

DOI: 10.11766/trxb202105180262

周宾, 胡树文. 不同种稻年限对苏打盐碱土孔隙和入渗性能的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 99–105.

ZHOU Bin, HU Shuwen. Effect of Different Rice Planting Years on Pore and Infiltration Properties of Soda Saline-alkali Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 99–105.

不同种稻年限对苏打盐碱土孔隙和入渗性能的影响*

周 宾¹, 胡树文²

(1. 太原科技大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100091)

摘 要: 已有的科学研究和生产实践表明, 种植水稻可以有效改良东北苏打盐碱土。但种植水稻是如何影响土壤结构和入渗性能来改良盐碱地的相关研究还比较缺乏。采用压汞法研究不同种稻年限土壤的微观孔隙变化, 并通过土柱实验研究土壤入渗性能的差异, 明确了种植水稻对盐碱土结构和入渗性能的影响。研究表明: 土壤平均孔径随种植年限增加, 种植 7a 的土壤平均孔径较 1a 的土壤增加了 0.808 μm ; 土壤比表面积随种植年限的增加降低, 种植 7a 的土壤比表面积较 1a 的土壤降低了 0.087 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$; 土壤孔隙率随种植年限增加, 种植 7a 的土壤孔隙率较 1a 的土壤增加了 8.35%。随着种植年限的增加, 小孔隙数量减少, 大中孔隙数量不断增加, 种植 7a 的土壤孔隙在 30~75 μm 和 75~200 μm 这两个范围内的占比最大, 分别为 28.25%和 12.45%。土壤入渗性能也显著提高, 种植 7a 的土壤稳定入渗速率较荒地提高了 107 倍。盐碱地通过种植水稻, 有利于土壤孔隙的形成和小孔隙数量减少, 大中孔隙数量增加。土壤孔径和孔隙率的增加, 有效改善了土壤结构, 提高了土壤入渗性能。盐碱土壤盐分向下淋洗的速率增加, 提高了土壤耕作层的脱盐效率。

关键词: 苏打盐碱土; 种稻; 微观孔隙; 土壤入渗

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effect of Different Rice Planting Years on Pore and Infiltration Properties of Soda Saline-alkali Soil

ZHOU Bin¹, HU Shuwen²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100000, China)

Abstract: 【Objective】The existing scientific literature and production practice have proved that rice planting can effectively improve soda saline-alkali soil. However, there is still a lack of research on how rice planting affects soil structure and infiltration performance to improve saline-alkali land. 【Method】In this paper, the pressurized mercury method was used to study the micro-pore changes of soil in different years of rice planting and the difference of soil infiltration performance was studied by soil column experiment, to clarify the influence of rice planting on the change of saline-alkali soil structure and infiltration performance. 【Result】The result show that the average pore size of soil increased with an increase in the planting years. Specifically, the average pore size of soil in the 7th year increased by 0.808 μm compared with that in the 1st year. Also, the

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0501205)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No.2016YFC0501205)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shuwenhu@cau.edu.cn

作者简介: 周 宾 (1992—), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 研究方向为土壤修复与改良。E-mail: 1063782420@qq.com

收稿日期: 2021-05-18; 收到修改稿日期: 2022-03-08; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-04-25

specific surface area of soil decreased with an increase in planting years, and the specific surface area of soil after 7 years was decreased by $0.087\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ compared with that after one year. Soil porosity increased with the planting years, and the soil porosity after 7 years was increased by 8.35% compared with that in the 1st year. With the increase of planting years, the number of small pores decreased while that of large and medium pores increased. The pore size of the soil planted for 7 years was 28.25% (ranging from 30~75 μm) and 12.45% (ranging from 75~200 μm). Also, the infiltration performance of the soil was also significantly improved. The steady infiltration rate of soil planted for 7 years was 107 times higher than that of waste land. 【 Conclusion 】 Planting rice in saline alkali land is conducive to the formation of soil pores and the transformation from small pores to large and medium pores. The increase of soil pore size and porosity can effectively improve soil structure and improve soil infiltration performance. Under the experimental conditions, the leaching rate of salt in saline-alkali soil was increased, thereby enhancing the desalination efficiency of the soil tillage layer.

Key words: Soda Saline-Alkali soil; Planting rice; Micro pore; Soil infiltration

随着目前世界农业发展遇到的耕地面积减少, 土地退化等问题, 世界各国都重点关注通过盐碱地的改良利用来提高土壤耕地面积。吉林省西部盐碱土属于内陆苏打型, 是盐碱土类型中改良利用难度最大的土壤类型^[1]。松嫩平原西部盐碱地面积从 1954 年到 2005 年面积增加了 69.597hm^2 , 保持了每年 1% 的增长^[2]。科学研究和生产实践表明, 通过在苏打盐碱地种植水稻是一条行之有效的方法。通过种植水稻能够分解土壤中的有机物, 产生大量有机酸及中间代谢产物, 中和土壤的碱性^[3]。种植水稻过程中保持淹水条件不仅可以起到压盐排碱的作用, 通过保持水层还可以减少盐分蒸发向上迁移^[4]。水稻种植期间的耕作、灌排等能够有利于土壤耕层的淡化。我国从 1953 年开始在吉林省前郭县研究种稻改良试验, 陈恩凤等^[5]的研究表明通过种稻改良, “排水洗盐” 效果明显, 土壤含盐量和矿化度均呈现降低趋势。20 世纪 70 年代, 尚庆昌等^[6]进行了水稻育秧床土调酸技术研究, 极大推动了苏打盐碱地种稻改良技术。赵兰坡等^[7]通过在前郭县盐碱地的研究, 提出了建立盐碱地“淡化表层” 的评价体系。Hayward 和 Wadleigh^[8]探究了在滨海盐碱土中燕麦糠减少植物盐离子胁迫的潜在价值。目前, 对于土壤入渗问题的研究大多以非盐碱土居多。解文艳和樊贵盛^[9]针对土壤结构和质地对入渗速率的影响进行研究。袁建平等^[10]针对黄土高原小流域进行了入渗试验, 研究了不同耕作方式对土壤入渗的影响。王雪和樊贵盛^[11]认为在原生盐碱荒地的土壤中掺入石膏对入渗性能提高最大, 不过该研究改变了原生土壤结构, 属于扰动土壤的入渗研究。

对于盐碱地而言, 不同土壤孔径的组成和分布直接影响了土壤结构的好坏, 进而影响土壤入渗性能, 决定土壤淋洗排盐的效率^[12]。土壤孔隙能够真实反映土壤结构状况, 应作为土壤结构研究的重点^[13]。随着技术的发展, 土壤孔隙的测定也由之前的间接计算变为直接测定方法, 具体包括土壤切片分析、X 射线扫描土壤断面、压汞法, 气体吸附法测定等^[14]。王清和王剑平^[15]应用分形几何的无标度概念, 实测了土壤的孔隙分布情况, 提出黏性土的孔隙划分界限。熊承仁等^[16]利用 SEM 照片获取了黏性土的孔隙结构参数。冯杰和郝振纯^[17]利用 CT 扫描得到了土壤断面大孔隙的分形维数, 分析了分形维数随土壤深度的变化。

本文通过对比不同种稻年限的盐碱土壤的孔隙组成和入渗性能指标, 探究不同种稻年限对盐碱土壤孔隙和入渗性能的影响, 进一步探究种稻对苏打盐碱土的改良作用机理, 为改良盐碱地提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省白城市通榆县境内, 属中温带半干旱大陆性季风气候区, 年均气温 5.1℃ , 春秋干旱多风, 夏季炎热多雨。年均降水 407.6mm , 春冬降水少, 夏秋降水集中, 尤其是 7、8 月份占全年降水的 70% 左右, “十春九旱” 构成了通榆气候的特点^[18]。该地地下水埋深为 1~3 m, 矿化度为 $0.5\sim 3.0\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 属于弱矿化类型^[19]。供试土壤质地为砂

质黏壤土^[20]，砂粒占比 54.12%，粉粒占比 18%，黏粒占比 27.88%，土壤容重为 $1.57\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，比重为 $2.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。该试验区为典型的苏打盐碱土，主要盐分为 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子。该试验区荒地 pH 为 10.08，EC 为 $0.42\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，碱化度为 39.83%。当地基本于每年 5 月底进行灌水泡田，6 月初进行插秧，复合肥（12-19-14）用作底肥，水稻不同生育期用硫酸铵进行追肥，期间正常田间管理。

1.2 试验设计

田间试验：通过走访当地群众选取取样地块，保证相同的考虑地形等外部环境因素。对同一农户种植的不同开发年限的盐碱地水稻田块进行取样，保证了不同地块种植条件差异较小。采集的土壤种稻年限分别为：1a、3a、5a、7a。于 2018 年 9 月 25 日水稻收获之后各随机选取 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 地块，对不同地块沿对角线用环刀进行三次取样，取样深度为 0~20 cm，取样完成用塑料薄膜包裹环刀，运输过程中防止挤压土壤，在实验室通过压汞法对土壤孔隙进行测定。

土柱实验：用 PVC 管（高度 20 cm，内径 10 cm）对选取的 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 地块耕层土壤和未开发的荒地（CK）进行取样，沿对角线取样三次，用塑料薄膜进行封口，带回实验室装填进有机玻璃管内（高度 40 cm，内径 10 cm）。用 200 目的滤布封住有机玻璃管底口，在滤布上垫少量石英砂作为反滤层。利用马氏瓶稳定供水，保持土层上 4 cm 的供水水头，测定土壤入渗的相关数据。该实验进行三次重复。

1.3 测定指标和方法

土壤孔隙：压汞法测定原理大致认为多孔材料的内部孔隙分布是呈现大小不等的连通性的圆柱

状，每条孔隙均能达物品外表面，能够与汞蒸汽直接接触，使汞蒸气能够进入孔隙，根据 Washburn^[21] 公式进行孔隙度计算：

$$r = \frac{-4\beta \cos \theta}{P}$$

式中， r 为孔径（nm）； P 为进汞压力（MPa）； β 为汞的表面张力（ $0.485\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ）； θ 为汞与孔隙接触角（ 140° ）。

入渗特征指标：不饱和土壤的入渗速率、土壤湿润锋深度、稳定入渗速率。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2013 进行处理，采用 SPSS 软件进行数据分析统计，试验结果采用 Origin8.1 作图。

2 结果与讨论

2.1 不同种植年限对土壤孔隙的影响

土壤孔隙是水分运动和储存的场所，直接影响土壤入渗性能，针对盐碱地而言，良好的土壤孔隙分布能够有效地增加盐分的淋洗，提高土壤表层脱盐速率，毛管孔隙的减少，能破坏盐分上行的通道，有效防止土壤返盐的发生^[22]。土壤孔隙的变化情况是盐碱地改良的重要指标之一。

表 1 是通过压汞法测定的关于不同种植年限下的 0~200 μm 的微观孔隙的比表面积、平均孔径、孔隙率等的参数。土壤平均孔径不断增加，种植 3a、5a、7a 较 1a 分别增加了 0.07 μm 、0.25 μm 、0.808 μm ，

表 1 比表面积、孔隙率及平均孔径

Table 1 Specific surface area, porosity and average pore size

种植年限 Planting age/a	深度 Depth/cm	比表面积 Specific surface area/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	平均孔径 Average pore size/ μm	孔隙率 Porosity/%
1	10	0.173±0.015a	0.156±0.080a	35.47±0.50a
3	10	0.149±0.010a	0.226±0.050a	40.52±0.60b
5	10	0.117±0.006b	0.406±0.070b	42.68±0.50c
7	10	0.086±0.013c	0.964±0.130c	43.82±0.70c

其中种植 1a 和 3a 差异不明显, 种植 5a 和 7a 较 1a 和 3a 年限差异明显。土壤比表面积随种植年限的增加不断降低, 种植 3a、5a、7a 的比表面积较第 1 年的降低了 $0.024 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.056 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.087 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 其中种植 1a 和 3a 差异不明显, 种植 5a 和 7a 较 1a 和 3a 差异明显。随着种植年限的增加, 土壤孔隙率不断增加, 种植 3a、5a、7a 较 1a 分别增加了 5.05%、7.21%、8.35%, 且与 1a 均差异明显, 种植 5a 和 7a 之间差异不明显。其中, 种植 7a 孔隙率较 5a 虽然只增加了 1.14%, 平均孔径却从 $0.406 \mu\text{m}$ 增加到 $0.964 \mu\text{m}$, 说明可能是由于中小孔隙逐渐转变为大孔隙。

图 1 可以较为直观地表征土壤孔径的分布情况。峰值所对应的数值可以认为是土壤多数孔径的分布情况。从图中可以看出, 随着种植年限的增加, 峰值不断右移, 说明土壤孔径不断增大。种植 7a 的土壤孔径两个峰值分别对应 $20 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$, 说明种植 7a 的土壤孔隙集中分布于 $20 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 。

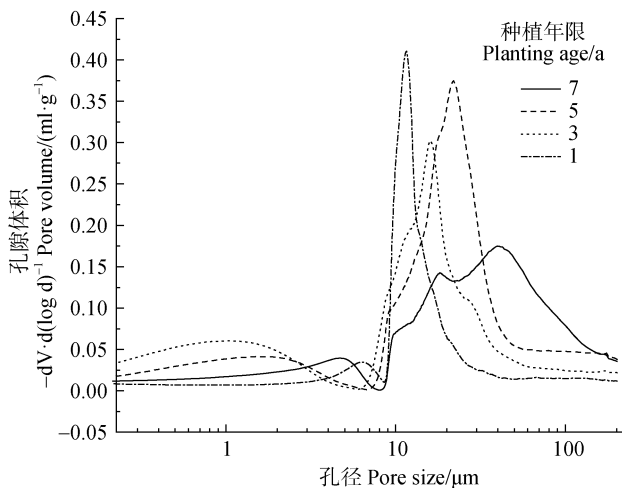


图 1 不同种植年限土壤孔径分布

Fig. 1 Soil pore distribution in different planting years

图 2 是通过压汞法测定土壤孔隙后, 参考美国土壤学会土壤分级占比对土壤孔隙进行分类^[23]。从图中可以看出, 在 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 土壤孔隙范围内所占比例分别为 10.42%、5.32%、5.26%、5.83%, 随着种植年限的增加, 集中在这一范围内的小孔隙数量不断减少; 在 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ 范围内, 变化规律同上, 种植 7a 土壤孔隙所占比例最小, 为 12.96%; 在 $5 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内, 不同种植年限的土壤孔隙占比差别不

大, 种植 3a 和 5a 的土壤孔隙占比较 1a 增加了 10.22%和 10.65%; 在 $30 \sim 75 \mu\text{m}$ 范围内, 种植 7a 的土壤在这一范围内的孔隙占比较其他年限分别提高了 23.77%、16.31%、8.9%; 在 $75 \sim 200 \mu\text{m}$ 范围内, 种植 7a 的土壤在这一范围内的孔隙占比较其他种植年限分别提高了 12.19%、6.89%、3.37%。种植 7a 的土壤在 $30 \sim 75 \mu\text{m}$ 和 $75 \sim 200 \mu\text{m}$ 的范围内的占比最大, 分别为 28.25%和 12.45%。

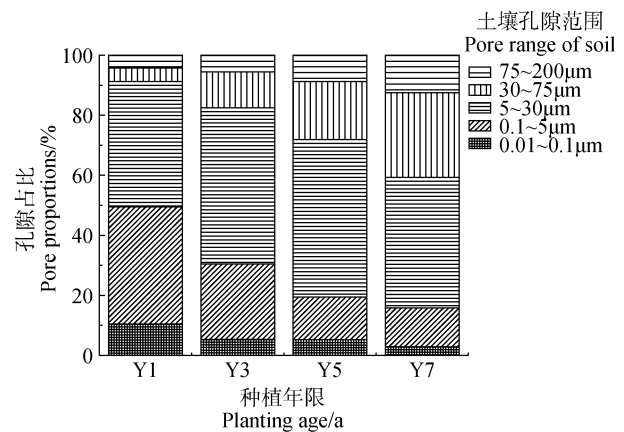


图 2 不同种植年限处理土壤孔隙组成

Fig. 2 Soil pore composition in different planting years

通过分析不同种植年限土壤的孔隙分布和占比可以发现, 随着种植年限的增加, 土壤中的无效孔隙 (当量孔径 $< 2 \mu\text{m}$) 占比不断减小, 大中孔隙占比不断增加, 其中种植 7a 的土壤大孔隙所占比例最高。

通过对土壤质地进行测定, 分析表 2 可以发现土壤黏粒含量随种稻年限增加不断降低, 土壤粉粒含量不断增加, 土壤砂粒含量变化不明显。其中, 种植 5a 以上的土壤粉粒和黏粒含量较其他年限的土壤差异显著, 种植 5a 和 7a 的土壤颗粒组成差异不明显。说明一方面随着种稻年限的增加, 可能导致土壤颗粒不断团聚, 小颗粒逐渐团聚成大中颗粒。另一方面可能是种稻淹水条件下土壤小颗粒被淋洗至下部, 大颗粒的比例增加。随着小颗粒占比的不断减少, 土壤比表面积不断降低。土壤孔隙的增多和孔隙率增加, 能够有效改善土壤结构。黏粒含量降低, 土壤胶结能力减弱, 有利于土壤孔隙的形成, 小孔隙减少, 大中孔隙增加。另一方面, 随种稻年限的增加, 土壤盐碱胁迫不断减弱, 有利于水稻生长和水稻根系的延伸发育, 形成一定规模的根系,

能够增加土壤大孔隙数量。

表 2 不同种植年限土壤颗粒组成

Table 2 Soil particle composition in different planting age			
种植年限 Planting age/a	颗粒组成 Soil particle composition		
	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%
1	53.90±0.41a	20.30±0.50a	25.80±0.41a
3	54.00±0.65a	21.00±0.40a	25.00±0.33a
5	54.40±0.44a	22.40±0.58b	23.20±0.42b
7	54.60±0.52a	23.00±0.42b	22.40±0.40b

2.2 不同种植年限对土壤入渗特征指标的影响

土壤入渗是指水分从土壤表面渗入土壤内部的现象，是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的重要环节^[24]。盐碱地因为土壤入渗性差，土壤板结严重，盐分难以向下淋洗。土壤入渗性能直接影响了盐碱地盐分淋洗和脱盐的效率。

从图 3 分析可知，CK 的土壤湿润锋和种植 1 a 的土壤湿润锋推进速度较慢，200 min 以后土壤湿润锋基本不再下移。种植 3 a 的土壤湿润锋 500 min 后基本达到 20 cm 的底部；种植 5 a 和 7 a 的土壤湿润锋在 100 min 左右即达到底部，且无明显差异。

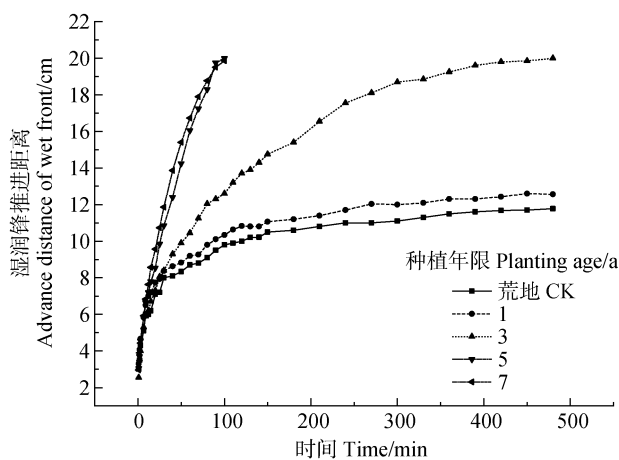


图 3 湿润锋推进距离与时间的关系

Fig. 3 The relationship between the advance distance of wet front and time

从图 4 分析得知，0~15 min 为初始入渗阶段，水分入渗锋面快速延伸，入渗速率递减。15 min 以后入渗速率递减，逐渐趋于平稳。可以看出随着种植年限的增加，土壤入渗速率也是不断增加。

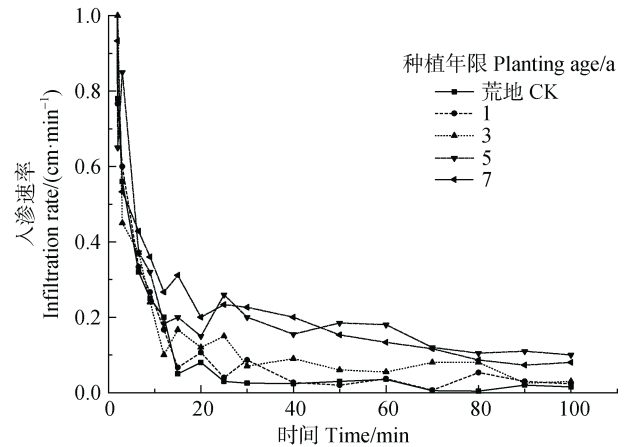


图 4 入渗速率与时间的关系

Fig. 4 The relationship between infiltration rate and time

待土柱达到稳定入渗时测定其稳定入渗速率，从图 5 分析可以发现，随着种植年限的增加，土壤稳定入渗速率也呈现增加趋势。其中，CK 和种植 1 a 的土壤稳定入渗速率较低，分别为 $0.007 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.011 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，且差异性不显著。种植 3 a 的土壤的稳定入渗速率为 $0.12 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，与其他种植年限土壤入渗速率差异显著。种植 5 a 和 7 a 的土壤的稳定入渗速率分别为 $0.69 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.75 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，且差异性不显著。种植 7 a 的土壤稳定入渗速率较荒地提高了 107 倍。

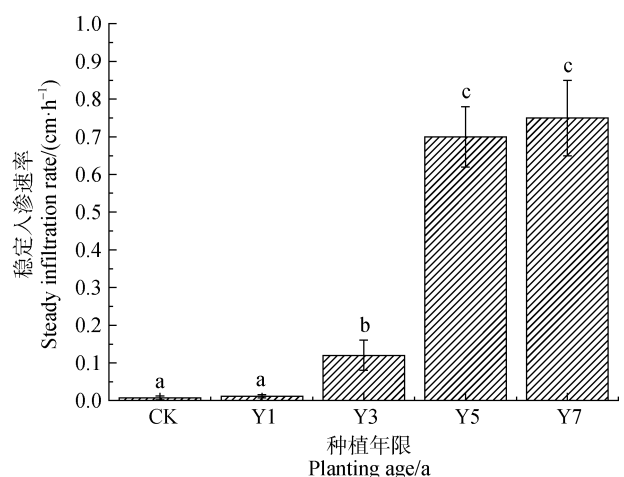


图 5 稳定入渗速率与不同种植年限的关系

Fig. 5 The relationship between steady infiltration rate and different planting age

CK 和种植 1 a 的土壤入渗速率明显较低，可能是由于土壤容重较大，有机质含量低，团粒结构稳定性低，表层团粒遇水容易溃散，水分入渗时会沉

积在大孔隙中阻碍水分入渗,分散的黏粒也会在土壤表面形成致密层,导致入渗能力变差^[25]。另一方面土壤钠质化严重,土壤胶体上吸附的交换性钠离子浓度高,导致土壤胶体水化度增大,土壤胶体高度分散,阻碍水分入渗^[26]。随着水稻种植年限的增加,形成了“淡化表层”,有机质含量增加,土壤碱化度降低,土壤结构改善,孔隙率和孔径增加,导致土壤入渗性能不断提高。对盐碱地而言,入渗性能的提高,能够加快土壤表层脱盐,加速盐分向下淋洗的速率,达到改良盐碱地的目的。

3 结 论

随着种植年限的增加,土壤结构不断改善。土壤平均孔径不断增加,种植 7 a 的土壤平均孔径较 1 a 增加了 0.808 μm 。土壤比表面积随种植年限的增加不断降低,种植 7a 的土壤比表面积较 1 a 降低了 0.087 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。土壤孔隙率不断增加,种植 7 a 的土壤孔隙率较 1 a 增加了 8.35%。随着种植年限的增加,在 30~75 μm 和 75~200 μm 范围内的土壤孔隙占比不断增加,种植 7a 的土壤孔隙在这两个范围内的占比最大,分别为 28.25%和 12.45%。土壤入渗性能随种植年限的增加变化明显。除种植 1a 的土壤较荒地土壤入渗性能无显著差异外,其他种植年限的土壤入渗性能较荒地均有显著提高。种植 7a 的土壤稳定入渗速率较荒地提高了 107 倍。盐碱地通过种植水稻,有利于土壤孔隙的形成和小孔隙减少,大中孔隙增加。土壤孔径和孔隙率的增加,有效改善了土壤结构,提高了土壤入渗性能。盐碱土壤盐分向下淋洗的速率增加,提高了土壤耕作层的脱盐效率。证明在东北苏打盐碱地种稻改良是一条行之有效的办法。

参考文献 (References)

[1] Li Q S, Li X J, Li X J, et al. Sodium bicarbonate soil management and utilization in Songnen Plain[J]. Resources Science, 2003, 25 (1): 15—20. [李取生, 李秀军, 李晓军, 等. 松嫩平原苏打盐碱地治理与利用[J]. 资源科学, 2003, 25 (1): 15—20.]

[2] Yang F, Wang Z C, Ma H Y, et al. Research and integrated demonstration of ecological amelioration techniques of saline-sodic land in northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (22): 7054—7058. [杨帆, 王志春, 马红媛, 等. 东北苏打盐碱地生态治理关

键技术研发与集成示范[J]. 生态学报, 2016, 36 (22): 7054—7058.]

[3] Wang C Y. The discussion on ecological amelioration of salt-effected soil under growing rice condition[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33 (2): 94—95. [王春裕. 论盐渍土之种稻生态改良[J]. 土壤通报, 2002, 33 (2): 94—95.]

[4] Sun B, Xie J C, Wang N, et al. Effect of straw mulching on water-salt dynamic of saline soil. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29 (4): 180—184. [孙博, 解建仓, 汪妮, 等. 秸秆覆盖对盐渍化土壤水盐动态的影响. 干旱地区农业研究, 2011, 29 (4): 180—184.]

[5] Chen E F, Wang R Y, Hu S M, et al. Improvement of soda saline soil in qianguoqi irrigation area of Jilin Province[J]. Acta Pedologica Sinica, 1962, 10 (2): 201—214. [陈恩凤, 王汝庸, 胡思敏, 等. 吉林省前郭旗灌区苏打盐渍土的改良[J]. 土壤学报, 1962, 10 (2): 201—214.]

[6] Shang Q C, Sun J S, Wang Z J. Study on acid regulation of rice seeding bed soil in greenhouse in soda saline alkali soil area[J]. Utilization of saline-alkali land, 1986, 16 (1): 23—27. [尚庆昌, 孙景双, 王志军. 苏打盐碱土区水(禾刀)大棚盘育苗床土调酸的研究[J]. 盐碱地利用, 1986, 16 (1): 23—27.]

[7] Zhao L P, Feng J, Wang Y, et al. Theoretical and technological problems in the development of planting paddy in saline-alkali land of Songnen Plain[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2012, 34 (3): 237—241. [赵兰坡, 冯君, 王宇, 等. 松嫩平原盐碱地种稻开发的理论与技术问题[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34 (3): 237—241.]

[8] Hayward H E, Wadleigh C H. Plant growth on saline and alkali soils[J]. Advances in Agronomy, 1949, 1: 1—38.

[9] Xie W Y, Fan G S. Influence of soil structure on infiltration characteristics in field soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35 (5): 537—540. [解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35 (5): 537—540.]

[10] Yuan J P, Zhang S L, Zhang C Y, et al. Spatial variation of steady water infiltration rates of small watershed in hilly and gully loess region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38 (4): 579—583. [袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J]. 土壤学报, 2001, 38 (4): 579—583.]

[11] Wang X, Fan G S. Study on measures for improving infiltration capability of original saline-alkali wasteland soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28 (6): 46—49. [王雪, 樊贵盛. 改善原始盐碱荒地入渗能力措施的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28 (6): 46—49.]

[12] She D L, Liu Y Y, Yu S G, et al. Comparison of soil hydraulic properties under different land use pattern[J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (9): 175—179, 186. [余冬立, 刘营营, 俞双恩, 等. 不同土地利用方式下土壤水力性质对比研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 175—179, 186.]
- [13] Sun M, Huang Y X, Sun N, et al. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46 (1): 233—238. [孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46 (1): 233—238.]
- [14] Cheng Y N, Liu J L, Zhang J B. Advance in the study on quantification of soil pore structure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43 (4): 988—994. [程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43 (4): 988—994.]
- [15] Wang Q, Wang J P. A study on fractal of porosity in the soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (4): 496—498. [王清, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (4): 496—498.]
- [16] Xiong C R, Tang H M, Liu B C, et al. Using SEM photos to gain the pore structural parameters of soil samples[J]. Earth Science, 2007, 32 (3): 415—419. [熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛, 等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. 地球科学, 2007, 32 (3): 415—419.]
- [17] Feng J, Hao Z C. Study on application of fractal theory to describe soil macropore structure[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19 (S1): 270—274. [冯杰, 郝振纯. 分形理论在描述土壤大孔隙结构中的应用研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19 (S1): 270—274.]
- [18] Wang J, Dun Y L, Guo Y Q, et al. Effects of land consolidation on improvement of salinity soil in Western Songnen Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (18): 266—275. [王军, 顿耀龙, 郭义强, 等. 松嫩平原西部土地整理对盐渍化土壤的改良效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 266—275.]
- [19] Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (9): 1233—1245. [李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67 (9): 1233—1245.]
- [20] Yao R J, Yang J S, Liu G M. Characteristics and agro-biological management of saline-alkalized land in northeast China[J]. Soils, 2006, 38 (3): 256—262. [姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 东北地区盐碱土特征及其农业生物治理[J]. 土壤, 2006, 38 (3): 256—262.]
- [21] Washburn E W. The dynamics of capillary flow[J]. Physical Review, 1921, 17 (3): 273—283.
- [22] Zhao W J, Ma H, Fan Y W, et al. Study on the characteristics of water and salt transport in sandy loam soil under different mulching models[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (3): 331—336. [赵文举, 马宏, 范严伟, 等. 不同覆盖模式下砂壤土水盐运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (3): 331—336.]
- [23] Ringrose-voase A J, Bullock P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs[J]. Journal of Soil Science, 1984, 35 (4): 673—684.
- [24] Liu M X, Du W Z, Zhang H L. Research on the soil infiltration capacity of different forest types in the Three Gorges reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22 (3): 299—306. [刘目兴, 杜文正, 张海林. 三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (3): 299—306.]
- [25] Xu S. Effects of chemicals on soil aggregates stability and their other physical characters[D]. Shaanxi: Northwest A & F University, 2015. [徐爽. 化学物质对土壤团聚体稳定性及其它物理性状的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015]
- [26] Wang C X, Wang Q J, Lü T B, et al. The studies of infiltration characteristics on sandy saline alkali soil by chemical amelioration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (1): 31—35. [王春霞, 王全九, 吕廷波, 等. 添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (1): 31—35.]

(责任编辑: 檀满枝)