

干湿交替过程中土壤胀缩特征的研究

黄传琴^{1,2} 邵明安^{1,2*}

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100 ;

2.中国科学院 水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100)

摘 要 土壤胀缩是土壤在干燥、湿润交替变化过程中所表现出的土壤容积随含水量改变的现象。本文通过测定 4 种土壤脱水和吸水过程中的土柱高度和直径的变化,分析了胀缩过程中土壤容积与含水量的关系及土壤的胀缩特征。结果显示:三直线模型能够很好地拟合 4 种土壤的收缩、膨胀过程,土壤收缩、膨胀曲线各段的特征值均小于 1,这说明土壤胀缩过程中土壤容积的变化速率小于含水量的变化速率;4 种土壤胀缩过程中几何因子 r_1 大于 1 而小于 3,且收缩初期几何因子 r_1 等于 1,表明土壤的胀缩是各向异性的,并且在土壤收缩的最初阶段只有垂直收缩。

关键词 干湿交替;土壤胀缩;三直线模型;几何因子;各向异性

中图分类号 S152.7 文献标识码:A 文章编号:0564-3945(2008)06-1243-05

含有粘粒的土壤,其容积会随含水量的变化而改变,从而影响到土壤容重与含水量的关系和土壤机械特性^[1-3]。在干湿交替过程中,土壤容积随含水量的变化包括垂直和水平两个方面,即土壤表面的下陷和上移以及裂隙的产生和封闭,不仅影响土壤的结构与质量,同时水分和溶质还会通过收缩裂隙优先运移到下层土壤和地下水中,导致水分、养分的损失及地下水污染^[4-6],因此土壤的干湿胀缩特征引起了国内外众多学者的关注。

Mitchell^[7]提出用比容积 v 与质量含水量 U 的关系曲线来表达土壤容积的变化,并将其定义为土壤收缩特征曲线,即 $v-U$ 曲线。目前描述土壤收缩特征曲线的模型有三直线模型^[8]、Logistic 模型^[9,10]以及土壤容积变化的通用方程^[11,12]。McGarry(1987)对上述模型进行了比较,详细地说明了模型的重要参数,得出土壤容积变化通用模型没有最大值,不适于结构收缩段,无转折点,不能完整地描述整个含水量内的收缩过程^[8]。Logistic 模型描述了土壤收缩曲线的形状,但是缺乏较强的理论基础和参数的物理意义。三直线模型能很好地描述三个收缩段,在每一收缩段都有它自身的量化特点和物理条件,且二者具有一致性。Crescimanno 和 Provenzano(1999)研究了粘土的收缩特征曲线,证实了三直线模型能拟合实测数据和从粘粒含量预测基本收缩曲线的可能性^[13]。邵明安和吕殿青(2003)采用压力室法研究了土壤收缩特征曲线,说明了土壤脱水收缩过程可用三直线模型描述^[14]。有研究表明各类土壤及土壤胶体的吸水曲线形状各不相同,土壤和胶体的吸

水量不仅受粘土矿物所限制,土粒的团聚和分散情况都有关系。大量研究主要集中在对土壤收缩或膨胀过程的分析,但对土壤干燥、湿润交替变化过程中胀缩特征的对比研究尚未见报道。

本文通过测定 4 种扰动土脱水收缩、吸水膨胀过程中土柱的垂直和水平变形,从而得到干湿交替过程中土壤容积与含水量的关系,并采用三直线模型进行拟合,旨在分析 4 种土壤膨胀与收缩过程中比容积和质量含水量的关系及胀缩特征,以便为土壤胀缩过程的定量研究打下基础,并为土壤中优先流和污染物迁移研究提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

选取 4 种不同质地的土壤,即分别采自陕西安塞、长武、杨凌、湖南桃园的砂壤土、壤土、粘壤土、粘土作为供试土样,其基本物理特性测定如表 1。其中 4 种土壤的颗粒组成及比表面积利用英国马尔文公司生产的 MS2000 激光分析仪进行测定,比重采用比重瓶法测定。

1.2 试验方法

土壤风干、磨碎过 1mm 筛后放入烘箱 105℃ 烘干。将一定数量的烘干土样均匀装入内径为 5cm 的自制有机玻璃柱中,浸水让其饱和。土柱吸水饱和后将土柱经历干燥收缩过程直至其质量几本平衡不变,之后再逐量加水并密封放置 24 小时,使其经历吸水膨胀过程。在干燥收缩和吸水膨胀的过程中,土壤含水

收稿日期:2007-08-30; 修订日期:2007-11-09

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(90502006)和西北农林科技大学“创新团队”计划资助

作者简介:黄传琴(1983-),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事土壤物理方面的研究。

* 通讯作者 E-mail:mashao@ms.iswc.ac.cn

表 1 供试土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of experimental soil

土壤质地 Soil texture	粘粒含量 Clay content (%)	粉粒含量 Silt content (%)	比表面积 Specific surface (m ² g ⁻¹)	比重 Specific gravity (g cm ⁻³)	主要粘土矿物 Clay mineral
砂壤土 [*]	10.01	53.82	0.72	2.63	以伊利石、绿泥石为主 [*]
壤土 [*]	20.97	69.44	4.1	2.63	以伊利石为主,含少量蒙脱石 [*]
粘壤土 [*]	27.25	65.51	4.67	2.59	以伊利石、蛭石为主 [*]
粘土 ^{**}	34.51	55.33	1.97	2.58	以高岭石为主 ^{**}

注:^{*}引自陕西土壤(陕西省土壤普查办公室主编,1992);^{**}引自中国土壤(熊毅、李庆逵主编,1987)

量由精度为 0.01g 的电子天平测定,同时土柱的高度及直径由精度为 0.002cm 的游标卡尺测定。每种土样 4 组重复。

1.3 分析方法

土壤比容 v 为单位质量土壤的容积,即容重的倒数,它是描述土壤容积变化的通用方法。

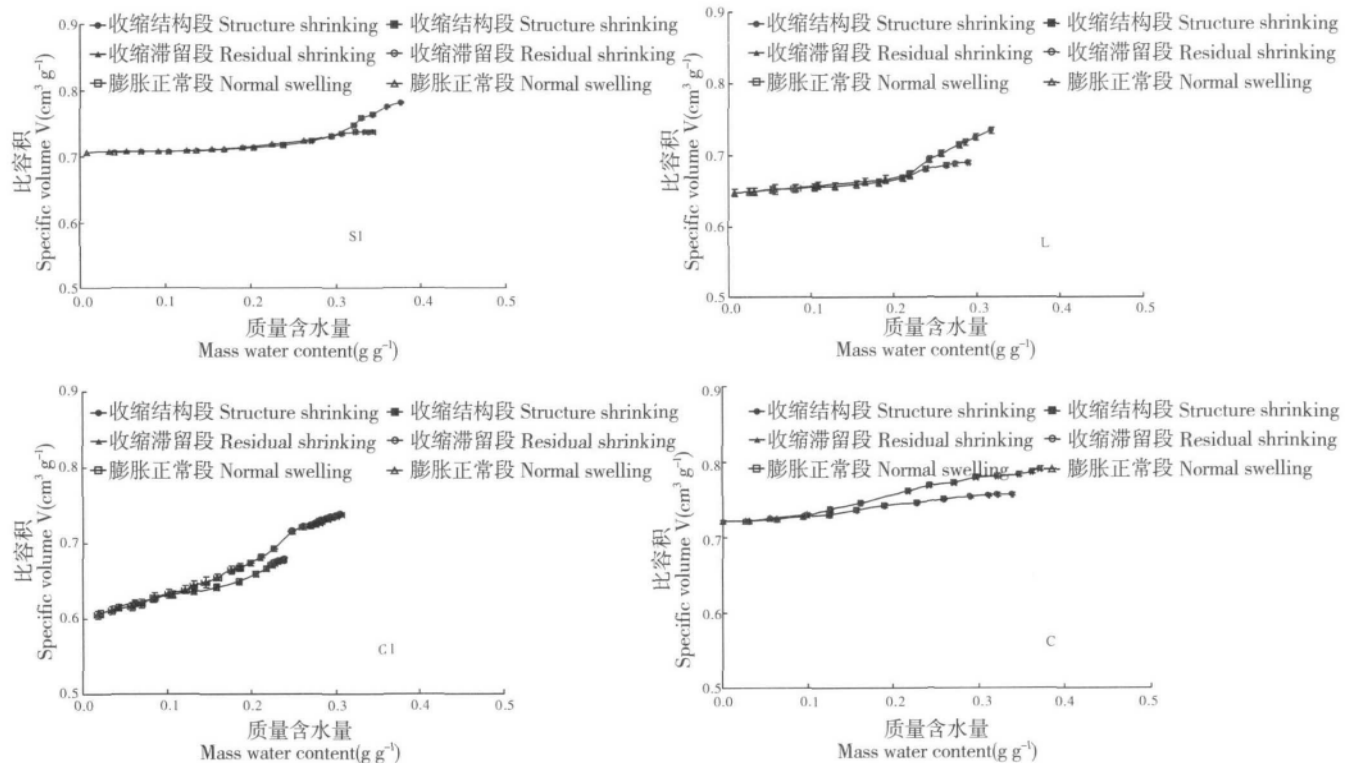


图 1 4 种供试土壤胀缩特征曲线 (SI=砂壤土, L=壤土, CI=粘壤土, C=粘土)

Fig. 1 Shrinking and swelling characteristic curves of four soils studied(SI=Sandy loam, L=Loam, CI=Clay loam, C=Clay)

土壤干湿交替过程中容积随含水量的变化包括垂直和水平两个方面,即土壤表面的下陷和上移及裂隙的产生和封闭。Bronswijk^[15]考虑到土壤胀缩过程中垂直和水平变形的异质性而定义了无量纲几何因子 r_s ,可表达为:

$$r_s = \frac{\ln \frac{V_i}{V_s}}{\ln \frac{z_i}{z_s}} \quad (1)$$

式中 V_s 和 z_s 分别是土柱饱和时的体积和高度, V_i 和 z_i 分别是第 i 次测定的土柱体积和高度。用 r_s 描述土壤垂直和水平变形时有五种情况,即:(1)在只有

垂直变形而无水平变形的情况下 $r_s = 1.0$;(2)在只有水平变形的情况下 $r_s \rightarrow \infty$;(3)在以垂直变形为主的情况下 $1.0 < r_s < 3.0$;(4)在以水平变形为主的情况下 $r_s > 3.0$;(5)在变形各向同性情况下 $r_s = 3.0$ 。

2 结果与讨论

2.1 土壤的胀缩特征及胀缩特征曲线的拟合结果

2.1.1 土壤胀缩特征 4 种土壤在脱水过程中,土体收缩,土壤容积减小,容重增大;而在吸水过程中,土体膨胀,土壤容积增大,容重减小。根据实测资料,绘制了 4 种土壤的胀缩特征曲线,即比容积与含水量的关系,见图 1 所示。

有研究表明,干燥或湿润过程可引起土壤结构的

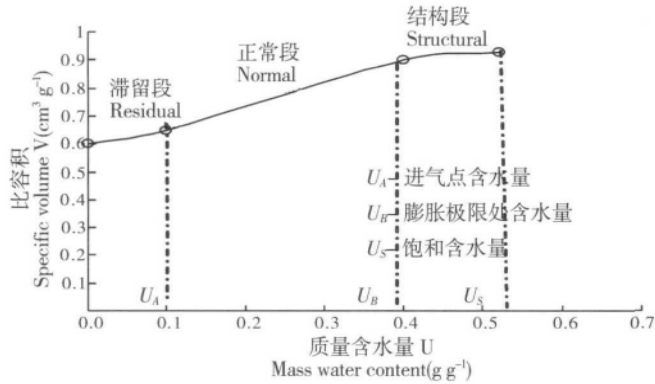


图2 三直线模型的示意图

Fig. 2 General forms of three straight lines model

不同变化^[16]。而土壤对颗粒再排列的内部阻力使得土壤在一定吸力下平衡时脱水过程的体积大于吸水过程的体积,从而使得在一定能量状态下的容积含水量发生改变而产生滞后现象。由图1可以看出,4种土壤收缩与膨胀过程之间确实存在滞后现象,且粘壤土、粘土的滞后效应比砂壤土、壤土明显。4种土壤湿润膨胀过程最终的含水量和体积都不能恢复到干燥收缩过程初始的含水量和体积,这可能是因为在加水湿润过程中存在封闭空气现象,进一步降低重新湿润过程中土壤的含水量,由于土壤不能达到真正的平衡而增

强了滞后效应。

图2中4种土壤的干燥收缩和湿润膨胀曲线可以近似分为3个直线型变化段,可用3直线模型进行描述。土壤收缩过程和膨胀过程的滞留段变化平缓,土壤容积胀缩性小,结构段变化较平缓,正常段变化相对陡直,土壤容积胀缩性大。砂壤土、壤土、粘土的整个胀缩过程比容积随含水量的变化较平缓,粘壤土的整个胀缩过程比容积随含水量的变化有很大的跳跃性。

2.1.2 三直线模型拟合结果 三直线模型(Three straight lines model)将土壤收缩特征曲线划分为滞留段、正常段和结构段。三直线模型方程为:

$$\begin{cases} v = \alpha + rU & 0 < U < U_A \\ v = k + nU & U_A < U < U_B \\ v = r + sU & U_B < U < U_S \end{cases} \quad (2)$$

式中 v 是比容积($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$), U 为质量含水量(g g^{-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 分别是滞留拐点(进气点)、结构拐点(膨胀极限)及饱和点处的质量含水量, α, k, γ 是经验常数。

采用三直线模型对4种土壤的收缩和膨胀过程的 $v-U$ 曲线进行分段拟合,其结果如表2、表3所示。

由表2~3可见,实测资料与三直线模型具有较好

表2 收缩过程三直线模型的拟合参数

Table 2 Properties of the three straight lines model fitted the shrinking processes

土壤 Soil	滞留段(Residual)			正常段(Normal)			结构段(Structural)			U_A	U_B	U_S
	α	r	R	k	n	R	γ	s	R			
砂壤土	0.702	0.079	0.928	0.516	0.726	0.986	0.585	0.524	0.995	0.287	0.342	0.376
壤土	0.646	0.110	0.989	0.525	0.685	0.991	0.562	0.545	0.999	0.210	0.264	0.318
粘壤土	0.597	0.371	0.994	0.521	0.775	0.988	0.613	0.411	0.995	0.188	0.253	0.305
粘土	0.719	0.128	0.966	0.707	0.249	0.997	0.738	0.138	0.931	0.099	0.252	0.368

表3 膨胀过程三直线模型的拟合参数

Table 3 Properties of the three straight lines model fitted the swelling processes

土壤 Soil	滞留段(Residual)			正常段(Normal)			结构段(Structural)			U_A	U_B	U_S
	α	r	R	k	n	R	γ	s	R			
砂壤土	0.703	0.053	0.956	0.660	0.238	0.997	0.726	0.034	0.997	0.232	0.324	0.343
壤土	0.646	0.091	0.979	0.593	0.358	0.979	0.654	0.122	0.979	0.199	0.258	0.290
粘壤土	0.604	0.249	0.990	0.565	0.468	0.984	0.594	0.354	0.984	0.178	0.254	0.238
粘土	0.716	0.098	0.999	0.713	0.149	0.997	0.729	0.084	0.997	0.059	0.250	0.336

注: R - 相关系数

的相关性。对于4种土壤而言,收缩和膨胀过程的滞留段较长,正常、结构段较短。各收缩段和膨胀段的特征值均小于1,说明土壤在胀缩过程中容积的变化速率小于含水量的变化速率。对比表2与表3可知,4种土壤各收缩段的特征值均大于各膨胀段特征值,且收缩

过程的 U_A, U_B, U_S 均高于膨胀过程的 U_A, U_B, U_S , 这也说明了土壤收缩过程与膨胀过程之间存在滞后现象。

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。由表1可见,砂壤土、壤土、粘壤土的比表面积随粘粒含量增加而增大,而壤土的粘粒含量

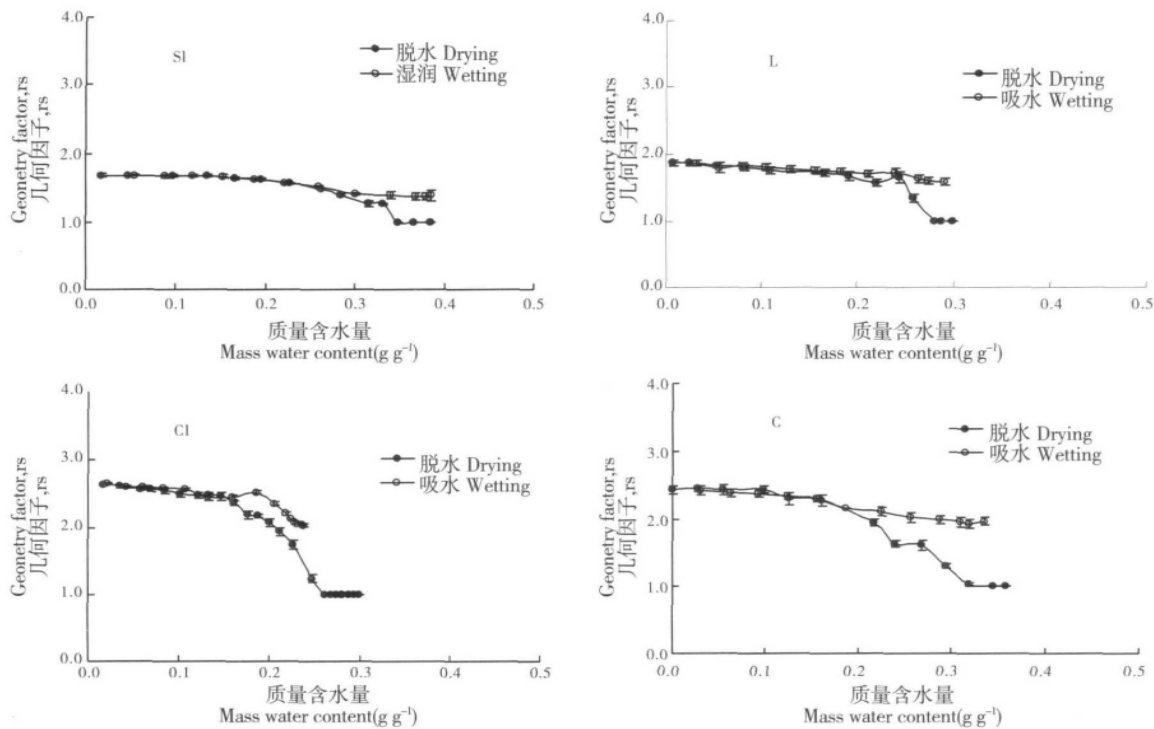


图 3 4 种供试土壤胀缩过程中几何因子的变化(SI=砂壤土, L=壤土, Cl=粘壤土, C=粘土)

Fig. 3 Changes of geometry factor during the drying and wetting processes of four soils studied(SI=Sandy loam, L=Loam, Cl=Clay loam, C=Clay)

最大,比表面积却较小。通过比较表 1 和表 2、表 3 可知 4 种土壤的进气含水量较高,且拟合结果表明 4 种土壤胀缩过程的进气含水量大小顺序为:砂壤土 < 壤土 < 粘壤土 < 粘土,即土壤质地越粘滞留段越短。砂壤土、壤土、粘壤土的土壤收缩过程和膨胀过程各段的特征值随粘粒含量的增加而增加,但粘土的粘粒含量最高,其收缩过程和膨胀过程各段的特征值却较小,土壤容积胀缩性小。这是因为粘土的粘粒矿物是以非膨胀性的高岭石为主。有研究表明粘粒含量尤其是细粘粒含量与土壤的收缩与膨胀明显相关,但是非膨胀性粘粒会限制比表面(尤其是内比表面)的进一步发展,膨胀收缩能力的大小还取决于粘粒矿物种类^[7]。因此,土壤胀缩特征受其粘粒含量以及粘粒矿物类型等因素的综合影响。

2.2 土壤二维胀缩的各向异性

根据实测资料,绘制了 4 种土壤胀缩过程中几何因子 r_s 随含水量的变化图,如图 3 所示。

几何因子 r_s 的变化是因为土壤胀缩过程中土体中应力的变化。由图 3 可见,4 种土壤干燥收缩过程中,收缩初期土壤的 r_s 值是 1,说明收缩初始阶段土壤水分在重力作用下从大孔隙中排出,因此只有垂直变形而无水平变形,随着干燥过程的不断进行,土壤内部的应力不断增加,土壤的 r_s 值在一定含水量范围内不

断增加,在收缩后期直至土柱平衡,土壤的 r_s 值的变化趋于平缓,这一过程中土壤的 r_s 值始终小于 3,这说明在该收缩过程中土壤发生了垂直变形和水平变形,但是以垂直收缩为主。在土壤吸水膨胀过程中,土壤的 r_s 值随含水量的增加而缓慢减小,但均大于 1,这说明在吸水膨胀过程以垂直变形为主,兼有水平变形。干燥收缩、吸水膨胀过程中几何因子 r_s 的变化说明 4 种土壤的收缩与膨胀是各向异性的。

土壤胀缩过程中 r_s 值的变化情况对于研究胀缩性土壤及裂化土壤中的水分及溶质的运移十分重要。目前 r_s 概念已被应用于二维轴对称胀缩性土壤流体运动方程中。

3 结论

本实验测定了 4 种土壤脱水收缩和吸水膨胀过程中比容积与含水量的关系,分析了 4 种土壤收缩、膨胀的特征,得到如下结论:(1)土壤收缩和膨胀过程均可以分为滞留段、正常段、结构段,三直线模型能够较好地拟合 4 种土壤的收缩和膨胀特征曲线;(2)土壤在胀缩过程中各段的特征值均小于 1,即土壤在胀缩过程中土壤容积的变化速率小于含水量的变化速率;(3)4 种土壤胀缩过程中几何因子 r_s 值小于 3 而大于 1,且在收缩初期等于 1,这说明在收缩与膨胀过程中

土壤容积变化在垂直和水平方向上是各向异性的,并且土壤干燥收缩过程中先发生土面的下沉。

参考文献:

- [1] ALLBROOK R F. Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for physics [J]. Aust. J. Soil Res. , 1992, 3: 111-118.
- [2] YONG R N, WARKENTIN B P. Soil Properties and Behavior [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1975.
- [3] 杨绍锴, 黄元仿. 关于土壤收缩特征曲线的探讨 [J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 749-752.
- [4] BEVEN K, GERMAN P. Macropores and water flow in soils [J]. Water Resources Research, 1982, 18: 1311 - 1325.
- [5] CRESCIMANNO G, PROVENZANO G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: Measurement and prediction [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1999, 63: 25-32.
- [6] 吕殿青, 邵明安. 土壤干湿收缩特征研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 225-228.
- [7] MITCHELL A R, VAN GENUCHTEN M TH. Shrinkage of bare and cultivated soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1992, 56: 1036-1042.
- [8] MC GARRY D, MALAFANT K W J. Analysis of volume change in unconfined unite of soil [J]. Soil Sci. Soc. AM. J. , 1987, 51: 290-297.
- [9] NELDER J A. The fitting of a generalization of the logistic curve[J]. Biometrics. 1961, 17: 89-110.
- [10] NELDER J A. An alternative form of a generalized logistic equation[J]. Biometrics, 1962 , 18: 614-616.
- [11] GIRALDEZ J V, G SPOSITO, C DELGADO. A general soil volume change equation: I: The two - parameter model [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1983, 47: 419-422.
- [12] GIRALDEZ J V, G SPOSITO, C DELGADO. A general soil volume change equation: II: Effect of load pressure [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1983, 47: 422-425.
- [13] CRESCIMANNO G, PROVENZANO G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: Measurement and prediction [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1999, 63: 25-32.
- [14] 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.
- [15] BRONSWIJKS J J B. Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1990, 54: 1500-1502.
- [16] HILLEL D, MOTTES J. Effect of plate impedance, wetting method and aging on soil moisture retention [J]. Soil Sci. , 1966, 102: 135-150.
- [17] 仇荣亮, 熊德祥, 黄瑞采. 变性土的膨胀收缩特点及影响因素. 南京农业大学学报, 1994, 17(1): 71-77.

Experimental Study on Soil Shrinking and Swelling Characteristics during the Alternative Drying and Wetting Processes

HUANG Chuan-qin¹², SHAO Ming-an^{12*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil swelling-shrinking is related to the change in soil volume with water content in the processes of soil drying and wetting. The height and diameter changes of four soils were measured during drying and wetting processes in this study. Meanwhile both the relations between soil volume and water content and soil swelling-shrinking characteristics were analyzed. The results showed that the three straight lines model could fit the soil shrinking and swelling characteristic curves well. The characteristic values of the curves were smaller than 1. This indicated that during the processes of soil swelling and shrinking, the change of the soil specific volume was smaller than that of the soil water content. Values of the geometry factors of four soils studied were equal to 1 at the beginning of shrinking, less than 3 and greater than 1 at other swelling-shrinking phases. The geometry factor values in different phases showed that soil swelling-shrinking was anisotropic and only subsidence occurred at the beginning of shrinking.

Key words: Alternative drying and wetting processes; Soil shrinking and swelling; Three straight lines model; Geometry factor; Anisotropic