

# 不同水稳性团聚体测定方法的对比研究

赵玉明, 高晓飞, 刘瑛娜, 姜洪涛

(北京师范大学 地表过程与国家资源重点实验室 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:** 水稳性团聚体是研究土壤肥力、质量及侵蚀强度的重要参考指标。研究目的不同,测定其含量的方法常常也不同。采用非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空慢速气溶胶浸润法 3 种方法测定了黑土、褐土、黄土、红壤、紫色土共 5 种土壤的水稳性团聚体含量。通过配对样本  $t$  检验分析了各种方法的稳定性及不同方法的差异性。分析结果表明,非真空快速浸润法测定的各级团聚体含量和总含量均最小,非真空慢速气溶胶浸润法测定的各级团聚体含量和总含量均最大,非真空快速滴水浸润法则介于两者之间。分析了不同方法对团聚体的破坏机制及其适用范围,指出非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空快速气溶胶浸润法对团聚体的破坏性呈减小趋势,它们分别适用于暴雨、中雨和小雨等情况。

**关键词:** 水稳性团聚体; 测定方法; 非真空快速浸润; 非真空快速滴水浸润; 非真空慢速气溶胶浸润

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)02-0138-06

中图分类号: S151.9, P934

## Comparison of Different Pre-wetting Strategies in Wet Aggregate Stability Determination

ZHAO Yu-ming, GAO Xiao-fei, LIU Ying-na, JIANG Hong-tao

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,  
College of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Accurate determination of water-stable aggregates is of great significance for soil fertility, soil quality and soil erosion. Followed the three popular pre-wetting methods (no vacuum fast pre-wetting, no vacuum fast dripping pre-wetting and no vacuum slow vapor pre-wetting), the contents of water-stable aggregates of 5 soil types (black soil, cinnamon soil, loess soil, purple soil and red soil) were measured. Based on paired-sample  $t$  tests, the results showed that the measured contents were fairly stable with the same method but varied substantially with different methods. The method of no vacuum fast pre-wetting generated the lowest values, no vacuum fast dripping pre-wetting the moderate, and no vacuum slow vapor pre-wetting the highest, which might be suitable respectively for the conditions of heavy rain storms, moderate rain and gentle rain.

**Keywords:** water-stable aggregate; determination method; no vacuum fast pre-wetting; no vacuum fast dripping pre-wetting; no vacuum slow vapor pre-wetting

团聚体是指一组黏结在一起的,具有比周围其它土壤颗粒更强黏结作用的基本土壤颗粒,是组成土壤结构的基本单元,起着保证和协调土壤中的水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤疏松熟化等作用<sup>[1-4]</sup>。团聚体按稳定性可分为稳定性团聚体和非稳定性团聚体两类,按粒径大小以 0.25 mm 为界可分为大团聚体和微团聚体两类<sup>[5]</sup>。其中,大团聚体对土地利用和管理的变化最为敏感,也被称为稳

定性团聚体<sup>[2,6-8]</sup>,而具有抗水力分散的稳定性团聚体即为水稳性团聚体。水稳性团聚体对土壤有机碳含量<sup>[9-10]</sup>、肥力大小和质量<sup>[11-13]</sup>、侵蚀严重程度<sup>[14-16]</sup>等都有具有重要影响,因此准确地测定其含量具有非常重要的意义。

团聚体稳定性的测定方法最早采用滴水法 (water-drop method)<sup>[17-21]</sup>,此指标突出了雨滴打击的作用,但不能反映团聚体遇水的其它破坏机制。针

收稿日期:2011-09-09

修回日期:2012-04-27

资助项目:国家基础科学(973)研究发展计划项目“多尺度土壤侵蚀预报模型”(2007CB407204);中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介:赵玉明(1983—),男(汉族),河南省济源市人,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zhaoyuming02@126.com。

通信作者:高晓飞(1979—),男(汉族),山东省莱阳市人,实验师,主要研究方向为土壤侵蚀与作物生长模型。E-mail:gaoxiaofei@bnu.edu.cn。

对上述问题, Yoder<sup>[22]</sup>提出了非真空快速浸润的水稳性团聚体测定方法(约得尔湿筛法), 并经过 Kemper 一系列实验后的改进, 先后形成了真空快速浸润法<sup>[1, 23]</sup>和非真空慢速气溶胶浸润法<sup>[2]</sup>。此后, Dickson 又提出了缓慢灯芯式浸润法<sup>[24]</sup>, 并对比分析了非真空和真空快速浸润法、非真空和真空缓慢灯芯式浸润法 4 种方法, 指出快速浸润法测定的水稳性团聚体含量明显低于慢速浸润法的测定值; 在快速浸润下, 非真空条件下的测定值要明显低于真空条件下的测定值; 在慢速浸润下, 二者则无明显差别。Le Bissonnais<sup>[25]</sup>在分析团聚体遇水后的破坏机制基础上, 推荐了快速湿润、湿润后搅动和慢速湿润 3 种相似的测定方法。美国土壤学会在分析上述方法的基础上, 推荐了非真空快速浸润法、真空快速浸润法、非真空慢速气溶胶浸润法和缓慢灯芯式浸润法 4 种方法, 并认为上述不同的测定方法测定的重点不同, 应根据不同的分析目的选择合适的测定方法<sup>[26]</sup>。

国内对水稳性团聚体测定方法的研究相对较少, 王秀颖等<sup>[27]</sup>从测定的目的和意义、团聚体的破坏机制以及团聚体的分析方法等方面对水稳性团聚体的测定进行了综述研究; 郭伟等<sup>[28]</sup>、史志华等<sup>[29]</sup>分别采用快速湿润和预湿后振荡两种方法研究了红壤表土的水稳性团聚体含量; 张孝存等<sup>[30]</sup>、郭曼等<sup>[31]</sup>分别采用快速湿润、慢速湿润和预湿后扰动 3 种方法先后研究了东北黑土区和黄土丘陵区土壤水稳性团聚体的含量; 苏静等<sup>[32]</sup>根据萨维诺夫湿筛法的测定结果对团聚体稳定性评价方法进行了研究; 而王风等<sup>[33]</sup>则分析了不同浸润方式、不同浸润时间和不同浸提剂等 7 种条件下东北黑土的水稳性团聚体含量。

针对国内水稳性团聚体测定方法研究较少, 研究比较分散的情况, 本研究以蒸馏水为浸提剂, 采用非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空快速气溶胶浸润法 3 种不同的水稳性团聚体浸润方法对中国的黑土、褐土、黄土、紫色土和红壤等 5 种土壤的水稳性团聚体进行了测定, 探讨不同团聚体浸润方法的稳定性、差异性、差异成因及适用条件。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集和制备

样品采集于北京师范大学房山综合实验基地的标准小区, 采集时间为 2009 年 10 月 17 日。5 种土的标准小区建于 2005 年, 填充土壤分别为黑土、褐土、黄土、紫色土和红壤, 分别来自黑龙江省嫩江县的鹤山农场、北京市延庆县的上辛庄、陕西省安塞县的大南沟、四川省盐亭县的林山乡和福建省长汀县的河

田镇的耕层土壤。取样位于标准小区中部坡面均一, 无扰动的地方, 用 20 cm×20 cm×20 cm 的取样器进行取样。取样过程中保持原来的土壤结构, 所采土块没有受到挤压。取出土样后, 用坚硬结实的铝质饭盒存放, 在干燥阴凉通风的室内风干。

土样风干后, 对较大的土块, 按照本身的结构面轻轻剥开, 使其成为直径约 10 mm 的团块。然后, 把风干土置于 5, 2, 1, 0.5 和 0.25 mm 套筛上, 保持相同的转速晃动若干次, 直到各筛子上样品均没有明显的质量变化为止, 此时对各级土粒分别称重。

### 1.2 实验设计

根据实验要求, 本研究设计了非真空快速浸润法(方法 1)、非真空快速滴水浸润法(方法 2)和非真空慢速气溶胶浸润法(方法 3)3 种浸润方法, 其中方法 1 和方法 3 为美国土壤学会和 Le Bissonnais 的推荐方法, 方法 2 则是方法 1 的一种改进。在测定过程中, 每种方法重复 3 个批次, 每批次 4 个重复样, 共测定组配土样 180 个。具体处理过程为: (1) 方法 1(非真空快速浸润法)。根据各粒级的比例, 配置成 20.0 g 的组配土样, 并均匀放置于相应的套筛上(5, 2, 1, 0.5, 0.25 mm), <0.25 mm 的不称重, 直接参与最后计算; 然后把套筛放于振荡架上, 缓慢的放入水筒中, 静置 10 min 后, 开启马达, 进行湿筛。其中, 套筛直径 10 cm, 高 5 cm, 筛分时, 套筛振幅为 4 cm, 筛分频率为 30 次/min, 筛分时间为 10 min(秒表计), 筛分用水为蒸馏水。筛分结束后, 将套筛从水中慢慢取出, 静置, 稍干, 将各粒级团聚体移至蒸发皿中, 烘干称重。实验中应注意套筛放入水筒中时要防止出现气泡; 筛分过程中桶内加水达固定高度, 使套筛最上面筛子的上缘部分始终保持在液面以下。(2) 方法 2(非真空快速滴水浸润法)。按照方法 1 将配置成的 20.0 g 组配土样均匀放置到相应的套筛上, 用滴管对每个套筛上的土样进行浸润。待全部土样都浸润后, 再按照方法 1 处理余下过程。(3) 方法 3(非真空慢速气溶胶浸润法)。按照方法 1 将配置成的 20.0 g 组配土样均匀放置到相应的套筛上, 再把 4 组套筛放到水浴锅上, 用水蒸汽进行浸润。待全部土样都浸润后, 再按照方法 1 处理余下过程。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同方法的稳定性和合理性分析

配对样本  $t$  检验能够准确地判断数据的稳定性和合理性。其适用于样本相同而方法不同或方法相同而处理批次不同而导致实验结果不同, 数据服从正态分布规律, 且数据之间的相关系数  $r$  大于 0 的情

况。本研究采用配对样本  $t$  检验对实验数据进行稳定性和合理性分析。

2.1.1 同种方法不同批次间的配对  $t$  检验 表 1 给出了同种方法不同批次之间的配对样本  $t$  检验结果,列出了在 95% 置信水平下同种方法不同批次之间的配对样本  $t$  检验结果及其对应的双尾检验概率  $P$  值。从表 1 可知,除了方法 2 中黄土的 2—3 批次的双尾检验概率  $P=0.046$ ,略小于 0.05 外,其余批次间的

双尾检验概率  $P$  值均大于 0.05,即除了方法 2 中黄土的 2—3 批次间略有差异外,同种方法不同批次间的实验数据均没有显著差别,即 3 种方法都具有较高的稳定性和良好的可重复性。引起方法 2 中黄土的 2—3 批次间的双尾检验概率  $P$  差异显著的原因可能在于实验过程中,黄土在各个粒径间的团聚体含量都很低,从而使团聚体含量的微小差异都有可能引起较大的相对误差,从而使数据的分析出现不合理的波动。

表 1 3 种测定方法内不同批次之间的配对样本  $t$  检验

| 测定方法 | 配对批次 | 黑土     |       | 褐土     |       | 黄土     |       | 紫色土    |       | 红壤     |       |
|------|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|      |      | $t$    | $P$   |
| 方法 1 | 1—2  | -0.890 | 0.385 | 0.709  | 0.487 | 0.438  | 0.666 | -0.061 | 0.952 | 0.175  | 0.863 |
|      | 1—3  | -1.674 | 0.110 | -2.042 | 0.055 | -1.000 | 0.330 | -0.420 | 0.679 | -1.280 | 0.216 |
|      | 2—3  | -2.055 | 0.054 | -1.441 | 0.166 | -0.370 | 0.716 | -0.317 | 0.755 | -0.680 | 0.504 |
| 方法 2 | 1—2  | -0.214 | 0.833 | -1.902 | 0.072 | 2.027  | 0.057 | -0.621 | 0.542 | 0.260  | 0.797 |
|      | 1—3  | -1.281 | 0.216 | 0.000  | 1.000 | 0.438  | 0.666 | -0.387 | 0.703 | 0.000  | 1.000 |
|      | 2—3  | -0.770 | 0.452 | -1.908 | 0.072 | 2.131  | 0.046 | -0.887 | 0.386 | 0.209  | 0.837 |
| 方法 3 | 1—2  | -0.345 | 0.734 | -0.470 | 0.644 | 0.218  | 0.830 | -0.551 | 0.588 | 1.506  | 0.148 |
|      | 1—3  | 1.023  | 0.319 | -1.000 | 0.891 | -1.347 | 0.194 | 0.328  | 0.747 | -0.971 | 0.742 |
|      | 2—3  | 0.513  | 0.614 | 0.139  | 0.330 | -1.105 | 0.283 | -0.263 | 0.795 | -0.137 | 0.892 |

2.1.2 不同测定方法间的配对样本  $t$  检验 表 2 为 3 种方法之间的配对样本  $t$  检验表。同表 1 相同,列出了在 95% 置信水平下不同方法间的配对样本  $t$  检验结

果及其对应的双尾检验概率  $P$  值。从表 2 可以看出,不同方法之间的双尾检验概率  $P$  都在 0.000 级别上,均小于 0.001,这说明 3 种方法间的差异极其显著。

表 2 不同方法之间的配对样本  $t$  检验

| 配对方法 | 黑土     |       | 褐土      |       | 黄土      |       | 紫色土    |       | 红壤     |       |
|------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|
|      | $t$    | $P$   | $t$     | $P$   | $t$     | $P$   | $t$    | $P$   | $t$    | $P$   |
| 1—2  | -4.108 | 0.000 | -11.573 | 0.000 | -17.154 | 0.000 | -5.952 | 0.000 | -8.242 | 0.000 |
| 1—3  | -8.848 | 0.000 | -14.292 | 0.000 | -17.754 | 0.000 | -7.498 | 0.000 | -8.711 | 0.000 |
| 2—3  | -6.387 | 0.000 | -6.645  | 0.000 | -5.536  | 0.000 | -6.151 | 0.000 | -5.891 | 0.000 |

## 2.2 不同水稳性团聚体测定方法的对比分析

水稳性团聚体的测定方法不同,测定的结果差异通常较大。表 3 为不同浸润方法测得的 5 种土壤不同粒级的团聚体含量及总含量。由表 3 可以看出,3 种方法间既有一定的相似性,又有明显的差异性。

首先,3 种方法的测定结果具有一定的相似性。各级团聚体含量在粒径  $\geq 0.5$  mm 时随着筛网孔径的减小逐渐增大,在粒径  $< 0.5$  mm 后又出现一个明显的减小。具体而言,  $\geq 5$  mm 的团聚体含量很少,3 种方法测定的含量分别为 0.14, 0.16 和 0.52g,在组配土中占的比例非常小,分别只有 0.7%, 0.8% 和 2.6%; 2~5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm 的团聚体含量基本上以几何比例增长,到 0.5~1 mm 时,3 种方法测定的团聚体含量已分别达到 1.26, 4.00 和 5.20 g,分别占组配土的 6.3%, 20% 和 26%,与  $\geq 0.5$  mm

粒径的团聚体含量相比,分别增长了 9, 25 和 10 倍; 粒径  $< 0.5$  mm 后,测定的团聚体含量有一个明显的减小,0.25~0.5 mm 的测定含量分别为 1.06, 2.12 和 2.13 g,分别占组配土的 5.3%, 10.6% 和 10.65%,分别相当于 0.5~1 mm 之间团聚体含量的 84%, 53% 和 41%。造成各级团聚体含量在 0.5~1 mm 之间出现最大值的原因可能是由于粒径较大的团聚体本身在组配土中的含量就比较小且易崩解,从而使得测定含量在粒径  $\geq 0.5$  mm 时随着筛网孔径的减小逐渐增大;而粒径达到 0.5~1 mm 之间时,其本身粒径已经较小,再崩解难度增大,且 0.25~0.5 mm 只有 0.25 mm 的孔径差距,远小于其上一级 0.5~1 mm 的 0.5 mm 孔径差距,粒级口径较窄,导致其本身所占比例较低,从而使得粒径  $< 0.5$  mm 后有一个明显的减小。

其次,3种方法的测定结果具有明显的差异性。无论是哪种土壤,3种方法之间,差异非常明显。具体而言,方法1与方法2、方法3相比,各个粒级的测定结果明显偏小,水稳性团聚体总量占组配土样的比例也明显偏小,平均只有16.07%,远低于方法2的38.18%和方法3的56.86%;除个别粒级外,方法2与方法3相比,测定结果也明显偏小。

造成方法1结果明显偏小的原因为可能是由于方法1未经过预湿润处理而直接放入湿筛中进行筛分,组配土样和水体直接接触而引起了水分的快速入渗。水分的快速入渗,一方面使土粒中原本为 $O_2$ 和 $N_2$ 所占据的部分孔隙被水分子代替,引起剩余孔隙中的 $O_2$ 和 $N_2$ 的密度发生明显变化,形成压力差,并最终引起土粒的破裂和团聚体的崩解<sup>[26,33-34]</sup>,另一方面引起组配土样中的膨胀性矿物快速膨胀,土样粒径

明显增大并在入渗锋面处形成一个剪切面,破坏了土粒内部原有的胶结情况,造成团聚体快速的崩解<sup>[2,26]</sup>。

造成方法2的测定经过明显大于方法1的原因可能是由于在用水滴进行浸润时,虽同样存在膨胀性矿物快速膨胀的情况,但方法2中组配土样在浸润阶段,土样直接与大气接触,土样内部的空气在入渗过程中可直接逸散到大气中,没有引起土粒内外的压力发生变化,不会形成压力差,不会由于压力原因而崩解。造成方法3的测定结果明显大于方法1和方法2的原因可能是由于用水蒸汽进行浸润,浸润过程缓慢,土粒内部的各种胶结力之间有足够的时间进行缓冲而不会发生破裂或只产生少量破裂,对土粒的破坏性小,引起土粒的崩解量小,同时也不会出现方法1中由于压力变化而崩解的情况。

表 3 不同团聚体测定方法测定结果分析

| 土壤  | 方法 | 各级粒径水稳性团聚体含量/g |        |        |          |             | 合计    | 占组配土样比例/% |
|-----|----|----------------|--------|--------|----------|-------------|-------|-----------|
|     |    | ≥5 mm          | 5~2 mm | 2~1 mm | 1~0.5 mm | 0.5~0.25 mm |       |           |
| 黑土  | 1  | 0.01           | 0.08   | 0.25   | 0.98     | 1.28        | 2.58  | 12.92     |
|     | 2  | 0.06           | 0.30   | 1.13   | 5.92     | 3.05        | 10.46 | 52.29     |
|     | 3  | 0.53           | 0.90   | 2.58   | 6.18     | 2.43        | 12.63 | 63.13     |
| 褐土  | 1  | 0.43           | 0.43   | 0.45   | 1.18     | 0.89        | 3.38  | 16.88     |
|     | 2  | 0.50           | 0.62   | 0.71   | 2.24     | 1.34        | 5.41  | 27.04     |
|     | 3  | 1.04           | 1.30   | 1.62   | 3.18     | 1.51        | 8.65  | 43.25     |
| 黄土  | 1  | 0              | 0.04   | 0.04   | 0.14     | 0.13        | 0.35  | 1.75      |
|     | 2  | 0.02           | 0.02   | 0.12   | 0.27     | 0.26        | 0.68  | 3.42      |
|     | 3  | 0.33           | 0.96   | 1.17   | 1.39     | 0.93        | 4.77  | 23.83     |
| 紫色土 | 1  | 0.19           | 0.58   | 0.54   | 1.18     | 1.46        | 3.94  | 19.71     |
|     | 2  | 0.16           | 0.73   | 1.58   | 6.41     | 3.03        | 11.91 | 59.54     |
|     | 3  | 0.21           | 1.48   | 3.95   | 7.92     | 2.58        | 16.14 | 80.71     |
| 红壤  | 1  | 0.06           | 0.20   | 1.17   | 2.83     | 1.56        | 5.82  | 29.08     |
|     | 2  | 0.06           | 0.21   | 1.36   | 5.16     | 2.94        | 9.73  | 48.63     |
|     | 3  | 0.49           | 0.72   | 2.95   | 7.33     | 3.19        | 14.68 | 73.38     |
| 平均  | 1  | 0.14           | 0.27   | 0.49   | 1.26     | 1.06        | 3.21  | 16.07     |
|     | 2  | 0.16           | 0.38   | 0.98   | 4.00     | 2.12        | 7.64  | 38.18     |
|     | 3  | 0.52           | 1.07   | 2.45   | 5.20     | 2.13        | 11.37 | 56.86     |

通过对上述3种方法之间的对比分析可知,方法1对土样中团聚体的破坏性最大,测定的各级水稳性团聚体含量和总含量最小;方法3对土样中团聚体的破坏性最小,测定的各级水稳性团聚体含量和总含量最大;方法2对土样中团聚体的破坏比方法1小而比方法3大,其测定的各级水稳性团聚体含量和总含量也介于两者之间。测定结果与郭曼等<sup>[31]</sup>、王凤等<sup>[33]</sup>、彭新华等<sup>[34]</sup>用类似方法测定的结果相似。

Le Bissonnais<sup>[26]</sup>、王凤等<sup>[33]</sup>认为快速浸润(方法1)过程中,干团聚体中陷入的空气在湿筛过程中压缩或膨胀、黏土性矿物的差异性膨胀等容易导致破碎和瓦解,而慢速浸润(方法3)对团聚体具有较小的破坏性,这与本研究的分析结果相同。

美国土壤学会认为上述不同的团聚体测定方法测定的重点不同,应根据不同的分析目的选择合适的方法。非真空快速浸润法不经过预湿润,直接放入水

筒中进行湿筛,团聚体与水体直接接触,引起团聚体中的压力、膨胀性矿物的快速变化而对团聚体破坏较大,这种情况与暴雨等情况下土壤表面被迅速浸润,雨水快速渗入土壤的情况类似,因此可认为其适用于暴雨等情况,这与 Le Bissonnais<sup>[26]</sup>、王风等<sup>[33]</sup>的研究观点一致;非真空快速滴水浸润法用滴管滴水对土样进行预湿润,然后再对团聚体进行湿筛,类似于萨维诺夫法和湿润后搅拌法,但比萨维诺夫法和湿润后搅拌法更简洁方便,在预湿润过程中团聚体内外的压力没有发生明显的变化,但对膨胀性矿物却有较大影响,类似于中雨情况下雨滴和雨强较小,所带的动能也较小,对土壤破坏性较小的情况,因此可认为其适用于中雨等情况;非真空慢速气溶胶浸润法以水蒸气对组配土样进行预湿润,过程缓慢,对土样内的压力变化和膨胀性矿物的影响都非常小,类似于田间小雨情况下雨滴和雨强都较小,对土壤破坏性很小的情况,因此可认为其适用于田间小雨等情况,这与 Le Bissonnais<sup>[26]</sup>、郭曼等<sup>[31]</sup>的观点一致。分析结果表明,非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空慢速气溶胶浸润法分别适用于暴雨、中雨和小雨等情况。

### 3 结论

(1) 非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空慢速气溶胶浸润法 3 种方法内部同一批次内和不同批次间的配对样本  $t$  检验均没有明显的显著性差异,都具有良好的稳定性和可重复性。

(2) 非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空慢速气溶胶浸润法 3 种方法间的配对样本  $t$  检验均在 0.000 水平上,小于 0.001,差异极其显著。

(3) 在非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空慢速气溶胶浸润法 3 种方法中,非真空快速浸润法对土样中水稳性团聚体的破坏性最大,测定的各级团聚体含量和总含量均最小;非真空慢速气溶胶浸润法对土样中水稳性团聚体的破坏性最小,测定的各级团聚体含量和总含量均最大;非真空快速滴水浸润法则介于两者之间。

(4) 在非真空快速浸润法、非真空快速滴水浸润法和非真空慢速气溶胶浸润法 3 种方法中,非真空快速浸润法适用于暴雨等条件,非真空快速滴水浸润法适用于中雨等条件,而非真空慢速气溶胶浸润法适用于小雨等条件。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Kemper W D, Chepil W S. Size Distribution of Aggregates[M]//Black C A, Evans D D, Ensminger L E, et al. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc, 1965:499-510.
- [2] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate Stability and Size Distribution[M]//Klute A. Method of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph No. 9. Madison, WI: ASA and SSSA, 1986: 425-442.
- [3] Ghildyal B P, Tripathi R P. Soil Physics[M]. New Delhi, India: Wiley Eastern Limited, 1987:87-116.
- [4] 陈恩凤. 土壤肥力研究文集[M]. 辽宁 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1984.
- [5] Díaz-Zorita M, Perfect E, Grove J H. Disruptive methods for assessing soil structure[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 64(1/2): 3-22.
- [6] Kemper W D. Aggregate Stability[M]//Black C A, Evans D D, Ensminger L E, et al. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc, 1965:511-519.
- [7] Candan F, Broquen P. Aggregate stability and related properties in NW Patagonian Andisols[J]. Geoderma, 2009, 154(1/2): 42-47.
- [8] Wuddvira M N, Stone R J, Ekwue E I. Structural stability of humid tropical soils as influenced by manure incorporation and incubation duration[J]. Soil Science Society of America Journals, 2009, 73(4): 1353-1360.
- [8] Wuddivira M N, Ekwue E I, Stone R J. Modelling slaking sensitivity to assess the degradation potential of humid tropic soils under intense rainfall[J]. Land Degradation & Development, 2010, 21(1): 48-57.
- [9] Unger P W. Aggregate and organic carbon concentration interrelationships of a Torricic Paleustol[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 42(1/2): 95-113.
- [10] Angers D A, Carter M R. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils[M]//Carter M R, Stewart B A, eds. Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Boca Raton, FL: Lewis Publ, CRC Press, 1996:193-211.
- [11] Neufeldt H, Ayarza M A, Resck D V S, et al. Distribution of water-stable aggregates and aggregating agents in Cerrado Oxisols [J]. Geoderma, 1999, 93(1/2): 85-99.
- [12] Wright S F, Starr J L, Paltineanu I C. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition[J]. Soil Science Society

- of America Journal, 1999,63(6):1825-1829.
- [13] 梁爱珍,张晓平,申艳,等.东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征[J].应用生态学报,2008,19(5):1052-1057.
- [14] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels[J]. Catena, 2002,47(2):133-149.
- [15] Barthes B, Roose E. 表层土壤团聚体稳定性对径流及土壤侵蚀的影响[J].中国水土保持,2002(7):23.
- [16] 张金池,陈三雄,刘道平,等.浙江安吉主要植被类型土壤抗蚀性指标筛选及评价模型构建[J].亚热带水土保持,2006,18(2):1-5.
- [17] McCalla T M. Water-drop method of determining stability of soil structure[J]. Soil Science, 1944,58(2):117-121.
- [18] Imeson A C, Vis M. Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion[J]. Geoderma, 1984,34(3/4):85-200.
- [19] Farres P J, Cousen S M. An improved method of aggregate stability measurement [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1985,10(4):321-329.
- [20] Sarah P. Soil aggregation response to long and short-term differences in rainfall amount under arid and Mediterranean climate conditions[J]. Geomorphology, 2005,70(1/2):1-11.
- [21] Cantón Y, Solé-Benet A, Asensio C, et al. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion[J]. Catena, 2009,77(3):192-199.
- [22] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936,28(5):337-351.
- [23] Kemper W D, Koch E J. Aggregate stability of soils from the western portions of the United States and Canada[R]. Washington, D C. USDA. Tech. Bull. 1355. U. S. Gov. Print. Office, 1966.
- [24] Dickson E L, Rasiyah V, Groenevelt P H. Comparison of four pre-wetting techniques in wet aggregate stability determination [J]. Can. J. Soil Sci., 1991,71:67-72.
- [25] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and drodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1966,47(4):425-437.
- [26] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate Stability and Size Distribution [M]//Dane J H, Clarck R G. Methods of Soil Analysis Part 4: Physical Methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc., 2002:317-328.
- [27] 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.
- [28] 郭伟,史志华,陈利顶,等.红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J].生态学报,2007,27(6):2516-2522.
- [29] 史志华,闫峰陵,李朝霞,等.红壤表土团聚体破碎方式对坡面产流过程的影响[J].自然科学进展,2007,17(2):217-224.
- [30] 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[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2009,37(5):82-86.
- [31] 郭曼,郑粉莉,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区土壤团聚体稳定性[J].中国水土保持科学,2010,8(2):68-73.
- [32] 苏静,赵世伟.土壤团聚体稳定性平均方法比较[J].水土保持通报,2009,29(5):114-117.
- [33] 王风,李海波,韩晓增,等.黑土水稳性团聚体测定方法研究[J].农业系统科学与综合研究,2007,23(2):138-140,145.
- [34] 彭新华,张斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23(10):2176-2183.

(上接第 137 页)

[ 参 考 文 献 ]

- [1] 治沙造林学编委会.治沙造林学[M].北京:中国林业出版社,1981.
- [2] 白凤忠,连桂梅,张俊生,等.毛乌素沙地沙柳不同季节造林试验研究初报[J].内蒙古林业调查设计,2005,28(S):55-56.
- [3] 张天勇,任宏斌,李培贵.流动沙丘迎风坡沙柳深栽造林技术研究[J].宁夏农业科技,2006(6):25-26.
- [4] 杨埃清,越文斌,张彦,等.毛乌素沙地沙柳不同季节造林试验研究初报[J].内蒙古林业科技,1997(3):17-18.
- [5] 姚建成,梁海荣,张松林,等.沙柳平茬不同留茬高度对比试验[J].内蒙古林业科技,2009,35(4):35-36.
- [6] 米志英,高永.库布齐沙漠沙柳无性快速培育技术对比研究[J].中国沙漠,2008,28(2):318-321.
- [7] 邬玉明,薛凤英,王计.干旱风沙地区沙柳造林成活率的技术探讨[J].内蒙古林业科技,2003(1):35-36.