doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.019

土壤失水过程对土体收缩特性的影响

邢旭光　马孝义

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探求不同质地和容重土壤失水过程中的土体收缩特性,选取山东壤土(SD)和陕西粉粘壤土(SX)作为供试土壤,并分别设定初始容重为 1.30、1.40、1.50 g/cm^3,采用离心机法测定土壤水分特征曲线,同时对土壤脱水过程中土体轴向和径向收缩特征进行研究。结果表明,对于 SD 和 SX 土样,不同容重土壤含水率随吸力增加呈现不同幅度的减小趋势,但其减小速率均表现出"慢-快-慢"的变化特点;在土壤脱水过程中,土体线缩率随含水率减小而增大,Logistic 模型可以较好地拟合线缩率与含水率之间的非线性关系(R^2在 0.96 ~ 0.99 之间);土壤轴向(δ_s)、径向(δ_r)和体积收缩应变(δ_V)均随容重增加而减小,SD 和 SX 土样分别以水平收缩形变和垂直收缩形变为主。相关性分析表明,δ_s、δ_r和 δ_V与砂粒含量呈负相关关系,与粉粒和粘粒含量呈正相关关系,且 3 种收缩特征指标与土壤颗粒含量之间的相关性受容重影响;对于 SD 土样,δ_s和 δ_r与粘粒和粉粒含量显著相关,δ_V与砂粒含量显著相关;对于 SX 土样,δ_s、δ_r和 δ_V与砂粒和粉粒含量显著或极显著相关,而与粘粒含量无显著相关性。

关键词: 土壤水分特征曲线; 土体收缩; 脱水

中图分类号: S152; TU431　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)06-0148-06

Effects of Soil Drying Process on Soil Shrinkage Characteristic

Xing Xuguang　Ma Xiaoyi

(*College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To explore soil shrinkage characteristics during soil drying process, loam soil from Shandong Province (SD) and silty clay loam soil from Shaanxi Province (SX) were selected. The initial bulk density of the two different types of soil was set at 1.30, 1.40 and 1.50 g/cm^3. A centrifuge method was adopted for soil - water characteristic curve measurement, and the axial and radial shrinkages during drying process were measured and quantitatively analyzed. Results showed that firstly, as for SD and SX soils, soil moisture was decreased with the increase of suction, but the decreasing range was different due to different bulk densities. When suction was increased from 0 to 7 000 cm, soil moisture was decreased with different rates. Secondly, linear shrinkage ratio increased with decrease of soil moisture during drying process, and the non-linear relationship between linear shrinkage ratio and soil moisture could be well fitted by the Logistic model, with high determination coefficients (R^2) ranged from 0.96 to 0.99. Thirdly, axial shrinkage strain (δ_s), radial shrinkage strain (δ_r) and volume shrinkage strain (δ_V) all decreased with the increase of soil bulk density. And further analyses indicated that the mainly shrinkage characteristics for SD and SX soils were horizontal shrinkage and vertical shrinkage, respectively. Meanwhile, correlation analyses showed that δ_s, δ_r and δ_V were all negatively correlated with sand content and positively correlated with silt and clay contents. And the correlation between the three types of shrinkage strains (i.e., δ_s, δ_r and δ_V) and soil particle content was obviously influenced by bulk

收稿日期: 2015-10-10　修回日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279167)、"十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD08B01)和水利部公益性行业科研专项(201301016)

作者简介: 邢旭光(1986—),男,博士生,主要从事土壤水-盐-热迁移监测与模拟研究,E-mail: xingxg86@163.com

通信作者: 马孝义(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土和电气研究,E-mail: xiaoyima@vip.sina.com

density. Detailedly, as for SD soil, δ_s and δ_r were significantly correlated with clay and silt contents, however, δ_V was significantly correlated with sand content; as for SX soil, δ_s, δ_r and δ_V were all significantly or highly significantly correlated with sand and silt contents, but there was no significant correlation with clay content.

Key words: soil－water characteristic curve; soil shrinkage; dehydration

引言

土体收缩是指土体随自身含水率的降低而产生体积缩小的现象[1]。在脱水过程中,土壤将发生轴向和径向收缩,且其收缩应变逐渐增大,最终将导致土体出现裂缝,并随着含水率减小裂缝面积和长度密度均呈现增大趋势[2],这对于工业和农业均具有显著危害:①在工业方面,土体失水时,收缩裂缝使得土体强度和稳定性显著降低,可能引发地基变形、边坡失稳和建筑物沉降等问题[3];在发生降雨入渗时,极易导致滑坡等地质灾害[4]。②在农业方面,土壤收缩产生的裂缝可能破坏作物根系,从而影响其分布及吸水,造成生理损伤[5];另一方面,土壤收缩裂缝将导致土壤水分运动及溶质迁移特性发生改变,甚至产生优先流,造成养分流失和地下水污染等生态问题[6]。由此可以看出,土壤收缩问题是土木工程以及农业工程等多学科的热点问题。

土壤水分特征曲线对于工农业生产具有重要作用,可以较好地反映土壤水能量和数量之间的关系,是推求土壤水力参数的基础,对土壤持水和水分有效性评价具有重要作用,同时可为土木工程施工提供参考[7-9]。目前已有较多关于土壤水分特征曲线和土壤收缩特性方面的研究,然而大多是将二者分开进行探讨,将土壤失水过程和土体收缩相结合的研究较少,特别是土壤脱水过程中对应的土体收缩应变变化特征的综合研究方面。土壤在高吸力条件下发生失水,且容重逐渐增大,土体逐渐发生收缩现象,故土体收缩变化与吸力、含水率和容重变化具有同步性。因此,在土壤发生失水时,对其土壤水分特征曲线和土壤收缩特征同时展开研究具有实际意义。

综上所述,土壤失水过程伴随土体收缩,田间土壤结构易被破坏,导致容重不均匀而发生变化,因此综合考虑不同初始容重及失水过程中容重的变化更具有实践意义。基于此,本文以山东壤土和陕西粉粘壤土为研究对象,分别对 2 种供试土壤的失水特征进行研究,同时对土壤失水过程中土体收缩特征曲线进行分析、拟合,并进一步定量分析土体的轴向、径向和体积收缩应变等收缩特征指标,以期为土壤收缩裂缝研究奠定基础,为农田失水过程中的土壤水分运动分析模拟提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试土壤与前期处理

试验土壤取自陕西(SX)和山东(SD)试验农田,采集于 0～30 cm 耕作土层。所有土样经风干、过 2 mm 筛后,采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定土壤颗粒组成(表 1),各样品均测定 3 次,取其均值。田间实测容重介于 1.32～1.51 g/cm^3,同时为探讨变容重土壤在失水过程中的收缩特性,故将 2 种土壤初始干容重 γ 均设定为 1.30、1.40、1.50 g/cm^3。将土样按不同预设容重装入环刀(容积为 100 cm^3),在试验开始前将全部样品置于蒸馏水中饱和处理 48 h,试验结束后置于 105℃恒温箱内干燥 24 h,以计算土壤含水率;各处理均重复 3 次,取其均值作为结果。

表 1　供试土壤颗粒组成(质量分数)

Tab.1　Soil particle composition of selected soils (mass fraction)　%

土样	粘粒含量	粉粒含量	砂粒含量	土壤质地
SD	13.86	37.73	48.41	壤土
SX	17.28	44.32	38.40	粉粘壤土

注:土壤质地根据国际制质地三角形确定。

1.2　分析方法

采用 CR21GⅡ型高速恒温冷冻离心机测定土壤水分特征曲线,测定时机内恒温 4℃。将待测土样放入离心机中,吸力范围为 0～7 000 cm,本试验选定的吸力为 10、50、100、300、500、700、1 000、3 000、5 000、7 000 cm,与其对应的平衡时间分别为 10、17、26、42、49、53、58、73、81、85 min;在每次离心结束后,采用称量法获得土壤质量含水率,将其转换为体积含水率;用游标卡尺测定环刀内土样的体积变化(直径减小量和土面下降距离),以确定在离心过程中土壤收缩变化和容重变化。

在脱水过程中,环刀内土壤将会发生轴向和径向收缩,其中径向收缩表现为试样直径减小,轴向收缩表现为试样高度减小,通过无量纲几何因子 ε 可以反映土壤在脱水过程中其水平和垂直方向的形变。评价土壤轴向收缩特性的指标通常主要包括线缩率 δ_{sl}、轴向收缩应变 δ_s、径向收缩应变 δ_r、体积收

缩应变 δ_V 等,其计算式为

$$\delta_{sl} = (z_t - z_0)/h_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta_s = (h_0 - h)/h_0 \times 100\% \quad (2)$$

$$\delta_r = (d_0 - d)/d_0 \times 100\% \quad (3)$$

$$\delta_V = (V_0 - V)/V_0 \times 100\% \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\lg(1 - \frac{\Delta V}{V_0})}{\lg(1 - \frac{\Delta h}{h_0})} \quad (5)$$

式中 z_t——某吸力时的土体收缩量,mm

z_0——土体初始收缩量,mm

h_0——土体初始高度,mm

d_0——土体初始直径,mm

V_0——土体初始体积,mm^3

h——土体脱水结束时高度,mm

d——土体脱水结束时直径,mm

V——土体脱水结束时体积,mm^3

ΔV——土体体积变化量,mm^3

Δh——土体高度变化量,mm

2 结果与分析

2.1 土壤水分特征曲线

在脱水过程中,由于不断有水分排出,土壤容重时刻发生变化(表 2),在计算体积含水率时,所采用的土壤干容重为每次离心过程达到平衡后计算所得,并非是试样的初始干容重。为更清晰、直观地表现含水率随吸力的变化,土壤水分特征曲线采用半对数坐标图,即将吸力取对数(图 1)。可以看出,所有供试土壤水分特征曲线形态相同,局部差异可能是由于土质或各粒径土壤颗粒含量存在差异所致。不同土质和容重的土壤含水率均表现出随吸力增加而减小的趋势,但其速率存在一定差异:当接近饱和含水率或土壤较干时,土壤含水率的减小速率较小,而在该二者之间时土壤含水率的减小速率较大。对比图 1a、1b 可知,对于山东壤土(SD)和陕西粉粘壤土(SX),容重相同的土壤在相同吸力条件下,SX 土样土壤含水率较高,表现出较好的持水性;当吸力相同时,不同容重的 SD 和 SX 土样土壤含水率均表现为 1.50 g/cm^3 处理最大、1.40 g/cm^3 处理最小,可以发现,对于土壤质地相同的土壤,其持水能力与土壤容重并不存在单调增减关系,这是由于试样土壤比水容量存在差异所致。

表 2 脱水过程中土壤干容重的变化

Tab. 2 Variations of soil bulk density during dehydration

g/cm^3

吸力/cm	SD			SX		
0	1.30	1.40	1.50	1.30	1.40	1.50
10	1.42	1.50	1.51	1.38	1.45	1.54
50	1.45	1.51	1.55	1.43	1.49	1.56
100	1.49	1.52	1.57	1.48	1.51	1.60
300	1.55	1.56	1.61	1.57	1.60	1.66
500	1.59	1.60	1.63	1.60	1.63	1.70
700	1.61	1.60	1.64	1.64	1.65	1.71
1 000	1.63	1.62	1.66	1.64	1.67	1.74
3 000	1.71	1.71	1.73	1.78	1.80	1.84
5 000	1.75	1.74	1.77	1.82	1.85	1.89
7 000	1.77	1.76	1.81	1.84	1.87	1.91

土壤比水容量 $C(h)$ 为单位吸力变化时单位质量土壤可释放或吸收的水量,可由模型 $C(\theta) = Ah^{-B}$ 的一阶导数求得(表 3),模型中参数 A 和 B 分别表示土壤持水能力和土壤含水率随吸力增加而递减的快慢程度[10-11]。从表 3 看出,对于 SD 和 SX 土样,参数 A 随土壤初始干容重的增加表现出先减小后增大的趋势,即不同容重条件的参数 A 均表现为 1.50 g/cm^3 处理最大、1.30 g/cm^3 处理次之、1.40 g/cm^3 处理最小,亦即不同容重的土壤持水能力表现为 1.50 g/cm^3 处理最大且 1.40 g/cm^3 处理最小,这与土壤水分特征曲线是一致的。同时可以看出,对于 SD 和 SX 土样,容重为 1.50 g/cm^3 和 1.40 g/cm^3 试样的参数 B 值分别为最小和最大,表明土壤含水率随吸力增加而递减的速率分别为最小和最大,反映出其持水能力为最强和最弱,这与上述分析结果

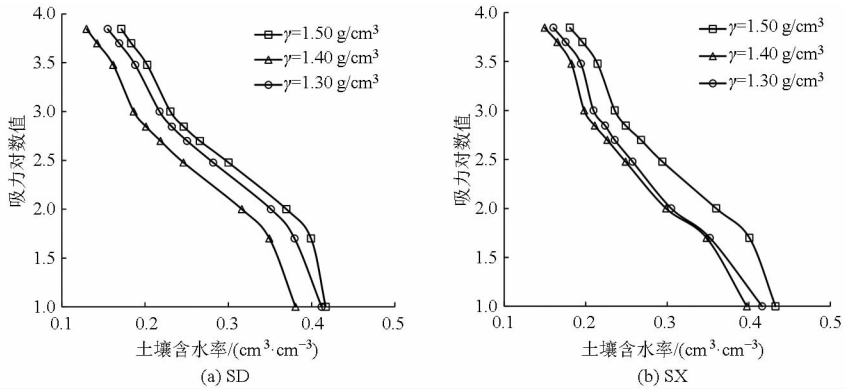

图 1 供试土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil - water characteristic curves of selected soils

表 3　供试土壤比水容量表达式

Tab. 3　Expressions of specific water capacity of selected soils

土样	容重/(g·cm^{-3})	A	B	$C(h)$	R^2
SD	1.30	0.622 4	0.146 1	$C(h) = -0.090\,9h^{-1.146\,1}$	0.944 4
	1.40	0.595 4	0.160 2	$C(h) = -0.095\,4h^{-1.160\,2}$	0.944 2
	1.50	0.623 2	0.136 5	$C(h) = -0.085\,1h^{-1.136\,5}$	0.925 1
SX	1.30	0.591 7	0.144 9	$C(h) = -0.085\,7h^{-1.144\,9}$	0.989 8
	1.40	0.579 7	0.148 7	$C(h) = -0.086\,2h^{-1.148\,7}$	0.980 0
	1.50	0.626 6	0.134 8	$C(h) = -0.084\,5h^{-1.134\,8}$	0.958 2

是相同的。

2.2　土壤收缩特征曲线

在脱水过程中，土壤线缩率随着土壤含水率减小而增大(图 2)，但增加幅度有减缓趋势，由此可知土壤线缩率将会在含水率很小时趋于稳定，因此，土壤失水收缩过程大致可划分为正常收缩、残余收缩和零收缩 3 个阶段[8]。当吸力从 0 增至 7 000 cm 时，对于容重相同的土壤，SX 较 SD 土样线缩率大，这是由于 SX 土样粘粒含量较高[1]。当含水率相同时，SD 和 SX 土样均表现出容重最小(1.30 g/cm^3)的试样线缩率最大，这是由于环刀内土样疏松、孔隙较多，极易被压缩；然而当容重为 1.40 g/cm^3 和 1.50 g/cm^3 时，容重为 1.40 g/cm^3 处理的土壤线缩率更小，分析其原因认为在装填土时，过大的初始容重导致土壤结构发生改变，可能引发土壤缩限发生变化，使得线缩率出现差异[1]。有关土壤容重与缩限、线缩率关系仍需深入研究，且有必要开展土壤缩限试验进行进一步验证。

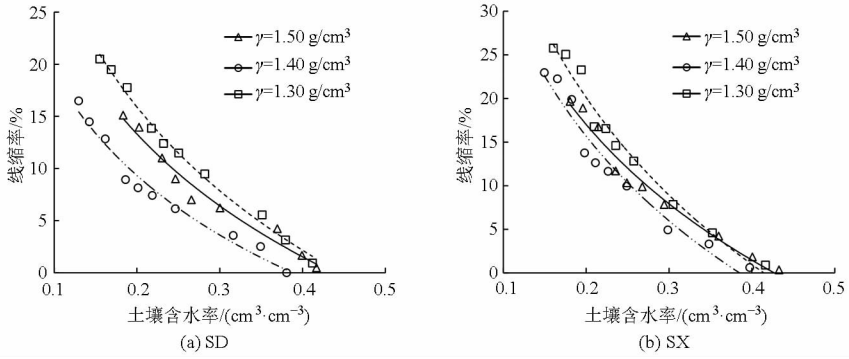

图 2　供试土壤线缩率与含水率的关系

Fig. 2　Relationships between linear shrinkage ratio and soil moisture of selected soils

目前应用较为广泛的定量描述土壤收缩曲线的模型主要有 Logistic 模型[12-13]和“三直线”模型[14]，但鉴于本研究中土壤线缩率与含水率之间并未呈现出明显的分区，故采用 Logistic 模型进行拟合(表 4)。从表 4 可以看出，该模型可以较好地表征山东壤土和陕西粉粘壤土的线缩率和含水率之间的非线性关系。

表 4　供试土壤 Logistic 模型参数拟合

Tab. 4　Fitted values of parameters in Logistic model of selected soils

土样	容重/(g·cm^{-3})	a	b	c	m	R^2
SD	1.30	93.21	5.40	−7.55	0.00	0.991 6
	1.40	61.92	11.45	−1.06	0.04	0.996 5
	1.50	92.53	8.79	−0.79	0.00	0.965 2
SX	1.30	83.71	9.12	−3.14	0.10	0.974 6
	1.40	72.71	11.86	−0.80	0.10	0.967 9
	1.50	126.10	8.38	−2.44	0.00	0.975 9

注：Logistic 模型表达式为 $\delta_{sl} = a/[1 + \exp(b(\theta - m))] + c$。

2.3　土壤收缩特征分析

不同装填容重表示土壤压实度不同，土体内孔隙数量亦不相同，故不同容重的土壤在脱水过程中轴向和径向的收缩特征存在一定差异(表 5)。对于 SD 和 SX 2 种土壤，δ_s、δ_r 和 δ_V 均表现出随容重增加而减小的趋势，这是由于当初始容重较小时，土壤内存在较多孔隙，水分随着吸力增加而迅速排出，从而发生失水收缩现象；而对于容重较大的土壤，土壤内孔隙相对较少，虽然也存在被压缩现象，但其收缩程度显著降低。对比 SD 和 SX 土样的收缩特征发现，当 2 种土壤容重相同时，SX 土样的 δ_s、δ_r 和 δ_V 均比 SD 大，表明 SX 土样比 SD 压缩性大，这可以通过颗粒级配曲线加以解释：对于 SD 土样，土壤不均匀系数 $C_u = 8.526 > 5$、曲率系数 $C_c = 1.694 \in [1,3]$；对于 SX 土样，$C_u = 8.257 > 5$、$C_c = 0.714 \notin [1,3]$。可知，SD 土样比 SX 土壤级配好，故 SX 压缩性优于 SD。另一方面，SD 和 SX 土壤的几何因子分别表现为 $\varepsilon > 3$ 和 $1 < \varepsilon < 3$，表明山东壤土和陕西粉粘壤土在

发生收缩时,其收缩形变分别以水平向和垂直向为主,且在收缩过程中产生裂缝;$\varepsilon = 3$ 则表明土壤收缩形变在各向同性,表明土壤在脱水过程中发生三维体积收缩,但并未产生裂缝[15],由此可知,本研究中对于 SD 土样,容重增加(由 1.30 g/cm^3 增至 1.50 g/cm^3)并不利于土体稳定,而对于 SX 土样,容重增加(由 1.30 g/cm^3 增至 1.50 g/cm^3)在一定程度上有利于土体稳定,这对于土木工程中边坡失稳及建筑物沉降具有重要作用。

表 5 供试土壤收缩特征指标

Tab.5 Soil shrinkage characteristic indexes of selected soils

土样	容重/(g·cm^{-3})	δ_s/%	δ_r/%	δ_V/%	ε
SD	1.30	20.49	21.69	51.24	3.13
	1.40	16.47	18.67	44.76	3.30
	1.50	15.10	17.27	41.89	3.32
SX	1.30	25.77	23.09	56.09	2.76
	1.40	22.95	21.84	52.94	2.89
	1.50	19.65	19.40	47.80	2.97

本研究中,供试土壤为壤土和粉粘壤土,不同粒径土壤颗粒含量存在较大差异,对土壤收缩特征参数与不同粒径土壤颗粒含量进行相关性分析(表 6)。从表 6 可以看出,整体而言,山东壤土(SD)收缩特征参数与粉粒和砂粒含量之间显著性较弱,陕西粉粘壤土(SX)收缩特征参数与粉粒和砂粒含量之间显著性较强,2 种土壤与粘粒含量之间的显著性较弱。

土壤轴向、径向和体积收缩应变与土壤中粘粒、粉粒和砂粒含量均具有较高的相关性,且三者均与砂粒含量呈现负相关关系,与粘粒和粉粒含量呈现正相关关系。对于 SD,轴向和径向收缩应变基本与粘粒和粉粒含量显著相关($p < 0.05$),体积收缩应变与砂粒含量在一定程度上显著相关($p < 0.05$);对于 SX 土样,轴向、径向和体积收缩应变均与砂粒含量显著相关($p < 0.05$),另外,轴向和体积收缩应变与粉粒含量呈显著或极显著相关($p < 0.01$),而三者与粘粒含量之间无显著相关性,这与 YULE 等[16]的研究结果较为一致。同时看出,对于 SD 和 SX 2 种土壤,随着容重变化,土壤收缩特征指标与土壤颗粒之间的相关性也随之变化,分析其原因认为,土壤容重变化会导致土壤导水率、土壤总孔隙度、液限和塑限等性质发生改变,而土壤水力特性及其物理力学性质对土壤收缩特征具有显著影响[17],因此在这种情况下,土壤收缩特征参数与土壤颗粒含量之间的相关性可能发生变化,有关变容重土壤膨胀收缩变化影响因素的研究仍需完善。

表 6 土壤收缩特征参数与不同粒径土壤颗粒含量的相关分析

Tab.6 Correlation analysis on the relationship between soil shrinkage characteristic parameters and soil particle composition of different particle sizes

土样	容重/(g·cm^{-3})	参数	粘粒含量	粉粒含量	砂粒含量
SD	1.30	δ_s	0.978*	0.980*	-0.906
		δ_r	0.909	0.902	-0.903
		δ_V	0.935	0.926	-0.975*
	1.40	δ_s	0.974*	0.968*	-0.984*
		δ_r	0.954*	0.954*	-0.881
		δ_V	0.947	0.946	-0.879
	1.50	δ_s	0.946	0.950	-0.852
		δ_r	0.879	0.868	-0.923
		δ_V	0.819	0.812	-0.777
SX	1.30	δ_s	0.819	0.993**	-0.963*
		δ_r	0.949	0.898	-0.951*
		δ_V	0.872	0.994**	-0.971*
	1.40	δ_s	0.945	0.916	-0.964*
		δ_r	0.936	0.933	-0.971*
		δ_V	0.819	0.994**	-0.964*
	1.50	δ_s	0.846	0.975*	-0.953*
		δ_r	0.832	0.956*	-0.932
		δ_V	0.820	0.995**	-0.963*

注:**、* 分别表示在 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 水平(双侧)极显著和显著相关。

3 结论

(1)对于不同容重的山东壤土 SD 和陕西粉粘壤土 SX 土样,在 0 ~ 7 000 cm 吸力范围内,土壤含水率均表现出随吸力增加而减小的趋势,且不同容重处理其减小幅度不同,但减小速率均表现出“慢-快-慢”的变化特点。

(2)在脱水过程中,土壤发生径向和轴向收缩,且土壤线缩率随土壤含水率减小而增大;Logistic 模型可以较好地定量描述土壤收缩曲线,表征土壤线缩率和含水率之间的非线性关系。

(3)对于 SD 和 SX 土样,土壤轴向、径向和体积收缩应变均随着容重增大而减小,在发生土体失水收缩时,SD 和 SX 土样分别以水平收缩形变和垂直收缩形变为主。

(4)土壤中粘粒、粉粒和砂粒含量对土壤收缩特征具有不同程度的影响,其中砂粒含量与土壤收缩特征指标呈负相关,粉粒和粘粒含量则与其呈正相关关系。

(5)对于 SD 土样,轴向和径向收缩应变与粘粒和粉粒含量显著相关,体积收缩应变与砂粒含量显著相关;对于 SX 土样,轴向、径向和体积收缩应变

与砂粒含量显著相关，与粉粒含量呈显著或极显著相关，与粘粒含量之间无显著相关性，但 3 种收缩特征指标与土壤颗粒之间的相关性随容重变化而发生变化。

参 考 文 献

1 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]. 农业机械学报，2015，46(6)：153 - 159.
WEI Yujie, WU Xinliang, CAI Chongfa. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 153 - 159. (in Chinese)

2 张展羽，朱文渊，朱成立，等. 农田土壤表面干缩裂缝的随机分布统计特征[J]. 农业工程学报，2013，29(16)：119 - 124.
ZHANG Zhanyu, ZHU Wenyuan, ZHU Chengli, et al. Statistical characteristics of random distribution of shrinkage cracks on farmland soil surface[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 119 - 124. (in Chinese)

3 孙萍，彭建兵，吴树仁，等. 裂隙性黄土力学特性试验研究[J]. 中南大学学报：自然科学版，2015，46(6)：2188 - 2195.
SUN Ping, PENG Jianbing, WU Shuren, et al. An experimental study on mechanical properties of fractured loess[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(6): 2188 - 2195. (in Chinese)

4 STOLTE J, RITSEMA C J, DE ROO A P J. Effect of crust and cracks on simulated catchment discharge and soil loss[J]. Journal of Hydrology, 1997, 195: 279 - 290.

5 张中彬，彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[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)

6 BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982, 18: 1311 - 1325.

7 郑健，王燕，蔡焕杰，等. 植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J]. 农业机械学报，2014，45(5)：107 - 112.
ZHENG Jian, WANG Yan, CAI Huanjie, et al. Soil - water characteristic curves of soil with plant additive and analyses of the fitting models[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 107 - 112. (in Chinese)

8 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 Wen'gang, MA Xiaoyi, et al. Study on soil shrinkage characteristics during soil water characteristic curve measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1181 - 1188. (in Chinese)

9 高会议，郭胜利，刘文兆，等. 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J]. 农业机械学报，2014，45(6)：161 - 165，176.
GAO Huiyi, GUO Shengli, LIU Wenzhao, et al. Spatial variability of soil water retention curve under fertilization practices in arid-highland of the loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 161 - 165, 176. (in Chinese)

10 马昌臣，王飞，穆兴民，等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. 水土保持学报，2013，27(2)：105 - 109.
MA Changchen, WANG Fei, MU Xingmin, et al. Effect of the mechanical action of wheat roots on soil water characteristic curve [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 105 - 109. (in Chinese)

11 GARDNER W R, HILLEL D, BENYAMINI Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. redistribution[J]. Water Resource Research, 1970, 6(3): 851 - 861.

12 NELDER J A. The fitting of a generalization of the logistic curve[J]. Biometrics, 1961, 17: 89 - 110.

13 NDLDER J A. An alternative form of a generalized logistic equation[J]. Biometrics, 1962, 18: 614 - 616.

14 MCGARRY D, MALAFANT K W J. The analysis of volume change in unconfined unite of soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51: 290 - 297.

15 BOIVIN P, GARNIER P, TESSIER D. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 1145 - 1153.

16 YULE D F, RICHIE J T. Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols: I. small cores[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 1285 - 1291.

17 程涛，洪宝宁，程江涛. 干湿循环下高液限土力学特性研究[J]. 四川大学学报：工程科学版，2013，45(6)：82 - 86，95.
CHENG Tao, HONG Baoning, CHENG Jiangtao. Mechanical properties of high liquid limit soil under different drying and wetting cycles[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(6): 82 - 86, 95. (in Chinese)