

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170218

# 天然沸石对松嫩平原黑钙土理化性质和保水能力的影响

马媛媛<sup>1</sup> 戴显庆<sup>1</sup> 彭绍好<sup>1</sup> 杨光<sup>2</sup> 冀晓东<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室,北京 100083; 2. 河南省电力勘察设计院海外事业部,河南 郑州 450007)

**摘要:**【目的】通过研究天然沸石掺配量对于松嫩平原黑钙土理化性质和土壤水分特征曲线的影响,来研究天然沸石改良黑钙土的保水能力的效果,为改良土壤保水性提供理论参考。【方法】采用天然沸石改良土壤,进行60 d花盆培养,环刀法测量土壤密度,公式法计算土壤总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度。离心机法测定土壤水分特征曲线。【结果】天然沸石改良黑钙土试验中,土壤密度随沸石掺配量的增加而增大,呈正相关关系,当沸石掺配量为10%时,土壤密度增加最为显著;毛管孔隙度和总孔隙度均随掺配量的增加而减小,呈负相关关系,当沸石掺配量为10%时,土壤的通气孔隙度为最大。各掺配量下土壤的持水能力结果为:20% 天然沸石(NZ) > 15% NZ ≈ 10% NZ > 5% NZ > CK。各组土壤的水分特征曲线均能用Gardner模型拟合。Gardner模型方程的拟合系数a、b均随持水能力增强而减小,呈负相关关系;随饱和含水率升高而增大,呈正相关关系。将饱和含水率和拟合系数a进行拟合,结果显示决定系数( $R^2$ )为0.9418。【结论】在进行土壤持水能力改良时,利用10%天然沸石掺配量比较经济可行。土壤饱和含水率高,不一定水分特征曲线初始水平就高。各项试验结果说明,利用天然沸石可以有效改良砂壤黑钙土的保水能力,为黑土区土壤改良提供试验和理论参考。

**关键词:**黑钙土; 土壤改良; 保水性; 天然沸石

**中图分类号:**S152.5; S152.7   **文献标志码:**A   **文章编号:**1000-1522(2018)02-0051-07

**引文格式:**马媛媛,戴显庆,彭绍好,等. 天然沸石对松嫩平原黑钙土理化性质和保水能力的影响[J]. 北京林业大学学报,2018,40(2):51-57. Ma Yuan-yuan, Dai Xian-qing, Peng Shao-hao, et al. Effects of natural zeolite on physical and chemical properties and water retention capacity of chernozem in Songnen Plain of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 51-57.

## Effects of natural zeolite on physical and chemical properties and water retention capacity of chernozem in Songnen Plain of northeastern China

Ma Yuan-yuan<sup>1</sup> Dai Xian-qing<sup>1</sup> Peng Shao-hao<sup>1</sup> Yang Guang<sup>2</sup> Ji Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Henan Electric Power Survey &amp; Design Institute, Zhengzhou 450007, Henan, China)

**Abstract:** [Objective] To study the effects of natural zeolite on modifying the water retention capacity of chernozem and provide theoretical reference for the improvement of soil water retention, the effects of natural zeolite on the physical and chemical properties of chernozem in Songnen Plain of northeastern China and soil water characteristic curve were studied. [Method] Chernozem was modified by natural zeolite, cultured in a pot for 60 days. The soil bulk density was measured by cutting ring method. Soil total porosity, capillary porosity and aeration porosity were calculated by formula method. Determination of soil water characteristic curve was measured by centrifuge test. [Result] The results showed that there was a positive correlation between soil bulk density and the amount of natural zeolite, soil bulk density

收稿日期: 2017-06-16 修回日期: 2017-08-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-01, 2016JX04)。

第一作者: 马媛媛。主要研究方向: 生态恢复与土壤修复。Email: mayuanyuan@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 冀晓东,教授。主要研究方向: 生态恢复与土壤修复。Email: jixiaodong@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

increased with the increasing amount of nature zeolite. Soil bulk density increased significantly at the 10% mixing amount of natural zeolite. However, there was a negative correlation between the capillary porosity and total porosity and the amount of natural zeolite, the capillary porosity and total porosity decreased with the increasing amount of natural zeolite. The maximum ventilation porosity was obtained at the 10% mixing amount of natural zeolite. The result of the water retention capacity of different mixing amount of natural zeolite was: 20% natural zeolite (NZ) > 15% NZ ≈ 10% NZ > 5% NZ > CK. The soil water characteristic curve of each group can be fitted well by Gardner model. The coefficients  $a$  and  $b$  of water characteristic curve equation were negatively correlated with water holding capacity, and positively correlated with saturated water content. The saturated water content and the fitting coefficient  $a$  were fitted too. The results showed that  $R^2$  is 0.9418. [Conclusion] It is feasible and economical to improve water retention capacity of chernozem by 10% mixing amount of natural zeolite. The saturated water content is high, the initial level of water characteristic curve is not necessarily high yet. The results show that the water retention properties of chernozem can be effectively improved by mixing natural zeolite. This study provides a theoretical and experimental reference for soil improvement in chernozem.

**Key words:** chernozem; soil improvement; water retention property; natural zeolite

东北黑土自然肥力高,是我国重要的商品粮生产基地,其面积约 101.85 万 km<sup>2</sup><sup>[1-2]</sup>。东北黑土区的自然特点为降雨集中、坡面平缓且坡长较长、表土疏松底土黏重等。随着气候变化和人为不合理的利用,黑土退化现象日益严重。我国东北黑土区属温带大陆性季风气候,降雨集中且降雨强度大。独特的气候导致侵蚀以水力侵蚀为主<sup>[1]</sup>,黑土区水土流失情况不容乐观。因此改良土壤质量,寻找有效水土保持措施,增强土壤蓄水保水能力已成为黑土区水土保持的重要任务之一<sup>[3]</sup>。

沸石是一种硅铝酸盐矿物质,其分子式为  $M_{n/2} \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$ ,式中:M 为碱金属或碱金属阳离子<sup>[4]</sup>。天然沸石来源广、价格低,具有良好的吸附性能和离子交换能力,而且无毒无害,是一种天然的环境友好型材料<sup>[5]</sup>。研究表明,将天然沸石作为土壤改良剂,不仅能够改良土壤物理性质,对土壤化学性质及植物生长也有一定改良。Li 等<sup>[6]</sup>将天然沸石作为土壤改良剂,发现添加天然沸石可以增加土壤 pH 值,土壤有机质含量,促进土壤团聚体的形成,同时还能降低土壤中可溶性铅。李华兴等<sup>[7]</sup>通过模拟土柱淋洗试验发现,土壤中的有效 N、有效 P 和有效 K 含量随着沸石用量的增加而提高。孔宪清等<sup>[8]</sup>通过 2 年田间试验,发现在土壤中施用天然斜发沸石,可使蔬菜产量增加 20%。说明沸石作为土壤改良剂可以有效改良土壤的质量,有助于作物生长,节约肥料。目前有关天然沸石改良土壤保水能力的研究较少,本研究通过测定不同沸石掺配量对于黑钙土理化性质和土壤水分特征曲线的影响,来研究天然沸石改良土壤的保水能力的效果,为改良土壤保水性提供理论参考。

## 1 研究区概况

东北黑土区主要有 3 大块,第 1 块位于内蒙古呼伦贝尔和兴安盟,以黑钙土为主;第 2 块位于松嫩平原,以黑土、黑钙土和草甸土为主;第 3 块位于三江平原,以草甸土、白浆土和黑土为主。研究地区位于黑龙江省齐齐哈尔市依安县新兴镇(124°50' ~ 125°42'E, 47°16' ~ 48°20'N),所处松嫩平原,属典型黑钙土区。松嫩平原黑钙土区面积约为 11.40 万 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。研究区为典型的漫川漫岗地形,海拔 160 ~ 220 m,平均坡度 3°。北靠乌裕尔河,土壤多为碳酸盐黑钙土,黑土层 25 cm 以上,有机质含量 3.5% ~ 6.5%。气候类型为寒温带大陆性季风气候。多年平均温度为 2.18 ℃ 左右,1957—2006 年平均无霜期为 130 d,多年平均降水量为 476 mm,降雨主要集中在 6—8 月。

## 2 材料与方法

### 2.1 天然沸石

本研究采用的天然沸石粉取自河北省灵寿县某沸石厂。产地为河北省保定市一矿山,矿石纯度达 75% 以上,以斜发沸石为主。沸石粒度为 100 目,密度为 0.879 g/cm<sup>3</sup>。采用 X 射线荧光光谱分析(飞利浦 PW2404)测定天然沸石的主要化学组成。天然沸石主要成分见表 1。

天然沸石的矿物组成采用 X 射线衍射分析(Rikaku D/max-RB),其技术参数为 Cu 钮 Ka 衍射,采用连续扫描的方式,扫描角度为 5° 到 90°,扫描速率为 0.02°/s。与数据库的标准谱图对照(图 1),得到本研究中天然沸石主要由斜发沸石、高岭石、石英

表 1 天然沸石主要成分

Tab. 1 Main composition of natural zeolite

成分 Composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	Na <sub>2</sub> O	
天然沸石 Natural zeolite	60.24	22.17	11.40	2.32	1.43	1.17	0.56	0.24	0.11	0.08	0.08

及其他硅铝氧化物组成(图 1)。

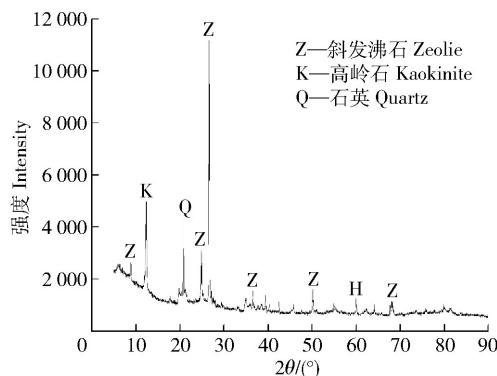


图 1 天然沸石的 X 射线衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns of natural zeolite

天然沸石的表面形态和结构采用电子显微镜扫描(S-3000N, Hitachi)分析,如图 2 所示。结果显示天然沸石的表面比较粗糙,晶体表面形态呈多种不

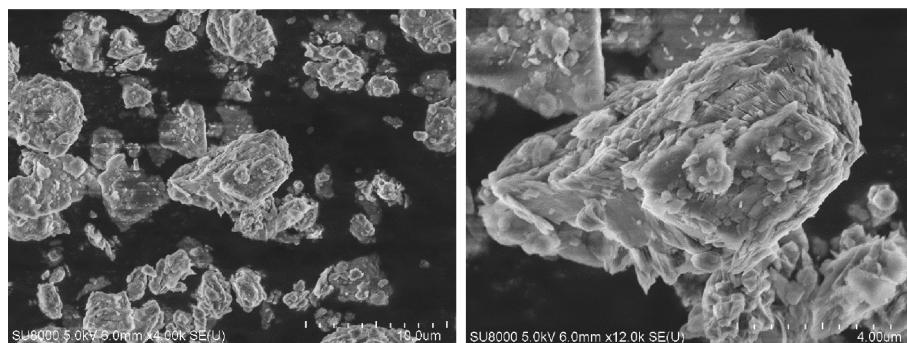


图 2 天然沸石 SEM 图

Fig. 2 SEM images of natural zeolite

表 2 黑钙土理化性质

Tab. 2 Physical and chemical properties of chernozem

各粒径团聚体含量 Percentage of aggregate size/%				0.5 ~	0.25 ~	有机质	全氮	速效磷	速效钾	
> 5 mm	2 ~ 5 mm	1 ~ 2 mm	1 mm	0.5 mm	< 0.25 mm	Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	Total nitrogen/ (g·kg <sup>-1</sup> )	Available P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
17.81	18.82	16.35	15.31	17.99	13.72	68.03	0.80	49.27	56.30	5.12

### 2.3 试验方法

对采集回来的土壤进行风干,按照质量百分比将天然沸石掺入土壤,进行花盆实验。具体步骤为:取 60 kg 过筛黑土,分成 10 份,每份 6 kg。分为 5 组,对照组(CK)不添加沸石,实验组(NZ)沸石掺配量分别为 5%、10%、15%、20%,充分搅拌,使其混合均匀。然后将各组土样置于大花盆中培养,每隔 3 d 浇水 1 次,培养期为 60 d。

规则形状。这种晶体结构使天然沸石具有较大的比表面积。较大的比表面积有利于沸石的吸附性能,进而利于土壤改良过程中天然沸石与土壤颗粒胶结。

### 2.2 黑钙土

试验用土采自试验地耕地,为碳酸盐黑钙土,根据中国土壤质地分类制属砂壤土。根据 NY/T 1121.1—2006《土壤检测 第 1 部分:土壤样品的采集、处理和贮存》规定,土壤密度及孔隙度采用原状土,直接用环刀采取;耕层混合土样的采集按照“随机”“等量”“多点混合”原则采样,一个混合样由 15~20 个样点组成。取样深度 15~30 cm,采用“S”形布点采样,将采集土样置于样品袋中,带回后在实验室进行风干。在土样风干时,将大土块捏碎,同时去除土壤以外的杂物。黑钙土基本理化性质见表 2。然后过 5 mm 筛备用。



图 2 天然沸石 SEM 图

Fig. 2 SEM images of natural zeolite

土壤、沸石混合土样密度、总孔隙度、毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度测定:环刀法测定土壤密度;土壤总孔隙度测定采用经验公式(1)计算法<sup>[10]</sup>:

$$P_t = 93.947 - 32.995d \quad (1)$$

式中:d 为土壤密度,g/cm<sup>3</sup>。

毛管孔隙度测定:用环刀取花盆培养后的各组土样,将环刀有孔并放入滤纸的一侧置于盛有水的托盘中,托盘中水层深为 2~3 mm 内,浸水 12 h。环

刀中的样品吸水后发生膨胀,用小刀刮去膨胀到环刀外的土样,立即称质量,精度为0.1 g。然后,用铝盒从环刀中取5 g土样,测定土壤吸水后的含水率,来换算环刀中烘干土质量<sup>[10]</sup>。通气孔隙度为土壤总孔隙度与毛管孔隙度之差,表示为:

$$P_a = P_t - P_c \quad (2)$$

式中: $P_a$ 为土壤通气孔隙度,%; $P_t$ 为土壤总孔隙度,%; $P_c$ 为土壤毛管孔隙度,%。

土壤水分特征曲线测定采用离心机(H-1400PF)法,具体方法如下:本研究中,利用土壤离心机自带环刀取样,每个样品取3个平行样。取样后,使土样吸水饱和,设置不同转速进行离心75~90 min,转速n为500~7 000 r/min。达到水分平衡后,称质量,并测定土壤表面到离心盒口的距离,计算土壤吸力。离心试验结束后,把土样烘干(105℃),称质量,计算土壤含水率。

为了定量研究土壤水分特征曲线,学者们提出了多种模拟方程。常用的拟合土壤水分特征曲线的经验方程有Gardner模型<sup>[11]</sup>,Van Genuehten模型<sup>[12]</sup>,Brooks-Corey模型<sup>[13]</sup>,Campell模型<sup>[14]</sup>等。建立模型的关键是用较少的参数精确模拟土壤水分特征方程,便于实际应用。Gardner模型具有待定参数较少的优点,应用较为方便。本文采用Gardner模型进行拟合:

$$\theta = aS^{-b} \quad (3)$$

式中: $\theta$ 为土壤体积含水率,%; $S$ 为土壤水势,cm; $a$ 、 $b$ 为拟合参数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同沸石掺配量对土壤密度的影响

土壤密度是土壤的一项基本物理性质,土壤密度反映出土壤的密实度以及空隙大小,对土壤的通气性、透水性和持水能力都有影响<sup>[15]</sup>。不同沸石掺配量对土壤密度的影响实验结果如图3。

由图3可知,经过60 d花盆培养的土样,土壤密度随着沸石掺配量的增多而增大,呈正相关关系。

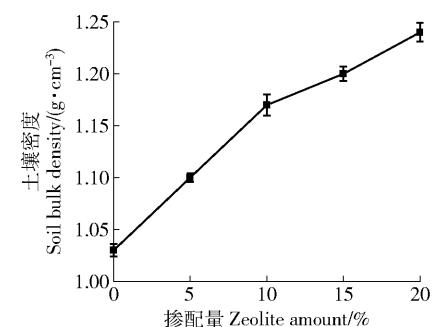


图3 不同沸石掺配量下土壤密度

Fig. 3 Soil bulk density under different zeolite amount

在0~10%掺配量时,土壤密度增加最为明显,当掺配量继续增加时,土壤密度增加有所减缓。结果显示,经过60 d花盆培养的土样,土壤密度与沸石的掺配量呈正相关关系。

#### 3.2 不同沸石掺配量对土壤孔隙度的影响

土壤空隙是表征土壤结构的重要指标之一。土壤空隙直接影响土壤的物理化学性质、生物特性及生态功能<sup>[16]</sup>。土壤空隙的分类主要有以下两种:按照土壤孔隙的水分类型可以分为通气空隙、有效孔隙和无效空隙。按照团聚体孔隙分类可以分为团聚体总孔隙度,各级团聚体内孔隙度和团聚体间孔隙度。毛管孔隙度和总孔隙度由2.3所述试验和公式计算所得,结果列于表3。可知毛管孔隙度和总孔隙度均随掺配量增加而减小,呈负相关关系。这与张莉等<sup>[5]</sup>的沸石减小土壤密度,增大总孔隙度趋势相反。这可能是因为沸石及土壤类型不同,沸石对土壤理化性质的影响机理不同。本研究中土壤空隙变小,土壤密度变大。这可能是因为沸石与小粒径团聚体胶结,并附着在大粒径团聚体表面,填充了土壤颗粒之间的孔隙,使土壤密度增大,土壤更加密实。根据图4所示,当沸石掺配量为10%时,毛管孔隙度和总孔隙度降低幅度较大。沸石掺配量继续增大,孔隙度变化幅度相对变小。随着沸石掺配量的增加,土壤通气孔隙度均不同程度增大。当沸石掺配量为10%时,土壤通气孔隙度为最大,说明当沸石掺配量为10%时土壤的透气性最好。

表3 不同沸石掺配量下土壤孔隙度

Tab. 3 Soil porosity under different zeolite amount

沸石掺配量 Zeolite amount/%	土壤密度 Soil bulk density/(g·cm⁻³)	总孔隙度 Total porosity( $P_t$ )/%	毛管孔隙度 Capillary porosity( $P_c$ )/%	通气孔隙度 Aeration porosity( $P_a$ )/%
0	1.03	60.28	57.77	2.51
5	1.10	57.64	54.70	2.94
10	1.17	55.36	51.34	4.02
15	1.20	54.41	50.73	3.68
20	1.24	53.03	49.18	3.85

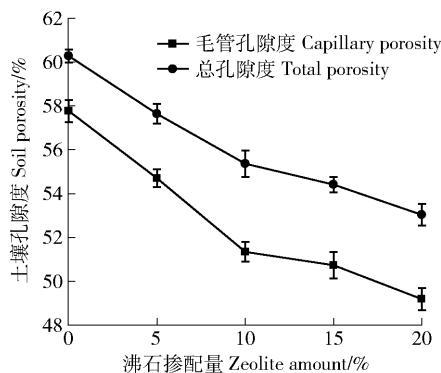


图 4 不同沸石掺配量下土壤孔隙度

Fig. 4 Soil porosity under different zeolite amount

### 3.3 不同沸石掺配量对土壤保水能力的影响

#### 3.3.1 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线是指土壤的含水率与土壤水势或土壤水吸力的关系曲线,它能揭示土壤水能量与数量的关系<sup>[17]</sup>。土壤水分特征曲线的不同反应土壤持水能力大小,土壤水分特征曲线越高,说明土壤持水能力越强,反之则越弱<sup>[18]</sup>。土壤黏粒含量、比表面积和孔隙度对土壤的含水率和水势的关系起着决定性的作用。土壤结构、土壤有机质、土壤盐分等,也是土壤水分特征曲线的影响因素。土壤水分特征曲线能够描述和预测土壤的持水特性,可以利用经验模型对持水曲线进行模拟。

不同沸石掺配量下的土壤水分特征曲线如图 5 所示。由图 5 可知,当吸力一定时,土壤含水率随沸石掺配量的增加而升高。当沸石掺配量从 5% 增加到 10% 时,土壤含水率增量相对其他组较为显著。当沸石掺配量为 10% 和 15% 时,土壤含水率差别不大。当沸石掺配量从 15% 增加到 20% 时,含水率继续升高,但升高幅度小于沸石掺配量从 5% 增加到

10% 时。而且在高吸力阶段中,实验组含水率均高于未掺加沸石的对照组。试验结果表明:沸石掺配量为 20% 时土壤持水能力最强,未掺加沸石的对照组土壤持水能力最弱,这表明使用天然沸石改良黑钙土能够增强其持水能力。魏江生等<sup>[19]</sup>研究也发现相似规律:沸石能够提升沙质土壤保水能力。各试验组持水能力强弱:20% NZ > 15% NZ ≈ 10% NZ > 5% NZ > CK (CK: 对照组, NZ: 天然沸石)。由此可知,在进行土壤持水能力改良时,利用 10% 天然沸石能够改良土壤持水能力的原因是,沸石结构内有很多孔隙通道,比表面积较大,从而能够吸附更多的水分子,这决定了其对水分有很好的亲和力。使用天然沸石改良土壤,不仅可以提高土壤中的含水率、增强土壤抗旱能力,还能促进气体的扩散,有利于土壤的呼吸作用以及植物生长<sup>[20]</sup>。

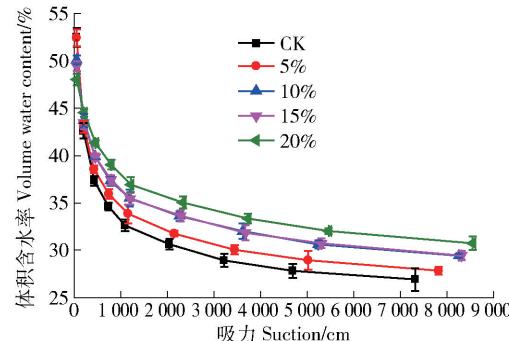


图 5 不同沸石掺配量下的土壤水分特征曲线

Fig. 5 Soil water characteristic curves under different zeolite amount

#### 3.3.2 土壤水分特征曲线拟合分析

对试验结果采用 Gardner 模型进行拟合。拟合结果列见表 4、图 6。

表 4 土壤水分特征曲线拟合方程

Tab. 4 Fitting equations of soil water characteristic curves

沸石掺配量 Zeolite amount /%	拟合方程 Fitting equation	a	b	R <sup>2</sup>	饱和含水率 Saturated moisture content /%
					S
0	$\theta = 90.09S^{-0.14}$	90.09	0.14	0.9893	56.74
5	$\theta = 86.39S^{-0.13}$	86.39	0.13	0.9927	54.70
10	$\theta = 76.75S^{-0.11}$	76.75	0.11	0.9986	51.34
15	$\theta = 75.08S^{-0.10}$	75.08	0.10	0.9986	50.73
20	$\theta = 70.17S^{-0.09}$	70.17	0.09	0.9846	49.18

注:  $\theta$  为土壤体积含水率;  $S$  为土壤水势;  $a$ 、 $b$  为拟合参数。Notes:  $\theta$  means soil volumetric moisture content;  $S$  means soil water potential;  $a$ ,  $b$  mean fitting parameters.

结果显示,各掺配量土样的水分特征曲线均能用 Gardner 模型拟合,相关系数从 0.9846 ~ 0.9986, Gardner 模型对实验结果拟合效果较好。由表 4 可知, Gardner 模型方程的拟合系数  $a$ 、 $b$  均随持水能力

增强而减小,呈负相关关系;随饱和含水率升高而增大,呈正相关关系。将饱和含水率和拟合系数  $a$  进行拟合,结果显示方程为:  $y = -11.9 + 0.187x$ , 决定系数  $R^2 = 0.9418$ 。土壤的饱和含水率越高时,土壤

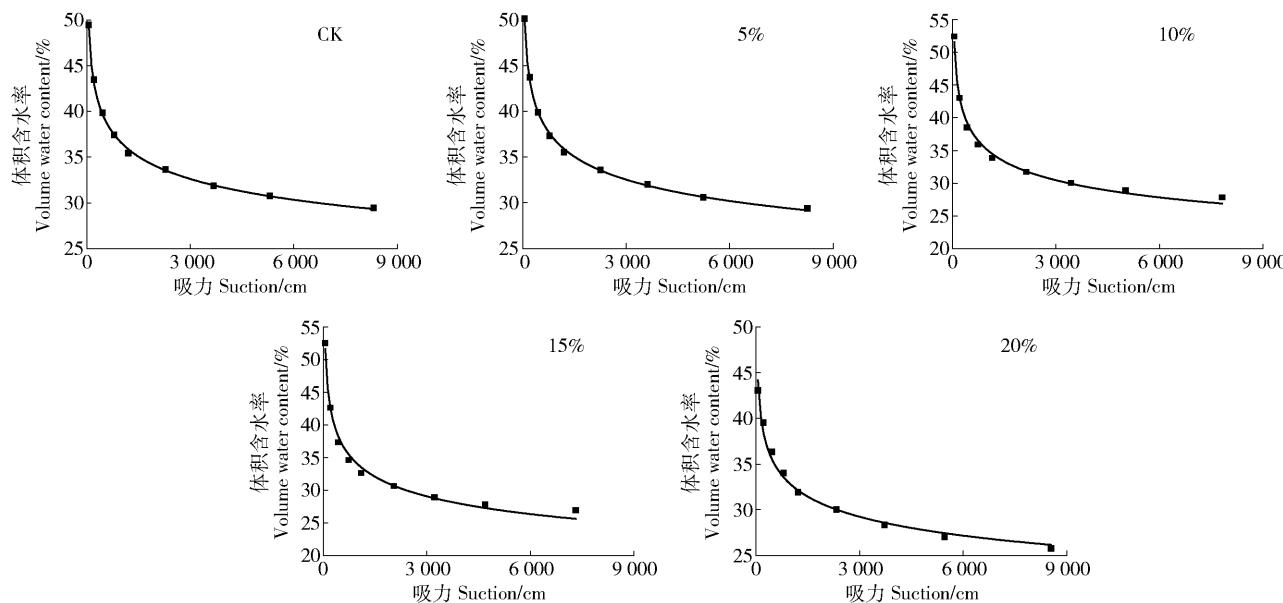


图6 不同沸石掺配量下土壤水分特征 Gardner 模型拟合曲线

Fig. 6 Gardner model fitting curves of soil water characteristics under different zeolite amount

的土水分特征曲线试验初始值越大,曲线初始水平越高;土壤失水率越小时,曲线下降幅度越小,曲线坡度相对缓和,曲线最终水平越高<sup>[21]</sup>。本研究发现,采用不同沸石掺配量改良黑钙土,虽然未掺加沸石的土壤饱和含水率较高,但是经过沸石改良的土壤具有更强的持水能力。饱和含水率高,不一定土壤水分特征曲线初始水平就高。

## 4 结 论

(1) 随着天然沸石掺配量的增加,土壤密度增加,与掺配量的大小呈正相关关系。当沸石掺配量从0增加至10%时,土壤密度增最为明显。当沸石掺配量从10%增加至20%时,土壤密度增加稍缓,增加的幅度有所下降。

(2) 毛管孔隙度和总孔隙度均随沸石掺配量增加而减小,呈负相关关系。当沸石掺配量为10%时,毛管孔隙度和总孔隙度降低幅度较大。沸石掺配量继续增大,孔隙度变化幅度相对变小。随着沸石掺配量的增加,土壤通气空隙度均不同程度增大。当沸石掺配量为10%时,土壤通气孔隙度为最大,说明当沸石掺配量为10%时土壤的透性最好。

(3) 土壤水分特征曲线含水率随着吸力的增加而降低,当吸力一定时,土壤含水率随沸石掺配量的增加而升高。使用天然沸石改良黑钙土能够增其持水能力。持水能力强弱:20% NZ > 15% NZ ≈ 10% NZ > 5% NZ > CK。考虑到土壤密度、孔隙度以及沸石成本,在进行土壤改良时,利用10% 天然沸石掺配量比较经济可行。

(4) 随着沸石掺配量增大,土壤密度增加,持水

能力增强,各组实验中土壤密度与持水能力呈正相关关系。土壤总孔隙度和毛管孔隙度与沸石掺配量呈负相关关系。孔隙度的降低并不一定减弱土壤的持水能力。

(5) 各组土壤的水分特征曲线均能用Gardner模型拟合。Gardner模型方程的拟合系数a、b均随持水能力增强而减小,呈负相关关系,随饱和含水率升高而增大,呈正相关关系。将饱和含水率和拟合系数a进行拟合,结果显示相关系数R<sup>2</sup>=0.9418。饱和含水率高,不一定土壤水分特征曲线初始水平就高。

## 参 考 文 献

- [1] 徐晓斌,王清. 我国黑土退化研究现状与展望[J]. 地球与环境, 2005, 33(增刊1): 588-592.  
Xu X B, Wang Q. The current status and prospects of research in black earth degradation in Northeast China [J]. Earth and Environment, 2005, 33 (Suppl. 1): 588-592.
- [2] 卢倩倩,王恩姮,陈祥伟. 季节性冻融对机械压实黑土微团聚体特征的影响[J]. 北京林业大学学报,2017,39(3):57-64.  
Lu Q Q, Wang E H, Chen X W. Effects of seasonal freeze and thaw cycles on the micro-aggregate characteristics of the mechanically compacted black soil [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(3):57-64.
- [3] 宋春雨,张兴义. 不同施肥措施对黑土土壤水分及保水性的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2007,23(2): 161-165, 171.  
Song C Y, Zhang X Y. Impact of fertilization methods on soil water and soil water retention [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(2):161-165, 171.
- [4] 楼莉萍,王光火,胡顺良. 沸石吸附铵离子的若干性质的研究

- [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2001,27(1):28-34.
- Lou L P, Wang G H, Hu S L. Characteristics of ammonium adsorption by the natural clinoptilolite [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2001, 27(1):28-34.
- [5] 张莉,赵保卫,李瑞瑞. 沸石改良土壤的研究进展[J]. 环境科学与管理,2012,37(1):39-43.
- Zhang L, Zhao B W, Li R R. Research progress of soil amelioration with zeolite [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(1):39-43.
- [6] Li H, Shi W Y, Shao H B, et al. The remediation of the lead-polluted garden soil by natural zeolite [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1-3):1106-1111.
- [7] 李华兴,李长洪,张新明,等. 天然沸石对土壤保肥性能的影响研究[J]. 应用生态学报,2001,12(2):237-240.
- Li H X, Li C H, Zhang X M, et al. Effect of natural zeolite on nutrient preserving capability of degraded slope soil in South China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (2):237-240.
- [8] 孔宪清,苑静. 天然沸石在温室土壤改良中的作用研究[J]. 中国非金属矿工业导刊,2005(2):31-33,37.
- Kong X Q, Yuan J. Study on natural zeolite in soil improvement of greenhouse [J]. China Nonmetallic Minerals Industry, 2005(2):31-33,37.
- [9] 刘宝元,阎百兴,沈波,等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
- Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the northeastern black soil area of China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1):1-8.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978:66-71.
- Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties [M]. Beijing: Science Press, 1978:66-71.
- [11] Gardner W R, Hillel D, Benyamin Y. Post-irrigation movement of soil water (1): redistribution [J]. Water Resources Research, 1970, 6(3):851-861.
- [12] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [13] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media, hydrology paper No. 3 [M]. Fort Collins: Colorado State University Press, 1964.
- [14] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Science, 1974, 117(6):311-314.
- [15] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3):53-56.
- [16] 林琳,单博,卢倩倩,等. 模拟机械压实黑土持水特征与孔隙分布[J]. 东北林业大学学报,2014, 42(12):102-105.
- Lin L, Shan B, Lu Q Q, et al. Water retention characteristics and pore size distribution of black soil under simulated mechanical compaction [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(12):102-105.
- [17] 陈丽华,鲁绍伟,张学培,等. 晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):79-82,86.
- Chen L H, Lu S W, Zhang X P, et al. Analysis of soil water content of main afforestation species in western Shanxi of Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15 (1):79-82,86.
- [18] 张强,孙向阳,黄利江,等. 毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J]. 林业科学研究,2004,17(增刊1):9-14.
- Zhang Q, Sun X Y, Huang L J, et al. Studies on soil water characteristic curves and infiltration capability of Mu Us Sandland [J]. Forest Research, 2004, 17 (Suppl. 1):9-14.
- [19] 魏江生,山本太平,董智,等. 在干旱区农业开发中对人工沸石作用的探讨[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(3):150-152.
- Wei J S, Yamamoto T, Dong Z, et al. Effect of artificial zeolite for agriculture development in arid land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(3):150-152.
- [20] 徐根洪. 天然沸石改良土壤的作用机理[J]. 矿产保护与利用,2003(5):18-20.
- Xu G H. The mechanism of the improvement of soil with natural zeolite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2003(5):18-20.
- [21] 李广文,冯起,张福平,等. 黑河上游草地土壤水分特征曲线研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(10):128-134.
- Li G W, Feng Q, Zhang F P, et al. The soil-water characteristic curve for grassland stand in upstream region of Heihe River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(10):128-134.

(责任编辑 范娟  
责任编委 杨晓晖)