

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.028

# 不同初始条件对砂姜黑土收缩特征的影响

魏翠兰<sup>1,2</sup> 高伟达<sup>1,2</sup> 李录久<sup>3</sup> 黄峰<sup>1,2</sup> 李保国<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 农业部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193;

3. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 利用离心机法, 分别测定了初始容重为 1.10、1.22、1.31 g/cm<sup>3</sup>, 初始含水率为 49.34%、43.55%、36.03%、31.93% 和 25.51% 以及砂姜质量分数为 0、4%、6%、8%、10% 和 12% 的砂姜黑土样品在不同吸力下的土壤体积含水率及收缩特征。结果表明: 在考虑土壤收缩变形的情况下, 相比 VG 模型, Gregory 模型可以更好地拟合砂姜黑土的水分特征, 砂姜黑土含水率随着土样初始容重及初始含水率增加而增加, 随着砂姜含量增加而降低。收缩过程中, 在不同初始容重处理下, 初始容重增加, 土壤的线缩率减小, 土壤收缩后容重增加比例下降; 且初始容重增加显著提高了土壤结构收缩段孔隙收缩比例, 降低了线性收缩段孔隙收缩比例。在不同初始含水率处理下, 初始含水率越高, 土壤线缩率及收缩后的容重越大; 当初始含水率为 36.03% 时, 土壤结构收缩段孔隙收缩比例最高, 线性收缩段孔隙收缩比例较低。在不同砂姜含量处理下, 砂姜含量的提高减小了线缩率及土壤收缩后的容重, 增加了土壤总孔隙比。因此, 对于砂姜黑土而言, 在一定范围内, 提高土壤容重以及降低土壤含水率可以减少土壤收缩; 而在砂姜含量较高的情况下, 主要应防止由于大孔隙存在而引起的水分流失。

**关键词:** 砂姜黑土; 容重; 含水率; 砂姜含量; 收缩特征

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)10-0229-08

## Effects of Initial Conditions on Soil Shrinkage Characteristic of Shajiang Black Soil

WEI Cuilan<sup>1,2</sup> GAO Weida<sup>1,2</sup> LI Lujia<sup>3</sup> HUANG Feng<sup>1,2</sup> LI Baoguo<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China

3. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Shajiang black soil is one of the major soil types with low and medium productivity in Huaibei Plain, a sub plain of Huang - Huai - Hai Plain (HHH) of China. Centrifuge method was used to investigate the effects of different initial conditions on its shrinkage characteristics during drying process. The results showed that soil water characteristic curve (SWCC) was fitted better by Gregory model than the VG model when the shrinkage characteristic was considered. When the initial density ( $\rho_b$ ) were 1.10 g/cm<sup>3</sup>, 1.22 g/cm<sup>3</sup> and 1.32 g/cm<sup>3</sup> (B1, B2 and B3), respectively, soil water retention capacity at the same water suction was improved as the initial  $\rho_b$  was increased, linear shrinkage ratio was increased as the initial  $\rho_b$  was decreased. The final  $\rho_b$  upon shrinkage was positively correlated with the initial  $\rho_b$ . The increased initial bulk density increased void ratio in soil structure shrinking phase, while decreased void ratio in linear shrinking phase. When the initial water content were 49.34%, 43.55%, 36.03%, 31.93% and 25.51% (W1, W1, W3, W4 and W5), respectively, the higher the initial water content was, the faster the water lost, and the linear shrinkage ratio was increased. The void ratio in the structure shrinkage phase was the highest when water content was 36.03%. When the Shajiang contents were 0, 4%, 6%, 8%, 10% and 12% (SJ1, SJ2, SJ3, SJ4, SJ5 and SJ6) respectively, Shajiang content had little effect on linear shrinkage ratio and bulk density after shrinkage, and with the increase of Shajiang content, soil water content under the same soil suction was decreased. Soil void ratio was increased as Shajiang content was increased, but the soil moisture ratio was decreased under the same void ratio.

**Key words:** Shajiang black soil; bulk density; water content; Shajiang content; shrinkage characteristics

收稿日期: 2017-02-24 修回日期: 2017-03-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD05B00)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300804-3)

作者简介: 魏翠兰(1989—),女,博士生,主要从事土壤变化及其过程量化研究,E-mail: weicuilan1989@cau.edu.cn

通信作者: 李保国(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤与水资源、作物模型及应用研究,E-mail: libg@cau.edu.cn

## 引言

土壤收缩是土壤水分流失过程中土壤体积减小的一种现象,它影响了土壤中许多重要过程。如土壤收缩开裂时,土壤强度增大<sup>[1]</sup>,加大了土壤水力传导度,可能导致优先流,降低土壤持水性,增加田间土壤的水分和养分流失,增加地下水污染风险<sup>[2-6]</sup>;其次,土壤收缩开裂影响土壤表面水分蒸发、地表径流产生等过程<sup>[7-8]</sup>;另外,土壤收缩可能破坏作物根系,影响其对水分的吸收<sup>[9]</sup>;再者,土壤收缩也改变了容重等土壤结构特征<sup>[10]</sup>。

土壤收缩是一个复杂的过程,受多种其他土壤因素的影响。OMIDI等<sup>[11]</sup>在实验中发现,蒙脱石含量高的土壤收缩最大,其次为含伊利石较高的土壤;CHERTKOV<sup>[12]</sup>认为土壤粘粒含量越高,土壤收缩越强;PENG等<sup>[13]</sup>认为土壤收缩能力与土壤有机质含量呈正相关;冯欣等<sup>[14]</sup>认为土壤的收缩性与土壤的蒸发速率相关;除此以外,ZHANG等<sup>[15]</sup>认为土壤收缩与土壤容重呈负相关关系;邢旭光等<sup>[16]</sup>研究结果也表明土壤径向、轴向以及体积收缩都随着土壤容重的增加而减小;BIRLE等<sup>[17]</sup>认为土壤收缩不但与土壤容重相关,土壤初始含水率也对土壤收缩产生影响;杨晶等<sup>[18]</sup>和李保雄等<sup>[19]</sup>的试验也表明土壤含水率影响了土壤的压缩系数以及抗剪强度。同时,有研究认为沙粒对于水分的吸附较弱,且骨架较为稳定,因此沙粒含量较高的土壤收缩受到抑制<sup>[20]</sup>。

砂姜黑土是淮北平原主要土壤类型之一,砂姜层是砂姜黑土的基本发育层<sup>[21-22]</sup>,砂姜层的存在对作物根系生长造成阻碍,对水分运行造成影响;除此之外,砂姜黑土质地粘重,土壤收缩开裂特征明显,在干湿交替情况下,土壤表层容重变化大,影响了砂姜黑土质量<sup>[23-24]</sup>。目前为止,有关砂姜黑土土壤收缩及水分性质影响因素的相关报道还很少,尤其砂姜作为砂姜黑土特有属性,对砂姜黑土收缩及持水性的影响并不清楚。因此,本文以砂姜黑土为研究对象,定量分析不同初始容重、初始含水率及砂姜含量下土壤水分及收缩特征,以期对砂姜黑土及其他类型土壤的收缩开裂研究奠定基础并提供借鉴,为砂姜黑土水分运移及田间管理提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

供试砂姜黑土样品采自安徽省阜阳市临泉县单桥镇(115°17' E, N32°59' N,海拔高度为37 m)砂姜黑土改良试验点农田。田间取0~10 cm表层土

样,在实验室内风干后过2 mm筛备用。土壤颗粒组成采用沉降法测定,其中粒径小于0.002 mm的粘粒含量为39.75%,0.002~0.02 mm的粉粒含量为40.26%,0.02~2 mm的砂粒含量为20.36%;砂姜黑土土粒密度采用比重计法测定,为2.69 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

田间多组实测结果表明砂姜黑土田间容重为1.03~1.44 g/cm<sup>3</sup>,且多数在1.10~1.30 g/cm<sup>3</sup>范围内,砂姜含量范围为0.3%~14.7%(质量分数),为了探讨容重和砂姜含量对砂姜黑土收缩特征的影响,本文设置初始容重为1.10、1.22、1.31 g/cm<sup>3</sup>,分别记作B1、B2和B3;砂姜质量分数设定为0、4%、6%、8%、10%和12%,分别记作SJ1、SJ2、SJ3、SJ4、SJ5和SJ6;另外,由于砂姜黑土农田表层含水率随季节变化较大,因此设置不同初始质量含水率,为49.34%、43.55%、36.03%、31.93%和25.51%,分别记作W1、W2、W3、W4和W5。试验中每个处理设定3组重复,每个处理取其均值作为计算结果。

### 1.3 试验方法

土样制备后利用高速冷冻离心机(G III系列,R11D2型,日本)测定不同吸力下土壤含水率和收缩特征,设定离心机转速分别为500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000 r/min,离心时间为60 min,测定过程在4℃的恒温下进行。样品在离心前及每次离心后都用百分之一天平称量以获得质量含水率,同时利用游标卡尺测定土样高度变化以计算土样体积,继而计算土壤体积含水率及容重。试样结束后,土样在105℃干燥箱中干燥24 h,再次测定土样高度和质量。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 土壤吸力计算

考虑到土壤在离心失水过程中体积变小对土壤吸力产生的影响,采用尚慢廷等<sup>[25]</sup>提出的吸力计算改进公式计算不同转速下的土壤吸力,即

$$H = 1.3975 \times 10^{-6} f^2 (r_1 - l - h') (3r_1 + l + h') \quad (1)$$

式中  $H$ ——土壤吸力,cm  $f$ ——转速,r/min  
 $r_1$ ——离心机转子中心到土样底端距离,cm  
 $l$ ——离心机转子中心到离心盒顶端的距离,cm  
 $h'$ ——离心盒顶端到土样表面的距离,cm

#### 1.4.2 砂姜黑土水分特征曲线

VAN GENUCHTEN<sup>[26]</sup>在1980年提出的水分特征曲线模型(简称VG模型)可以很好地拟合不同类型土壤在吸力下的水分变化,而GREGORY等<sup>[27]</sup>在2010年提出的土壤水分特征曲线模型(简称

Gregory 模型)则考虑了土壤收缩后的孔隙度变化,因此本文对 2 个模型的拟合含水率与实测值进行比较,选择模拟效果较好的模型对砂姜黑土不同初始条件的水分特征进行拟合分析。

#### (1) VG 模型

VG 模型表达式为

$$\theta(H) = \frac{\theta_m - \theta_r}{[1 + (\alpha H)^n]^{1 - \frac{1}{n}}} + \theta_r \quad (2)$$

式中  $\theta_m$ ——土壤饱和含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $\theta_r$ ——土壤残余含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $\theta$ ——土壤含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $\alpha, n$ ——拟合参数

#### (2) Gregory 模型

Gregory 模型表达式为

$$S = \frac{S_m - S_r}{[1 + (\varepsilon^b H)^{n'}]^{1 - \frac{1}{n'}}} + S_r \quad (3)$$

其中  $\varepsilon = 1 - \frac{m}{v\rho_s}$  (4)

式中  $S_m$ ——土壤最大饱和度,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $S_r$ ——土壤残余饱和度,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $S$ ——土壤饱和度,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $\varepsilon$ ——土壤孔隙度,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $b, n'$ ——拟合参数  
 $m$ ——土壤质量, g  
 $v$ ——土壤体积,  $\text{cm}^3$   
 $\rho_s$ ——土粒密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

#### 1.4.3 砂姜黑土线缩率计算

利用线缩率公式<sup>[28]</sup>,计算不同初始条件下砂姜黑土样品在离心失水时土样轴向的收缩特征

$$\delta_{sl} = \frac{z_i}{h} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $\delta_{sl}$ ——土壤线缩率, %  
 $z_i$ ——不同吸力下土样高度收缩量, cm  
 $h$ ——土样初始高度, cm

#### 1.4.4 砂姜黑土收缩特征曲线

土壤收缩特征曲线定义为土壤孔隙随土壤湿度的变化情况,本文采用 PENG 等<sup>[29]</sup>在 2005 年提出的收缩曲线模型进行拟合,其表达式为

$$e = e_r + \frac{e_s - e_r}{[1 + (\chi\vartheta)^{-p}]^q} \quad (6)$$

式中  $e$ ——土壤孔隙比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $e_s$ ——土壤饱和点孔隙比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $e_r$ ——土壤残余孔隙比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $\vartheta$ ——土壤湿度比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $\chi, p, q$ ——拟合参数

另外,计算土壤收缩曲线结构收缩段、线性收缩段、残余收缩段以及零收缩段的孔隙收缩比例<sup>[29]</sup>为

$$e_{ss} = \frac{e_s - e_w}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (7)$$

$$e_{ps} = \frac{e_w - e_p}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (8)$$

$$e_{rs} = \frac{e_p - e_z}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (9)$$

$$e_{zs} = \frac{e_z - e_r}{e_s - e_r} \times 100\% \quad (10)$$

式中  $e_w$ ——土壤结构收缩段终点孔隙比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $e_p$ ——土壤线性收缩段终点孔隙比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $e_z$ ——土壤残余收缩段终点孔隙比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$   
 $e_{ss}$ ——土壤结构收缩段孔隙收缩比例, %  
 $e_{ps}$ ——土壤线性收缩段孔隙收缩比例, %  
 $e_{rs}$ ——土壤残余收缩段孔隙收缩比例, %  
 $e_{zs}$ ——土壤零收缩段孔隙收缩比例, %

#### 1.4.5 土壤吸力与容重的关系拟合

土壤在收缩时,体积减小,土壤容重也发生变化,本研究选用吕殿青等<sup>[30]</sup>提出的容重与吸力之间的关系式,拟合不同初始条件下土壤容重的变化趋势,即

$$\frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s - \rho_{bs}} = A'H^{-\beta'} \quad (11)$$

式中  $\rho_{bs}$ ——土壤饱和时容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$   
 $\rho_b$ ——土壤容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$   
 $A', \beta'$ ——经验常数

## 2 结果与分析

### 2.1 砂姜黑土水分特征曲线拟合

砂姜黑土脱水过程中,土壤收缩变形,体积发生变化,计算土壤体积含水率所对应的体积也在一直发生变化。VG 模型和 Gregory 模型拟合体积含水率与实测值相关性(图 1)表明:VG 模型和 Gregory 模型在土壤体积变化的情况下对土壤水分特征曲线拟合效果都较好,决定系数  $R^2$  大于 0.99(图 1);但是相比 VG 模型,利用 Gregory 模型拟合曲线所得到的均方根误差(RMSE)更小。在不同初始容重处理下,VG 模型 RMSE 范围为 0.009 ~ 0.015  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , Gregory 模型 RMSE 范围为 0.007 ~ 0.015  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;在不同初始含水率处理下,VG 模型 RMSE 范围为 0.005 ~ 0.015  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , Gregory 模型为 0.005 ~ 0.014  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;在不同砂姜含量处理下,VG 模型 RMSE 范围为 0.019 ~ 0.023  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , Gregory 模型为 0.005 ~ 0.011  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

从图 1 中也可以看出,利用 Gregory 模型拟合获

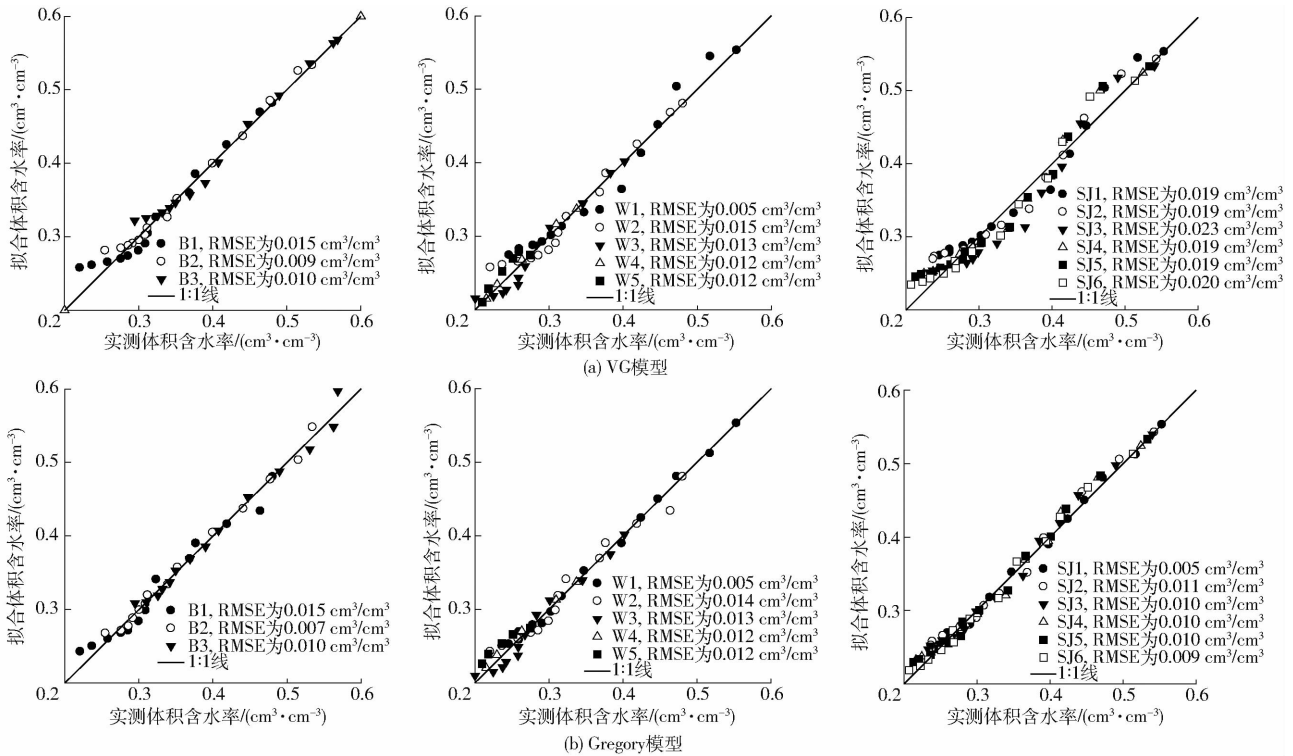


图1 土壤拟合含水率和实测含水率的相关性

Fig. 1 Relationship between measured and modeled soil volume water contents

得的土壤体积含水量和实测值相关性更加贴近 1:1 线,因此,利用 Gregory 模型相比于 VG 模型能够更好地拟合土壤在收缩状态下的水分特征。

## 2.2 初始条件对砂姜黑土水分特征的影响

根据 2.1 节的分析,本文选用 Gregory 模型对土壤水分特征曲线进行拟合,表 1 为拟合参数。其中参数  $b$  反映土壤在失水过程中相对于最初状态时的变形程度,其值越大,土壤变形越大,破坏程度越高<sup>[27]</sup>。从表 1 可以看出,随着土壤初始容重的增加, $b$  值下降,土壤破坏程度减小;初始含水率对土壤破坏程度没有明显的影响,初始含水率为 W5 时, $b$  值最大,土壤破坏最大;初始含水率为 W3 时,土壤的破坏程度最小;相比 SJ1 处理,在添加砂姜以后, $b$  值都有所降低。

图 2 为不同初始条件下土壤水分特征曲线(土壤含水率由模型中土壤饱和度转化获得)。从图 2 可以看出,土壤体积含水率均随着土壤吸力增加而降低。在土壤吸力较小时,土壤含水率下降速率随着吸力增加变化显著,在高吸力阶段,土壤含水率下降较为缓慢。

由图 2a 可知,对于不同初始容重的土样,土壤含水率由小到大始终表现为 B1、B2、B3;当土壤容重为 B2 和 B3 时,土壤含水率在低吸力段下降较快,当土壤吸力大于 1 000 cm 以后,土壤含水率下降缓慢;当土壤容重为 B1 时,土壤含水率下降速率大于其他 2 个处理。在最大土壤吸力处,B1 处理的土

表 1 不同初始条件下土壤水分特征曲线拟合参数

Tab. 1 Fitted parameters of soil water characteristic curves under different initial conditions

不同初始条件	最大饱和度 $S_m / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	残余饱和度 $S_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	拟合参数		决定系数 $R^2$
			$b$	$n'$	
容重	B1	0.815	0.578	7.746 2.798	0.997
	B2	1.006	0.750	6.949 2.932	0.999
	B3	1.067	0.964	6.498 3.698	0.998
含水率	W1	0.948	0.662	7.463 4.315	1
	W2	0.815	0.578	7.747 2.800	0.997
	W3	0.687	0.432	7.070 1.676	0.997
	W4	0.567	0.272	7.111 1.684	0.998
	W5	0.458	0.208	9.541 2.504	0.998
砂姜含量	SJ1	0.948	0.662	7.463 4.315	1
	SJ2	0.926	0.625	7.265 2.677	0.998
	SJ3	0.926	0.609	7.206 2.637	0.999
	SJ4	0.881	0.550	7.144 2.322	0.998
	SJ5	0.910	0.538	7.018 2.171	0.999
	SJ6	0.867	0.490	7.341 2.326	0.999

壤含水率为 24.25%,与该值相比,B2 及 B3 处理下土壤含水率分别提高了 10.30% 和 27.19%。由此可见,在一定范围内,增加土壤容重提高了土壤的持水性,该试验结果与吕殿青等<sup>[31]</sup>的试验结果是一致的,其认为在容重增加时,有效饱和度增加,BIRLE 等<sup>[17]</sup>的试验也有相同的结论。

在不同初始含水率处理下,在低吸力阶段,初始土壤含水率越高,土壤含水率下降越快(图 2b),

BIRLE 等<sup>[17]</sup>也表明土壤含水率对持水性影响较大。W1、W2、W3、W4 及 W5 处理整个过程中土壤含水率下降比例分别为 54.32%、49.53%、49.79%、58.07% 以及 59.01%，在初始含水率为 W2 和 W3 时，土壤水分损失较小。

相同吸力下，土壤中砂姜含量越高，土壤含水率越低(图 2c)，相比 SJ1 处理，SJ2、SJ3、SJ4、SJ5 以及 SJ6 处理的最终含水率分别降低了 5.55%、7.92%、

16.85%、18.66% 以及 25.97%。宋日权等<sup>[32]</sup>的试验表明，土壤在掺砂之后土壤含水率降低，也有研究认为土壤砾石含量的增加加快了土壤水分的移动，减弱了土壤有效水分的储存<sup>[33-34]</sup>，与本文结果有相似之处。这主要是由于砂姜占据了土壤中的一部分体积，且减少了土壤颗粒之间的连接，进而减少了土壤中小孔隙的形成，增加了土壤中孔隙的产生，从而加快了水分的流失。

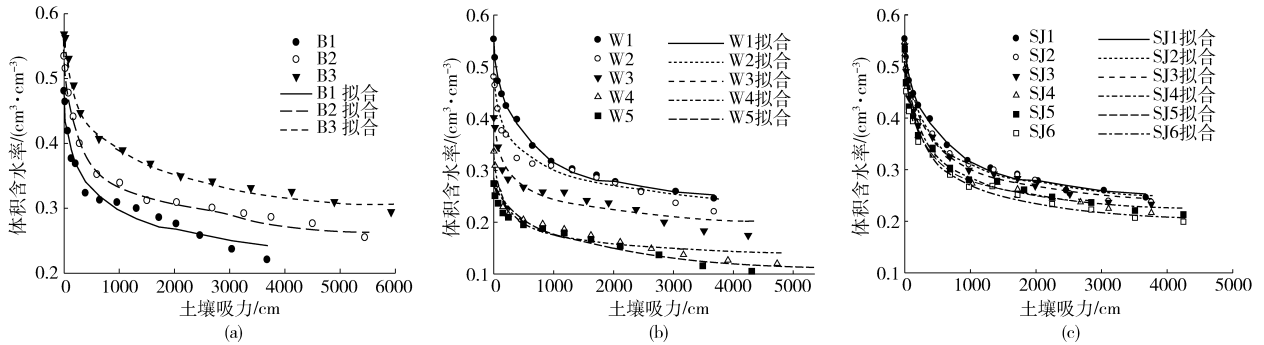


图 2 不同初始条件下土壤水分特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curves under different initial conditions

## 2.3 初始条件对砂姜黑土收缩特征的影响

### 2.3.1 初始条件对线缩率的影响

图 3 是不同初始条件下土壤线缩率随着土壤吸

力的变化，可以看出，土壤线缩率随着土壤吸力增加而增加，且当土壤吸力小于 2 000 cm 时，土壤线缩率变化较快，在吸力超过 2 000 cm 后，表现较为平缓。

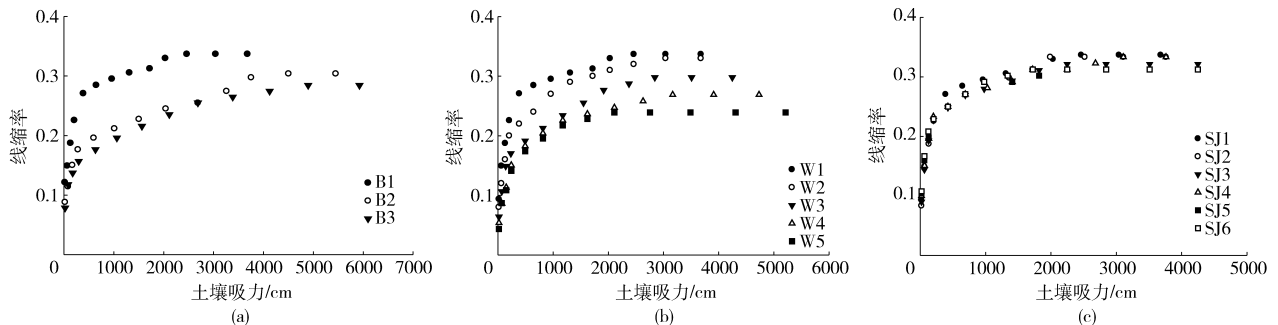


图 3 不同初始条件下土壤线缩率

Fig. 3 Soil linear shrinkage ratio under different initial conditions

从图 3a 可以看出，土壤线缩率随着土壤初始容重的减小而增加。容重为 B1 时，其线缩率最大值为 0.337，初始容重为 B2 和 B3 时，线缩率最大值分别下降了 9.76% 和 15.59%，这与邢旭光等<sup>[16]</sup>的结果是一致的。主要是因为，在吸力较小时，土壤排出水分主要来自土壤中大孔隙，而大孔隙中水分的排出易引起土壤收缩。当土壤初始容重减小时，土壤中大孔隙的数量增加，从而引起了土壤更大的收缩幅度。

随着土壤初始含水率增加，土壤线缩率增加(图 3b)，W1、W2、W3、W4 及 W5 处理下的线缩率分别为 0.337、0.337、0.298、0.269 以及 0.239。线缩率的减小一方面是由于在相同吸力下，含水率较高的土样排出的水量增加，增加了土壤收缩的可能性；

另外一方面，杨晶等<sup>[18]</sup>基于黄土做的力学相关试验表明，随着含水率的增加，土壤的压缩系数增大；再者，有试验研究表明含水率的提高会降低土壤的抗剪强度<sup>[19, 35]</sup>，影响土壤的土力学性质，这对土壤收缩可能也会造成一定影响。

从图 3c 可以看出，随着砂姜含量的增加，土壤线缩率最终都稍微有所减小。但是在土壤低吸力阶段，土壤的线缩率随着砂姜含量的增加而增加，这主要是由于砂姜含量增加加快了土壤在低吸力阶段的排水，而大孔隙的排水会导致土壤收缩，从而进一步说明了砂姜黑土中砂姜的存在不利于土壤水分保持。

### 2.3.2 初始条件对收缩特征曲线的影响

表 2 为利用式(6)拟合土壤收缩特征曲线所得

参数,其中 $\chi$ 、 $p$ 、 $q$ 是无量纲的拟合参数,但是与曲线形状相关。从表2可以看出,利用PENG等<sup>[29]</sup>的方程可以较好地拟合不同处理下土壤的收缩曲线,决定系数都达到了0.9以上。

表2 不同初始条件下收缩特征曲线拟合参数

Tab.2 Fitted parameters of soil shrinkage characteristic curve under different initial conditions

不同初始条件	决定系数 $R^2$	拟合参数			
		$\chi$	$p$	$q$	
容重	B1	0.968	1.060	6.585	0.512
	B2	0.944	1.824	3.175	2.236
	B3	0.949	1.860	3.396	2.961
含水率	W1	0.986	0.818	14.136	0.179
	W2	0.968	1.060	6.585	0.512
	W3	0.977	3.241	3.594	7.789
	W4	0.989	2.702	3.877	2.221
	W5	0.988	2.110	6.700	1.019
砂姜含量	SJ1	0.986	0.818	14.136	0.179
	SJ2	0.983	0.995	6.763	0.522
	SJ3	0.982	0.941	7.878	0.395
	SJ4	0.983	0.892	9.594	0.261
	SJ5	0.981	0.942	7.623	0.398
	SJ6	0.987	0.960	10.727	0.331

土壤收缩分为结构收缩、线性收缩、残余收缩以及零收缩4个阶段,在零收缩段和残余收缩段,土壤体积收缩量小于土壤中水分的损失量;在线性收缩段,土壤体积收缩量几乎等于土壤中水分的减少量,线性收缩段比例高也表明土壤结构较差;在结构收缩阶段,土壤失水较大,但是带来的土壤形变较小,

结构收缩阶段比例增加则说明土壤结构较好。

表3是不同收缩段孔隙收缩比例及终点处的孔隙比值。从表3可以看出,初始容重为B1、B2及B3的土样其总孔隙比分别下降了58.16%、56.25%及56.08%,其中土壤结构收缩段孔隙收缩比例为13.97%、32.14%以及33.22%,线性收缩段的比例分别为66.98%、57.33%以及56.27%,B2和B3处理显著提高了结构收缩段的孔隙收缩比例,降低了线性收缩段的孔隙收缩比例。由此可见,在一定的范围内,增加砂姜黑土土壤容重,可以增加土壤孔隙度,减小土壤的收缩,有利于土壤结构稳定。

在不同初始含水率条件下,土壤收缩后总孔隙比分别下降了59.79%、58.16%、55.57%、46.54%及40.76%,其中结构收缩段孔隙比比例分别为6.64%、13.97%、24.20%、20.14%及11.78%,线性收缩段孔隙比比例分别为66.79%、66.99%、67.77%、69.92%及73.97%。土壤含水率在较高或较低时,都不利于土壤结构稳定,土壤含水率为W3时,结构收缩段孔隙收缩比例最高,且线性收缩段比例较低,表明在该含水率下土壤结构较为稳定。

在不同砂姜含量条件下,土壤收缩后总孔隙比分别下降了59.78%、57.08%、56.81%、56.91%、55.64%及52.86%,与SJ1相比,SJ2、SJ3、SJ4、SJ5及SJ6处理下,土壤结构收缩段孔隙比比例显著提高,分别增加了12.08%、6.97%、4.57%、7.43%、8.23%,这主要与砂姜不易引起土壤收缩有关。在相同的孔隙比时,土壤含水率降低。

表3 土壤收缩特征曲线各段(结构收缩段、线性收缩段、残余收缩段及零收缩段)终点孔隙比及孔隙收缩比例

Tab.3 Void ratio and its decreased percentage of end-points of defined zones (structural, proportional, residual shrinkage and zero zones)

不同初始条件	土壤孔隙比/( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )					土壤孔隙收缩比例/%				
	$e_r$	$e_s$	$e_p$	$e_w$	$e_s$	$e_{ss}$	$e_{ps}$	$e_{rs}$	$e_{zs}$	
容重	B1	0.597 <sup>a</sup>	0.614 <sup>a</sup>	0.755 <sup>a</sup>	1.311 <sup>a</sup>	1.427 <sup>a</sup>	13.97 <sup>b</sup>	66.98 <sup>a</sup>	16.98 <sup>a</sup>	2.04 <sup>a</sup>
	B2	0.525 <sup>b</sup>	0.532 <sup>b</sup>	0.596 <sup>b</sup>	0.983 <sup>b</sup>	1.200 <sup>b</sup>	32.14 <sup>a</sup>	57.33 <sup>b</sup>	9.48 <sup>b</sup>	1.03 <sup>b</sup>
	B3	0.462 <sup>b</sup>	0.469 <sup>b</sup>	0.524 <sup>b</sup>	0.856 <sup>b</sup>	1.052 <sup>b</sup>	33.22 <sup>a</sup>	56.27 <sup>b</sup>	9.32 <sup>b</sup>	1.18 <sup>b</sup>
含水率	W1	0.567 <sup>d</sup>	0.584 <sup>d</sup>	0.791 <sup>b</sup>	1.354 <sup>b</sup>	1.410 <sup>d</sup>	6.64 <sup>c</sup>	66.79 <sup>b</sup>	24.55 <sup>a</sup>	2.01 <sup>a</sup>
	W2	0.597 <sup>d</sup>	0.614 <sup>d</sup>	0.755 <sup>b</sup>	1.311 <sup>b</sup>	1.427 <sup>c</sup>	13.97 <sup>b</sup>	66.99 <sup>b</sup>	16.99 <sup>b</sup>	2.04 <sup>a</sup>
	W3	0.679 <sup>c</sup>	0.683 <sup>c</sup>	0.737 <sup>c</sup>	1.227 <sup>c</sup>	1.402 <sup>cd</sup>	24.20 <sup>a</sup>	67.77 <sup>b</sup>	7.46 <sup>c</sup>	0.55 <sup>c</sup>
	W4	0.787 <sup>b</sup>	0.792 <sup>b</sup>	0.855 <sup>a</sup>	1.334 <sup>b</sup>	1.472 <sup>b</sup>	20.14 <sup>a</sup>	69.92 <sup>b</sup>	9.19 <sup>c</sup>	0.72 <sup>c</sup>
	W5	0.888 <sup>a</sup>	0.896 <sup>a</sup>	0.975 <sup>a</sup>	1.427 <sup>a</sup>	1.499 <sup>a</sup>	11.78 <sup>b</sup>	73.97 <sup>a</sup>	12.92 <sup>b</sup>	1.30 <sup>b</sup>
砂姜含量	SJ1	0.567 <sup>b</sup>	0.584 <sup>b</sup>	0.791 <sup>a</sup>	1.354 <sup>b</sup>	1.410 <sup>b</sup>	6.64 <sup>b</sup>	66.78 <sup>a</sup>	24.55 <sup>a</sup>	2.01 <sup>a</sup>
	SJ2	0.609 <sup>b</sup>	0.628 <sup>ab</sup>	0.769 <sup>b</sup>	1.301 <sup>b</sup>	1.419 <sup>b</sup>	14.56 <sup>a</sup>	65.67 <sup>a</sup>	17.40 <sup>a</sup>	2.35 <sup>a</sup>
	SJ3	0.608 <sup>b</sup>	0.628 <sup>ab</sup>	0.784 <sup>b</sup>	1.309 <sup>b</sup>	1.408 <sup>b</sup>	12.37 <sup>a</sup>	65.62 <sup>a</sup>	19.50 <sup>a</sup>	2.50 <sup>a</sup>
	SJ4	0.639 <sup>a</sup>	0.654 <sup>a</sup>	0.828 <sup>a</sup>	1.403 <sup>a</sup>	1.483 <sup>a</sup>	9.47 <sup>a</sup>	68.12 <sup>a</sup>	20.62 <sup>a</sup>	1.77 <sup>b</sup>
	SJ5	0.636 <sup>a</sup>	0.656 <sup>a</sup>	0.809 <sup>a</sup>	1.332 <sup>b</sup>	1.434 <sup>b</sup>	12.78 <sup>a</sup>	65.53 <sup>a</sup>	19.17 <sup>a</sup>	2.50 <sup>a</sup>
	SJ6	0.682 <sup>a</sup>	0.705 <sup>a</sup>	0.872 <sup>a</sup>	1.377 <sup>a</sup>	1.447 <sup>a</sup>	9.15 <sup>a</sup>	66.01 <sup>a</sup>	21.83 <sup>a</sup>	3.00 <sup>a</sup>

注:不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

## 2.4 初始条件对砂姜黑土容重的影响

土壤收缩使得土壤体积减小,土壤容重也不断发生变化,利用吕殿青等<sup>[30]</sup>提出的容重与吸力的关

系方程,拟合不同初始条件下土壤容重随土壤吸力的变化,结果表明决定系数达到了0.99以上。不同初始条件下土壤容重都随着吸力的增加而增加。

从图 4a 可以看出,初始容重越大,收缩后最终容重越大。当土壤初始容重为 B1 时,收缩后土壤容重增加了 50.79%,初始容重为 B2 及 B3 时,容重分别增加 43.63% 和 39.73%,也有研究发现初始容重范围为  $1.2 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$  不同土壤在收缩后容重增量为  $0.46 \sim 0.19 \text{ g/cm}^3$  [36],与本文研究结果一致。而土壤容重的变化趋势也进一步表明,在一定范围内,土壤初始容重的增加减少了土壤的收缩与压实。

初始含水率对容重的影响与线缩率一致,初始含水率越高,土壤最终收缩后的容重越大,且土壤容

重在低吸力阶段增加最快,当土壤吸力大于  $1000 \text{ cm}$  时,土壤容重增长缓慢(图 4b)。与开始时的容重相比,在 W1、W2、W3、W4 和 W5 的初始含水率处理下,土壤容重分别增加了 50.79%、50.79%、43.75%、37.87% 以及 32.35%,容重的增加表明含水率较高时,土壤易收缩变紧实。

随着砂姜含量的增加,土壤收缩后容重反而较低(图 4c),而这主要是因为砂姜本身不具有收缩性,且砂姜密度低于土壤颗粒密度,因此相同质量的砂姜和土壤,容重反而下降。

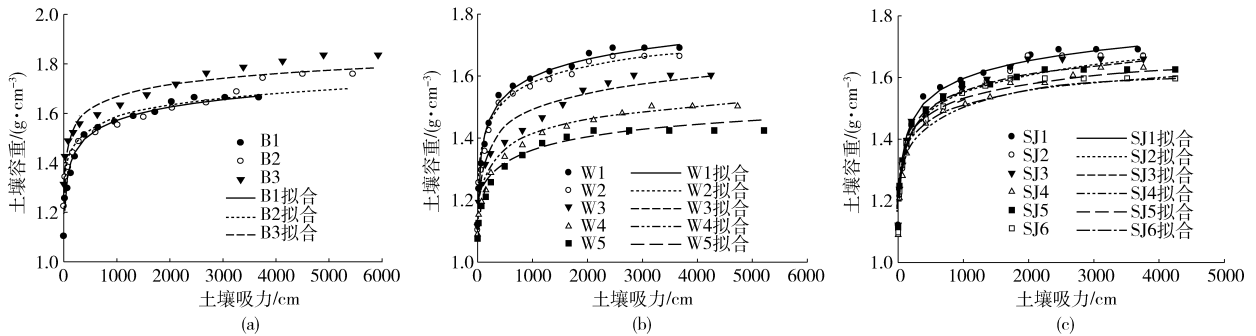


图 4 不同初始条件下土壤容重随土壤吸力的变化

Fig. 4 Changes of soil bulk density with soil suction under different initial conditions

### 3 结论

(1) 在考虑土壤收缩的情况下, VG 模型和 Gregory 模型都能很好地拟合土壤水分特征曲线,但 Gregory 模型的 RMSE 更小。

(2) 相比容重为  $1.10 \text{ g/cm}^3$  处理,砂姜黑土初始容重为  $1.22$ 、 $1.31 \text{ g/cm}^3$  时,土壤持水性增强;同时,初始容重增加后,土壤线缩率、总孔隙比下降比例及收缩后容重增加比例都降低;另外,初始容重增加显著提高了土壤结构收缩段比例。由此可见,对于砂姜黑土而言,表层土壤容重在一定范围内的紧

实可以提高其保水性并减弱土壤收缩。

(3) 砂姜黑土初始含水率为 49.34% 时,土壤水分流失最快,不利于水分保持。随着初始含水率增加,土壤收缩性增强,土壤总孔隙比下降比例增高,由于收缩引起的土壤容重变化增大。当含水率为 36.03% 时,土壤结构收缩段比例最高,有利于结构稳定。

(4) 砂姜黑土中砂姜含量越高,土壤持水性越弱。但是,相比不添加砂姜的处理,砂姜黑土中添加不同比例的砂姜以后,土壤线缩率及收缩后的容重都减小,总孔隙比增加。

### 参 考 文 献

- WHITMORE A P, WHALLEY W R. Physical effects of soil drying on roots and crop growth[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(10): 2845 - 2857.
- HEWITT J S, DEXTER A R. The behavior of roots encountering cracks in soil. II development of a predictive model[J]. *Plant and Soil*, 1984, 79(1): 11 - 28.
- TAY Y Y, STEWART D I, COUSENS T W. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners[J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1-4): 263 - 274.
- KAMAI T, WEISBROD N, DRAGILA M I. Impact of ambient temperature on evaporation from surface-exposed fractures[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(2): W02417.
- LI J H, ZHANG L M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface[J]. *Engineering Geology*, 2011, 123(4): 347 - 358.
- SHOKRI N, ZHOU P, KESHMIRI A. Patterns of desiccation cracks in saline bentonite layers[J]. *Transport in Porous Media*, 2015, 110(2): 333 - 344.
- 熊东红,周红艺,杜长江,等. 土壤裂缝研究进展[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 249 - 255.
- XIONG Donghong, ZHOU Hongyi, DU Changjiang, et al. A review on the study of soil cracking[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 249 - 255. (in Chinese)
- 张中彬,彭新华. 土壤裂隙及其优先研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477 - 488.
- ZHANG Zhongbin, PENG Xinhua. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow[J]. *Acta*

- Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 477–488. (in Chinese)
- 9 田洪艳,周道玮,李质馨,等. 土壤胀缩运动对草原土壤的干扰作用[J]. 草地学报, 2003, 11(3): 261–268.  
TIAN Hongyan, ZHOU Daowei, LI Zhixin, et al. Effects of expansion and contraction of grassland soil in Northeastern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2003, 11(3): 261–268. (in Chinese)
- 10 邵明安,吕殿青. 土壤收缩特征曲线的实验研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 471–474.  
SHAO Ming'an, LÜ Dianqing. Experimental study on soil shrinkage characteristic curves[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 471–474. (in Chinese)
- 11 OMIDI G H, THOMAS J C, BROWN K W. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1996, 89(1–2): 91–103.
- 12 CHERTKOV V Y. A physically based model for the water retention curve of clay pastes[J]. Journal of Hydrology, 2004, 286(1–4): 203–226.
- 13 PENG X, HORN R, SMUCKER A. Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1095–1104.
- 14 冯欣,孔令伟,郭爱国. 不均匀收缩方式对膨胀土工程性状影响试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2):208–213.  
FENG Xin, KONG Lingwei, GUO Aiguo. Experiment study of impact of non-uniform shrinkage on engineering behaviors of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 208–213. (in Chinese)
- 15 ZHANG Z B, PENG X, WANG L L, et al. Temporal changes in shrinkage behavior of two paddy soils under alternative flooding and drying cycles and its consequence on percolation[J]. Geoderma, 2013, 192: 12–20.
- 16 邢旭光,马孝义. 土壤失水过程对土体收缩特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 148–153. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160619&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160619&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.019.  
XING Xuguang, MA Xiaoyi. Effect of soil drying process on soil shrinkage characteristic[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 148–153. (in Chinese)
- 17 BIRLE E, HEYER D, VOGT N. Influence of the initial water content and dry density on the soil-water retention curve and the shrinkage behavior of a compacted clay[J]. Acta Geotechnica, 2008, 3(3):191–200.
- 18 杨晶,白晓红,王林浩,等. 基于不同初始含水量的压实黄土力学特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(6): 669–673.  
YANG Jing, BAI Xiaohong, WANG Linhao, et al. Research on mechanical properties of compaction loess with different initial water content[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(6): 669–673. (in Chinese)
- 19 李保雄,苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5):1003–1008.  
LI Baoxiong, MIAO Tiande. Research on water sensitivity of loess shear strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5):1003–1008. (in Chinese)
- 20 魏玉杰,吴新亮,蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 153–159. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150622&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150622&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.022.  
WEI Yujie, WU Xinliang, CAI Chongfa. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 153–159. (in Chinese)
- 21 李德成,张甘霖,龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤, 2011, 43(4):623–629.  
LI Decheng, ZHANG Ganlin, GONG Zitong. On taxonomy of shjiang black soils in China[J]. Soils, 2011, 43(4):623–629. (in Chinese)
- 22 马丽,张民. 砂姜黑土的发生过程与成土特征[J]. 土壤通报, 1993, 24(1):1–4.  
MA Li, ZHANG Min. Soil formation and characteristics of shjiang black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1993, 24(1):1–4. (in Chinese)
- 23 张生. 皖北地区砂姜黑土低产原因及其综合治理[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 1995, 23(增刊):103–107.  
ZHANG Sheng. Causes of shjiang black soils low-yield in north Anhui and its synthetic improving[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 1995, 23(Supp.):103–107. (in Chinese)
- 24 东野光亮,史衍玺,李贻学. 从微形态特征看砂姜黑土土地资源的利用改良[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 52–54.  
DONGYE Guangliang, SHI Yanxi, LI Yixue. Micromorphological characteristics and melioration of shjiang black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(2): 52–54. (in Chinese)
- 25 尚熲廷,冯杰,刘佩贵,等. SWCC测定吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009, 37(1):12–15.  
SHANG Manting, FENG Jie, LIU Peigui, et al. On formulas for soil suction and optimum centrifugal time by use of SWCC[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2009, 37(1):12–15. (in Chinese)
- 26 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.
- 27 GREGORY A S, BIRD N R A, WHALLEY W R, et al. Deformation and shrinkage effect on the soil water release characteristic [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(4): 1104–1112.
- 28 邢旭光,马孝义,康端刚. 盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 115–122.  
XING Xuguang, MA Xiaoyi, KANG Duangang. Impacts of type and concentration of salt cations on soil water retention and desiccation cracking[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9):115–122. (in Chinese)



- stem leaf and corn straw [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 173 – 179. (in Chinese)
- 14 CHANDRA R, TAKEUCHI H, HASEGAWA T, et al. Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments [J]. Energy, 2012, 43: 273 – 282.
  - 15 MONLAU F, BARAKAT A, STEYER J P, et al. Comparison of seven types of thermo-chemical pretreatments on the structural features and anaerobic digestion of sunflower stalks [J]. Bioresource Technology, 2012, 120: 241 – 247.
  - 16 ZHENG Yi, ZHAO Jia, XU Fuqing, et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production [J]. Progress in Energy and Combustion Science. 2014, 42:35 – 53.
  - 17 HAYKIR N I, BAHCEGUL E, BICAK N, et al. Pretreatment of cotton stalk with ionic liquids including 2-hydroxy ethyl ammonium formate to enhance biomass digestibility [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 41: 430 – 436.
  - 18 QIU Z, AITA G M, WALKER M S. Effect of ionic liquid pretreatment on the chemical composition, structure and enzymatic hydrolysis of energy cane bagasse [J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 251 – 256.
  - 19 GAO J, CHEN L, YAN Z, et al. Effect of ionic liquid pretreatment on the composition, structure and biogas production of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Bioresource Technology, 2013, 132: 361 – 364.
  - 20 WEERACHANCHAI P, LEE J M. Effect of organic solvent in ionic liquid on biomass pretreatment [J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2013, 1(8): 894 – 902.
  - 21 SWATLOSKI R P, SPEAR S K, HOLBREY J D, et al. Dissolution of cellulose with ionic liquids [J]. Journal of the American Chemical Society, 2002, 124(18): 4974 – 4975.
  - 22 LI C, KNIERIM B, MANISSERI C, et al. Comparison of dilute acid and ionic liquid pretreatment of switchgrass: biomass recalcitrance, delignification and enzymatic saccharification [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(13): 4900 – 4906.
  - 23 LI S H, HE C Y, LIU H W, et al. Ionic liquid-based aqueous two-phase system, a sample pretreatment procedure prior to high-performance liquid chromatography of opium alkaloids [J]. Journal of Chromatography B, 2005, 826(1 – 2): 58 – 62.
  - 24 VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583 – 3597.
  - 25 BRANDT A, HALLETT J P, LEAK D J, et al. The effect of the ionic liquid anion in the pretreatment of pine wood chips [J]. Green Chemistry, 2010, 12(4): 672 – 679.
  - 26 XU A, WANG J, WANG H. Effects of anionic structure and lithium salts addition on the dissolution of cellulose in 1-butyl-3-methylimidazolium-based ionic liquid solvent systems [J]. Green Chemistry, 2010, 12(2): 268 – 275.
  - 27 ZHANG Y T, DU H B, QIAN X H, et al. Ionic liquid-water mixtures: enhanced  $K_w$  for efficient cellulosic biomass conversion [J]. Energy Fuels, 2010, 24(4): 2410 – 2417.

(上接第 236 页)

- 29 PENG X, HORN R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 584 – 592.
- 30 吕殿青, 邵明安, 王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 110 – 114, 119. LÜ Dianqing, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Bulk density changing during measuring soil water retention characteristics and its determining method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 110 – 114, 119. (in Chinese)
- 31 吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 209 – 212. LÜ Dianqing, SHAO Ming'an, PAN Yun. Dependent relationship between bulk density changes and soil water characteristics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 209 – 212. (in Chinese)
- 32 宋日权, 褚贵新, 冶军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 109 – 113. SONG Riquan, CHU Guixin, YE Jun, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 109 – 113. (in Chinese)
- 33 龚久平, 李燕, 刘吉振, 等. 村镇水源地土壤中砾石对水分运动的影响[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(3): 621 – 627. GONG Jiuping, LI Yan, LIU Jizhen, et al. Effect of rock fragment on soil water management of water source of villages and small towns[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2010, 32(3): 621 – 627. (in Chinese)
- 34 吕国安, 蔡崇法, 陈明亮, 等. 丹江口库区石渣土土壤水分有效性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 106 – 109. LÜ Guoan, CAI Chongfa, CHEN Mingliang, et al. Study on soil water availability of Lithosol in Danjiangkou reservoir basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3): 106 – 109. (in Chinese)
- 35 施威, 魏继红, 宋京雷, 等. 含水率对下蜀土抗剪强度的影响[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2016, 35(3): 97 – 101. SHI Wei, WEI Jihong, SONG Jinglei, et al. Study on the influence of moisture content to shear strength test for xiashu soil[J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2016, 35(3): 97 – 101. (in Chinese)
- 36 邢旭光, 赵文刚, 马孝义, 等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1181 – 1188. XING Xuguang, ZHAO Wengang, MA Xiaoyi, et al. Study on soil shrinkage characteristic during soil water characteristic curve measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1181 – 1188. (in Chinese)