5510. doi:10.1002/2017GL073337
- [25] Zhang Jianguo, Xu Xinwen, Zhao Ying, et al. Effect of shifting sand burial on soil evaporation and moisture-salt distribution in a hyper-arid desert[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(21): 1417.

Artificial cultivation of soil salt crust and effects of its damage rate on soil evaporation

Zhang Jianguo^{1,2}, Li Hongwei¹, Li Yafei¹, Li Yunuo¹, Ma Yue¹, Tian Lele¹, Zhang Yuxin¹

(1. College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil salt crust is widely developed in arid and semi-arid areas, which has great impacts on earth surface soil hydrological processes, and interference of external forces on mechanical damage of salt crust is common. Shifting aeolian sandy soil in the Taklimakan Desert was taken as an example, different salt solutions (NaCl, Na₂SO₄, CaCl₂, KCl) of different salinities (5, 10, 20, 30 g/L) were used to simulate the formation and development of salt crust under saline water irrigation. The air temperature and humidity during the salt crust cultivation were recorded. The optimum artificial cultivation conditions were determined based on the physiochemical properties analysis results of salt crust. Furthermore, the soil evaporation process under the influence of different damage degree of salt crust (damage rates of 100%, 50%, 25% and 0) was monitored. The results showed that the hardness, shear resistance, pH and EC of the salt crust generally increased with the increasing salinity of irrigation water. The thickness and hardness of the crust were the largest for 30 g/L NaCl solution, and its hardness was 24.17 kg/cm², shear resistance was 6.73 kg/cm², pH value was 7.45, and EC was 3.77 mS/cm. Daily soil evaporation in micro-lysimeters (MLS) increased with the increasing damage degree of salt crust and decreased with the days after irrigation. Soil accumulative evaporation increased with the days after irrigation and the degree of damage. During the soil moisture evaporation, soluble salts gradually crystallized on the soil surface, which not only blocked soil capillary action, but also inhibited diffusion of water vapor into the atmosphere. Meanwhile, it changed and lowered surface soil temperature, thus further reduced soil evaporation. Thus, the evaporation rate of water gradually slowed down and the amount of evaporation per day reduced. Daily evaporation and cumulative evaporation with 100% soil salt crust were significantly different from the other treatments. Cumulative evaporation inhibition efficiency of salt crust on soil evaporation increased with the increasing time after irrigation, and decreased with the increasing damage degree, which indicated that soil cumulative evaporation would change due to the change of salt crust damage. The cover of salt crust had positive effect on maintaining high soil moisture and plant growth in arid regions. Cumulative evaporation inhibition efficiency of salt crust increased with the days after irrigation, and decreased with the increasing damage rate. When the crust was damaged by 50% or 0, the cumulative evaporation inhibition efficiency reached the maximum on the 7th day. When the crust damage rate was 25%, the maximum evaporation inhibition efficiency was on the 4th day. The maximum cumulative evaporation inhibition efficiency of salt crust without damage was 58.84%, while it was only 30.20% under damaged rate of 50%. In summary, soil salt crust could be artificially cultivated, and it has obvious inhibitory effects on soil evaporation, and its damage degree has significant impacts on soil evaporation process. It is of great significance to reveal the hydrological processes of saline soils and to guide the rational utilization of soil and water resources in arid and semi-arid areas.

Keywords: soils; salts; evaporation; crust; artificial cultivation; physiochemical properties; damage degree