

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.023

刘淙琮, 孙宏勇, 郭凯, 等. 不同矿化度咸水在滨海典型植被盐碱地中的入渗特性研究. 土壤, 2022, 54(1): 177–183.

## 不同矿化度咸水在滨海典型植被盐碱地中的入渗特性研究<sup>①</sup>

刘淙琮<sup>1</sup>, 孙宏勇<sup>2,3\*</sup>, 郭凯<sup>2,3</sup>, 董心亮<sup>2,3</sup>, 程东娟<sup>1</sup>

(1 河北工程大学水利水电学院, 河北邯郸 056038; 2 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 050022; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于滨海盐碱区典型植被白茅、盐地碱蓬和裸地的土壤性状调查, 开展了不同矿化度咸水(0、5、10 g/L)在上述典型地块中的水分入渗试验, 以分析滨海盐碱区典型植被对土壤结构特征、咸水入渗特性、水盐分布规律的影响。结果表明: ①裸地、盐地碱蓬地和白茅地土壤容重和含盐量依次降低、土壤大粒径水稳性团聚体含量依次增加; ②同一地块初始入渗率、稳定入渗率和累积入渗量均随咸水矿化度的升高逐渐增大, 相同矿化度咸水入渗下, 稳定入渗率和累积入渗量由大到小依次为白茅地、盐地碱蓬地和裸地; ③入渗前土壤表层含盐量由高到低的地块依次为裸地、盐地碱蓬地和白茅地, 咸水入渗后, 裸地表层土壤含盐量随咸水矿化度的升高而增加, 咸水入渗对盐地碱蓬地表层土壤盐分的淋洗显著, 且在矿化度为 5 g/L 咸水入渗后的淋洗效果最佳, 而白茅地土壤盐分淋洗对入渗咸水矿化度则不敏感; ④双因素方差分析结果显示, 植被类型对滨海盐碱地水分入渗特性的影响大于入渗水的矿化度。

**关键词:** 滨海盐碱地; 典型植被类型; 水分入渗特性; 水盐分布

**中图分类号:** S156.4+2 **文献标志码:** A

### Infiltration Characteristics of Saline Water with Different Salinity in Coastal Saline-alkali Land with Typical Vegetation

LIU Congcong<sup>1</sup>, SUN Hongyong<sup>2,3\*</sup>, GUO Kai<sup>2,3</sup>, DONG Xinliang<sup>2,3</sup>, CHENG Dongjuan<sup>1</sup>

(1 School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the investigation of soil properties of coastal saline-alkali land with typical vegetations, including bare land, *Suaeda salsa* and *Imperata cylindrica*, the infiltration experiments were conducted with saline water of different salinity (0, 5, 10 g/L) to evaluate the effects of the typical vegetations on the characteristics of soil structure, saline water infiltration and soil water and salt distribution. The results showed that: 1) Soil bulk density and salinity were in the order of bare land > *Suaeda salsa* land > *Imperata cylindrica* land, while water stable macro-aggregates contents were on the contrary. 2) In the same plot, the initial infiltration rate, stable infiltration rate and cumulative infiltration increased with the increase of water salinity, while the above infiltration parameters of the saline water with the same salinity were in the order of bare land < *Suaeda salsa* land < *Imperata cylindrica* land. 3) Before infiltration, the salt contents in topsoil were in the order of bare land < *Suaeda salsa* land < *Imperata cylindrica* land; after infiltration, the salt content in topsoil of bare land increased with the increase of salinity, significant salt leaching effect was observed after saline water infiltrated into the soil of *Suaeda salsa*, and the best leaching effect was obtained after salinity of 5 g/L salt water infiltration; while water salinity influenced salt leaching insensitively in the soil of *Imperata cylindrica*. 4) The results of two-factor ANOVA showed that the vegetation type had more influence on the infiltration characteristics than the water salinity.

**Key words:** Coastal saline-alkali land; Typical vegetation; Water infiltration characteristics; Water and salt distribution

①基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51809260)和河北省重点研发计划项目(192273039D, 20327002D)资助。

\* 通讯作者(hysun@sjziam.ac.cn)

作者简介: 刘淙琮(1996—), 男, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源与环境研究。E-mail: 1220981719@qq.com

我国盐渍土分布范围广、面积大,在干旱、半干旱及滨海地区都有大面积分布<sup>[1]</sup>,总面积达  $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,潜在盐碱地面积达  $1.73 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[2-4]</sup>。其中滨海地区包括渤海湾、黄海、东海等地区是我国典型的滨海盐碱地分布区,面积约占中国盐渍土总面积的 7%<sup>[5]</sup>。河北省的滨海盐渍土面积达  $7.80 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,占全省总耕地面积的 10.4%。由于滨海地区海拔低,地下水水位高,常年受海水侵蚀的影响,使得土壤盐分含量高、渗透性差,加之淡水资源相对匮乏,制约了该地区农业发展<sup>[6]</sup>。因此作为重要的后备耕地资源<sup>[7]</sup>,盐碱地合理的开发和利用对保障耕地安全具有重要意义。在盐碱地改良过程中,生物改良是重要的治理措施,种植耐盐植物可以通过土壤盐分吸收和改善土壤结构实现盐碱地土壤良性发展,同时该区域丰富的咸水资源也是亟待开发的水资源。因此,研究不同矿化度咸水在滨海地区典型植被土壤中的水分入渗特性,探索植被类型对水盐分布的响应机制,对丰富和发展盐碱地生物改良和咸水资源利用理论及技术具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。

大量研究表明,通过人工种植耐盐植物的方法可以改善盐渍土的土壤环境。耐盐植物在生长过程中能够吸收盐碱地中的盐分聚集于植物体内,降低盐碱地中的盐分含量。不同耐盐植物对于盐渍土盐分有不同的吸收能力,依据不同盐渍土类型和特点,选择种植不同种类耐盐植物在盐碱地改良中发挥了重要作用<sup>[10-11]</sup>。邹桂梅等<sup>[12]</sup>与李从娟等<sup>[13]</sup>利用盐地碱蓬进行盐碱土生物改良试验,结果表明盐地碱蓬能够明显降低滨海盐渍土的容重,增加土壤孔隙度,进而增强盐渍土的水分入渗特性。也有研究表明,怪柳、盐角草、苜蓿<sup>[14]</sup>等耐盐植物生长也能不同程度地改善土壤结构,进而影响水分在土壤中的入渗。

总结以往经验,以淡水压盐为核心的灌排工程措施是目前盐碱地改良最有效的方法<sup>[15]</sup>,而当前淡水资源日益不足始终是制约上述措施应用的关键因素。在以上水土资源约束下,盐碱区丰富的地下咸水成为盐碱地改良的重要水资源。据初步统计,仅河北省滨海地区的咸水资源总量可达  $7.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[16]</sup>,亟待开发利用。近年来大量研究表明,地下咸水的利用可以显著降低地下水位,扩大地下水水库容,缓解土壤积盐。咸水入渗过程中,咸水中离子和土壤的相互作用关系显著促进了土壤颗粒的絮凝,土壤团聚性、稳定性、孔隙度和渗透性能显著增强<sup>[17-18]</sup>,显著促进了水分的入渗过程。与淡水相比,咸水入渗的累积入渗量与湿润锋迁移距离均显著提高,同时咸水矿化度越高越有

利于水分的入渗<sup>[19-21]</sup>。对于盐分的淋洗则与土壤初始条件、咸水矿化度和水量等密切相关。基于上述研究,有研究通过采用咸淡水轮灌、咸淡水混灌、暗管排水等措施,以更好地调控土壤盐分,保证作物生长<sup>[22]</sup>。

耐盐植物的生长以及水分的矿化度对土壤水盐运移过程都有一定程度的影响。盐碱区由于土壤盐分异质性较高,不同植被类型呈斑块状分布,且不同植被类型对土壤结构特性、咸水入渗特征、土壤水盐分布等影响的研究均不够完善,同时不同植被类型下土壤结构和咸水入渗过程的相互作用关系也不明确。基于此,本研究以滨海地区典型植被类型(裸地、盐地碱蓬、白茅)的土壤为主要研究对象,开展田间咸水入渗试验,研究不同矿化度咸水在典型植被类型土壤中的入渗过程、水盐分布规律等,分析典型植被类型下的土壤结构、水分入渗参数和水盐分布相互作用关系,为滨海盐碱地生物改良和咸水资源利用提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于河北省海兴县小山乡( $117^{\circ}57'50''\text{E}$ ,  $38^{\circ}17'45''\text{N}$ )。该地区地势低洼平坦,土壤类型为典型的滨海盐渍土,其中土壤盐分组成以  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  为主。气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候<sup>[23]</sup>,年平均气温为  $12.1^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量  $582.3 \text{ mm}$ ,降水主要集中在 7—8 月份。土壤中的盐分含量具有明显的季节性特征,土壤盐分动态主要表现为春秋冬三季积盐,夏季淋盐,其中春季积盐期土壤积盐最为强烈<sup>[24-26]</sup>。前期对试验区典型植被类型及土壤进行了系统调查与分析,试验区植被呈斑块状分布,裸地、盐地碱蓬和白茅为 3 种典型耐盐植被类型,土壤中的砂粒、粉粒、黏粒含量分别为  $155.3$ 、 $821.2$ 、 $23.5 \text{ g/kg}$ ,按照土壤质地国际制分类标准,试验区土壤质地为粉质壤土。此外,对典型植被类型的地上生物量、土壤容重、团聚体等理化性质的调查结果显示,裸地、盐地碱蓬、白茅 3 种地块中的植物生物量依次升高,表层( $0 \sim 20 \text{ cm}$ )土壤盐分依次降低,土壤中的大粒径水稳性团聚体含量依次增大(表 1)。

### 1.2 试验处理及材料准备

本试验选取 3 个典型耐盐植被类型(裸地、盐地碱蓬和白茅),设置 3 个咸水矿化度( $0$ 、 $5$ 、 $10 \text{ g/L}$ )水平,共 9 个处理,进行田间入渗试验,每个处理重复 3 次。试验前,进行了不同矿化度咸水、双环入渗仪等材料准备。其中咸水配置方法为:根据设置的咸水

表 1 不同植被类型盐碱地土壤基本理化性质  
Table 1 Soil basic physiochemical properties of saline-alkali lands with different vegetation types

植被类型	土壤深度 (cm)	电导率 (dS/m)	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	团聚体(g/kg)		平均重量直径 (mm)	生物量 (g/m <sup>2</sup> )
				>0.25 mm	≤0.25 mm		
裸地	0~20	7.13 ± 0.65 a	1.60 ± 0.00	260.44 ± 17.16 c	739.56 ± 17.16 a	0.39 ± 0.04 c	7.67 ± 1.40 c
	20~40	3.87 ± 0.35 a	1.59 ± 0.03	288.39 ± 52.66 c	711.61 ± 52.66 a	0.24 ± 0.01 c	—
	40~60	2.83 ± 0.12 a	1.58 ± 0.03	146.89 ± 12.71 c	853.11 ± 12.71 a	0.38 ± 0.01 b	—
盐地碱蓬	0~20	5.27 ± 1.00 b	1.60 ± 0.01	642.21 ± 20.56 b	357.79 ± 20.56 b	1.97 ± 0.08 b	37.81 ± 18.91 b
	20~40	3.63 ± 0.25 a	1.58 ± 0.02	306.23 ± 63.41 b	693.77 ± 63.41 b	0.39 ± 0.06 b	—
	40~60	2.83 ± 0.06 a	1.56 ± 0.05	451.57 ± 29.74 a	548.43 ± 29.74 c	1.15 ± 0.06 a	—
白茅	0~20	1.17 ± 0.12 c	1.55 ± 0.06	765.88 ± 25.41 a	234.12 ± 25.41 c	2.14 ± 0.05 a	51.20 ± 10.70 a
	20~40	1.16 ± 0.11 b	1.54 ± 0.04	589.59 ± 16.86 a	410.41 ± 16.86 c	1.53 ± 0.03 a	—
	40~60	1.22 ± 0.11 b	1.52 ± 0.12	298.52 ± 2.50 b	701.48 ± 2.50 b	0.28 ± 0.02 c	—

注: 表中不同小写字母表示同一土层不同植被类型间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

矿化度, 采用与当地地下水离子成分一致的海盐融入蒸馏水配制, 由于田间咸水用量较大, 5 g/L 和 10 g/L 处理采用天平(0.01 g)分别称取 100 g 和 200 g 海盐, 融入 25 L 水桶中, 并定容至 20 L, 混匀后储藏备用; 入渗试验采用的入渗仪为内环直径 30 cm、外环直径 60 cm 的 IN12-W 型双环入渗仪, 并配套标准马氏瓶(内环使用水位每下降 1 cm 水量下渗 100 ml 的小马氏瓶, 外环使用水位每下降 1 cm 水量下渗 250 ml 的大马氏瓶)。

### 1.3 试验过程及样品采集

试验开展于 2020 年 10 月, 试验前在入渗仪设置点周围选取具有代表性的裸地、盐地碱蓬和白茅斑块, 每个地块选取了 3 个重复, 进行了土壤取样, 取样深度为 0~20、20~40 和 40~60 cm, 测其土壤含水量、容重及孔隙度。在入渗仪设置点, 使用吸能锤将双环入渗仪<sup>[27]</sup>击入土壤深度 15 cm 处, 后将与内外环配套使用的马氏瓶固定在土壤中与入渗仪相同深度处, 向两个马氏瓶中倒入足量对应矿化度的咸水, 调节马氏瓶底部的流量阀。此时马氏瓶中的水流入到内外环中, 在两个马氏瓶中的侧面都有一个透明玻璃管, 调节流量阀的同时, 观察其中水的流速。当内外环中水的深度同时达到 2 cm 水头时, 调节流量阀, 维持 2 cm 定水头供水的入渗试验, 入渗时间为 180 min。在入渗开始后的 0、5、10、15、20、25、30、45、60、75、90、120、150、180 min 观察并记录马氏瓶读数, 入渗结束后, 待地表没有积水时, 使用土钻在入渗后的土壤中进行取样, 取样深度为 0~20、20~40 和 40~60 cm, 进行土壤水盐含量测定。入渗试验完成后, 在 3 种不同植被类型盐碱地中分别设置 3 个 2 m×2 m 的样块, 测其土壤表层 0~20 cm 的生

物量。

### 1.4 指标测定与统计分析

采用环刀法测定土壤容重; 采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体各粒径团聚体分布; 土壤质量含水量采用烘干法测定(105 °C, 8 h); 土壤样品进行风干、研磨、5:1 水土质量比浸提等操作后, 使用 B-173 型电导率仪测定土壤电导率, 采用滴定法测定可溶性离子含量, 土壤总盐分含量利用各离子含量加和计算。本试验数据利用 Excel 2007 进行整理, 使用 SPSS17.0 进行数据分析, 采用双因素方差分析法分析不同植被类型和咸水矿化度对滨海盐碱地水分入渗特性的影响, 采用 Duncan 法对各处理间的差异进行多重比较(差异显著性  $P < 0.05$ ), 利用 Origin 2019b 进行图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同矿化度咸水在典型植被盐碱地中的水分入渗特性

**2.1.1 入渗率** 图 1 为不同矿化度咸水在典型植被盐碱地中的水分入渗率随时间的变化。由图 1 可见, 水分入渗率随时间呈先快速减小后逐渐稳定的趋势, 相同植被类型中, 咸水矿化度对水分入渗率影响显著( $P < 0.05$ )。裸地中, 淡水(矿化度 0 g/L)的初始入渗率为 0.21 mm/min, 矿化度 5、10 g/L 咸水的初始入渗率分别比淡水增加了 4.76% 和 14.29%, 入渗 90 min 时, 矿化度 0、5、10 g/L 咸水的稳定入渗率分别为 0.05、0.09、0.09 mm/min; 盐地碱蓬地中, 淡水的初始入渗率为 0.49 mm/min, 矿化度 5、10 g/L 咸水的初始入渗率分别比淡水增加了 36.73% 和 42.86%, 入渗 90 min 时, 矿化度 0、5、10 g/L 咸

水的稳定入渗率分别为 0.10、0.14、0.21 mm/min；白茅地中，淡水的初始入渗率为 0.89 mm/min，矿化度 5、10 g/L 咸水的初始入渗率分别比淡水增加 43.82% 和 62.92%，入渗 90 min 时，矿化度 0、5、10 g/L 咸水的稳定入渗率分别为 0.18、0.30、0.42 mm/min。相比在裸地，在盐地碱蓬地和白茅地淡水的初始入渗率分别增加 133.33% 和 323.81%，入渗 90 min 时，稳定入渗率分别增加 100.00% 和 260.00%；矿化度 5 g/L 咸水的初始入渗率分别增加 204.55% 和 481.82%，稳定入渗率分别增加 55.56% 和 233.33%；矿化度 10 g/L 咸水的初始入渗率分别增加 191.67% 和 504.17%，稳定入渗率分别增加 132.53% 和 391.09%。上述结果显示，随着咸水矿化度的升高，同一地块中的水分初始入渗率和稳定入渗率逐渐增大；同时，裸地、盐地碱蓬地、白茅地的水分初始入渗率和稳定入渗率呈依次增大的趋势。

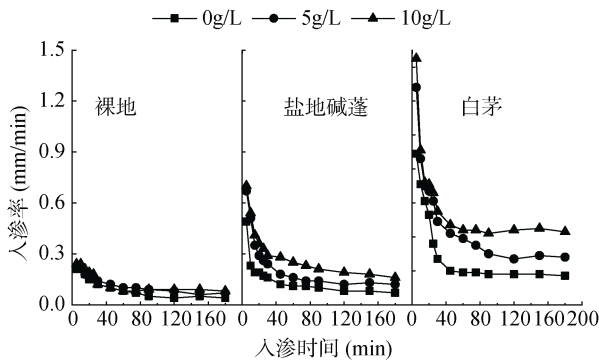


图 1 不同矿化度咸水在典型植被盐碱地中的水分入渗率随时间的变化

Fig. 1 Variation with time of infiltration rate of water with different salinities in typical vegetation saline lands

**2.1.2 累积入渗量** 图 2 为不同矿化度咸水在典型植被盐碱地中的累积入渗量随时间的变化。由图 2 可见，累积入渗量随时间的增加表现为先快速增长后稳定增长的趋势。不同植被类型盐碱地中的累积入渗量也存在着显著差异( $P<0.05$ )。裸地中，淡水在水分入渗结束后的累积入渗量为 14.01 mm，矿化度 5、10 g/L 的咸水入渗后的累积入渗量相比淡水分别增加 31.98% 和 33.62%；盐地碱蓬地中，淡水的累积入渗量为 20.75 mm，矿化度 5、10 g/L 咸水的累积入渗量相比淡水分别增加 60.24% 和 109.78%；白茅地中，淡水的累积入渗量为 44.47 mm，矿化度 5、10 g/L 咸水的累积入渗量相比淡水分别增加 64.47% 和 106.99%。相比在裸地，在盐地碱蓬地和白茅地淡水的累积入渗量分别增加 48.11% 和 217.42%；矿化度

5 g/L 咸水的累积入渗量分别增加 79.83% 和 295.57%；矿化度 10 g/L 咸水的累积入渗量分别增加 132.53% 和 391.72%。以上结果表明，同一地块中的水分累积入渗量随着咸水矿化度的升高呈增大的趋势；同时，裸地、盐地碱蓬地、白茅地的水分累积入渗量呈依次增大的趋势。

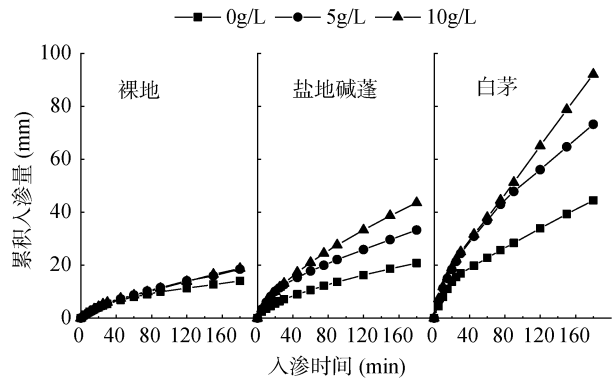


图 2 不同矿化度咸水在典型植被盐碱地中的累积入渗量随时间的变化

Fig. 2 Variation with time of cumulative infiltration of water with different salinities in typical vegetation saline lands

此外，基于上述结果，采用双因素方差分析，本文探讨了植被类型和咸水矿化度对水分入渗特性的影响特征，结果如表 2 所示，植被类型和咸水矿化度均显著影响了水分的入渗特性，并且植被类型相对于咸水矿化度的影响更为显著。因此，植被生长对土壤结构特性的影响，显著大于咸水矿化度在入渗过程中对土壤透水性的影响。

表 2 不同因素对水分入渗特性影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of influences of different factors on water infiltration characteristics

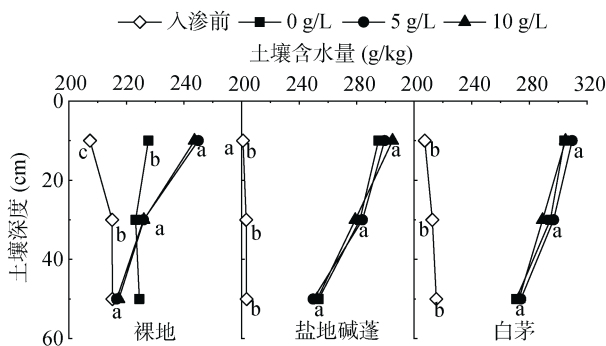
处理	自由度	稳定入渗率	累积入渗量	显著性
A	2	363.10	1510.55	0.00
B	2	112.64	325.65	0.00
A×B	4	25.96	79.92	0.00

注：A 代表植被类型；B 代表咸水矿化度。

**2.2 不同矿化度咸水入渗后典型植被盐碱地中的水盐分布**

**2.2.1 水分分布** 图 3 为不同矿化度咸水入渗后典型植被盐碱地中土壤含水量的变化，可见，裸地、盐地碱蓬地和白茅地不同土壤深度中的初始含水量在 201.0 ~ 215.4 g/kg 范围内。水分入渗后，裸地土壤含水量的变化主要在土壤表面 0 ~ 20 cm 深度，矿化度 0、5 和 10 g/L 的咸水入渗后，土壤含水量与入渗前相比分别升高 9.76%、18.11% 和 17.48%，而

下层 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 深度与入渗前则没有显著差异；盐地碱蓬地 0 ~ 20 cm 深度土壤含水量比入渗前分别升高 46.83%、48.94% 和 51.68%，白茅地则分别升高 46.72%、49.37% 和 47.11%，两种植被下其下层 20 ~ 40、40 ~ 60 cm 深度土壤含水量与入渗前相比均有不同程度的升高，但其增加幅度没有表层明显。以上结果表明，在同一地块不同矿化度咸水入渗后的土壤含水量无明显差异，不同地块咸水入渗后的土壤含水量由高到低分别为白茅地、盐地碱蓬地和裸地，且都随土壤深度的增加而逐渐降低。因此，不同植被类型对土壤容重、团聚体等的影响不同，导致咸水入渗后土壤剖面水分差异显著，而不同矿化度咸水入渗对土壤剖面水分分布的影响则不明显( $P < 0.05$ )。



(不同小写字母表示同一土层不同处理间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 下同)

图 3 不同矿化度咸水入渗后典型植被盐碱地中的土壤含水量

Fig. 3 Soil moistures of typical vegetation saline-alkali lands after infiltration with saline water of different salinities

**2.2.2 盐分分布** 图 4 为不同矿化度咸水入渗后典型植被盐碱地中土壤盐分分布，可见，入渗前不同植被类型土壤含盐量由高到低依次为裸地、盐地碱蓬地和白茅地，入渗完成后，0 ~ 20 cm 表层土壤含盐量变化最为剧烈。入渗前，裸地土壤表层含盐量为 25.16 g/kg，淡水入渗后，土壤表层含盐量为 25.01 g/kg，相比入渗前降低了 0.60%；矿化度 5、10 g/L 咸水入渗后，土壤表层含盐量分别为 26.35 和 31.65 g/kg，相比于入渗前分别升高了 4.73% 和 25.79%。盐地碱蓬地，土壤表层初始含盐量为 17.38 g/kg，矿化度 0、5、10 g/L 咸水入渗后，其含盐量相比入渗前分别降低了 21.92%、36.08% 和 33.53%；白茅地，入渗前各层土壤中的盐分含量为 1.59、2.12 和 3.05 g/kg，随着土壤深度的增加略有增大，不同矿化度的咸水入渗后土壤盐分含量仍较低，与入渗前相比差异未达到显著水平( $P > 0.05$ )。

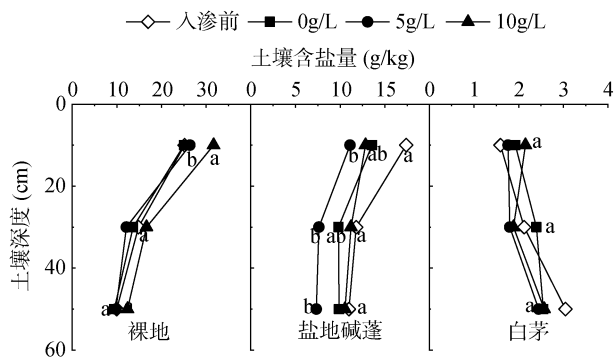


图 4 不同矿化度咸水入渗后典型植被盐碱地中的盐分含量

Fig. 4 Soil salt ion contents of typical vegetation saline-alkali lands after infiltration with saline water of different salinities

### 3 讨论

滨海地区由于常年受到海水侵蚀的影响，导致土壤盐分高、结构性差，大量的盐碱地处于荒废状态，并且淡水资源日益不足限制了盐碱地的开发与利用。在上述背景下，滨海盐碱区典型盐生植物和咸水资源利用在该地区盐碱地改良中的前景广阔，而耐盐植物生长和咸水利用对土壤结构均有不同程度的影响。土壤容重和孔隙度是土壤松紧程度、通气状况的直接反映，它们与土壤中的水盐运移过程密切相关，是反映盐碱土改良状况的重要指标。据研究，耐盐植被生长过程中根系的物理穿插作用、根系的腐熟等生命活动，能够显著促进土壤腐殖酸、有机质的形成，进而促进了土壤大粒径团聚体的形成，提高了土壤孔隙度，土壤通气透水性显著增强，并且不同植被类型根系形态结构差异明显，对土壤结构性改善作用也存在差异<sup>[28]</sup>。本研究中裸地的土壤容重最大、大粒径土壤团聚体含量最低，盐地碱蓬地次之，白茅地最小，这表明裸地的土壤结构处于板结状态，其透气性较差，盐地碱蓬地与之相比有一定程度的改善，而白茅地的生长对盐碱地的改土效果最好，这与杨策等<sup>[7]</sup>研究的盐地碱蓬等植株能够改善土壤结构、降低土壤容重的结果相一致。同时，大粒径团聚体对于维持土壤结构稳定性具有重要的作用，其含量越高，土壤的抗侵蚀能力越强。本研究对不同植被类型盐碱地中不同土壤深度的团聚体含量进行测定，结果显示裸地的土壤团聚体以小粒径团聚体为主，盐地碱蓬地和白茅地的土壤以大粒径团聚体为主，其中，白茅地中的大粒径团聚体含量最高。这表明白茅地土壤结构的改善程度最大，能够很好地增强土壤抗侵蚀能力。

土壤容重和孔隙度与其渗透性紧密相关，并且土

壤渗透性作为土壤物理结构的一项重要指标,渗透性越强,入渗率越大,土壤中盐分运移也就越快。不同植被类型盐碱地(裸地、盐地碱蓬地、白茅地)中的土壤逐渐疏松,其容重逐渐降低,孔隙度逐渐增加等变化提高了土壤的导水性<sup>[5]</sup>。本研究中裸地的土壤容重高、渗透性能差,其盐分淋洗较为困难,土壤含水量在水分入渗后只在土壤表层有较小幅度的增加,矿化度 5、10 g/L 咸水入渗后,盐分在土壤表层有一定程度的滞留,增加了表层土壤含盐量;而盐地碱蓬地的土壤结构得到明显的改善,其相对于裸地的土壤容重显著降低,入渗完成后的土壤含水量在 0~20、20~40 和 40~60 cm 深度均有所增加。白茅地的土壤结构特性最佳,由于白茅生长根系生物量大,对土壤结构的改善效果最好,前期相同降雨条件下,水分的入渗性能最佳,盐分淋洗效果显著,因此该地块土壤初始含盐量最低,咸水入渗完成后,各层的土壤含水量也相对最高,并且相对于入渗前,土壤盐分的淋洗效果受到咸水矿化度的影响不敏感。

在盐碱地改良的过程中,土壤的板结现象较为严重,土壤容重较大使得土壤孔隙度较小,水分不容易向下层入渗,无法对盐分进行充分淋洗,同时淡水资源日益不足是制约盐碱地改良的关键。因此,在上述条件下,利用当地适应性强的耐盐植物的生长改善盐碱地土壤结构,再结合咸水入渗盐碱地可以取得更好的改良效果。本研究中不同矿化度的咸水在土壤入渗特性较淡水强,并且能够取得较好的盐分淋洗效果。戴继航等<sup>[29]</sup>在研究咸水入渗土壤的过程中,发现咸水的入渗过程是由咸水中离子和土壤中离子共同作用的结果,促进了土壤团聚体的形成,改善了土壤结构,提高了咸水的入渗率和累积入渗量,本研究结果与上述研究一致,但相对于咸水矿化度,植物对土壤结构的改善和对水分入渗特性的影响则更为显著。

## 4 结论

1) 同一典型植被地块中水分的初始入渗率、稳定入渗率和累积入渗量随咸水矿化度的升高逐渐增大,不同地块中上述入渗特性参数由大到小分别为白茅地、盐地碱蓬地和裸地。

2) 入渗前,不同典型植被地块中土壤含盐量由高到低分别为裸地、盐地碱蓬地和白茅地,入渗后,裸地表层土壤含盐量随咸水矿化度的升高而增大;盐地碱蓬地表层土壤含盐量显著降低,白茅地表层土壤盐分最低,且土壤盐分淋洗对咸水矿化度的影

响不敏感。

3) 滨海盐碱地水分入渗特性受植被类型的影响程度要大于咸水矿化度。

## 参考文献:

- [1] 孙甲霞,康跃虎,胡伟,等. 滨海盐渍土原土滴灌水盐调控对土壤水力性质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 107-112.
- [2] 冯伟,刘忠宽,刘振宇,等. 河北省盐碱地分布成因及改良利用技术研究[J]. 河北农业科学, 2015, 19(1): 56-60.
- [3] 李宪,李亚光. 不同矿化度咸水冬季结冰灌溉对滨海盐碱土的改良效果[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 64-68.
- [4] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [5] 李晓彬,康跃虎. 滨海重度盐碱地微咸水滴灌水盐调控及月季根系生长响应研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 112-121.
- [6] 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[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 506-510.
- [7] 杨策,陈环宇,李劲松,等. 盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1578-1586.
- [8] Meiri A, Frenkel H, Mantell A. Cotton response to water and salinity under sprinkler and drip irrigation[J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(1): 44-50.
- [9] Malash N M, Ali F A, Fatahalla M A, et al. Response of tomato to irrigation with saline water applied by different irrigation methods and water management strategies[J]. *International Journal of Plant Production*, 2008, 2(2): 101-116.
- [10] Hasanuzzaman M, Nahar K, Alam M M, et al. Potential use of halophytes to remediate saline soils[J]. *BioMed Research International*, 2014, 2014: 589341.
- [11] 樊贵盛,李尧,苏冬阳,等. 大田原生盐碱荒地入渗特性的试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 63-70.
- [12] 邹桂梅,苏德荣,黄明勇,等. 人工种植盐地碱蓬改良吹填土的试验研究[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 51-56.
- [13] 李从娟,孙永强,范敬龙,等. 盐地碱蓬在高盐碱土环境中的生态学意义[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1160-1166.
- [14] 潘洁,王立艳,肖辉,等. 滨海盐碱地不同耐盐草本植物土壤养分动态变化[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 168-172.
- [15] 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[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4): 73-77.
- [16] 林叶彬,顾卫,许映军,等. 冬季咸水冰覆盖对滨海盐渍土的改良效果研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 18-25.
- [17] 史晓楠,王全九,苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 516-520.

- [18] 郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 84-87.
- [19] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.
- [20] Bustan A, Cohen S, Malach Y D, et al. Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(2): 123-134.
- [21] 马东豪. 土壤水盐运移特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [22] 朱瑾瑾, 孙军娜, 张振华, 等. 咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 113-117, 122.
- [23] 郭凯, 张秀梅, 刘小京. 咸水结冰灌溉下覆膜时间对滨海盐土水盐运移的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1202-1212.
- [24] 郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 等. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1016-1024.
- [25] 张秀梅, 郭凯, 谢志霞, 等. 冬季咸水结冰灌溉下滨海重盐碱地土壤水盐动态及对棉花出苗和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1310-1314.
- [26] 封晓辉, 张秀梅, 刘小京, 等. 滨海重盐碱地人工栽植柽柳生长动态及生态效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1233-1240.
- [27] Lai J B, Ren L. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(6): 1667-1675.
- [28] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征[J]. 林业科学, 2011, 47(4): 95-100.
- [29] 戴继航, 张金龙, 李婧男, 等. 咸水淋洗改良滨海盐渍土的潜力研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 250-253.