

# 宁夏典型土壤持水性能及收缩特征

金建新, 桂林国, 尹志荣, 何进勤, 雷金银

(宁夏农林科学院 农业资源与环境研究所, 银川 750002)

**摘要:**为了探明宁夏不同生态区域土壤在脱水过程中的收缩特性,选择六盘山(LP)、贺兰县(HL)、同心县(TX)和盐池县(YC)四地的土壤对其脱水过程中的土壤水分特征曲线进行测定,并对其比容、容重等参数进行了研究。结果表明:V-G模型对4种土壤水分特征曲线的拟合均具有较高的精度,土壤有效收缩度相对大小依次为 $HL>TX>YC>LP$ ,收缩最大的为黏土,在吸力值在400 cm时HL有效收缩度为0.23。脱水过程中比容曲线表现为LP曲线比较平缓,其余三种土壤跳跃性比较大。脱水后容重相对大小为 $LP>TX>YC>HL$ ,这与土壤各颗粒级配组成密切相关。

**关键词:**脱水; 土壤水分特征曲线; 收缩; 比容

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)04-0279-05

## Soil Moisture Curve and Shrinkage Characteristic of Different Areas in Ningxia

JIN Jianxin, GUI Linguo, YIN Zhirong, HE Jinqin, LEI Jinyin

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia

Academy of Agriculture and Forestry, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** In order to understand soil shrinkage characteristics in the dewatering process in the different ecological regions of Ningxia, soil samples in Liupan Mountain (LP), Helan County (HL), Tongxin County (TX) and Yanchi County (YC) were collected. Dehydration the process of soil moisture characteristic curves and soil specific volumes, bulk densities and other parameters were measured. The results show that VG model can precisely describe the soil moisture curves, effective soil shrinkage of the relative size decreases in the order:  $HL>TX>YC>LP$ , the contraction of clay soil is the largest, when the suction value is 400 cm, the effective degree of shrinkage of HL is 0.23. Performance of a specific volume curve of LP is relatively gentle during dehydration, the fluctuation of the curves of the other three soils is relatively large. Relative bulk densities decrease in the order:  $LP>TX>YC>HL$  after dehydration, which is closely related to particle size distribution of each soil.

**Keywords:** dehydration; soil moisture characteristic curve; contraction; specific volume

土壤水分特征曲线是指土壤体积分含水量与压力水头之间的函数关系,它是定量模拟土壤水分流动和溶质运移的重要参数<sup>[1]</sup>。国内外学者对试验测定水分特征曲线的试验数据进行拟合,推导出多种土壤水分特征曲线经验公式和模型来表示土壤含水量与吸力的关系,如Brooks-Corey模型、Campbell模型、Mualem模型、Van Genuchten (Mualem Y, Brooks R H, Campbell G S, Van Genuchten M Th)模型等,其中Van Genuchten模型的应用较为广泛<sup>[2-4]</sup>。对土壤脱水过程中的收缩特性的研究已有诸多研究报道,邵

明安<sup>[5]</sup>通过对5种质地不同的土壤利用压力室法对其特定压力值下土壤比容重、质量含水率及土壤容重之间的关系,并拟合得到比容重不同阶段的函数关系模型,邢旭光<sup>[6]</sup>不同尺度范围内对不同类型的土壤水分特征曲线及脱水过程中的收缩特性进行了研究,并对比容与质量含水率相关曲线进行了重新定义与划分,吕殿青<sup>[7]</sup>利用离心机法对原状土和扰动土的持水性,及其在脱水过程中的收缩特征值进行了量化研究,杨绍镠<sup>[8]</sup>提出对Groenevelt-Grant模型进行改进和试验验证,进一步提出了适合不同土壤类型的收

缩特性曲线模型,魏玉杰<sup>[9]</sup>利用 SS-1 型土壤收缩仪对崩岗体剖面土壤线缩率进行测定,并且用 Logistic 模型对其进行模拟。这些对土壤收缩性的研究涉及尺度、土壤质地、扰动等多种因素,并且利用模型对收缩特性与含水率的关系进行了模拟,但是对宁夏地区不同尺度、不同土壤类型的收缩性研究较少,本试验对宁夏不同生态类型区及土壤类型进行取样研究,主要针对宁夏中北部灰漠土、黄河沿线灌淤土、南部黄绵土及银川平原灰钙土四种土壤类型进行土壤水分特征曲线及其测定过程中土壤体积收缩变化特征进行试验研究,寻求典型土壤最优土壤水分特征曲线及其收缩性,为负压计测定值和土壤含水率之间换算、估算土壤孔隙状况、分析不同土壤持水性和土壤水分有效性,进行比水容重、导水率等土壤水力参数估算,以及为今后定量分析土壤水分运动等提供依据,为土壤不同尺度水力参数转换、土壤胀缩性及溶质运移,以及为当地灌溉制度的制定等提供基础。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验方法

试验土样分别采自六盘山(LP)、贺兰县(HL)、同心县(TX)和盐池县(YC),选择当地具有代表性的四种土样,取土深度为 0—60 cm 的作物根系主要分布区,利用环刀法对土样采集地进行分层测定容重,共计 3 层,取平均值(表 1)。将土壤分层带回实验室风干,过 2 mm 筛,用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定不同土层各级粒径的含量,每个土样重复三次。将土样按照实地所测的容重装于环刀内,然后将环刀置于蒸馏水中浸泡 48 h,用烘干称重法测其饱和和含水率,用朗科斯威法测定各土样的田间持水量,各处理重复 3 次,取平均。

土壤水分特征曲线采用美国 SEC-1600 压力膜仪测定,重点测定饱和土壤脱湿曲线,将土样按照实测容重装入环刀内,放置在陶瓷盘上,每隔 0.05 MPa 从 0.05 MPa 开始分 12 个梯度逐渐加压,最大压力值设定为 0.6 MPa,每次压力试验结束后测定土壤含水率,并且用游标卡尺测定土壤顶部的下降量,用以计算土壤在脱水过程中的收缩特征和容重变化。

表 1 试验土样物理性质

土样	2~0.02	0.02~0.002	<0.002	机械	平均容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )
	mm	mm	mm	组成	
LP	40.13	30.51	29.36	砂壤土	1.56
HL	12.11	31.96	55.93	黏土	1.41
TX	4.26	67.71	28.04	黏壤土	1.46
YC	30.26	66.80	2.94	轻壤土	1.51

## 1.2 理论模型

土壤水分特征曲线是描述土壤水分数量和能量的数学模型,其形态受到多种因素的影响,其中土壤质地、结构及温度等对其影响最大,土壤水分特征曲线常用于描述土壤吸力和含水率之间的关系,目前常用于描述土壤水分特征曲线的数学模型主要有以下 4 种。

(1)van Genuchten 模型(V-G 模型)

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+|\alpha h|^n]^m} & h<0 \\ \theta_s & h\leq 0\end{cases}\quad (1)$$

式中: $\theta(h)$  土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_r, \theta_s$  别为残余土壤含水率和饱和土壤含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $h$  为吸力值(m); $\alpha$  为进气值的倒数,无量纲; $m, n$  分别为拟合参数,其相互关系为  $m=1-1/n$  或  $m=1-2/n$ 。V-G 模型不仅拟合精度较高,而且能反映土壤颗粒和容重等物理特性,可以利用 matlab 对各项参数进行非线性数值拟合。

(2)Brooks and Gorey 模型(B-C 模型)

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\begin{cases}(\alpha h)^{-\lambda} & \alpha h>1 \\ 1 & \alpha h\leq 1\end{cases}\quad (2)$$

式中: $S_e$  为饱和度; $\lambda$  为土壤中孔隙大小分布参数,其余符号意义同前。

(3)Dual-porosity 模型(D-P 模型)

$$S_e=w_1[1+(\alpha_1 h)^{n_1}]^{-m_1}+w_2[1+(\alpha_2 h)^{n_2}]^{-m_2}\quad (3)$$

式中: $w_1$  和  $w_2$  为不同区域的比重因子; $\alpha_1, \alpha_2$  为区域进气值的倒数; $m_1, m_2, n_1$  和  $n_2$  为土壤中孔隙大小分布参数,其余符号意义同前。

(4)Log normal distribution 模型(LND 模型)

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\begin{cases}\frac{1}{2}\text{erfc}\left\{\frac{\ln(h/h_0)}{\sqrt{2}\sigma}\right\} & h<0 \\ 1 & h\geq 1\end{cases}\quad (4)$$

式中: $h_0$  为区域进气值的倒数; $\sigma$  为土壤中孔隙大小分布参数,其余符号意义同前。后三种模型均可以采用 RETC 软件进行求解,进行分析土壤的水力特性。

## 1.3 土壤收缩值计算

用压力膜仪测定脱湿过程中的土壤水分特征曲线时,土壤收缩可以看作垂向一维收缩,在测定过程中,环刀内土壤体积与土壤含水率呈现正相关趋势变化,其收缩特性可以根据其体积收缩快慢程度进行反映,即反映土壤比容和质量含水率关系的土壤收缩特征曲线的斜率。

$$m=D_1/D_0, k=\partial m/\partial \theta\quad (5)$$

式中: $D_0, D_1$  为土壤压缩前后环刀内土层厚度(mm); $m$  为土壤收缩度(%); $k$  为土壤收缩特征值,即单位土壤含水率变化条件下土层收缩量。

2 结果与分析

2.1 土壤水分特征曲线

对四种土样装于环刀内,利用 SEC—1600 压力膜仪测定其脱湿过程中的土壤水分特征曲线,见图 1,不同机械组成的土壤其水分特征曲线类似,但是不同质地的土壤粒径不同,其对水分的吸持力也不同。六盘山地区土壤砂粒含量较多,土壤含水率随着土壤吸水力的增大迅速减小,当土壤水吸力为 500 cm 时,其含水率小于 10%,YC 土壤仍然保持在 20%以上,其余依次为 YC>TX>HL,当土壤水吸力大于 500 cm 时,只有少部分薄膜水能吸持在土壤颗粒间,因此,这部分土壤水分特征曲线表现的较为陡直,土壤水吸力 200~500 cm 这部分不同土样变化较大,黏粒较多的土壤其土壤含水率变化较为缓慢,曲线表现的较为陡直,总体表现为 LP>YC>TX>HL。

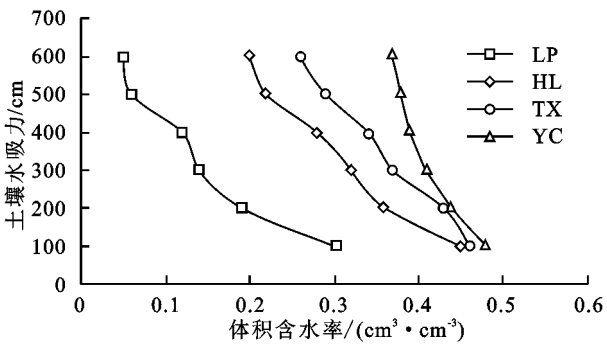


图 1 不同土壤类型的土壤水分特征曲线

2.2 土壤水分特征曲线拟合

应用美国 RETC 软件、Matlab 软件对不同区域土壤水分特征曲线进行拟合,不同类型土壤水分特征曲线进行拟合时,不同的模型其决定系数和相对误差并不相同,选取一种适合区域土壤类型和特点的模型对准确计算土壤在失水过程中的收缩特性。利用不同的模型对 4 种土壤水分特征曲线进行拟合,得到拟合结果见表 1。

表 1 不同模型对四种土壤水分特征曲线拟合结果

土壤	模型	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$m$	$n$	$R^2$
LP 砂壤土	V-G	0.0504	0.4632	0.0294	0.3404	1.0497	0.9923
	B-C	0.0297	0.4932	0.0504		0.1538	0.9812
	D-P	0.0392	0.3201				0.9876
	LND	0.0682	0.3247	154.9821	1.5466		0.9932
HL 黏土	V-G	0.1536	0.2698	0.0953	1.3069	1.5692	0.9906
	B-C	0	0.4503	0.0395		0.5597	0.9981
	D-P	0.2248	0.5502				0.9879
	LND	0.4271	0.4498	80.7840	1.6083		0.9902
TX 黏壤土	V-G	0.2134	0.4058	0.0182	1.2013	1.1036	0.9976
	B-C	0.2166	0.4322	0.0398		0.4629	0.9856
	D-P	0.1902	0.4301				0.9922
	LND	0.2304	0.4288	89.9832	1.5988		0.9891
YC 轻壤土	V-G	0.2049	0.3667	0.02054	0.4698	1.0233	0.9962
	B-C	0.2043	0.5521	0.0277		0.4981	0.9871
	D-P	0.2243	0.4482				0.9924
	LND	0.2298	0.4291	90.8432	1.6047		0.9871

表 2 DP 模型参数拟合表

类型	$\omega_1$	$\omega_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$n_1$	$n_2$	$m_1$	$m_2$
LP	0.8830	0.1224	0.0153	136.7761	1.6822	1.0844	0.4294	0.0688
HL	0.2203	0.6843	0.1226	0.0166	0.9982	1.8892	0.0322	0.3448
TX	0.1802	0.8344	24.5655	0.0277	1.0309	1.7781	0.0344	0.4025
YC	0.2025	0.8269	0.0981	0.0199	1.1072	1.6783	0.0442	0.4122

通过对各土样进行不同水分特征曲线模型拟合,发现不同的模型对各土样水分特征曲线的拟合均具有较高的精度,决定系数均在 0.98 以上,说明各模型在不同区域土壤均适用,但是不同模型在对不同土样拟合过程中表现出的适用程度及相关程度表现出一定的差异。总体来说 V-G 模型对四种土壤的水分特征曲线的拟合均具有较高的精度,决定系数  $R^2$  都在 0.99 以上,说明 V-G 在描述土壤水分数量和能量的相互关系上具有普遍适用性,LP 砂壤土水分特征曲线中 V-

G 模型和 LNG 模型  $R^2$  分别为 0.992 3,0.993 2,表现出比其余两种模型更高的拟合精度,HL 黏土 B-C 模型决定系数最大( $R^2=0.998 1$ ),TX 黏壤土和 YC 轻壤土均是 V-G 模型拟合精度最高。

2.3 土壤收缩量

土壤在脱水过程中,随着水分的排出,体积会逐渐变小,但是不同的土壤机械组成在脱湿的过程中土壤体积的收缩量表现出一定的差异,图 2 为不同土壤在不同吸力值条件下有效收缩度曲线,可以看出土壤

吸力值和土壤有效收缩度呈正比关系,说明随着吸力值的增加,土壤体积逐渐减小,在较小吸力范围,随着土壤吸力值的增大,土壤体积迅速减小,即有效收缩度呈指数增长,在 200 cm 吸力范围时,LP 土壤有效收缩度为 0.065,从 500 cm 到 700 cm 同样土壤吸力值范围内有效收缩度仅增加 0.03,为低吸力值(0—200 cm)的 46.2%,其他区域土壤也有类似的规律,这可能是由于饱和土壤在脱水过程中依次失去重力水、毛细管水、薄膜水,土壤含水率越小水分子所受到的吸持力越大。不同区域由于土壤类型的差异,土壤有效收缩度对土壤吸力值的反映也不同,土壤吸力值在 400 cm 时,有效收缩度相对值依次为 HL>TX>YC>LP,最大 HL 为 0.23,分别大其他区域土壤 20.8%,29.2%和 66.6%,这是因为土壤黏粒越多,土壤颗粒对水分的吸持力越大,相同土壤吸力值下有效收缩度越小。

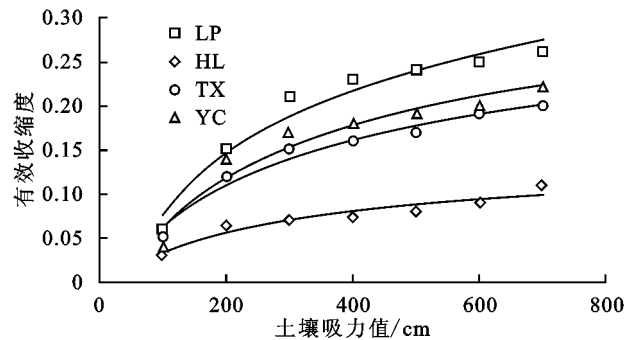


图 2 不同土壤有效收缩度曲线

拟合土壤吸力值和有效收缩度随土壤吸力值的相互关系,其均满足对数函数  $m=a\ln(x)+b$ ,即土壤有效收缩度随着土壤吸力值的增大表现出先快速增加再缓慢增加的趋势,这与吕殿青、邢旭光等的研究结果相似,式中  $a, b$  均为拟合参数,  $a$  为有效收缩度曲线的斜率,表征土壤有效收缩度随着土壤吸力值变化的快慢程度,其相对大小为 LP>HL>TX>YC,这与不同区域土壤类型及其机械组成有关,LP 土壤组成中由其砂粒含量较多,容重较大,在同一土壤吸力值条件下收缩较小。  $b$  为当饱和状态时,土壤实际收缩度,拟合结果显示,  $b$  值全为负值,表示在土壤在饱和饱和含水率条件下,土壤处于膨胀状态。

表 3 土壤有效收缩度曲线拟合表

类型	$a$	$b$	$R^2$
LP	0.1026	-0.3976	0.9613
HL	0.0843	-0.328	0.9369
TX	0.0734	-0.2786	0.9777
YC	0.0344	-0.1258	0.9176

2.4 土壤收缩特性分析

在土壤脱水过程中随着土壤含水率的减小,土壤容

重逐渐增大,比容重逐渐减小,图 3,图 4 分别为脱水过程中质量含水率与比容积、土壤吸力值与土壤容重之间的相互关系。从图 3 可以看出,比容积曲线大致可以分为三个阶段,这与邵明安等人的研究结果一致,仍采用其阶段划分,将曲线分为“滞留段、正常段、结构段”三个阶段,但是不同区域的土壤分别达到这三个阶段的土壤含水率并不一致,LP 土壤为 19%,24%,HL 土壤为 13%,20%,TX 土壤为 16%,26%,YC 土壤为 14%,22%,总体上表现为 LP 曲线比较平缓,其余三种土壤跳跃性比较大。土壤在失水过程中的容重变化见图 4,总体上表现为随着土壤水分的减少,容重逐渐增大,但是不同区域土壤类型其增加的快慢和增加量有较为显著的差异,LP 砂壤土容重增加较快,并且在土壤失水完成后其容重也较大,当吸力值为 600 cm 时,其容重为 1.68 g/cm<sup>3</sup>,相对大小分别为 LP>TX>YC>HL,这与土壤各颗粒级配组成密切相关。可见,在土壤在脱水过程中,收缩特征主要受到土壤机械组成、容重及土壤水分运动等多种因素的影响。

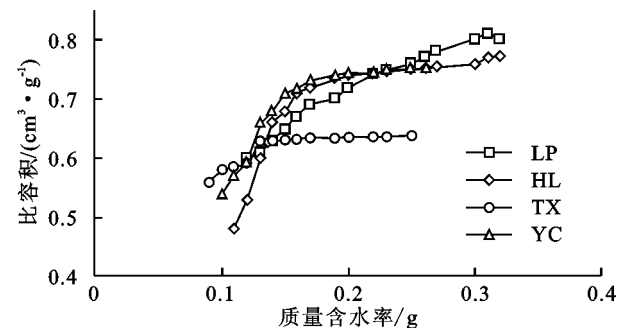


图 3 比容积变化曲线

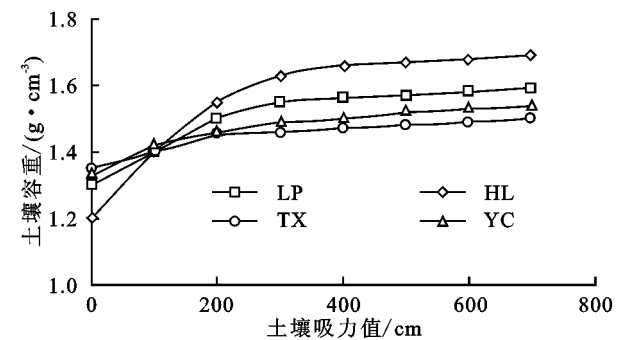


图 4 土壤容重变化曲线

Mc Garry 提出描述土壤收缩特征变化的三直线模型,因其在每一个收缩区段具有自身的数学特点和物理条件,因此得到广泛应用,如式(6)所示:

$$\begin{cases} v=\alpha+rU & 0<U<U_A \\ v=k+nU & U_A\leq U<U_B \\ v=\gamma+sU & U_B\leq U<U_s \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $v$  是比容积( $\text{cm}^3/\text{g}$ );  $r, n, s$  是滞留、正常、结构段内土壤收缩特征曲线的斜率。对不同区域典型土壤比容积变化曲线进行拟合,见表 4。

表 4 三直线模型拟合表

类型	$\alpha$	$k$	$\gamma$	$r$	$n$	$s$	$U_A$	$U_B$	$U_s$
YC	3.54	2.78	1.95	0.22	1.64	1.14	0.15	0.21	0.26
HL	0.95	4.0	0.094	0.45	0.23	0.62	0.12	0.16	0.21
TX	4.74	0.48	0.67	0.06	0.68	0.69	0.16	0.22	0.25
LP	1.78	1.1	1.0	0.44	0.66	0.9	0.19	0.24	0.27

3 结 论

通过对六盘山(LP)、贺兰县(HL)、同心县(TX)和盐池县(YC)四地的土壤通过取样,对其平均容重、土壤水分特征曲线进行测定分析,并且对脱水过程中土壤收缩特征进行定量测定,结果表明 V-G 模型对四种土壤的水分特征曲线的拟合均具有较高的精度,决定系数  $R^2$  都在 0.99 以上,LP 砂壤土水分特征曲线中拟合中 V-G 模型和 LNG 模型精度最高,HL 黏土 B-C 模型决定系数最大,TX 黏壤土和 YC 轻壤土均是 V-G 模型拟合效果最好。不同区域由于土壤类型的差异,土壤有效收缩度对土壤吸力值的反映也不同,总体有效收缩度相对值依次为  $HL>TX>YC>LP$ ,收缩最大的为黏土。脱水过程中比容曲线可以分为“滞留段、正常段、结构段”三个阶段,不同区域的土壤分别达到这三个阶段的土壤含水率 LP 土壤为 19%,24%,HL 土壤为 13%,20%,TX 土壤为 16%,26%,YC 土壤为 14%,22%,曲线总体上表现为 LP 曲线比较平缓,其余三种土壤跳跃性比较大。脱水后容重相对大小为  $LP>TX>YC>HL$ ,这与土壤各颗粒级配组成密切相关。

土壤水分特征曲线是表征土壤水分能量和数量的重要水力参数,其主要受土壤机械组成、土壤孔隙结构、土壤容重、温度、土壤孔隙变化等多种因素的影响,其对研究土壤水分保持和运动的基本物理参数。目前测定方法主要有压力膜法、离心机法,以及土壤水分特征曲线测定仪,不同方法原理不同,测定结果

略有误差。通过研究土壤脱水过程中的土壤收缩特性,为土壤不同尺度水力参数估算、土壤涨缩缩性及溶质运移等提供基础,本研究中,供试土壤取自不同的区域,其容重、机械组成、土壤结构等因素均存在一定差异,因此关于土壤水分特征曲线影响因素的研究需要进一步研究。

参考文献:

[1] 王淑英,路苹,王建立.不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征:以北京市平谷区为例[J].生态学报,2008,28(10):4957-4964.

[2] 寇薇.内蒙古河套灌区土壤水盐空间变异性研究[D].兰州:西北师范大学,2008.

[3] Eghball B, Sche pers J S, Negahban M, et al. Spatial andtemporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis [J]. Agronomy Journal, 2003, 95 (2):339-346.

[4] Peitgen H O, Jurgens H, Saupe D. Chaos and Fractals: New Frontier of Science[M]. NewYork: Springer-Verlag,1992:737.

[5] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等.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.

[6] 邵明安,吕殿青.土壤收缩特征曲线的试验研究[J].土壤学报,2003,40(3):471-474.

[7] 吕殿青,王宏,王玲.离心机法测定持水特征中的土壤收缩变化研究[J].水土保持学报,2010,24(3):209-216.

[8] 杨绍镠,黄元仿.关于土壤收缩特征曲线的探讨[J].土壤通报,2007,38(40):749-752.

[9] 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.

(上接第 278 页)

[25] 孙国钧,张荣,周立.植物功能多样性与功能群研究进展[J].生态学报,2003,23(7):1430-1435.

[26] 白永飞,陈佐忠.锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响[J].植物生态学报,2000,24(6):641-647.

[27] 周国英,陈桂琛,赵以莲,等.施肥和围栏封育对青海湖地区高寒草原影响的比较研究 I 群落结构及其物种多样性[J].草业学报,2004,13(1):26-31.

[28] 郑伟,朱进忠,潘存德.草地植物多样性对人类干扰的多尺度响应[J].草业科学,2009,26(8):72-80.

[29] 单贵莲,徐柱,宁发,等.围封年限对典型草原群落结构及物种多样性的影响[J].草业学报,2008,17(6):1-8.

[30] 闫玉春,唐海萍,辛小平,等.围封对草地的影响研究进展[J].生态学报,2009,29(9):5039-5046.

[31] 王蕾,许冬梅,张晶晶.封育对荒漠草原植物群落组成和物种多样性的影响[J].草业科学,2012,29(10):1512-1516.

[32] 张继义,赵哈林,张铜会,等.科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J].植物生态学报,2004,28(1):86-92.