

## 容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究\*

张晓媛 范昊明<sup>†</sup> 杨晓珍 周丽丽 武敏 刘金壮

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

EFFECTS OF SOIL BULK DENSITY AND WATER CONTENT ON HYDROSTATIC  
DISINTEGRATION RATE OF SANDY CLAY LOAMZhang Xiaoyuan Fan Haoming<sup>†</sup> Yang Xiaozhen Zhou Lili Wu Min Liu Jinzhuang

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

关键词 初始含水率; 容重; 崩解; 砂质黏壤土

中图分类号 S157.1 文献标识码 A

崩解在土工试验中叫做湿化,是指土壤在静水中发生破裂解体、塌落或强度减弱的现象<sup>[1]</sup>。土壤的崩解机制与土壤侵蚀的发生过程密切相关,是土壤侵蚀发生的必要条件之一。国内外对于土壤崩解的研究相对较少,而对于容重或含水对崩解性的影响的研究更少,国内仅有的研究目前大多限于黄土和南方的一些典型土壤,如燥红壤、红壤、褐红壤等。在降雨和地表灌溉作用下产生的土壤侵蚀过程中,崩解是侵蚀发生的一个前提条件。土壤颗粒组成是评价土壤基本性质的参数之一,土壤颗粒常以团聚体形式存在<sup>[2]</sup>,故将研究土壤团聚体的崩解特性作为研究土壤崩解特性的切入点。相关研究指出,传统的 Le Bissonnais 法将土壤团聚体的崩解机制分为四部分,消散作用、膨胀作用,机械作用和物理-化学分散作用<sup>[3-5]</sup>。影响土壤崩解的因素是多方面的,主要有土壤有机质含量、土壤被扰动情况、黏粒含量、矿物成分、成土过程、土壤胀缩性、pH 和土壤所受到的外营力等。关于土壤发生崩解的影响因素,国内外学者均有研究。Ruiz-Vera 等<sup>[6]</sup>认为土壤所处的碱性环境是影响土壤结构稳定性的关键因素,土壤所处的碱性环境决定土壤离子的存在状态;高黏粒含量的土壤通过黏粒在基质上的胶结

作用增加了其团聚体稳定性,团聚体稳定性随着黏粒含量的增加而增加<sup>[7]</sup>,颗粒间连结的本质是原子和离子之间的相互作用,粘土对于大颗粒间的粘合作用有很大影响<sup>[8-9]</sup>,这是因为土壤黏粒含量与土壤颗粒的比表面积之间的正相关关系。Ellen 等<sup>[10]</sup>在研究中指出:碳酸钙、有机高分子和废弃有机质能增加土壤的结构稳定性。此外,植物生长和耕作措施也影响土壤的崩解速率<sup>[11-12]</sup>。

Aldo 等<sup>[13]</sup>在研究中指出:容重越大,土壤的团聚体水稳性和固有吸水度越大。唐军等<sup>[14]</sup>在对贵州玄武岩残积土崩解特性试验中指出:土样本身的矿物成分、颗粒大小、初始含水率等因素对土样崩解的产生有重要影响。谭鑑益<sup>[15]</sup>也指出,土层的高含水率导致土层崩解速率加快,王恩姮等<sup>[16]</sup>研究发现高含水量条件使黑土团聚体稳定性明显降低。但现有的研究对于辽西地区典型土壤崩解性的关注较少,本文以容重和土壤含水率模拟农田土壤的翻耕程度和湿润度,研究辽西旱作农田区砂质黏壤土的崩解特性,进一步认识辽西砂质黏壤土抗水蚀的机理和特征,揭示辽西农田土壤在不同干燥程度及翻耕程度条件下抗蚀性变化规律。

\* 国家自然科学基金项目(41071183,41101256)和辽宁省博士科研启动基金项目(20111080)联合资助

<sup>†</sup> 通讯作者:范昊明(1972—),男,吉林白山人,副教授,主要从事流域侵蚀、产沙与水土保持规划等方面的研究。Tel:13904035995, E-mail:fanhaoming@163.com

作者简介:张晓媛(1988—),女,河北张家口人,硕士研究生,主要从事沟灌侵蚀机理研究。Tel:15942327884, E-mail:yuhan.0302@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-01-01;收到修改稿日期:2012-05-10

# 1 材料与方 法

## 1.1 试验土样及崩解装置

供试土样为辽西旱作农田砂质黏壤土,2011 年

4 月取自辽宁省朝阳市(东经 120°27'29",北纬 41°32'13"),取土深度为 0~10 cm。土壤属于褐土中的典型褐土亚类、钙镁质褐土土属,其成土母质为二元基岩风化物,上部为砂岩坡积物,下部为白云质灰岩残积物。表 1 为供试土壤的机械组成及一些基本性质。

表 1 供试土壤的基本性质

石砾 (g kg <sup>-1</sup> ) >20 mm	颗粒组成(g kg <sup>-1</sup> )				质地名称	黏化率	
	2.0~0.2 mm	0.2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm		B/C	B/A
111.1	73.3	489.8	198.6	238.3	砂质黏壤土	1.00	1.05
pH	碳酸盐含量(g kg <sup>-1</sup> )			有机质	全氮	全磷	全钾
	总量	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	(g kg <sup>-1</sup> )	(N, g kg <sup>-1</sup> )	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , g kg <sup>-1</sup> )	(K <sub>2</sub> O, g kg <sup>-1</sup> )
7.6	23.0	17.4	5.6	39.3	2.08	0.85	25.3

注:A,表土层,B,黏化层,C,母质层

试验方法参照水利部土工试验操作规程中的《湿化实验》<sup>[1,14]</sup>。试验装置包括崩解缸(46 cm × 16 cm × 70 cm)、崩解架(10 cm × 10 cm × 10 cm)、网板(10 cm × 10 cm;孔径为 1 cm<sup>2</sup>)、带刻度的浮筒(直径 6.5 cm;高 25 cm;最小刻度为 1 mm)和边长为 5 cm 的立方体装土容器。

## 1.2 试验方法

土样容重设定为 1.20、1.25、1.30、1.35 和 1.40 g cm<sup>-3</sup>五个标准,辽西褐土在自然状态下 A 层的平均容重为 1.30 g cm<sup>-3</sup>,对于农田土壤而言,翻耕程度不同,容重值有所变化,故取均值为 1.30 g cm<sup>-3</sup>的五个容重水平。原状土壤过 5 mm 筛后自然风干,将风干后的土样根据不同的容重填入边长 5 cm 立方体铁盒中,制作出不同容重土壤试样。然后将试样 5 个一组分别按 80、130、180、230、280 g kg<sup>-1</sup>的含水率配制,模拟土壤的不同湿润程度,农田土壤含水率为 80 g kg<sup>-1</sup>时表现为极度干旱缺水,依次类推。用塑料薄膜密封放置 48 h,使水分均匀。

试验于 2011 年 6 月进行。崩解水体温度恒为

15℃~17℃,温度对试验结果的影响可忽略不计。轻轻将试样外围的立方体容器打开,将试样放置在崩解架的网板上,放有试样的崩解架挂在带刻度的浮筒上,将试样轻轻放入盛水崩解缸中,开动秒表并记录浮筒刻度,分别在 10、30、50、70、90、110、130 s 记录浮筒刻度。每次试验进行 3 次重复测定。

根据浮力的物理计算公式整理得土壤崩解速

率的计算式: $B = \frac{S}{Y} \frac{L_0 - L_t}{t}$ ,式中, $B$  为崩解速率,表示单位时间内崩解掉的土样体积(cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>); $S$  为浮筒底面积,33.18 cm<sup>2</sup>; $Y$  为各土样的容重(g cm<sup>-3</sup>); $L_0$ 、 $L_t$  分别为崩解开始和结束时的浮筒刻度初始值和末读数(cm); $t$  为崩解时间(min)。

# 2 结果与分析

## 2.1 容重与含水率对土壤崩解速率的影响

根据崩解速率公式对数据进行处理,得出试验土样的崩解速率表(表 2)。

表 2 不同容重与不同含水率条件下平均崩解速率表(cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>)

含水率(g kg <sup>-1</sup> )	容重(g cm <sup>-3</sup> )				
	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40
80	13.83 ± 2.40	7.96 ± 7.03	14.04 ± 2.55	9.83 ± 3.69	17.97 ± 0.91
130	20.28 ± 3.19	19.91 ± 2.30	25.52 ± 0.00	20.48 ± 1.88	21.77 ± 6.08
180	20.74 ± 2.77	19.91 ± 2.30	25.52 ± 1.28	27.65 ± 1.06	20.70 ± 2.06
230	28.11 ± 4.00	27.87 ± 3.51	21.69 ± 0.00	24.17 ± 1.88	23.70 ± 5.17
280	51.62 ± 1.60	49.55 ± 1.53	48.49 ± 13.26	53.25 ± 2.84	41.78 ± 3.55

利用 SPSS 系统对试验数据进行方差分析,分析结果显示,含水率与容重的 F 值为 2.464,二者交互效应不显著,即认为不同含水率条件下崩解速率的差异在不同容重的情况下是相同的;含水率的 F 值为 165.734,各含水率对土样崩解速率的影响差异认为是明显的,含水率越低崩解速率越小;容重的 F 值为 0.769,各容重对土样崩解速率的影响差异性不显著。

## 2.2 不同含水率土样的崩解动态

由于土壤含水率直接影响土壤颗粒的连结状况,因此土壤初始含水率是影响其发生崩解的重要因素之一。颗粒间连结的本质是原子和离子之间的相互作用<sup>[10]</sup>。初始含水率影响土壤崩解的本质即为土壤中原子与离子之间的相互作用力的强弱;在崩解过程中,随着水的浸润,崩解的本质表现为水分子进入土壤颗粒内将气体驱逐产生的作用力、土壤细颗粒膨胀产生的作用力和非水稳性胶结键断裂导致的土壤颗粒间原子与离子之间相互作用力的减弱或消失。运用 SPSS 软件对崩解速率与土壤初始含水率进行相关性分析,分析结果显示:在水平  $\alpha = 0.01$  下,崩解速率与含水率的相关性系数为 0.850,崩解速率与含水率的 Pearson 相关性为 0.834,即在土样容重相同的条件下,土壤崩解速率与初始含水率在 0.01 水平下的相关性显著。

在容重相同的条件下,以土样在水中静置时间为横坐标,以浮筒的刻度变化值为纵坐标,得出五组不同含水率土样崩解速率变化图。

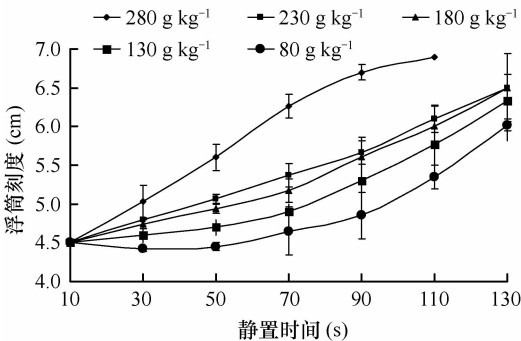


图1 容重  $1.40 \text{ g cm}^{-3}$  不同含水率土样的崩解速率变化

如图1所示,在容重相同条件下,土样崩解速率随含水率增加而加快,不同含水率土样其崩解机制有所不同。试验过程中可以看到:初始含水率为  $80 \text{ g kg}^{-1}$  的土样放入水中后,吸水导致质量增加,在重力作用下,浮筒的刻度减小;随着静置时间的增加,土样继续进行吸水,同时也伴随着水分进入

土壤内部后对内部气体产生的驱逐力,即发生微观气体爆破现象,其宏观表现为土样周围布满逸出的小气泡,还伴随着土壤细颗粒在水的浸润作用下发生膨胀的过程,这个阶段中土样吸水增加的质量与其崩解掉的细颗粒质量基本相抵消,所以浮筒刻度表现为没有明显变化;当土样内水分含量达到饱和的时候,停止吸水,土壤内部的非水稳性胶结键在水分浸润作用下削弱或断裂,土样进入大量崩解发生的阶段,浮筒刻度增加,土样崩解速率变快。初始含水率为  $130 \text{ g kg}^{-1}$  和  $180 \text{ g kg}^{-1}$  的土样,吸水增重的强度明显较含水率为  $80 \text{ g kg}^{-1}$  的土样弱,浮筒刻度没有减小的过程;其吸水所增加的质量与土样表面崩解掉的细颗粒质量相抵消,在水中静置的前 30 s 浮筒刻度没有明显变化。初始含水率为  $230 \text{ g kg}^{-1}$  和  $280 \text{ g kg}^{-1}$  的土样也有吸水增重的过程,由于本身含水率比较高,孔隙内气体所占体积相对减少,吸水量不大,且表面细颗粒的崩解量大于吸水增加的质量,浮筒刻度没有减小和持平的过程,直接进入浮筒刻度增加的阶段,直至水的浸润过程完成后,土样进入稳定快速崩解的阶段。

由上述分析可知,土样崩解过程分为:土样水分饱和之前,土样吸水使自身重量增加;水分进入土壤内部后对内部气体产生的驱逐力,和土壤细颗粒在水的浸润作用下发生膨胀的过程导致土样局部崩解的发生;土样水分饱和之后土样内部非水稳性胶结键在水分浸润下削弱和断裂。对于含水率较低的土样,其吸水增重的持续时间相对较长,表现为浮筒刻度减小或不变的持续时间较长;对于含水率较高的土样,由于其基质吸力较小,吸水增重的持续时间较短,表现为浮筒刻度减小或不变的持续时间较短或没有。图1中含水率为  $230 \text{ g kg}^{-1}$  的土样和含水率为  $180 \text{ g kg}^{-1}$  的土样的崩解速率曲线发生交叉,在理想状态下应该是土样崩解速率随着含水率的降低呈现递减的趋势,实际试验过程不同于理想状态,试验过程中会有不可控的微小因素影响试验结果,出现这样的结果符合客观条件。

## 2.3 不同容重土样的崩解动态

容重是反映土壤紧实度和土壤孔隙度的重要指标,是土壤紧实程度及气相比率的间接反映。土壤由固、液、气三相组成,土壤的容重越大,土壤的孔隙相对越少,在土壤浸水过程中,由水分对土壤颗粒非毛管孔隙内气体驱逐产生的作用力将会减小;另外由于土壤孔隙所占比例小,容重较大土壤的细颗粒之间接触更充分,在容重增加的过程中,

也促进了颗粒间胶结的形成。运用 SPSS 软件对崩解速率与土壤容重进行了相关性分析。分析结果显示:在水平  $\alpha = 0.01$  下,崩解速率与容重的相关性系数为 0.040,崩解速率与容重的 Pearson 相关性为  $-0.003$ ,即在土样含水率不变的条件下,土壤崩解速率与容重的相关性不显著。

图 2 和图 3 分别为在初始含水率为  $280 \text{ g kg}^{-1}$  和  $80 \text{ g kg}^{-1}$  的条件下,不同容重土样崩解速率变化图。

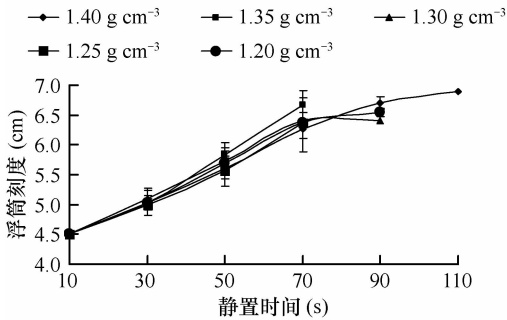


图 2 含水率  $280 \text{ g kg}^{-1}$  不同容重土样的崩解速率变化

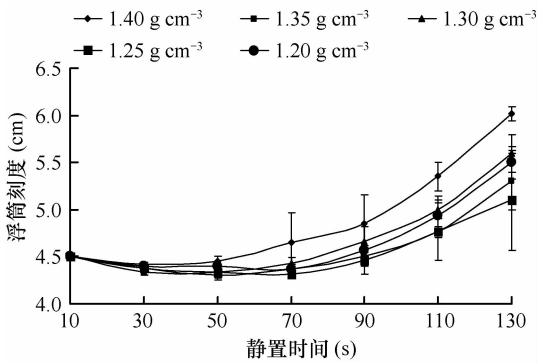


图 3 含水率  $80 \text{ g kg}^{-1}$  不同容重土样的崩解速率变化

从图 2 和图 3 中可以看出,初始含水率相同而容重不同土样的崩解速率并未表现出较大差异,由于崩解速率随容重的变化并不显著,本文只给出初始含水率为  $80 \text{ g kg}^{-1}$  和  $280 \text{ g kg}^{-1}$  两个极端含水率土样的崩解速率变化图。图 2 显示,含水率为  $280 \text{ g kg}^{-1}$  的土样由于含水率较高,其吸水增重的时间较短,直接进入受水分浸润作用稳定快速解体、塌落的阶段。图 3 显示,含水率为  $80 \text{ g kg}^{-1}$  的不同容重土样,在  $10 \text{ s}$  至  $30 \text{ s}$  之间,土样进行大量的吸收水分,吸水增加的重量大于土样局部崩解掉的重量,表现为浮筒刻度减小;在  $30 \text{ s}$  至  $80 \text{ s}$  之间,土样吸水增加的重量与其局部崩解掉的重量相抵消,表现为浮筒刻度没有明显变化;在  $80 \text{ s}$  之后,

土样吸水增重的过程逐渐减弱至终止,在水分进入土壤内部后对内部气体产生的驱逐力和土壤细颗粒在水的浸润作用下发生膨胀作用下,表现为浮筒刻度增加;在土样水分完全饱和以后,水分的浸润使土样进入稳定快速解体、塌落的阶段。从上述分析可知,不同容重对土样崩解速率没有明显的影响作用。用于实验的土样容重值须达到一定的界定值以上,才能保证实验中的土样形成“土块”的整体性,否则成散装形式的土样不能够进行崩解实验研究,所以实验中的土样在浸入水中以后,吸水增重和土块表面颗粒崩解是同时进行的。

### 3 结 论

土样崩解速率与含水率的相关性显著,与容重的相关性不显著,初始含水率与容重的交互效应不显著。土样崩解速率随初始含水率的增大而增大,初始含水率越小的土样吸水增重的时间越长。由含水率导致的崩解速率的差异主要体现在初始含水率较低的土样其吸水增重的持续时间较长,延后了土样进入稳定快速解体、塌落阶段的时间。

在农田灌溉或降雨过程中,在水的浸润作用下,土壤颗粒间原子与离子之间的相互作用力减弱或消失,土壤发生崩解,大部分胶结键的断裂或削弱使土壤颗粒间的胶结力大大减小,土壤扩散层迅速增厚,在降雨产生的径流或灌溉水流冲刷力的作用下,极易产生土壤侵蚀;土壤崩解产生的碎屑和小颗粒容易堵塞土壤非毛管孔隙,使水分难以入渗,发生超渗产流,导致径流量增加,促进土壤侵蚀发生,所以土壤崩解为进一步产生的灌溉侵蚀或降雨侵蚀提供了物质基础和前提条件。

### 参 考 文 献

- [1] 邹翔,张平仓,陈杰. 小江流域土壤抗崩性实验研究. 水土保持研究, 2008, 15(1): 244—246
- [2] 章明奎. 预处理对高铁土壤颗粒分析结果的影响. 浙江农业大学学报: 农业与生命科学版, 1996, 22(1): 94—97
- [3] 郑晓萍, 卢升高. 富铁土团聚体稳定性的表征及其物理学机制. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(3): 305—310
- [4] 闫峰陵, 史志华, 蔡崇法, 等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响. 土壤学报, 2007, 44(4): 577—583
- [5] 张孝存, 郑粉莉. 基于 Le Bissonnais 法的东北黑土区土壤团聚体稳定性研究. 陕西师范大学学报, 2009, 37(5): 82—86
- [6] Ruiz-Vera V M, Wu L S. Influence of sodicity, clay mineralogy, prewetting rate, and their interaction on aggregate stability. Soil

- Science Society of America Journal, 2006, 70:1 825—1 833
- [ 7 ] Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68:1 992—1 999
- [ 8 ] Kemper W D, Rosenau R C, Dexter A R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(4):860—866
- [ 9 ] 李喜安,黄润秋,彭建兵.黄土崩解性试验研究.岩石力学与工程学报,2009,28(增1):3 207—3 213
- [ 10 ] Ellen R G, Pinchas F, Guy J L. Soil stabilization in semiarid and arid land agriculture. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 2:190—205
- [ 11 ] 蒋定生,李新华,范兴科,等.黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究.水土保持通报,1995,15(3):20—27
- [ 12 ] 窦森,李凯,关松.土壤团聚体中有机质研究进展.土壤学报,2011,48(2):412—418
- [ 13 ] Aldo F, Jerzy L, Marcin T, et al. Stability and sorptivity of soil aggregates in grassed and cultivated sloping vineyards. Polosh Journal of Soil Science, 2007, 1:1—8
- [ 14 ] 唐军,余沛,魏厚振等.贵州玄武岩残积土崩解性试验研究.工程地质学报,2011,19(5):778—782
- [ 15 ] 谭镡益.广西覆盖型岩溶区土层崩解机理研究.工程地质学报,2001,9(3):272—276
- [ 16 ] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟.前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响.土壤学报,2009,46(2):241—247

(责任编辑:卢 萍)