

不同改良措施对苏打盐渍土物理性质的影响

杨洪涛^{1,2} 安丰华¹ 张璐^{1,2} 赵丹丹^{1,2} 朱文东^{1,2} 杨帆¹ 王志春^{1*}

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 长春 130102; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 苏打盐渍土因其交换性钠含量较高而具有极差的物理性质, 而恶劣的土壤物理性质是苏打盐渍土逆境胁迫的重要因素。苏打盐渍土在所有盐渍土类型中属于改良与利用难度最大的土壤类型。目前, 对于松嫩平原苏打盐渍土不同改良措施处理后的土壤水盐动态已有较清晰的认知, 而苏打盐渍土经过多年改良后的土壤物理性质变化规律尚鲜见报道。因此, 本研究将脱硫石膏、砂土、有机肥与大安站研制的改良剂脱碱一号等不同改良措施与种稻改良相结合, 对改良多年后土壤物理性质的变化进行了研究。结果表明, 不同理化改良措施均可显著影响苏打盐渍土的物理性质 ($P < 0.05$), 如不同改良措施均可使土壤容重降低 (0~40 cm)、土壤水分入渗速率显著增加 ($P < 0.05$)、土壤砂粒含量相对增加, 而黏粒含量则相对减少。综合考虑各试验处理对土壤物理性质的影响, 本研究认为脱碱一号对土壤物理性质的改善效果最好, 其次为有机肥, 而砂土对苏打盐渍土物理性质的改善效果最差。本研究结果可为松嫩平原苏打盐渍土的改良与利用提供基础数据支持。

关键词 苏打盐渍土; 改良措施; 土壤物理性质

Effects of different ameliorations on the physical properties of saline-sodic soil on the Songnen Plain. YANG Hong-tao^{1,2}, AN Feng-hua¹, ZHANG Lu^{1,2}, ZHAO Dan-dan^{1,2}, ZHU Wen-dong^{1,2}, YANG Fan¹, WANG Zhi-chun^{1*} (¹ Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; ² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Soil salinity-sodicity is a major factor leading to tremendous yield losses in many arid and semi-arid regions around the world. It is well recognized that saline-sodic soil is the most difficult to ameliorate and utilize. Extreme physical properties of saline-sodic soils, in most cases, result in soil conditions unsuitable for crop growth. Amelioration of saline-sodic soils can be accomplished using various methods. The dynamics of water and salt movement have been well documented in literatures. However, changes of soil physical properties of saline-sodic soils after ameliorating for several years have rarely been evaluated. A field experiment was conducted to evaluate the effects of five years amelioration by growing rice in conjunction with different physical/chemical materials, including desulfurization gypsum (GR), sand soil (SS), organic matter (OM), and an amendment (TJ, developed by Da'an sodic land experiment station), on the Songnen Plain, Northeast China. The results showed that physical properties of saline-sodic soil were significantly improved by the selected amelioration methods ($P < 0.05$). Soil clay particles were reduced significantly, while sand particles were significantly increased. Additionally, soil bulk density was significantly reduced and water infiltration rate was significantly increased. TJ showed the best effects in improving soil physical properties, then followed by OM. Furthermore, SS showed the lowest amelioration effects on soil physical properties. These findings would provide basic data support to saline-sodic soil management.

Key words: saline-sodic soil; amelioration; soil physical property.

国家自然科学基金项目(41571210, 41771250, 41701335)、国家重点研发计划项目(2016YFC0501200)、吉林省技术开发项目(20180201012SF)和国家科技基础专项(2015FY110500)资助。

收稿日期: 2019-01-22 接受日期: 2019-06-24

* 通讯作者 E-mail: wangzhichun@iga.ac.cn

世界范围内的盐碱地面积高达 1.0×10^{10} hm^2 , 约占陆地面积的 25%, 占全世界耕地面积的 76% (Malcolm *et al.*, 1998)。松嫩平原是我国苏打盐渍土集中分布区之一, 其土壤具有成土母质含盐量高、地下水埋深较浅、地势低洼、气候干旱与蒸发强烈等特点 (赵长巍, 2014; Yang *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018)。自 20 世纪下半叶以来, 由于农牧业高速发展与人口的急剧增长, 资源过度开发与利用, 加之气候日趋干旱, 导致松嫩平原盐渍化土地以每年约 1.7% 的速度增加 (林年丰等, 1999)。据统计, 目前松嫩平原盐渍化土地的面积约为 3.93×10^6 hm^2 (李晓燕等, 2005)。土壤盐渍化导致生态环境恶化, 局部地区形成大面积利用价值较低的碱斑裸地, 严重阻碍松嫩平原区域农业的可持续发展。因此, 盐渍化土地的改良对于维持和促进区域农业可持续发展具有重要意义 (赵长巍, 2014), 如何改良利用丰富的盐渍土资源一直是该区农业可持续发展研究所关注的难点和热点。苏打盐渍土作为一种重要的土地资源, 其改良、开发与利用成为一项迫切的任务。

苏打盐渍土中含有大量的黏土矿物 (孔元元, 2017), 土壤可溶性盐分组成中大量 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 的存在, 导致土壤矿物质受强碱性的影响而溶解度降低或有效性降低, 不利于作物的生长和产量形成 (Zhang *et al.*, 2010; Jogaiah *et al.*, 2014; Hashem *et al.*, 2015)。土壤盐渍化导致植被稀少, 生态环境脆弱、可利用土地资源减少。国内外学者围绕盐渍化土壤的改良与利用开展了大量的研究工作, 提出了许多改良理论与方法 (Qadir *et al.*, 2002; Akhter *et al.*, 2004; 张建峰等, 2005; Padmavathiamma *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2014; 唐珽等, 2017)。苏打盐渍土的形成原因及其特点决定了土壤中的盐分不可能根本消除 (赵长巍, 2014; 杨帆等, 2014), 因此通常在治理上采取以形成并维持土壤表层的淡化层为核心, 即通过调节水和盐等要素时空存在形式以实现时空分布调控, 协调植物与根系活动层之间的关系, 在随后的管理中, 根据“盐随水来, 盐随水去”的水盐运移规律, 以调控土壤水分运移为核心进而缓解土壤盐碱化程度 (王遵亲, 1993; 徐晓腾, 2011)。生产实践证明, 盐碱地开发种稻是一项成功的改良盐碱地的措施 (徐晓腾, 2011; 王帅等, 2017)。研究表明, 施用有机质对质地粘重的重度盐渍土或采取客土压砂, 或因地制宜施用脱硫石膏等改良措施均能起到改土肥田的作用 (王遵亲, 1993; Ahmad *et al.*, 2013;

Muhammad *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2014; 董宁等, 2018)。压砂、施加脱硫石膏以及有机质等改良重度苏打盐渍土有利于盐分淋洗、压碱, 并且土壤的水分和养分状况均可得到一定程度的改善, 为作物生长创造良好的条件 (刘兴土, 2001; 宋长春等, 2003; Srivastava *et al.*, 2014; 杨帆等, 2014; Muhammad *et al.*, 2018)。

松嫩平原苏打盐渍土改良与利用, 在土壤化学性质变化的研究已有大量的研究并取得了丰硕成果, 如王春裕 (2002)、徐晓腾 (2011)、张梅 (2015) 认为, 种植水稻可明显降低土壤表层可溶性盐含量。对苏打盐碱土而言, 由于土壤含有过高的交换性钠, 其逆境胁迫机制除了渗透胁迫、离子毒害和营养失衡的三种作用外, 恶化的土壤物理性质亦可对植物产生直接和间接的物理性限制, 也是苏打盐碱土逆境胁迫的重要原因。然而, 采用不同改良措施结合种稻改良重度苏打盐渍土多年后的土壤物理性质的变化规律尚鲜见报道。因此, 本研究选择重度苏打盐渍土为对象, 以多年种稻结合化学改良以及物理改良研究苏打盐渍土土壤物理性质的变化, 研究结果可为松嫩平原苏打盐渍土改良提供基础数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地简介

试验地点为中国科学院大安碱地生态试验站 ($45^{\circ}35'58''\text{N}$ — $45^{\circ}36'28''\text{N}$, $123^{\circ}50'27''\text{E}$ — $123^{\circ}51'31''\text{E}$), 位于松嫩平原西南、地处松嫩平原沉降中心的大安市安广镇, 是中度和重度苏打盐渍土的典型代表区域。大安市安广镇地处中温带大陆性季风区, 亦属于半湿润向半干旱气候过渡地带。年均降水量 413.7 mm。春季少雨, 降水主要集中于 7—8 月; 年均蒸发量约 1800 mm, 春季的最大蒸发量约为降雨量的 6 倍以上, 如 2000 和 2001 年的降水量分别为 375.5 和 315.1 mm, 年蒸发量达到了 1791.6 和 1876.5 mm。年平均气温 4.3°C 。全年光照充足, 无霜期达 137 d, 日照时数达 3014 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温为 2935 $^{\circ}\text{C}$ 。大安市盐渍土面积占全市总面积的 59%, 其中碱土面积占盐渍土面积的 77%, 且碱土以土壤理化指标最恶劣的苏打草甸碱土为主 (邓伟等, 2006; Wang *et al.*, 2018)。

于 2009 年在中国科学院大安碱地生态试验站, 选择重度盐碱地进行种稻改良结合物理化学措施对

表1 试验中采用的不同改良处理措施
Table 1 Amelioration methods in this study

试验处理	主要成分
对照 CK	无处理,即不施用任何改良剂
有机肥 OM	选用当地农家肥(腐熟羊粪)
脱硫石膏 GR	脱硫石膏,选自白城热电厂副产品
压砂 SS	当地风砂土
脱碱一号 TJ	钙源物质+砂土+农家肥

重度苏打盐渍土进行改良试验,试验小区原始植被以碱蓬以及碱斑裸地为主。采用的改良措施分别为(表1):压砂土改良(当地风砂土)、有机肥改良(腐熟羊粪)、脱硫石膏改良(火电厂脱硫废弃物)、脱碱一号(大安碱地生态试验站自主研发的苏打盐渍土快速改良剂)以及对照(无改良处理),每个改良处理重复3次,水稻品种为G19。

水稻灌溉水源为深层承压水(深度>100 m),水质见表2。2014年秋开展田间测试取样与测试工作,每个处理重复3次。主要测定的土壤物理性质包括土壤容重、土壤水分入渗速率、机械组成与土壤水分特征曲线。

各改良处理操作如下:

(1)对照处理为不作任何改良,人工搅浆排水2次后灌水沉淀插秧;

(2)脱硫石膏处理 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,然后人工搅浆深度20 cm,静止24 h后,排水,再灌水,再搅浆,再排水,再灌水,沉淀后插秧;

(3)压砂处理,在地表覆盖10 cm砂土,同上操作;

(4)有机肥(鲜重)处理 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,洗排2次后,施入有机肥,灌水搅浆沉淀后插秧;

(5)脱碱一号处理 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,而后人工搅浆深度20 cm,静止24 h后排水,再搅浆,再灌水,沉淀后插秧。

试验用水稻品种为G19。小区随机区组排列,3次重复,小区 $2 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 10 \text{ m}^2$ 。

1.2 采样与测试

于2009年(试验小区施工前)采集土壤样品用

于测定土壤背景值,主要测定了土壤容重、土壤孔隙度、饱和导水率以及土壤机械组成,土壤采样深度为0~100 cm(5层,分别为0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm)。本研究土壤采样与入渗测定时间为2014年秋季水稻收割10天后,此时稻田耕层土壤经强烈蒸发作用,已相对干燥。

土壤容重,环刀($V=100 \text{ cm}^3$)取原状土,采样深度为0~20和20~40 cm,每块试验小区采样重复1次;土壤水分特征曲线采用吸力平板仪(购自中国科学院南京土壤研究所)进行测定。首先环刀取原状土,采样深度为0~20 cm,每个试验小区重复一次,取样后用吸力平板仪测定不同吸力值条件下的土壤质量含水量。

水分入渗速率采用双环入渗仪(大环直径为40 cm,小环直径为20 cm,购自Tur-Tec International公司)测定,每5 min计数一次,每个试验小区测试一次,测试期间天气基本一致。

水稻灌溉用水与水分入渗测试时所用的水化学指标如表2所示,pH偏碱性,电导率低,水中以碳酸盐和碳酸氢盐为主,属于微咸水。

土壤机械组成采用激光粒度仪(Malvern MS-2000激光粒度分析仪)进行测定,采用《森林土壤颗粒组成的测定》(LY/T 1225—1999)进行分级。土壤采样深度为0~20 cm,采样后由中国科学院东北地理与农业生态研究所分析测试中心测定土壤机械组成。

2 结果与分析

2.1 试验小区土壤物理背景值

于2008年改良试验前取土样测定土壤物理背景值,主要测定了土壤容重、孔隙度、机械组成与饱和导水率等,具体结果见表3。

由表3可知,试验小区在进行改良前,0~10 cm的土壤容重在 $1.45 \sim 1.61 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,均值为 $1.54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,表明苏打盐渍土呈现高容重的特点;土壤孔隙度在39.25%~45.28%,均值为41.89%;土壤中砂粒含量均值为22.06%,粉粒含量为37.57%,黏粒

表2 试验水化学性质与试验用材料背景值

Table 2 Backgrounds of the experimental water and the amelioration materials

参数	试验用水								砂土		
	pH	EC ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)	Cl^- ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)	SO_4^{2-} ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)	Na^+ ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)	K^+ ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$)	砂粒 (%)	粉粒 (%)	黏粒 (%)
参数值	8.55	0.90	9.00	1.05	0.12	3.71	5.15	0.05	84.44	10.68	4.87

表3 试验小区土壤物理背景值

Table 3 Soil physical backgrounds in this study

深度 (cm)	容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度 (%)	砂粒 (%)	粉粒 (%)	黏粒 (%)	饱和导水率 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)
0~20	1.61	39.25	23.26	39.14	37.60	0.22
20~40	1.61	39.25	24.58	35.45	39.97	0.14
40~60	1.56	41.13	18.28	40.04	41.68	0.17
60~80	1.45	45.28	21.45	35.35	43.20	0.13
80~100	1.47	44.53	22.71	37.87	39.42	0.11
0~100	1.54	41.89	22.06	37.57	40.37	0.15

含量为 40.37%,以国际制分级法可将改良前的土壤鉴定为壤黏土;未改良前的土壤饱和导水率在 $0.11 \sim 0.22 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,均值为 $0.15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由此可见,未改良前的苏打盐渍土土壤质地粘重,透水性差。

2.2 不同改良对苏打盐渍土土壤容重的影响

土壤容重作为一个基本的土壤物理性质,对土壤的透气性、入参与持水能力以及溶质迁移等特征有重要影响。本研究中,不同改良显著降低了稻田土壤容重,表层(0~20 cm)土壤容重从大到小依次为:对照>砂土>脱碱一号>有机肥>脱硫石膏,在亚表层(20~40 cm)从大到小依次为:对照=脱硫石膏>砂土>有机肥>脱碱一号。不同改良处理条件下,脱硫石膏处理后的土壤容重值在两个采样深度中变异系数最大,达 5.08%;对照处理下的土壤容重在两个采样深度中的变异系数最小,为 0.55%(图 1)。

不同改良处理条件下的土壤容重在表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)均比初始条件下的土壤容重值低;其中在表层(0~20 cm)的脱硫石膏改良处理条件下的容重最低,只有 $1.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,相比于初始条件下的土壤容重值降低了 14.9%,相比于对

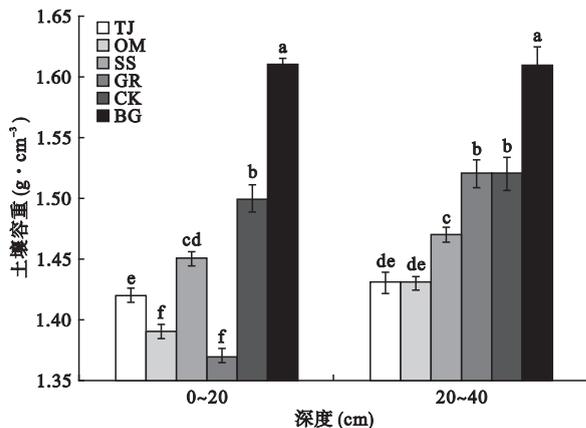


图1 不同改良处理条件下土壤容重

Fig.1 Soil bulk density of different amelioration methods

照降低了 8.67%;对照处理条件下的土壤容重高于其他处理,达到 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,相比于初始条件下的土壤容重降低 6.83%;在亚表层(20~40 cm)脱碱一号处理条件下的土壤容重相比于初始条件下的土壤容重最低,只有 $1.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,相比于初始条件下的土壤容重降低了 11.18%,相比于对照降低了 5.92%。因此,可以认为,不同改良处理均可降低土壤容重,其中以脱硫石膏处理条件下的效果较为理想,其 0~20 cm 容重相比于初始容重和对照降低 14.91%和 9.87%。

2.3 不同改良对土壤入渗速率的影响

本研究测定了不同改良措施下种稻改良对重度苏打盐渍土水分入渗速率的影响,结果如图 2 所示。经过不同改良处理和种稻改良后,苏打盐渍土水分入渗速率结果见图 2。由于对照处理的水分入渗较低,因此计数间隔为 20 min,脱碱一号、有机肥、脱硫石膏与砂土处理条件下的初始水分入渗速率较高,因此横坐标起始为测试开始 30 min 后的水分入渗速率。

如图 2 所示,脱碱一号、有机肥、脱硫石膏与砂土处理后的苏打盐渍土的土壤稳定入渗速率在测试开始 50 min 后达到相对稳定,而对照则在 100 min 后达到相对稳定状态。在不同改良处理中,苏打盐渍土的土壤水分稳定入渗速率差异性显著,脱碱一号和砂土处理后的稳定入渗速率分别为 14.50 和 $11.40 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,较有机肥与脱硫石膏处理后的苏打盐渍土的稳定入渗速率高出 154%和 100%,有机肥与脱硫石膏改良处理后的稳定入渗速率均为 $5.70 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。经过不同改良处理后,各处理条件下的土壤稳定入渗速率均极显著高于对照的稳定入渗速率($0.30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。由此可见,通过不同改良措施,均可显著提高苏打盐渍土的土壤稳定入渗速率,其中以脱碱一号和砂土处理的效果最好。

2.4 不同改良对土壤机械组成的影响

本研究中,测定了不同改良处理条件下,0~20 cm 苏打盐渍土机械组成黏粒含量($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒含量($2 \sim 50 \mu\text{m}$)和砂粒含量($50 \sim 1000 \mu\text{m}$),具体结果见图 3。经过多年改良与种稻后,苏打盐渍土机械组成中黏粒的含量显著降低,如有机肥改良处理条件下的土壤中黏粒含量在 8.50%,较未改良前的苏打盐渍土黏粒含量降低了 77.39%;而砂粒的含量则显著增加 125.75%。未经改良前的土壤按国际制分级方法可鉴定为壤黏土,经过多年种稻后,各改良

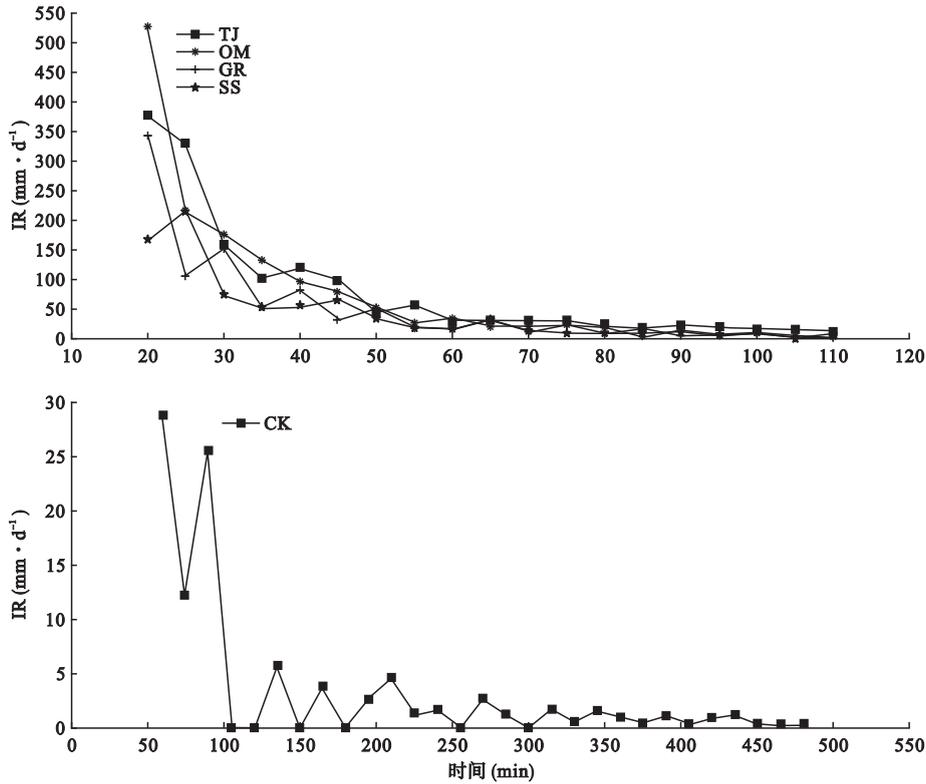


图2 不同改良处理条件下土壤水分入渗速率
Fig.2 Water infiltration rate of different ameliorations

处理条件下的土壤变为壤土。由此可见,各改良处理均能是土壤质地的改善起到显著的作用,其中以有机肥和脱碱一号的效果较为理想。

2.5 不同改良处理条件下土壤水分特征曲线

土壤水的基质势或土壤水吸力与土壤含水量相关,其关系称为土壤水分特征曲线(soil water characteristic curve)。本研究中测定了不同改良处理条

件下0~20 cm土壤的水分特征曲线,具体结果如图4所示。

如图4所示,在吸力值为0~0.9 MPa时,对照处理条件下的土壤含水量在29%~31%,显著高于各改良处理条件下土壤含水量。吸力值在0~0.9 MPa时,脱碱一号处理条件下土壤含水量在24%~27%,随吸力值的变化幅度较小,而脱硫石膏处理条

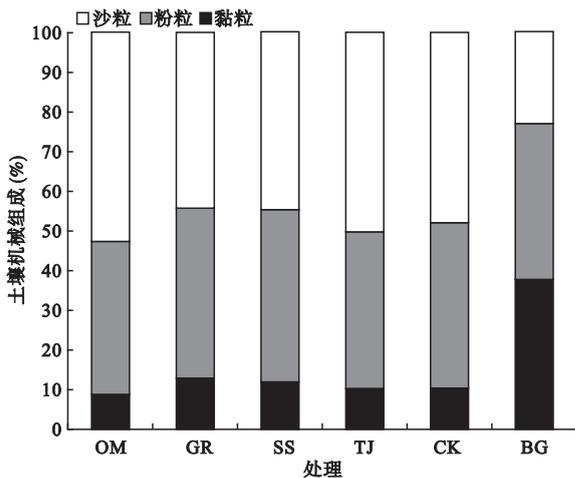


图3 不同改良处理条件下土壤机械组成
Fig.3 Soil mechanical composition of different ameliorations

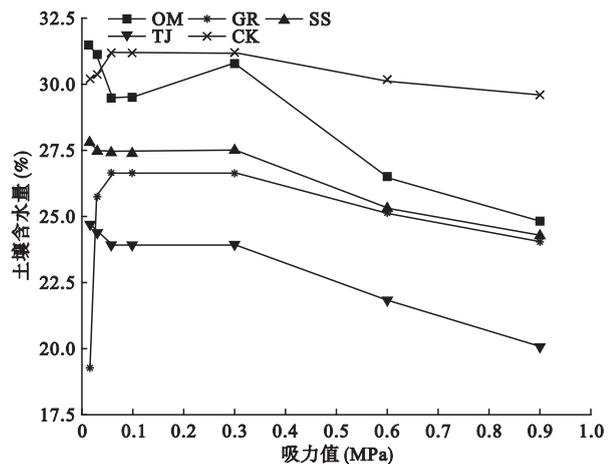


图4 不同改良处理0~20 cm土壤水分特征曲线
Fig.4 Soil-water characteristic curve of different ameliorations at depth of 0-20 cm

表4 各试验处理条件下苏打盐渍土物理性质 PCA 得分
Table 4 PCA scores of soil physical properties of different ameliorations

处理	PCA
TJ	0.68
OM	0.59
GR	0.55
SS	0.50
CK	0.48

件下的土壤含水量随吸力值的变化最大,即从19%增加到27%。此外,砂土改良后土壤的持水能力在本研究中为最弱,有机肥改良后土壤的持水能力最强,其次为脱碱一号处理后土壤的持水能力。由此可见,各改良处理均能使苏打盐渍土的水分特征发生显著变化,其中以脱碱一号的效果较为理想,其次为脱硫石膏。

2.6 各改良处理对苏打盐渍土物理性质影响评价

采用主成分分析(PCA)对各改良处理条件下苏打盐渍土物理性质的影响进行了综合评价(表4)。

如表4所示,各改良处理对苏打盐渍土物理性质影响的综合得分从高到低依次为:TJ>OM>GR>SS>CK。因此,相比于其他改良处理,脱碱一号对苏打盐渍土物理性质的改良效果最佳,其次为有机肥,而砂土对苏打盐渍土物理性质的改良效果较脱碱一号、脱硫石膏与有机肥差。

3 讨论

3.1 不同改良措施对土壤水分入渗速率与土壤水分特征曲线的影响

土壤为植物提供生长所需水分与养分等的的能力取决于土壤的结构状况。土壤在钠质化盐渍土中,黏粒的分散可导致土壤孔隙的崩塌,进而阻碍土壤空气与水分的运动(So *et al.*, 1993)。土壤水分入渗一方面决定了产生地表径流的水量,进而对土壤侵蚀产生影响;另一方面,又影响土壤的含水量,可影响作物可利用的土壤有效水含量,进一步对作物产量产生重要影响(Epstein *et al.*, 1966)。土壤水分入渗主要受初始含水量、土壤质地、土壤结构与土壤容重等参数的影响。大量关于容重与土壤入渗率的研究表明,容重变大则入渗速率变小(Singh *et al.*, 2003; 吕殿青等, 2006)。因此,影响土壤容重的因素同时也对土壤水分入渗产生影响。此外,质地不同的土壤,其孔隙状态也存在很大的差异,造成土壤水

分入渗过程与速率的差异。通常情况下,砂土具有入渗能力强(邵明安等, 2006)与透气性强(刘兴土, 2001)等特点,压砂成为苏打盐渍土改良的有效措施之一。本研究中脱碱一号与砂土处理条件下的土壤稳定入渗速率较脱硫石膏与有机肥处理条件下的土壤水分入渗速率高出154%和100%。砂土改良后苏打盐渍土的水分入渗效率最高,究其原因砂土本身具有良好的结构,因此加砂改良后的苏打盐渍土土壤水分入渗率较高;而脱碱一号的主要成分中含有有机肥、脱硫石膏与砂土,有机肥可使土壤容重降低,土壤紧实度降低,土壤孔隙度增加,土壤的持水能力增加(刘兴土, 2001; 黄昌勇等, 2010);脱硫石膏中的Ca²⁺可替换土壤中吸附性Na⁺,从而改善土壤理化性质(曹稳根, 1997),进而改善土壤的孔隙性提高土壤水分入渗速率。因此,可以认为脱碱一号(脱硫石膏、有机肥与砂土的组合)可进一步提高土壤的水分入渗速率。

土壤水分特征曲线可反映土壤孔隙分布状况与黏粒的含量(邵明安等, 2006; 黄昌勇等, 2010; Matlan *et al.*, 2014; 程东会等, 2017)。研究表明,土壤质地、有机肥以及土壤容重等因素对土壤水分特征曲线具有重要影响(陈宇龙等, 2016; 洪城等, 2018)。本研究中,对照土壤的水分含量在各吸力段均高于改良处理条件下的土壤含水量,砂土改良条件下的土壤含水量在0~0.9 MPa最低,其他改良处理条件下的土壤水分特征曲线无明显差异,这表明土壤黏粒的含量差异不明显。一般情况下,黏粒含量高的土壤,在任何吸力下土壤含水量都比较高,这主要是因为黏粒表面能大且黏粒含量高的土壤中微孔隙较多,因此能吸持较多的水分(邵明安等, 2006),这进一步说明了本研究中不同改良处理均可以降低土壤黏粒或者细孔隙含量。砂质土中,大孔隙较多,水分较容易排出,土壤颗粒吸持的水分较少;而黏土中的孔隙分布均匀且微孔隙较多,因此当吸力增加时,土壤含水量减少的较慢。

3.2 不同改良措施对土壤容重与机械组成的影响

土壤容重是多因素影响的土壤物理参数,如植被根系、土壤水分状况和土壤通气状况等。土壤容重与土壤质地、结构、有机肥含量以及各种自然因素和人工管理措施等密切相关。本研究中,以有机肥与脱硫石膏处理对苏打盐渍土容重(稻田耕层, 0~20 cm)改善效果最佳,脱碱一号次之;而耕层以下的土壤(20~40 cm)则以脱碱一号和有机肥的改良

效果较为理想。这主要是由于脱碱一号以钙源物质(脱硫石膏)与有机肥为主,而脱硫石膏的主要成分为 CaSO_4 ,因此本研究再次验证了 Ca^{2+} 与有机肥对苏打盐渍土容重有重要影响。研究表明,一价阳离子可以增加土壤胶体的分散性,二价或三价阳离子可以降低土壤胶体的分散性(邵明安等,2006;黄昌勇等,2010),对于土壤矿物组成以蒙脱石为主的苏打盐渍土(赵兰坡等,1993),水分可使土壤晶格膨胀,使土壤分散至无结构(黄昌勇等,2010),导致土壤容重增加,造成土壤物理性质的恶化,进而对植物的出苗以及根系的生长形成障碍(杨帆等,2014),只有容重值在特定的范围内,才有利于作物的生长发育同时获得较高的产量。有机质与土壤团聚体密切相关,对土壤团聚体数量、大小以及分布有重要影响,增加土壤有机质含量有利于土壤结构的形成与稳定性(Nimmo *et al.*, 2002; 彭兴华等, 2004; Bronick *et al.*, 2005; Oo *et al.*, 2013)。究其原因,主要是由于有机质可作为良好的有机胶结剂,促进土壤中大团聚体的形成,改善土壤结构(Puget *et al.*, 2000)。此外,有机质在分解过程中可产生能够中和土壤碱性的有机酸,因此在改良苏打盐渍土的生产实践中,脱硫石膏或脱硫石膏与有机肥可有效降低苏打盐渍土土壤容重。

土壤机械组成是土壤的一个稳定的自然属性,土壤的机械组成对土壤的物理、化学和生物特性具有决定性的作用(唐炎林等,2007)。结构良好的土壤透水性强、透气性良好、蒸发弱、土壤持水能力强等特点。黄昌勇等(2010)认为,土壤颗粒粒径的减小,可使土壤的吸湿水含量、最大吸湿量、持水量与毛管持水量增加,但土壤的通气与透水速率则下降。本研究取得了相似结果,即有机肥与脱碱一号处理可降低土壤机械组成中黏粒的含量,对土壤质地的改善作用最明显。众所周知,土壤的颗粒组成与质地是一个相对稳定的指标。本研究中,土壤的孔隙性因有机肥和脱硫石膏的施入而增加,因此黏粒在灌溉水的冲洗作用下而减少;砂土改良的土壤砂粒因引入砂土的增加,黏粒含量则相对降低。因此,总体表现为施入改良剂多年后的苏打盐渍土土壤黏粒含量减少而砂粒含量增加。因此,可通过增加土壤有机肥含量来改善土壤质地。

土壤容重、机械组成、水分入渗速率与水分特征曲线均可直接或间接反映土壤孔隙性,因此,可影响土壤容重、水分入渗速率、机械组成与水分特征曲线

的因素均可影响土壤孔隙性。本研究中,苏打盐渍土经过不同改良处理后,土壤容重降低、水分入渗速率增加以及机械组成中砂粒含量增加而黏粒含量降低表明土壤的结构得到了改善,此结果与Tejada等(2008)与Oo等(2013)的研究结果相同。此外,主成分分析结果表明,有机肥对苏打盐渍土孔隙性的改善作用最佳,而砂土最差,造成这个结果的作用机理尚需进一步试验研究。

4 结 论

苏打盐渍土的特点决定了其改良难度大,且严重依赖后续的排盐处理等措施。本研究通过对重度苏打盐渍土进行种稻改良与不同物理化学改良措施相结合的方式,对种稻改良5年后的重度苏打盐渍土物理性质的变化进行了研究,得到了以下主要结论:1)不同改良处理对苏打盐渍土物理性质的影响差异显著;2)土壤改良可显著降低土壤黏粒含量65%~77%,砂粒含量增加91.10%~125.75%;降低土壤容重6.1%~12.41%;相比于对照,土壤水分入渗速率极显著增加;水分特征曲线的结果表明,相比于对照,脱硫石膏、脱碱一号、砂土与有机肥均可使土壤微孔隙或黏粒含量降低;3)综合考虑各试验处理对土壤物理性质的影响,本研究认为脱碱一号对土壤物理性质的改善效果最好,其次为有机肥,而砂土对苏打盐渍土物理性质的改善效果相对于其他处理最低。

参考文献

- 曹稳根. 1997. 安徽淮北地区盐碱土的成因及其改良措施. 淮北煤师院学报, 18(1): 73-76.
- 陈宇龙, 内村太郎. 2016. 粒径对土持水性能的影响. 岩石力学与工程学报, 35(7): 1475-1482.
- 程东会, 常琛朝, 钱 康, 等. 2017. 考虑薄膜水的利用介质粒度分布获取水土特征曲线的方法. 水科学进展, 20(17): 534-542.
- 邓 伟, 裘善文, 梁正伟. 2006. 中国大安碱地生态试验站区域生态环境背景. 北京: 科学出版社.
- 董 宁, 康立娟, 石 峰, 等. 2018. 新型改良剂改良盐渍土组方效果研究. 中国农业科技导报, 20(4): 147-153.
- 洪 城, 尹殿生, 陈俊英, 等. 2018. 容重对黏壤土土壤水分特征曲线的影响. 节水灌溉, (10): 5-8.
- 黄昌勇, 徐建明. 2010. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.
- 孔元元. 2017. 镇赉盐渍土冻融条件下水热盐运移试验及结构演变(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 李晓燕, 张树文. 2005. 吉林省大安市近50年土地盐碱化时空动态及成因分析. 资源科学, 27(3): 92-97.
- 林年丰, 汤 洁, 卞建民, 等. 1999. 东北第四纪环境演化与

- 荒漠化问题. 第四纪研究, (5): 448-454.
- 刘兴土. 2001. 松嫩平原退化土地整治与农业发展. 北京: 科学出版社.
- 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 2006. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响. 水土保持学报, **20**(3): 154-157.
- 彭新华, 张斌, 赵其国. 2004. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. 土壤学报, **41**(4): 618-623.
- 邵明安, 王全九, 黄明斌. 2006. 土壤学. 北京: 高等教育出版社.
- 宋长春, 何岩, 邓伟. 2003. 松嫩平原盐渍化土壤生态地球化学. 北京: 科学出版社.
- 唐眺, 张强, 王斌, 等. 2017. 脱硫石膏改良重度苏打盐化土的环境效应. 水土保持学报, **31**(2): 317-321.
- 唐炎林, 邓晓保, 李玉武, 等. 2007. 西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, **27**(1): 70-76.
- 王帅, 王楠, 陈殿元, 等. 2017. 菌糠搭载硫酸铝对盐碱地稻田养分状况的影响研究. 土壤通报, **48**(2): 460-466.
- 王春裕. 2002. 论盐渍土之种稻生态改良. 土壤通报, **33**(2): 94-95.
- 王遵亲. 1993. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社.
- 徐晓腾. 2011. 苏打盐碱地水田“淡化表层”土壤的物理、化学及生物学特征(硕士学位论文). 长春: 吉林农业大学.
- 杨帆, 罗金明, 王志春. 2014. 松嫩平原盐渍化区水盐转化规律与调控机理. 北京: 中国环境出版社.
- 张梅. 2015. 吉林省西部苏打盐碱土种稻改良机理与生产关键技术研究(博士学位论文). 长春: 吉林农业大学.
- 张建峰, 张旭东, 周金星, 等. 2005. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施. 水土保持研究, **12**(6): 28-31.
- 赵兰坡, 井上克弘, 吉田稔. 1993. 吉林省主要耕作土壤的粘粒矿物组成. 土壤学报, **30**(3): 267-273.
- 赵长巍. 2014. 吉林省西部盐渍土空间变异性与均质化改良研究(博士学位论文). 长春: 中国科学院研究生院(中国科学院东北地理与农业生态研究所).
- Ahmad S, Ghafoor A, Akhtar ME, et al. 2013. Ionic displacement and reclamation of saline-sodic soil using chemical amendments and crop rotation. *Land Degradation & Development*, **24**: 170-178.
- Akhter J, Murray R, Mahmood K, et al. 2004. Improvement of degraded physical properties of a saline-sodic soil by reclamation with kallar grass (*Leptochloa fusca*). *Plant and Soil*, **258**: 207-216.
- Bronick CJ, Lal R. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, **124**: 3-22.
- Epstein E, Grant WJ, Struchtemeyer RA. 1966. Effects of stones on runoff, erosion, and soil moisture. *Soil Science Society of America Journal*, **30**: 638-640.
- Hashem A, AbdAllah EF, Ahmad P. 2015. Effect of AM fungi on growth, physio-biochemical attributes, lipid peroxidation, antioxidant enzymes and plant growth regulators in *Lycopersicon esculantum* Mill. subjected to different concentration of NaCl. *Pakistan Journal of Botany*, **47**: 327-340.
- Jogaiah S, Ramteke SD, Sharma J, et al. 2014. Moisture and salinity stress induced changes in biochemical constituents and water relations of different grape rootstock cultivars. *International Journal of Agronomy*, **2014**: 789087.
- Li YB, Xu QT. 2014. Study on the effect of the use of FGD gypsum into the alkalization soil to improve soil property. *Applied Mechanics and Materials*, **448**: 482-487.
- Lu J, Yan X, Ma YF, et al. 2014. Impact of salinity on treatment of saline wastewater by sequencing batch biofilm reactor process. *Journal of Central South University*, **21**: 1989-1994.
- Malcolm E, Sumner RN. 1998. Sodic Soils-distribution Properties, Management and Environmental Consequences. New York: Oxford University Press.
- Matlan SJ, Mukhlisin M, Taha MR. 2014. Performance evaluation of four-parameter models of the soil-water characteristic curve. *The Scientific World Journal*, **2014**: 1-12.
- Muhammad AZ, Khalil A, Hafeezullah R, et al. 2018. Effectiveness of compost and gypsum for amelioration of saline sodic soil in rice wheat cropping system. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, **6**: 514-523.
- Muhammad S, Muhammad A, Abou-Shanab RAI. 2013. Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments. *Plant, Soil and Environment*, **59**: 227-233.
- Nimmo JR, Perkins KS. 2002. Aggregates stability and size distribution// Dane JR, Topp GC, eds. Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America: 317-328.
- Oo AN, Iwai CB, Saenjan P. 2013. Soil properties and maize growth in saline and nonsaline soils using cassava-industrial waste compost and vermicopost with or without earthworms. *Land Degradation and Development*, **26**: 300-310.
- Padmavathiamma PK, Li LY. 2007. Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, **184**: 105-126.
- Puget P, Chenu C, Balesdent J. 2000. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, **51**: 595-605.
- Qadir M, Qureshi RH, Ahmad N. 2002. Amelioration of calcareous saline sodic soils through phytoremediation and chemical strategies. *Soil Use and Management*, **18**: 381-385.
- Singh S, Kumawat BL, Khem CN. 2003. Effect of soil compaction on physical properties of loamy sand soil. *Agricultural Science Digestion*, **23**: 95-97.
- So HB, Aylmore LAG. 1993. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. *Australian Journal of Soil Research*, **31**: 761-777.
- Srivastava PK, Gupta M, Shikha, et al. 2014. Amelioration of sodic soil for wheat cultivation using bioaugmented organic soil amendment. *Land Degradation & Development*, **27**: 1245-1254.
- Wang MM, Rengasamy P, Wang ZC, et al. 2018. Identification

of the most limiting factor for rice yield using soil data collected before planting and during the reproductive stage. *Land Degradation & Development*, **29**: 2310–2320.

Yang F, An FH, Ma HY, *et al.* 2016. Variations on soil salinity and sodicity and its driving factors analysis under microtopography in different hydrological conditions. *Water*, **8**: 227.

Zhang HX, Irving LJ, McGill C, *et al.* 2010. The effects of

salinity and osmotic stress on barley germination rate: Sodium as an osmotic regulator. *Annals of Botany*, **106**: 1027–1035.

作者简介 杨洪涛,男,1989年生,博士,苏打盐渍土改良与利用。E-mail: yang_ht_ucas@126.com

责任编辑 魏中青
