

干湿交替作用对西南地区黄壤团聚体稳定性的影响

邬铃莉^{1,2}, 王玉杰^{1,2}, 王彬^{1,2}, 王云琦^{1,2}, 胡波^{1,2}, 谭锦^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学), 北京 100083)

摘要: 为了探究我国西南地区干湿交替作用对土壤团聚体稳定性的影响, 选取重庆缙云山典型黄壤为研究对象, 在4个前期含水率(风干, 10%, 15%, 20%)水平下, 对4组不同粒级团聚体(1~2, 2~3, 3~5, 5~7 mm)分别进行7个不同干湿交替过程(1, 2, 3, 5, 7, 10, 15次)模拟。采用Le Bissonnais法, 对干湿交替作用后的团聚体在不同破碎机制下的稳定性特征进行了探讨。结果表明: (1)快速湿润(FW)对团聚体稳定性的破坏程度最大, 且与机械扰动(ST)和慢速湿润(SW)存在显著差异; (2)小粒径团聚体相较于大粒径团聚体稳定性更高; (3)干湿交替过程对团聚体存在明显的破坏作用, 且在不同含水率变化范围内其破坏程度不同; (4)干湿交替作用主要通过影响团聚体破碎后>2 mm团聚体的百分比含量来影响团聚体的稳定性。该结果对于研究西南地区土壤侵蚀的发生机理具有一定的参考价值。

关键词: Le Bissonnais法; 干湿交替; 前期含水率; 团聚体稳定性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0317-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.052

Influence of Dry-Wet Cycles on Aggregate Stability of Yellow Soil in Southwest China

WU Lingli^{1,2}, WANG Yujie^{1,2}, WANG Bin^{1,2}, WANG Yunqi^{1,2}, HU Bo^{1,2}, TAN Jin^{1,2}

(1. College of soil and water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083)

Abstract: To explore the influence of dry-wet cycles on soil aggregate stability in Southwest China, an experiment was conducted in the Jinyun mountain in Chongqing. The typical yellow soil in cultivated land was taken as the research object. With four groups of aggregates of different particle sizes (1–2, 2–3, 3–5, and 5–7 mm), seven dry-wet cycle processes (1, 2, 3, 5, 7, 10, and 15 times) under four antecedent moisture levels (air dried, 10%, 15%, and 20%) were simulated. The stability features of soil aggregates after dry-wet cycles under different broken mechanisms were discussed with the Le Bissonnais method. The results showed that: (1) Fast wetting (FW) had the most serious damage on soil aggregate stability, and there was a significant difference between FW and the other two broken mechanisms (slow wetting (SW) and stirring (ST)). (2) Compared with large-size aggregates, the stability of small-size aggregates was higher. (3) The destructive effect of dry-wet cycles on aggregate stability was obvious, and the extent of the damage was different under different antecedent moisture levels. (4) The dry-wet cycle processes mainly affected the stability of aggregates by affecting the percentage of >2 mm aggregate fragmentation. These results had an important reference value for the study of soil erosion mechanisms in Southwest China.

Keywords: Le Bissonnais method; dry-wet cycle; antecedent moisture content; aggregate stability

土壤侵蚀是全球面临的最重要环境问题之一, 正确认识土壤侵蚀的发生机理与影响因素对于有效控制土壤侵蚀有着重要的意义。作为土壤结构的基本单位, 团聚体的稳定性成为了评价土壤结构和物理形态的重要指标^[1]。影响团聚体稳定性的因素很多^[2-6], 干旱、降雨、河流水位变化常常使土壤处于干

湿交替状态, 干湿交替不仅可以激发土壤呼吸影响土壤的理化性质^[7], 而且还会影响土壤的抗蚀性。干湿交替对于岩土介质来说是一种“疲劳作用”, 它对岩土介质的破坏作用一般比在水中持续浸泡还要强^[8]。Denef等^[9]指出, 一次干湿交替作用就能使土壤中大团聚体(>2 mm)的含量由30%减少到21%, 随着干

收稿日期: 2016-12-31

资助项目: 国家“十三五”科技支撑计划子课题“三峡库区城郊防护林结构调控与高效经营技术”(2015BAD07B040304)

第一作者: 邬铃莉(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1976432054@qq.com

通信作者: 王玉杰(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀、林业生态工程研究。E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

湿交替次数增加,团聚体抵抗破碎的能力有所增强,但最后大团聚体(>2 mm)都会向小团聚体(0.053~0.25 mm)转变,而 Cosentino 等^[10]研究发现简单的干湿交替过程对团聚体的破坏作用并不明显。

土壤含水率变化是干湿交替作用的一个直接表现形式。相比含水率一定的土壤,土壤在不同含水率之间变化时,团聚体更容易发生失稳破坏^[11]。已有研究表明,土壤前期含水率是导致土壤可蚀性动态变化的一个重要因素^[12],目前关于土壤前期含水率的研究大多都基于全土条件下,从其对土壤团聚体稳定性的作用特征来进行分析的比较。国内外虽然已有相关研究^[11-13],但由于研究方法和测定样品的差异,得到的前期含水率对团聚体稳定性影响的规律也有所不同。因此,在特定地区针对性的研究前期含水率对团聚体稳定性的影响十分必要。我国西南地区雨量充沛,干湿交替现象明显。为了探究该区域不同前期含水率水平下干湿交替作用对土壤团聚体稳定性的影响,本文设计了 4 个前期含水率(风干,10%,15%,20%,分别对应风干土含水量、凋萎系数含水量、70%田间持水量、田间持水量)和 7 个干湿交替过程(1,2,3,5,7,10,15 次),对土壤团聚体进行干湿交替试验,以期更好地探究干湿交替作用下土壤侵蚀的发生机理。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

试验土壤采自重庆市缙云山(106°17′—106°24′ E, 29°41′—29°52′ N),该区域属于典型的亚热带季风湿润性气候,有明显的干湿季节变化,年均气温 13.6℃,年均降雨量 1 611.8 mm,年均蒸发量 777.1 mm,年均相对湿度 87%。成土母质为泥质砂岩,主要土壤类型为酸性黄壤。2016 年 5 月在研究区采集农耕地黄壤,土壤质地为重壤土,pH 值 4.55,容重 0.99 g/cm³,平均有机质含量 20.8 g/kg,机械组成中物理性粘粒含量占 58.58%^[14]。取 0—10 cm 土层原状土,装入铝盒带回实验室风干后依次过 7,5,3,2,1 mm 套筛,得到 4 种不同粒级的土壤团聚体(1~2,2~3,3~5,5~7 mm)。

1.2 干湿交替及前期含水率控制

将称量好的团聚体置于滤纸上,连同滤纸一起置于浸在蒸馏水中的海绵表面 2 h,使团聚体在 -0.3 kPa 吸力下缓慢湿润至饱和,模拟土壤吸水过程;然后放入 40℃烘箱内烘干至设定含水率后取出,模拟土壤脱水过程,此为一个干湿交替过程。每组粒径团聚体分别进行 1,2,3,5,7,10,15 次干湿交替试验。该过程设置一个对照组,即不进行干湿交替作用(下文用 0 次交替表示)。干湿交替试验中严格控制团聚体的前期含水率,对于“风干—饱和湿润”试验组,烘干 48 h 即可,“含水率 10%,15%,20%—饱和湿润”

试验组的烘干时间,在正式试验前通过定时称量并计算含水率进行确定。

1.3 LB 法测定团聚体稳定性

采用 Le Bissonnais (LB)法^[15-16]测定经历不同干湿交替过程的团聚体稳定性,包括 3 种处理方式:(1)快速湿润(FW),模拟消散作用;(2)慢速湿润(SW),模拟物理—化学分散作用;(3)机械扰动(ST),模拟机械破坏作用。每组试验重复 2 次。

选取土壤团聚体质量百分数(P_i ,%)、平均质量直径(MWD,mm)以及标准化平均质量直径(NMWD,mm)作为团聚体稳定性的评价指标。团聚体质量百分数反映了各粒级团聚体的分布情况;平均质量直径是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD 值越大表示团聚体越稳定,在同等外界干扰条件下所受的影响越小,反之,团聚体越不稳定,受外界干扰时更容易发生破碎;标准化平均质量直径在平均质量直径的基础上用于比较不同初始粒径团聚体的稳定性^[17]。计算公式为:

$$P_i = m_i / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

$$\text{NMWD} = \text{MWD} / (R_{\max} - R_{\min}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i 为处理后的各粒级团聚体质量百分数(%); m_i 为各粒级团聚体的质量(g); m_0 为样品总质量(g);MWD 为团聚体的平均质量直径(mm); X_i 为各粒级团聚体的平均直径(mm);NMWD 为团聚体的标准化平均质量直径(mm); $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 分别代表最大初始筛子孔径和最小筛子孔径(mm)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 对试验数据进行处理,利用 SPSS 16.0 进行方差分析(ANOVA),显著性水平 $p < 0.05$ 。

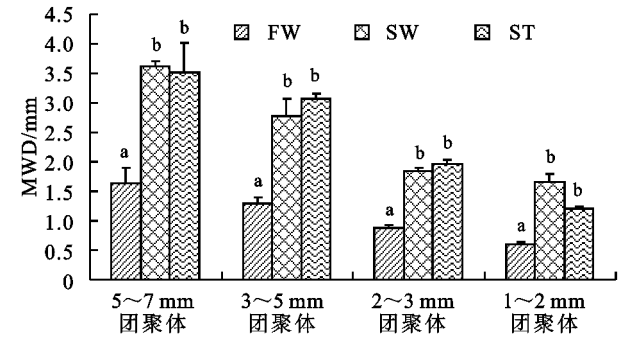
2 结果与分析

2.1 不同破碎机制及不同初始粒径下团聚体的稳定性差异

由图 1 可知,3 种破碎机制下,5~7 mm 和 1~2 mm 团聚体的稳定性表现为 $\text{SW} > \text{ST} > \text{FW}$,而 3~5 mm 和 2~3 mm 团聚体在 3 种破碎机制下的稳定性表现为 $\text{ST} > \text{SW} > \text{FW}$ 。从差异显著性分析结果看,FW 与 ST 和 SW 的相关性 p 值分别为 0.020 和 0.015,说明 FW 与其他 2 种破碎机制之间差异显著;而 SW 与 ST 之间 p 值达到了 0.898,说明二者差异较小。FW 处理下 MWD 值最小,说明快速湿润(FW)对团聚体稳定性的破坏程度最大,且破坏性显著大于慢速湿润(SW)和机械扰动(ST)。

相同破碎机制下,不同初始粒径团聚体的 MWD 值存在差异(图 1)。为了探究初始粒径对团聚体稳

定性的影响,将 LB 法处理下不同粒径团聚体的 NMWD 进行对比(图 2)。从图 2 中 NMWD 的分布来看,3 种破碎机制下,团聚体 NMWD 都随着初始粒径减小而增大,且总的来看不同粒级团聚体 NMWD 差异性显著($p<0.05$)。快速湿润(FW)处理条件下,各粒级团聚体 NMWD 都较小,且 5~7 mm 团聚体与 3~5 mm 团聚体 NMWD 差异不显著。慢速湿润(SW)处理条件下,各粒级团聚体 NMWD 差异显著,5~7 mm 团聚体的 NMWD 为 0.60 mm,当团聚体初始粒径减小到 1~2 mm 时,其 NMWD 达到 1.45 mm,增加了 141.7%。机械扰动(ST)处理下,各初始粒径团聚体 NMWD 差异显著且成等差增加。由此说明团聚体的初始粒径对团聚体稳定性有着显著影响,大粒径团聚体在外界干扰下更易被破坏。



注:图中不同小写字母代表不同破碎机制间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 3 种破碎机制下团聚体平均质量直径

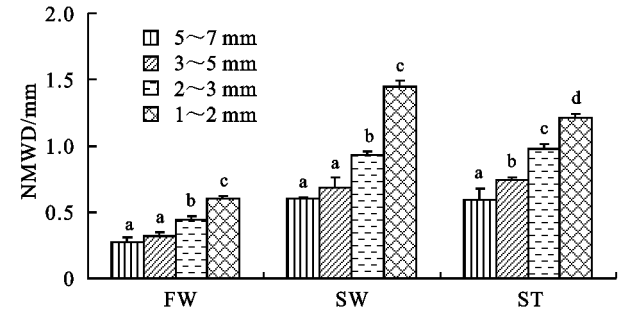


图 2 LB 法处理后不同粒径团聚体标准化平均质量直径

2.2 干湿交替作用下 MWD 的变化特征

2.2.1 不同干湿交替次数下团聚体 MWD 的变化 已有研究表明,坡面侵蚀与粒径 3~5 mm 的团聚体联系最为紧密^[18]。因此,本文以 3~5 mm 团聚体为例,利用 LB 法分析经过不同次数干湿交替过程(风干—饱和)的团聚体稳定性的变化。由图 3 可知,与对照组相比,经过干湿交替作用后的团聚体 MWD 值都有所下降,说明干湿交替过程对团聚体的稳定性存在明显的破坏作用。快速湿润(FW)处理下,团聚体 MWD 随干湿交替次数增加呈略微减小变化,但变化趋势不明显,到干湿交替 10 次时减少了 18.5%,当交替次数达到 15 次时 MWD 又有所增加;慢速湿润(SW)处理后,团聚体 MWD 随干湿交替次数增加呈“减小—增大—

减小”反复变化,且减小幅度要大于增加幅度,干湿交替 15 次相较于交替 1 次,MWD 减小了 38.9%;机械扰动(ST)处理下,在干湿交替 5 次之前,团聚体 MWD 随交替次数增加逐渐减小,随后小幅度增加,到干湿交替次数达到 15 次时,MWD 发生了减小,与干湿交替 1 次相比,减小幅度达 52.7%。从总的变化趋势看,在不同破碎机制下团聚体的稳定性均随干湿交替次数增加而逐渐降低。

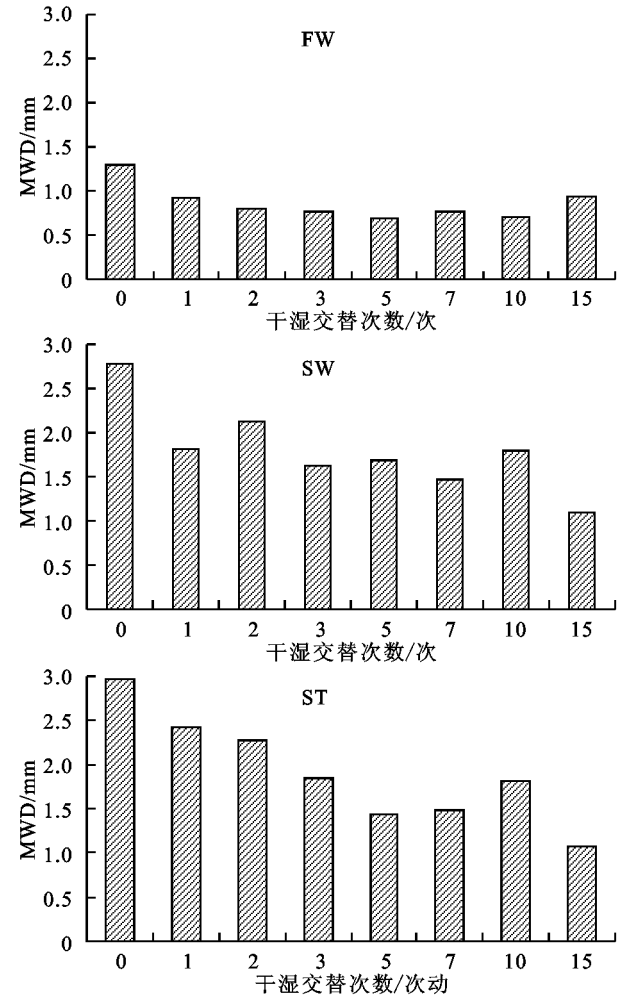


图 3 不同干湿交替次数下团聚体平均质量直径

2.2.2 不同含水率变化范围下团聚体 MWD 的变化 由图 4 可知,在不同破碎机制下团聚体 MWD 随不同含水率变化范围表现出不同的变化趋势。快速湿润(FW)处理下,团聚体 MWD 总的呈现出随前期含水率增加而增大的趋势,且在干湿交替 1 次,2 次和 10 次时,20%含水率团聚体的 MWD 显著增加;慢速湿润(SW)处理下,当团聚体前期含水率<20%时,MWD 随前期含水率增加而增加,当前期含水率达到 20%时 MWD 出现了减小的现象。不同于前面 2 种处理方式,机械扰动(ST)处理下,经过 1 次,2 次和 10 次干湿交替过程的团聚体 MWD 随前期含水率增加而减小,其他干湿交替次数下 MWD 则随前期含水率不规则变化。

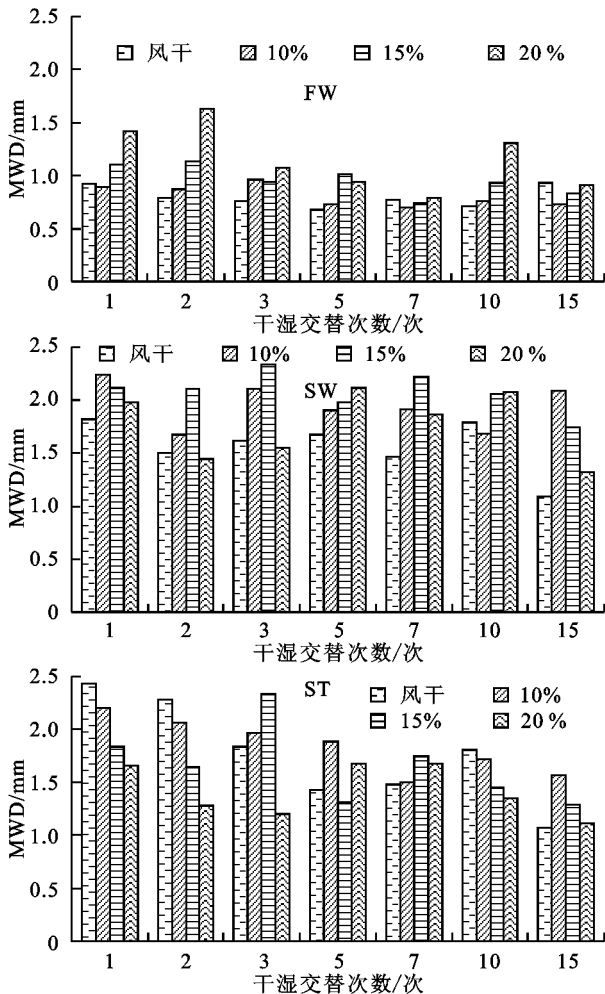


图 4 不同含水率变化范围下团聚体平均质量直径

2.2.3 团聚体粒径分布特征 对比 3~5 mm 团聚体经过不同干湿交替(风干—饱和)次数后在 LB 法 3 种处理方式下形成的各粒级团聚体质量百分比(图 5)可知,3 种破碎机制下,未经过干湿交替(0 次)的团聚体破碎后以大团聚体(>2 mm)为主,随着干湿交替次数的增加,大团聚体的比例逐渐减小,小团聚体(<0.5 mm)的比例逐渐增加。这也是团聚体 MWD 值随着干湿交替次数增加而逐渐减小的一个重要原因。快速湿润(FW)处理下,各粒级团聚体百分比含量变化不大,且都以 >2 mm 和 $0.1\sim0.5$ mm 团聚体为主。慢速湿润(SW)处理下,未经过干湿交替作用的团聚体破碎后以 >2 mm 团聚体为主,百分比含量达到 73.75%,到干湿交替 15 次时, >2 mm 团聚体百分比含量减少到 22.95%, $0.25\sim0.5$ mm 团聚体百分比含量从 5.78%增加到 34.46%;机械扰动(ST)处理与慢速湿润(SW)处理结果相似,干湿交替后(15 次)相比干湿交替前(0 次) >2 mm 团聚体百分比含量由 82.68%下降到 24.74%, $0.25\sim0.5$ mm 团聚体百分比含量从 2.41%增加到 25.85%。即随着干湿交替次数增加,团聚体破碎后的粒径组成以小团聚体(<0.5 mm)为主。

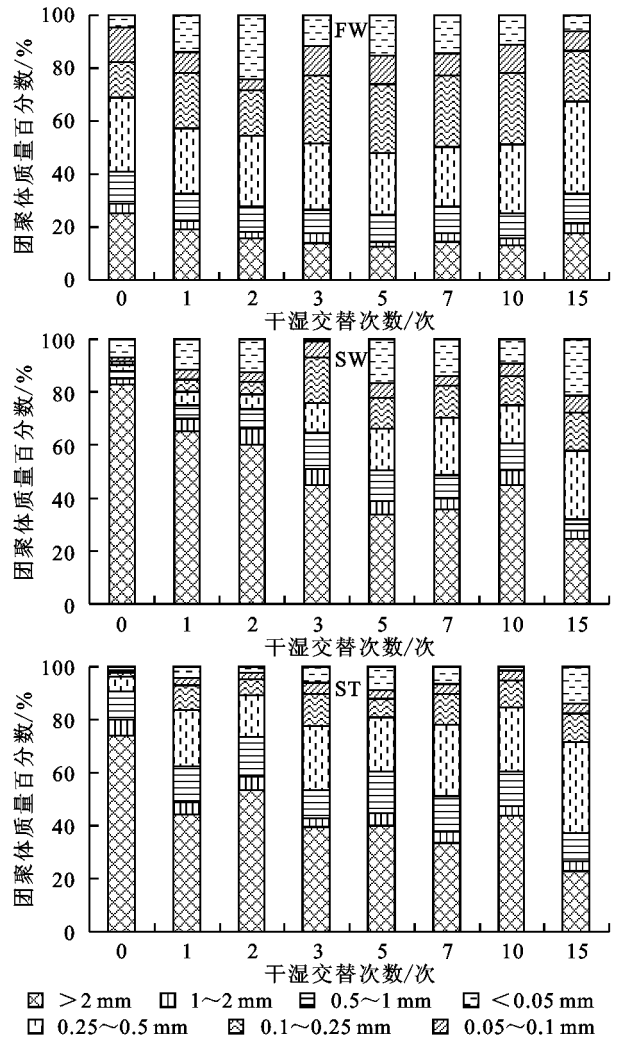


图 5 不同干湿交替次数下团聚体粒级分布质量百分比

3 讨论

3.1 不同破碎机制下团聚体的破碎特征

LB 法模拟了团聚体在自然界中的 3 种不同破碎机制^[16]。本研究中,快速湿润(FW)处理对团聚体稳定性表现出较强的破坏力,这是因为快速湿润时,水分迅速进入团聚体内部挤压空气造成团聚体内部压强增大而发生崩解,“气爆”加上水分渗透降低了团聚体间的胶结作用,所以快速湿润对团聚体的破坏作用最大^[19]。慢速湿润(SW)处理主要通过土壤中粘粒的不均匀胀缩作用对团聚体造成破坏,本研究的供试土壤粘粒含量高,粘土矿物以胀缩性较小的蛭石、高岭石为主,慢速湿润过程中土壤的胀缩能力不足以克服土壤毛管张力来破坏团聚体的结构,所以慢速湿润对团聚体的破坏作用较小。机械扰动(ST)处理下,团聚体首先经过酒精处理,去除了消散作用及粘粒膨胀的影响,加上晃动过程中力度不足及惯性的存在,导致机械外力不足以充分破坏团聚体间的胶结物质,所以该破碎机制对团聚体的破坏作用较弱。

3.2 初始粒径对团聚体稳定性的影响

采用标准化后的平均质量直径(NMWD)作为评

价不同粒径团聚体稳定性的指标,排除了初始粒径对MWD的影响。结果表明,小粒径团聚体相较于大粒径团聚体稳定性更高(图2),这与小粒径团聚体最不容易破碎这一研究结果一致^[21]。这是由于团聚体越大抗张强度越小,颗粒间的胶结作用需要依靠更多胶结物质和更强的引力,所以相同外界条件下,其抵抗破碎的能力比小粒径团聚体差;且团聚体越大,表面的孔隙和破裂面越多,随之内部闭蓄空气越多,当干燥的团聚体被侵入水后内部空气受挤压产生的爆破现象也就越明显,大团聚体便更容易破碎成稳定性更高的小团聚体。

3.3 干湿交替作用及前期含水率对团聚体稳定性的影响

干湿交替会破坏团聚体的内部结构,且这种破坏作用是不可逆的^[22]。任何一种土壤都存在一个平衡态,即水稳性团聚体比例存在一个平衡值,且该平衡值会随着一系列复杂的过程发生变化,在本次研究中则表现为大团聚体($>2\text{ mm}$)含量随着干湿交替次数增加而逐渐向小团聚体($<0.5\text{ mm}$)转变(图5)。大团聚体由小团聚体组成,且小团聚体之间存在较大孔隙从而导致大团聚体密度较小,所以在干湿交替等外力作用下,团聚体结构变得相对疏松,空隙间连通性得到改善^[20],大团聚体由于内部粒间孔隙互斥更容易破碎成相对稳定的小粒径团聚体,且干湿交替次数越多,该现象越明显。

干湿交替作用的破坏力大小还与团聚体前期含水率直接相关。干湿交替过程中,团聚体从前期含水率到饱和含水率之间循环反复变化,前期含水率越低,干湿交替中团聚体含水率变化范围就越大,干缩和湿胀的程度也就越大,土壤颗粒间结合力随着含水率降低而减小,遇水更易发生分散,从而导致团聚体破碎严重。团聚体内部含水量越少空气越多,“气爆”现象越明显,因此在快速湿润的破碎机制下,团聚体初始含水率越低稳定性越差(图4)。而在慢速湿润和机械扰动破碎机制下,前期含水率越高团聚体内部胶结物质含量越低,所以不同于快速湿润,在这2种破碎机制下出现了团聚体初始含水率越高稳定性越差的现象。

4 结论

(1)在我国西南地区,快速湿润(FW)处理对黄壤团聚体稳定性的破坏作用最大,且与慢速湿润(SW)和机械扰动(ST)处理差异显著,说明该地区黄壤团聚体破坏的主要机制是暴雨条件下的消散作用,对于1~2 mm和5~7 mm的团聚体,3种破碎机制下的稳定性表现为SW>ST>FW,3~5 mm和2~3 mm团聚体在3种破

碎机制下的稳定性表现为ST>SW>FW。

(2)从NMWD值来看,相同破坏作用下,小粒径团聚体相较于大粒径团聚体稳定性更高。

(3)干湿交替作用对团聚体存在明显的破坏作用。土壤干缩和湿胀的过程会显著影响团聚体的内部结构,从而提高团聚体的易碎性。前期含水率主要通过影响团聚体内部空气和水的比例以及单粒间胶结作用来影响团聚体的稳定性。干湿交替过程中,含水率变化范围越大,团聚体干缩和湿胀的程度就越大,团聚体内部结构破坏也就越严重。所以,在频繁干旱地区,尤其在突发暴雨情况下,其水土流失潜在隐患要明显高于其他地区。

参考文献:

- [1] 苏静,赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报,2009,29(5):114-117.
- [2] 苑亚茹,韩晓增,李禄军,等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(6):96-99.
- [3] 吴强盛,袁芳英,费永俊,等. 菌根真菌对白三叶根际团聚体稳定性、球囊霉素相关土壤蛋白和糖类物质的影响[J]. 草业学报,2014,23(4):269-275.
- [4] 李捷,杨学云,孙本华,等. 不同土壤管理措施下土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):346-354.
- [5] 邸佳颖,刘小粉,杜章留,等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2014,22(10):1129-1138.
- [6] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊,等. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [7] 王苑,宋新山,王君,等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):342-350.
- [8] 徐千军,陆杨. 干湿交替对边坡长期安全性的影响[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(7):1021-1024.
- [9] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics[J]. Soil Biology & Biochemistry,2001,33(12):1599-1611.
- [10] Cosentino D, Chenu C, Le B Y. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(8): 2053-2062.
- [11] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(3):95-103.
- [12] 刘振波,史学正,于东升,等. 模拟降雨下土壤前期含水量对土壤可蚀性的影响[J]. 生态环境学报, 2008, 17(1):397-402.