

# 一种可用于评估土壤团聚体稳定性的超声能量法

谢志强<sup>1</sup>, 许建林<sup>1</sup>, 朱兆龙<sup>1,2</sup>, 安韶山<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 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)

**摘要:**团聚体稳定性是土壤质量的重要指标。鉴于当前团聚体稳定性难以定量的研究现状,本文提出一个可定量评估土壤团聚体稳定性的超声能量法,并与传统 Yoder 湿筛法对比分析了稳定性土样(浙江潮土、重庆黄壤土、江西红壤)和弱稳定性土样(河北壤土和黑龙江暗棕壤)五种典型土壤的 5~3 mm 粒级团聚体的平均重量直径(MWD)和团聚体粒径分布(ASD)。结果表明:(1)测试土样的稳定性为潮土>红壤>黄壤土>暗棕壤>壤土;(2)超声能量法分散强度大,分散效率高,更适用于稳定性土样的评估,对于弱稳定性土样的评估则不如传统 Yoder 湿筛法。因此,评估土壤团聚体稳定性时可以选择合适的测量方法以提高分辨精度,即强稳定性土壤对比分析应选用超声能量法,而弱稳定性土壤对比分析则可以用 Yoder 湿筛法。

**关键词:**土壤团聚体; 团聚体稳定性; 超声能量; Yoder 湿筛法

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0019-04

## Application of Ultrasonic Energy for Assessing Aggregate Stability

XIE Zhiqiang<sup>1</sup>, XU Jianlin<sup>1</sup>, ZHU Zhaolong<sup>1,2</sup>, AN Shaoshan<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Aggregate stability is an important index of soil quality, but hard to be quantified. Here an ultrasonic energy method was developed to quantify soil aggregate stability, and its practicability was tested by comparing with Yoder method in terms of mean weight diameter (MWD) and aggregate size distribution (ASD) of two groups of soils, 3 stable soils (Fluvo-aquic soil from Zhejiang Province, Yellow loam from Chongqing City, Red soil from Jiangxi) and 2 weak soils (Loam from Hebei Province, Dark brown soil from Shangdong Province). The results show that the stability indicated by MWD decreases in the order: Fluvo-aquic soil>Red soil>Yellow loam>Dark Brown soil>Loam; the ultrasonic dispersion can break soil aggregate efficiently due to its strong dispersing power, and thus this method prefers to strong soil than Yoder method, but this method seems not to be suitable to assess the aggregate stability of weak soil compared with Yoder method. Therefore, a proper method assessing soil aggregate stability can be chosen through the rule: ultrasonic energy method for stable soil, Yoder method for weak soil.

**Keywords:** soil aggregate; aggregate stability; ultrasonic energy; Yoder method

土壤团聚体是指一组粘结在一起的多个基本土壤颗粒,是土壤结构的基本单位<sup>[1]</sup>。团聚体稳定性是土壤结构的重要属性,也是土壤质量的重要指标,它反映了土壤团聚体对于外来破坏性作用力的抑制能力,影响着土壤入渗和侵蚀等物理性质<sup>[2]</sup>。评估土壤团聚体稳定性的指标很多,当前最为常用的指标为平均重量直径(MWD)<sup>[3-4]</sup>,评估方法上则主要有湿筛法、水滴法、人工降雨模拟法、Le Bissonnais 法等<sup>[5-8]</sup>。然而,这些评估方法在样品处理、作用力和结

果的表示等方面存在着诸多差异<sup>[9]</sup>,而且都没有从能量角度量化团聚体的稳定性。近来有学者提出使用超声激励法分散土壤以定量评估土壤团聚体的稳定性。朱兆龙等在 North<sup>[10]</sup>和 Raine & So<sup>[11]</sup>评估团聚体稳定性方法基础上,将功率计法和热计量法有机结合,提出一种测量土壤分散能量的测量方法和技术<sup>[12]</sup>,并研制了一个简易的土壤团聚体稳定性评估系统<sup>[13]</sup>;评测了澳大利亚 Vertisol 土样和 Ferrasol 土样的团聚体粘结合能,量化其稳定性<sup>[14-15]</sup>。然而,该方法对试验控制条件

要求比较高<sup>[16]</sup>,因而限制了应用。

综上所述可知,现有团聚体稳定性的评估方法在定量评估上仍然存在许多局限性和技术瓶颈。鉴于此,本文在朱兆龙等<sup>[12]</sup>的超声方法基础上进行改进,提出一个可用于评估土壤团聚体稳定性的超声能量法,并与传统 Yoder 湿筛法对比测试五种典型土样的稳定性,明确其特点和适用范围。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2014 年 11 月在浙江大云山、重庆歌乐山、江西于都县、河北行唐县和黑龙江帽儿山选择环境条件及生产管理水平基本一致的地块进行采样,采集表层原状土(0—20 cm),重复三次,基本采集信息如表 1 所示。将所采土壤样品风干,去除根系、枯落物等杂物后,干筛分离出原状土中的 5~3 mm 团聚体,作为团聚体稳定性对照测试样本。

表 1 试验土壤的基本情况

| 土样标号 | 采集地点   | 土壤类型 | 地理坐标              |
|------|--------|------|-------------------|
| FAS  | 浙江大云山  | 潮土   | 119°29'E, 29°12'N |
| YLS  | 重庆歌乐山  | 黄壤土  | 106°25'E, 29°33'N |
| RS   | 江西于都县  | 红壤   | 115°34'E, 26°7'N  |
| LS   | 河北行唐县  | 壤土   | 114°24'E, 38°41'N |
| DBS  | 黑龙江帽儿山 | 暗棕壤  | 127°31'E, 45°18'N |

### 1.2 土壤团聚体组成和稳定性评估

1.2.1 试验设备 超声分散系统如图 1 所示,主要包括超声仪器、超声振子、双层中空试验容器、数据采集器、温度探头、冷却循环泵、计算机等。探针型超声仪器 UP100H(德国 Hielscher 公司,超声功率可调且电声转化效率高达 90%)通过其配套的超声振子 MS10(末端直径为 10 mm,声功率密度为 90 W/cm<sup>2</sup>)为双层中空试验容器(内壁上端直径约 60 mm,下端约 30 mm,深约 80 mm,容积大约为 75 ml,容器口壁厚约 3 mm,容器口边沿外延加厚 2 mm,直径约 65 mm,空腔容积约为 160 ml)内的土水溶液提供超声能量,以分散土壤团聚体;超声能量则由数据采集器实时监测;同时,数据采集器通过温度探头(Pt1000A,德国贺利氏公司,精密度为 0.002℃)同步监测土水溶液的温度,采样频率为 1 Hz,其测量结果通过串口通信上传给计算机实现显示、存储和运算等功能;此外,冷却循环泵提供冷却循环水,其流量可调,由流量计监测。冷却循环水通过双层试验容器中间密封层调节试验容器内壁土水溶液的温度,控制超声分散试验的溶液温度条件。

1.2.2 测量原理 通过评估一定分散能量作用下团

聚体的分散程度,可以有效评估团聚体的稳定性,因此,团聚体稳定性评估包括分散能量的确定和团聚体分散度两部分,前者由超声分散系统测定,后者可以用常规湿筛法测定的团聚体组成和平均重量直径 MWD。

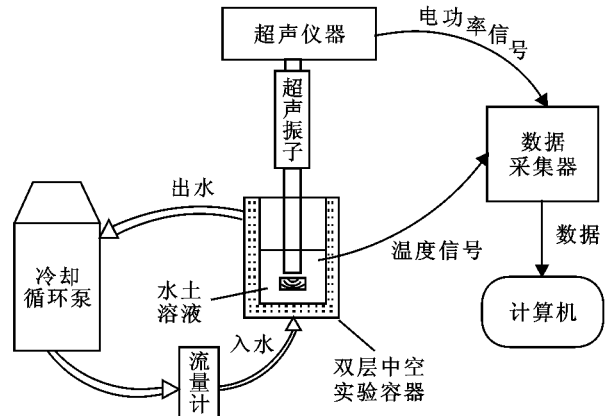


图 1 超声分散系统原理框图

超声仪器正常工作时,通过其内超声换能器将电能转换为机械能,并由超声振子输出超声波,进而为土水溶液分散土壤团聚体提供超声能量<sup>[12]</sup>。根据能量转化守恒定律,超声振子输出的超声能量  $P_A$  可以表示为:

$$P_A = P - P_D \quad (1)$$

式中:  $P$  表示超声仪器输入功率;  $P_D$  表示超声仪器消耗功率,对于土水溶液轻负载而言,它可以近似等于空载时的消耗功率  $P_0$ 。

因此,在超声分散时间内超声振子输出给土水溶液的超声能量  $W$  为

$$W = \int_0^t P_A dt = \int_0^t (P - P_0) dt \quad (2)$$

当超声振子输出超声波激励土水溶液时,将分散土壤团聚体。通过对比在统一超声能量  $W$  作用下土壤团聚体的平均重量直径 MWD,可以有效评估土壤团聚体的稳定性。MWD 的计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3)$$

式中:  $x_i$  为每一粒级团聚体的平均直径(mm);  $w_i$  为每一粒级团聚体的重量百分含量。

同一粒径范围内土壤团聚体,在超声能量  $W$  作用后, MWD 越大,其稳定性越强。

1.2.3 测量方法 于 2015 年 3 月至 6 月采用超声能量法测量土壤团聚体稳定性。首先设置超声仪器 UP100 H 为连续工作模式(Cycle=1),超声振子振幅档 Am 为 0.2,并由超声系统测定其输出超声功率  $P_A$  约为 20 W。然后取 5~3 mm 粒级团聚体  $3 \pm 0.01$  g,放入试验容器中,将量取好的  $30 \pm 0.01$  g 去离子水沿试验容器内壁轻轻倒入,浸润 5 min,使土

壤颗粒间空气充分排出。通过冷却循环泵控制,在满足统一起始温度条件(40 s 内溶液温度为  $20\pm0.1^{\circ}\text{C}$  且极差小于  $0.2^{\circ}\text{C}$ )后开始超声试验,分散时间为 10 s,超声能量约为 200 J。分散后的土水溶液移至套筛(孔径 2,1,0.5 及 0.25 mm)进行湿筛,收集各级土壤团聚体,并进行烘干称重,计算出团聚体的组成和平均重量直径 MWD。

同期采用 Yoder 湿筛法<sup>[5]</sup>进行团聚体稳定性评估的对照试验,取同粒级的相同风干土样  $50\pm0.01\text{ g}$ ,放进孔径依次为 2,1,0.5,0.25 mm 的套筛,应用 FT-3 型电动固粒分析仪(南京土壤仪器厂)使套筛在水中以 30 次/min 速度振动 30 次,收集各级团聚体,烘干称重,计算团聚体的组成和稳定性。

2 结果与分析

图 2 给出了超声能量法和 Yoder 湿筛法下的土壤平均重量直径 MWD。由图 2A 知,在超声能量 200 J 作用后,FAS,YS,RS 的 MWD 都保持在 0.9 mm 以上,稳定性好,而且  $\text{FAS}>\text{RS}>\text{YLS}$ ;而 DBS,LS 的 MWD 都在 0.25 mm 左右,差异小,稳定性相近。由图 2B 知,在 Yoder 湿筛法下,土样稳定性分布为  $\text{FAS}>\text{RS}>\text{YLS}>\text{DBS}>\text{LS}$ ,其中 FAS,YS,RS 的 MWD 都在 1.7 mm 左右,而 DBS,LS 的 MWD 为 0.8 mm 左右,且稳定性为  $\text{DBS}>\text{LS}$ 。对比两种测试结果

可知,超声能量法分散功率(20 W)高,土样整体 MWD 相对较低,但是对于稳定性土样(FAS,YLS 和 RS),其分辨力高,为 0.23 mm(标准差),大于 Yoder 湿筛法的 0.10 mm;而对于弱稳定性土样(DBS 和 LS),Yoder 湿筛法的分辨力较高,达到 0.19 mm(标准差),而超声能量法则难以分辨出 DBS 和 LS 的差异。

从粒径分布角度来看(图 3),对于稳定性土样(FAS,YS 和 RS),在超声能量法下,其粒径分布主要集中在  $>2\text{ mm}$  和  $<0.25\text{ mm}$  上,其中  $>2\text{ mm}$  占 36%~65%, $<0.25\text{ mm}$  占 24%~43%(图 3A),而 Yoder 湿筛法则集中在  $>2\text{ mm}$  上,占 71%以上(图 3B);而对于弱稳定性土样(DBS 和 LS),超声能量法下的粒径分布完全集中于  $<0.25\text{ mm}$  上,占 95%以上,而 Yoder 湿筛法的粒径分布相对均匀,各段粒径分布相差不是很大。可见,尽管超声能量法仅用 10 s,但对土样的分散程度要远大于振动 1 min 的 Yoder 湿筛法。这种差异与两者测量原理有关。超声能量法是利用超声空化效应中空泡溃灭的能量释放期产生强大冲击波和高速射流分散土壤,分散强度大,分散效果显著,且分散时间短<sup>[2,17]</sup>;而 Yoder 湿筛法则主要利用土样湿润过程中的崩解、差异膨胀和物理—化学分散作用以及湿筛过程中的筛分作用力来分散土样,由于振动幅度小、速度慢,因而分散强度小,分散效果差,且时间长<sup>[18-19]</sup>。

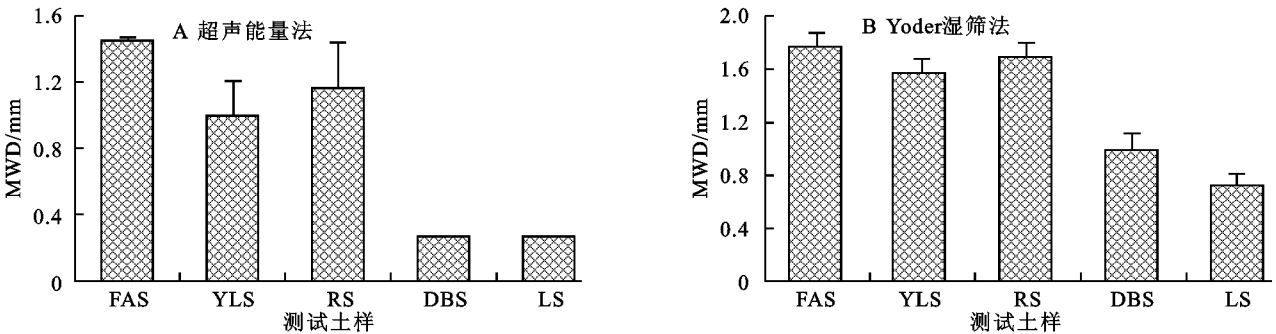


图 2 超声能量法和 Yoder 湿筛法下 MWD

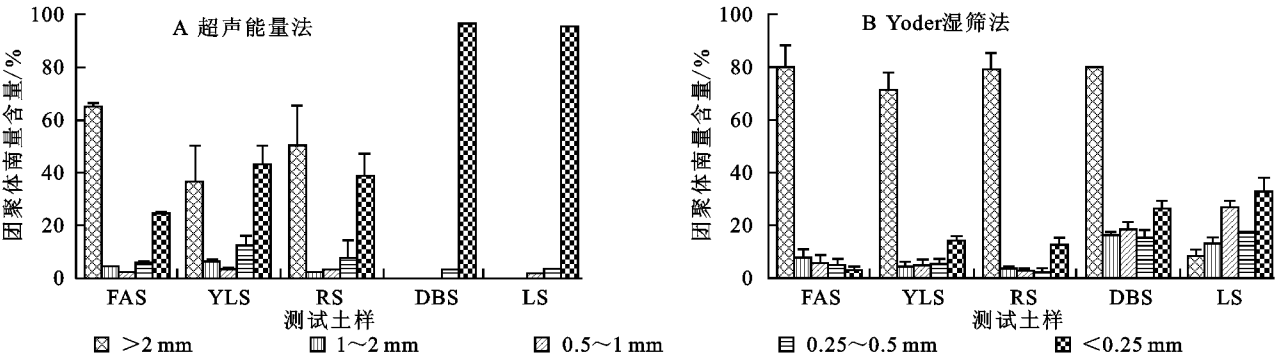


图 3 超声能量法和 Yoder 湿筛法下的土壤团聚体粒径分布

综上分析知,对于稳定性土样,采用超声能量法评估土壤团聚体稳定性,其分辨力远高于 Yoder 湿筛法,而对于弱稳定性土样,超声能量法评估能力相对较弱。

因此,要提高土壤团聚体稳定性评估的分辨力,应选择合适的评估方法,即中、高稳定性土样选用超声能量法,而弱稳定性土样则可以选择 Yoder 湿筛法。

### 3 结 论

提出了一种评估土壤团聚体稳定性的超声能量法,并对比了 Yoder 湿筛法评估中国五种典型土壤的团聚体稳定性,研究结果表明:(1) 相比于 Yoder 湿筛法,超声能量法分散效率高,对强稳定性土壤进行评估时分辨效果好,而对于弱稳定性土壤则分辨效果差;(2) 五种典型土壤的团聚体稳定性测试结果为:浙江潮土>江西红壤>重庆黄壤土>>东北暗棕壤>河北壤土;(3) 评估土壤团聚体稳定性时应选择合适的分散方法以提高分辨精度,即强稳定性土壤对比分析时应选用超声能量法,而弱稳定性土壤对比分析,则可以用 Yoder 湿筛法。

#### 参考文献:

- [1] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163.
- [2] Rawlins, B G, Wragg J, Lark R M. Application of a novel method for soil aggregate stability measurement by laser granulometry with sonication [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64: 92-103.
- [3] 祁迎春,王益权,刘军,等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340-347.
- [4] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 489-498.
- [5] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Journal of American Society of Agronomy*, 1936, 28(5): 165-169.
- [6] 张耀方,赵世伟,李晓晓,等. 利用方式对灌淤土团聚体稳定性及有机碳官能团特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 169-174.
- [7] 姜芑,严力蛟,董有浦,等. 人工降雨条件下南方坡耕地水土流失特征[J]. *陕西师范大学学报:自然科学版*, 2013(04): 96-99.
- [8] 刘雷,安韶山,黄华伟. 应用 Le Bissonais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6670-6680.
- [9] Amézketa E. Soil Aggregate Stability: A Review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*. 1999, 14: 83-151.
- [10] North P F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound [J]. *Journal of Soil Science*, 1976, 27(4): 451-459.
- [11] Raine S R, So H B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy [J]. *Journal of Soil Science*, 1993, 44(2): 249-259.
- [12] Zhu Z, Minasny B, Field D J. Adapting technology for measuring soil aggregate dispersive energy using ultrasonic dispersion [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(2): 258-264.
- [13] 朱兆龙,何东健,李敏通. 一种土壤团聚体稳定性评估系统[J]. *中国科学:信息科学*, 2010, 40(增刊): 152-159.
- [14] Zhu Z L, Minasny B, Field D J. Measurement of aggregate bond energy using ultrasonic dispersion[J]. *Eur. J. Soil Sci.*, 2009, 60: 695-705.
- [15] Zhu Z L, Field D J, Minasny B. Measuring and modelling the actual energy involved in aggregate breakdown [J]. *Catena*, 2010, 82(1): 53-60.
- [16] Schomakers J, Mentler A, Steurer T, et al. Characterization of soil aggregate stability using low intensity ultrasonic vibrations [J]. *International Agrophysics*, 2011, 25: 165-172.
- [17] Schomakers J, Zehetner F, Mentler A, et al. Study of soil aggregate breakdown dynamics under low dispersive ultrasonic energies with sedimentation and X-ray attenuation [J]. *International Agrophysics*, 2015, 29(4): 501-508.
- [18] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 106-113.
- [19] 郭军玲,王虹艳,卢升高. 亚热带土壤团聚体测定方法的比较研究[J]. *土壤通报*, 2010(3): 542-546.

(上接第 18 页)

- [7] 徐大兵,邓建强,上官力,等. 不同覆盖措施对鄂西土地整治区水土流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 53-56.
- [8] 陈小强,范茂攀,王自林,等. 不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 49-52.
- [9] 冯秀,查轩,黄少燕. 人工模拟降雨条件下花岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 19-23.
- [10] 耿晓东,郑粉莉,刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010, 12(6): 48-53.
- [11] 余长洪,李就好,陈凯,等. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 7-10.
- [12] 黄少燕. 红壤侵蚀退化地不同生态恢复措施对土壤养分影响研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 38-42.
- [13] 孙佳佳,于东升,史学正,等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1060-1066.
- [14] 刘纪根,张昕川,李力,等. 紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 16-27.
- [15] 查轩,黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土地退化过程的影响[J]. *山地学报*, 2001, 19(2): 109-114.