

土壤收缩特征曲线的实验研究*

邵明安^{1,2} 吕殿青^{2,3}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

(3 湖南师范大学, 长沙 410081)

EXPERIMENTAL STUDY ON SOIL SHRINKAGE CHARACTERISTIC CURVES

Shao Ming-an^{1,2} Lu Dian-qing^{2,3}

(1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of
Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

关键词 收缩特征, 三直线模型, 粘粒

中图分类号 S152

对于含有粘粒的土壤,随着土壤含水量的改变,土壤容积也会随之改变,从而影响了容重-含水量的关系^[1]和土壤机械特性^[2],同时从土壤干湿变化可以预测田间地表收缩与膨胀、计算含水量剖面和制定灌溉计划^[3]。土壤在饱和-干燥收缩过程中容易产生表面下陷和裂隙,使得水分和溶质通过收缩裂隙优先运移到下层土壤和地下水中^[4,5],造成水分、养分的流失,甚至引起地下水污染,因此土壤干湿收缩特征已引起众多的关注。

为了表达土壤容积的变化,定义了土壤比容积 v 为单位质量土壤的容积,即容重的倒数。本文通过压力室测定了五种土壤脱水过程中压力势-含水量-土壤容重间的关系,旨在分析五种土壤的收缩特征曲线-比容积和重量含水量的关系,并将其收缩过程分为3段:滞留、正常、结构段。同时采用三直线模型(Three Straight Lines Model)对其进行模拟,分析收缩特征指标和土壤物理特性间的关系,以便为土壤收缩过程、优先流的研究以及土壤水动力学的准确描述提供科学依据。

1 基本理论

1.1 土壤收缩特征

Mitchell^[3]提出通过比容积 v 与重量含水量 U 的关系曲线来表达土壤容积的变化,并把它定义为土壤收缩特征曲线,即 $v-U$ 曲线。

从土壤容积变化速率考虑,定义土壤收缩特征值 m 为它的微分式^[3],可表达为:

$$m = \frac{\partial V}{\partial V_w} = \frac{\partial v}{\partial U}$$

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018605)、国家杰出青年基金(40025106)和中国科学院研究生科学与社会实践创新研究类项目资助

式中 V 是土壤的容积, V_w 是土壤水的容积。

换句话说, m 是容积损失 - 水损失曲线在任一点的斜率, 也等同于比容积 v - 重量含水量 U 曲线在任一点处的斜率。

1.2 三直线模型

三直线模型(见图 1)是用来描述土壤收缩特征曲线(Soil Shrinkage Characteristic Curve)^[35]。三直线

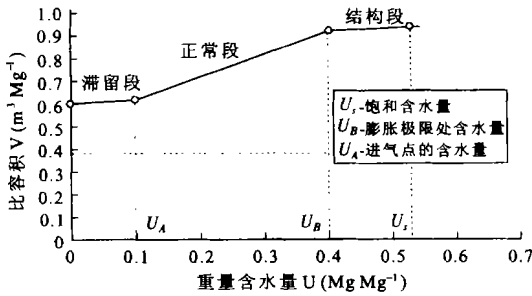


图 1 三直线模型的普通形式

模型在每一收缩段有它自身的数学特点和物理条件, 且数学特点与物理条件具有一致性, 其获得的参数有其物理意义。

三直线模型方程为:

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

式中 v 是比容积 ($m^3 Mg^{-1}$), U 为重量含水量 ($Mg Mg^{-1}$), r, n, s 是在滞留、正常、结构段内土壤收缩

特征曲线的斜率, 即三个收缩段的土壤收缩特征

值 m ; U_A, U_B, U_s 分别为滞留(进气点)拐点、结构(膨胀极限)拐点及饱和点处的重量含水量, α, k, γ 是经验常数。

2 材料与方法

2.1 供试土壤

选取了五种壤土^[67], 由砂壤到粘壤, 即砂质粘壤土、壤土、粉砂壤土、粉砂质粘壤土、粘壤土, 其基本物理特性测定如表 1 所示: 五种土壤的颗粒组成由吸管法测定, 比重采用比重瓶法测试, 饱和含水量是通过测定饱和点的含水量和容重计算获得, 比表面积采用 EGME (Ethylene Glycol Monoethyl Ether) 技术测定^[8]。

表 1 五种土壤的基本物理特性

土壤质地	砂粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	粘粒含量 (%)	比重 ($Mg m^{-3}$)	饱和含水量 ($m^3 m^{-3}$)	比表面积 ($10^{-2} m^2 kg^{-1}$)
砂质粘壤土	67.7	11.3	21.0	2.64	0.542	58
壤土	50.9	32.6	16.5	2.69	0.503	40
粉砂壤土	11.4	70.0	18.6	2.69	0.502	41
粉砂质粘壤土	2.4	69.5	28.1	2.67	0.562	79
粘壤土	32.1	39.2	28.7	2.57	0.569	141

2.2 试验方法

五种土壤过 2 mm 筛按自然状况装入压力室测定金属环中, 浸水让其饱和并测定其容重; 将样品放入压力室装置中, 分别加压为 $0.027 \times 10^5, 0.0713 \times 10^5, 0.156 \times 10^5, 0.378 \times 10^5, 0.752 \times 10^5, 1.002 \times 10^5, 3.2 \times 10^5, 4.852 \times 10^5, 10.197 \times 10^5, 15.26 \times 10^5$ Pa, 在每一压力下待土样平衡后, 测定其含水量和容重, 容重采用蜡封法测定^[9]。

3 结果与讨论

3.1 五种土壤的收缩特征曲线

五种土壤在脱水过程中由于承受一定的压力, 土壤容积减小, 容重不断增大, 是一个收缩的过程。根据实测资料, 绘制了五种土壤的收缩特征曲线—比容积与含水量的关系, 见图 2~ 图 6 所示。

由图 2~ 图 6 可见, 五种土壤的收缩过程都分为 3

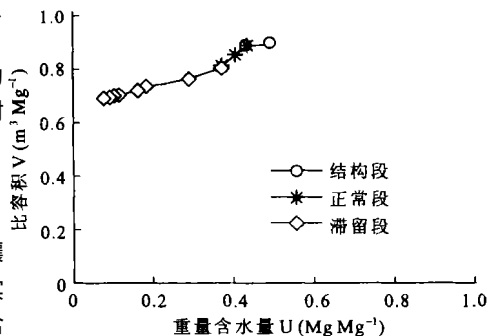


图 2 砂质粘壤土的收缩特征曲线

段,即滞留、正常、结构段,每段均为一直线型变化,可用三直线模型来描述。结构段变化极其平缓,土壤容积收缩性很小,滞留段变化较平缓,正常段变化极其陡直,土壤容积收缩性大。砂质粘壤土、粉砂质粘壤土、粘壤土的整个收缩曲线变化较平缓,壤土、粉砂壤土的整个收缩曲线有很大的跳跃性。

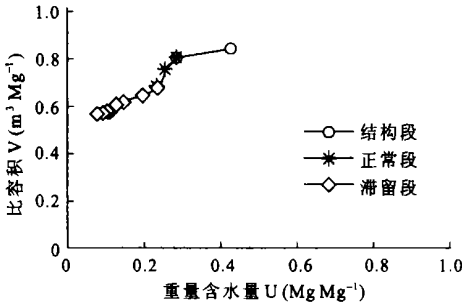


图 3 壤土的收缩特征曲线

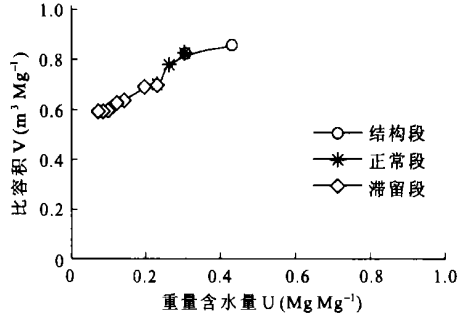


图 4 粉砂壤土的收缩特征曲线

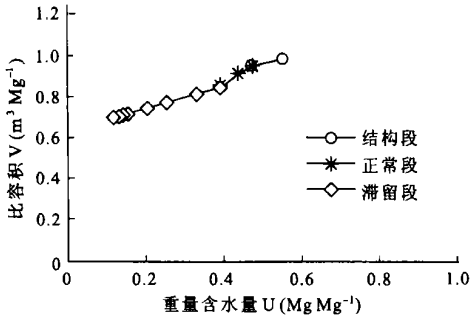


图 5 粉砂质粘壤土的收缩特征曲线

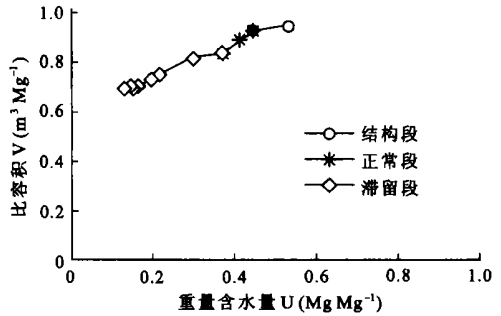


图 6 粘壤土的收缩特征曲线

3.2 三直线模型拟合结果

采用三直线模型对五种土壤的收缩特征曲线进行拟合,其结果如表 2 所示。

由表 2 可见,实测资料与三直线模型具有较好的相关性。对于五种土壤而言,在加压情况下,滞留段较长,正常、结构段较短,三段的收缩特征值大小顺序为:结构段 < 滞留段 < 正常段,符合通用的三直线模型。但是其正常段的收缩特征曲线特征值大于 1,进气点处的重量含水量较高,这可能是由于土壤承受压力的缘故。

表 2 三直线模型的拟合参数

土壤类型	α	r	R	k	n	R	γ	s	U_A	U_B	U_s
砂质粘壤土	0.662	0.385	0.995	0.310	1.330	0.986	0.734	0.351	0.374	0.436	0.491
壤土	0.512	0.747	0.984	0.124	2.453	0.970	0.746	0.234	0.231	0.283	0.425
粉砂壤土	0.535	0.760	0.977	0.330	1.655	0.955	0.751	0.255	0.230	0.305	0.432
粉砂质粘壤土	0.634	0.533	0.996	0.325	1.333	0.990	0.792	0.330	0.389	0.469	0.547
粘壤土	0.605	0.658	0.971	0.385	1.212	0.995	0.813	0.261	0.371	0.448	0.532

注: R —相关系数,其余同前

3.3 土壤收缩特征和土壤基本物理特性的关系

土壤容积随含水量改变而变化,这与土壤的基本物理特性有关,其中粘粒含量是一个重要的因素^[5, 10]。

通过表 1 和表 2 比较,粘粒含量增加,土壤比表面积增大;在土壤收缩正常段,土壤收缩特征值随粘粒含量的增加而减小;壤土类的 U_A 、 U_B 、 U_s 均小于粘壤土类。

3.4 吸力与比容积的关系

在测定过程中,由于加压可以改变土壤的容重,从而也改变了土壤的容积。下面分析比容积随吸力的变化(见图 7)。

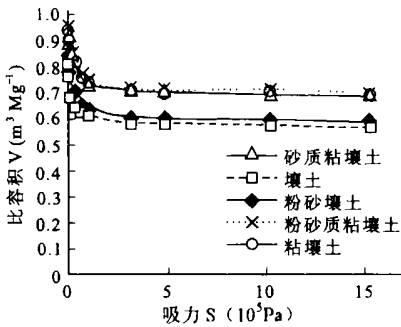


图 7 比容积与吸力的关系

由图 7 可见,五种土壤的比容积—吸力变化曲线在低吸力($0 \sim 10^5$ Pa)时急剧下降,吸力大于 10^5 Pa 后曲线变化十分平缓。壤土、粉砂壤土的曲线基本重合,砂质粘壤土、粉砂质粘壤土、粘壤土的曲线也基本重合,且同压力下的粘壤土类的比容积大于壤土类。

根据比容积和吸力关系曲线,采用幂函数关系($v = aS^b$)进行拟合,两者具有很好的一致性,其结果如表 3 所示。

表 3 比容积—吸力幂函数关系拟合结果

土壤类型	a	b	R
壤土	0.636	-0.0557	0.9277
粉砂壤土	0.6577	-0.0535	0.924
砂质粘壤土	0.7511	-0.0408	0.9429
粉砂质粘壤土	0.7733	-0.0504	0.924
粘壤土	0.7658	-0.0501	0.9324

注: a 、 b —经验常数; R —相关系数

4 结论

通过用压力室测定五种土壤脱水收缩过程和采用三直线模型分析土壤收缩特征曲线,得到如下结果:(1) 土壤收缩过程分为滞留段、正常段、结构段;(2) 土壤收缩特征曲线可用三直线模型描述;(3) 粘粒含量是影响土壤收缩特征的一个重要因素,在土壤正常收缩段,土壤收缩特征值随粘粒含量的增加而减小,壤土类 U_A 、 U_B 、 U_s 小于粘壤土类;(4) 土壤的比容积和吸力变化曲线可用幂函数关系描述。

参考文献

1. Allbrook R F. Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for physics. *Aust. J. Soil Res.*, 1992, 31: 111~ 118
2. Yong R N, Warkentin B P. *Soil Properties and Behavior*. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1975
3. Mitchell A R, Van Genuchten M Th. Shrinkage of bare and cultivated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1 036~ 1 042
4. Beven K, Germán P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18: 1 311~ 1 325
5. Crescimanno G, Provenzano G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: Measurement and prediction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 25~ 32
6. Shao M A, Horton R. Soil water diffusivity determination by general similarity theory. *Soil Sci.*, 1996, 161: 727~ 734
7. Shao M A, Horton R. Integral method for estimating soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 585~ 592
8. Cihacek L J, Bremner J M. A simplified ethylene glycol monoethyle ether procedure for assessment of soil surface area. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, 43: 821~ 822
9. 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 511~ 514
10. Parker J C, Amos D F, Kaster D L. An evaluation of several methods of estimating soil volume change. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977, 41: 1 060~ 1 064