

# 不同降雨条件下沂蒙山区耕层土壤团聚体特征

王月月, 吴元芝, 范雯华, 丁文雪, 魏 玮

(山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学 资源环境学院, 山东 临沂 276000)

**摘 要:**降雨强度和时长对土壤团聚体的影响至关重要,不同降雨特征下沂蒙山区耕层土壤团聚体时空变异特征仍不清晰。基于模拟降雨试验,研究了不同降雨强度(16 mm/h, 43 mm/h, 71 mm/h)和降雨时长(10 min, 30 min, 60 min)下沂蒙山区褐土耕层土壤团聚体特征。结果表明:降雨强度 16 mm/h, 10 min 降雨时长下仅对 0—5 cm 土层土壤团聚体产生影响, >5 mm 粒级团聚体含量迅速降低。其他雨强和时长下, 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层团聚体含量均发生变化。在 43, 71 mm/h 的降雨强度下, 随着降雨时长的增加, 0—5 cm 土层微团聚体含量均表现出先增加后降低的趋势。与供试土壤相比, 雨强为 71 mm/h, 降雨时长 60 min 时, 0—5 cm 土层 >5 mm 粒级团聚体含量减少了 93%, 而 <0.25 mm 粒级团聚体含量增加了 42%。土壤团聚体的平均重量直径(MWD)随降雨强度及时长的增加而减小, 在降雨强度 71 mm/h, 降雨时长 60 min 时各土层 MWD 趋于一致。说明, 随降雨强度及时长的增加, 雨滴打击和雨水湿润作用对土壤大团聚体的拆分作用增强, 大团聚体含量逐渐减少, 微团聚体含量逐渐增加, 土壤稳定性先降低后趋于稳定。

**关键词:**沂蒙山区; 耕层土壤; 降雨时长; 降雨强度; 土壤团聚体

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0092-08

## Characteristics of Soil Aggregates in Cultivated Layer of Yimeng Mountain Area Under Different Rainfall Conditions

WANG Yueyue, WU Yuanzhi, FAN Wenhua, DING Wenxue, WEI Wei

(Shandong Provincial Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Environmental Protection, School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

**Abstract:** Rainfall intensity and rainfall duration are important factors affecting soil aggregates. However, less information is available for the effect of rainfall intensity and duration on soil aggregates characteristics in cultivated layer of Yimeng Mountain area. Soil aggregates in a cultivated layer in the Yimeng Mountain area were studied before and after various intensities (16 mm/h, 43 mm/h, 71 mm/h) and durations (10 min, 30 min, 60 min) of artificially simulated rainfall. The results showed that the rainfall with intensity of 16 mm/h and duration of 10 min caused a rapid decrease of the >5 mm aggregate content in the 0—5 cm soil layer; rainfall with intensities of 43 and 71 mm/h caused the microaggregate content of the 0—5 cm soil layer to initially increase and then to decrease; compared to the original soil condition, the >5 mm aggregate content decreased by 93% in the 0—5 cm soil layer, and the <0.25 mm aggregate content increased by 42% under the rainfall intensity of 71 mm/h for a duration of 60 min; the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates declined as rainfall intensity and duration increased, and the MWD values of three soil layers (0—5 cm, 5—10 cm and 10—20 cm) tended to be similar under the rainfall intensity of 71 mm/h for 60 min. The above results indicate that the decomposition of soil macroaggregates was enhanced with the increase of rainfall intensity and rainfall duration, leading to gradual decrease in macroaggregate content and gradual increase in microaggregate content, and the soil stability first decreased and then tended to be stable.

**Keywords:** Yimeng Mountain area; cultivated layer soil; rainfall duration; rainfall intensity; soil aggregate

土壤是一个复杂多变的三相体系,受人为及自然因素的影响,土壤的结构、形态和物理特性呈动态变化<sup>[1]</sup>。大量研究表明,耕作方式、机械压实、降雨、冻融过程、根系生长和土壤生物活动等都在不同程度上引起土壤结构的变化<sup>[1-3]</sup>。土壤结构具有很强的时空变异特征,耕作后土壤结构内部会发生改变<sup>[4-5]</sup>,直接影响土壤渗透性、透气性、根系穿透阻力和机械强度等物理性质,对土壤物理、化学和生物过程有着重要的影响<sup>[6-7]</sup>。因此,良好的土壤结构是作物生长和农业可持续发展的重要保障。

降雨作为影响土壤结构的因素之一,是农业生产中经常面临的实际田间环境。土壤团聚体是土壤结构的基本组成单位<sup>[8-9]</sup>,且土壤水稳性团聚体数量和稳定性是影响土壤抗侵蚀性的重要因素<sup>[10]</sup>。降雨过程中雨滴打击、雨水的湿润及径流泥沙搬运等作用会对团聚体产生影响<sup>[11-13]</sup>。作为描述降雨特征的重要参数,降雨强度和时长对土壤团聚体的影响至关重要<sup>[14]</sup>。目前,许多研究者研究了降雨对坡面侵蚀过程中土壤团聚体及稳定性的影响<sup>[14-16]</sup>。对于坡面土壤,随降雨强度和降雨时长的增加,受雨滴打击和雨水湿润及径流的影响,表土大团聚体会破碎成细小颗粒<sup>[12-13,17]</sup>,降低了团聚体的稳定性,土壤团聚体发生迁移<sup>[18-19]</sup>,土壤抗侵蚀能力减弱<sup>[20]</sup>。而降雨对耕作层土壤团聚体影响的研究相对较少,尤其是在北方土石山区水力侵蚀较严重的沂蒙山区。该区土壤结构松散,且夏季降雨以暴雨方式居多,耕层土壤经历不同强度和时长的降雨过程,土壤团聚体特征发生变化,进而影响土壤结构<sup>[21-23]</sup>。目前关于沂蒙山区耕层土壤侵蚀过程的研究非常薄弱,不同降雨特征下耕层土壤团聚体时空变异特征的研究更是鲜见报道。本研究以该区典型土壤类型褐土为研究对象,人工模拟不同降雨强度和时长,分析不同降雨特征下不同土层土壤团聚体变化特征,以期为改善沂蒙山区耕层土壤结构、提高土壤抗侵蚀性提供重要的理论指导。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

供试土壤取自山东省临沂市郊区(35.13°N,118.30°E)20 cm 的耕层土。该区域以种植玉米—小麦为主,土壤类型为沂蒙山区典型土壤褐土,质地为粉壤土,其基本理化性质见表 1。土壤机械组成利用激光粒度仪测定,土壤容重利用环刀法测定,pH 值采用酸度计测定(水土比为 2.5:1),有机质利用重铬酸钾加热法得到。土壤样品风干后沿自然节理将其掰成 3~4 cm 的土块,以保持原有的土壤结构<sup>[8]</sup>。试验于 2019

年 7—8 月在山东省水土保持与环境保育研究所人工模拟降雨大厅开展。降雨设备为压力垂直下喷式模拟降雨器,雨滴能量较大,既有较强的抗风能力,又接近自然降雨,降雨均匀系数>0.85。试验所用土槽为长 85 cm、宽 60 cm、高 43 cm 的塑料箱。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤颗粒组成/%			容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	pH 值	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )
粉粒	砂粒	黏粒			
51.21	38.7	10.09	1.28	7.52	11.2

注:土壤颗粒分级划分标准采用国际制(<0.002 mm 为黏粒;0.002~0.02 mm 为粉粒;0.02~2 mm 为砂粒)。

## 1.2 试验设计与步骤

本研究共设计 3 个降雨强度(16 mm/h,43 mm/h,71 mm/h),每个降雨强度下设置 3 个降雨时长(10 min,30 min,60 min),共 9 个处理,每个处理 3 个重复。

试验前将供试土壤样品分层填装到塑料箱,每 5 cm 为一层,每填装一层土,用 1 cm 厚的木板抓毛土壤表面以防止发生分层现象。填装土壤分为两层,底层模拟犁底层,深度为 20 cm,填装土壤容重为 1.35 g/cm<sup>3</sup>;犁底层以上模拟耕层,深度为 20 cm,填装土壤容重为 1.20 g/cm<sup>3</sup>。为保证模拟降雨过程试验土箱有良好的透水性,在试验箱底部均匀打孔。正式开始降雨试验之前设定雨强,达到试验雨强要求后开始降雨试验。当雨强降雨试验结束后静置,待接触不变形时分三层(0—5 cm,5—10 cm 和 10—20 cm)取样,样品自然风干后称重。

## 1.3 指标测定及数据分析

1.3.1 土壤团聚体测定 分别采用干筛法和湿筛法测定土壤团聚体。干筛:将风干土样依次通过孔径为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的土筛装置进行干筛,左右平行震荡 60 下,称重每一孔径土筛上的土壤。湿筛:依据干筛后每一孔径下的土壤样品所占比例配置 100 g 土壤样品。将配好的土样倒入团聚体分析仪套筛最上部(套筛孔径自上而下依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm),沿桶壁缓慢加入去离子水直至没过土样,浸泡 5 min,然后以 30 次/min 的频率震荡 30 min,收集各级土筛内的土样于铝盒中,烘干后称重,每个处理重复 3 次。

1.3.2 土壤团聚体稳定性评价指标 平均重量直径(mean weight diameter,MWD)是评价土壤团聚体稳定性最重要的指标,MWD 值越大,说明土壤团聚体的稳定性越大,土壤抗侵蚀能力也越强。本研究通过计算降雨后团聚体的 MWD 来反映土壤团聚体的破碎情况,同时表征降雨侵蚀过程中团聚体的迁移特征。

MWD 的计算公式如下:

$$MWD=\sum_{i=1}^n x_i w_i$$

式中: $X_i$ 为筛分出来的  $i$  粒级团聚体的平均直径; $w_i$

为  $i$  粒级团聚体的相应重量占土壤样品干重的分数。

测定所得数据利用 Excel 处理,并采用 SPSS 18.0 软件进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 供试土壤中团聚体组成

由表 2 得出,干筛法测定的  $>0.25$  mm 的土壤团聚体含量达到 79.19%,且以  $>5$  mm 粒级为主。湿筛后土壤团聚体以  $<0.25$  mm 为主,达到 50.23%,是干筛处理下的 2.41 倍;湿筛后  $>0.25$  mm 的团聚体

为 49.77%。湿筛后  $>5$  mm 粒级团聚体含量仅为 1.88%,比干筛处理降低 21.29%; $<1$  mm 粒级团聚体含量呈增加趋势,0.25~0.5 mm 粒级团聚体是干筛处理的 1.69 倍,以上数据说明湿筛处理下  $>5$  mm 粒级团聚体受雨滴打击和湿润的拆分作用转化为小粒级团聚体。

通过计算干筛和湿筛处理下土壤团聚体的 MWD 可得出,湿筛后土壤团聚体的 MWD 低于干筛处理,相比干筛处理降低 63%,土壤团聚体稳定性下降。

表 2 供试土壤团聚体组成

处理	各粒级团聚体组成/%						MWD/
	$>5$ mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	$<0.25$ mm	mm
干筛法	23.17	22.56	7.50	16.09	9.87	20.81	2.24
湿筛法	1.88	12.52	5.04	13.64	16.70	50.23	0.84
变化率	-91.91	-44.50	-32.87	-2.42	+69.15	+131.50	-62.50

注:变化率(%)=(湿筛—干筛)/干筛;“+”表示为增加;“—”表示为减少。

### 2.2 不同降雨时长下土壤团聚体特征

当降雨强度为 16 mm/h,降雨时长为 10 min 时,湿润土层深度小于 5 cm,因此只测定了 0—5 cm 土层团聚体含量。由图 1 可以得出,各降雨时长下各土层  $>5$  mm 粒级土壤团聚体所占比例最小, $<0.25$  mm 土壤团聚体所占比例最高。随土层深度的增加, $<0.25$  mm 土壤团聚体含量逐渐减少。在 0—5 cm 土层,随着降雨时长的增加, $<0.25$  mm 土壤团聚体含量逐渐增加。降雨时长为 10 min 时,0—5 cm 土层  $>5$  mm 及 2~5 mm 的土壤团聚体含量比供试土壤分别减少了 37%和 49%;1~2 mm,0.5~1 mm,0.25~0.5 mm 及  $<0.25$  mm 粒级的团聚体均呈增加趋势,其中 1~2 mm 粒级的团聚体增加比例最高,达到 33%。当降雨时长由 10 min 增加到 30 min 时,0—5 cm,5—10 cm 和 10—20 cm 土层中  $>5$  mm 和 2~5 mm 粒级的团聚体含量均呈减少趋势,其中 2~5 mm 粒级的团聚体减少幅度最大,比供试土壤分别减少了 61%,53%和 57%。 $<1$  mm 团聚体含量增加,以 1~2 mm 粒级团聚体增加为主。当降雨时长由 30 min 增加到 60 min 时,各土层大团聚体含量继续降低,微团聚体含量增加。表明,随着降雨时长的增加,各土层各粒级团聚体含量逐渐发生变化,大团聚体含量减少,微团聚体含量增加,且在 0—5 cm 土层表现更明显。进一步分析发现,0—5 cm 土层  $>5$  mm 粒级的团聚体含量在 30 min 和 60 min 降雨时长下相近。说明,16 mm/h 降雨强度下,0—5 cm 土层  $>5$  mm 土壤团聚体含量在 30 min 降雨时长后趋于稳定。

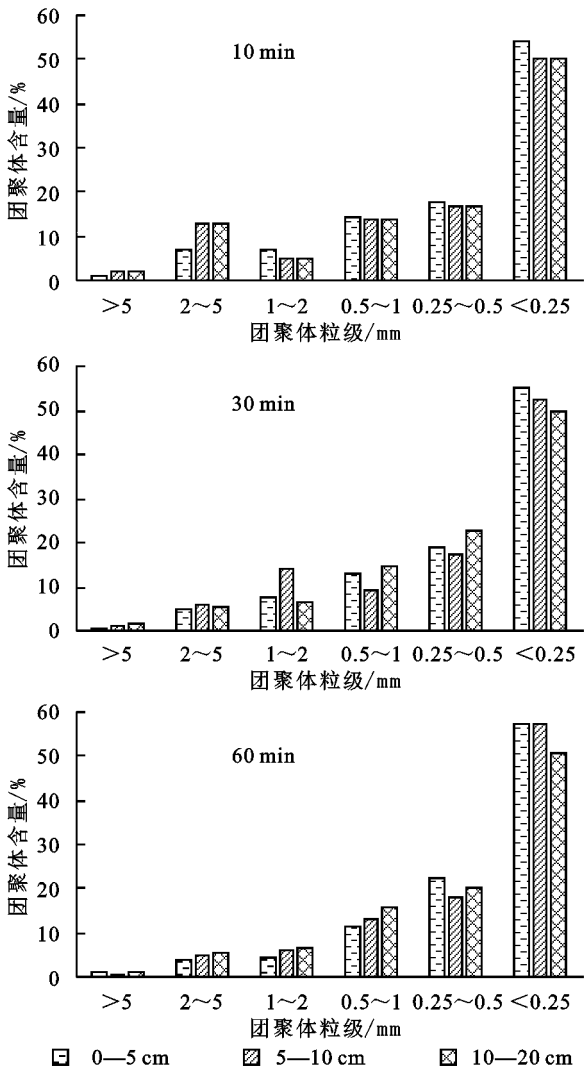


图 1 降雨强度为 16 mm/h 时不同降雨时长下

不同土层各粒级团聚体组成

当降雨强度为 43 mm/h 时,除降雨时长 10 min

时的 10—20 cm 土层,其他降雨时长及土层下 $<0.25$  mm 粒级团聚体含量均增加(图 2)。表明,当降雨达到一定时长后,较深土层团聚体含量才开始发生变化。降雨时长为 10 min 时,0—5 cm 和 5—10 cm 土层 $>2$  mm 团聚体明显减少, $<0.25$  mm 粒级团聚体含量所占比例增加,在 0—5 cm 土层含量最高,达到 58.30%。当降雨时长增加到 30 min 时, $<0.25$  mm 粒级团聚体在 5—10 cm 土层含量最高。降雨时长为 60 min 时, $<0.25$  mm 粒级团聚体在 10—20 cm 土层含量最高。说明,随着降雨时长的增加, $>0.25$  mm 的各粒级团聚体含量减小,而 $<0.25$  mm 粒级团聚体含量增加,且 $<0.25$  mm 粒级团聚体含量最高值所在的土层深度逐渐增加,微团聚体随雨水向下迁移。

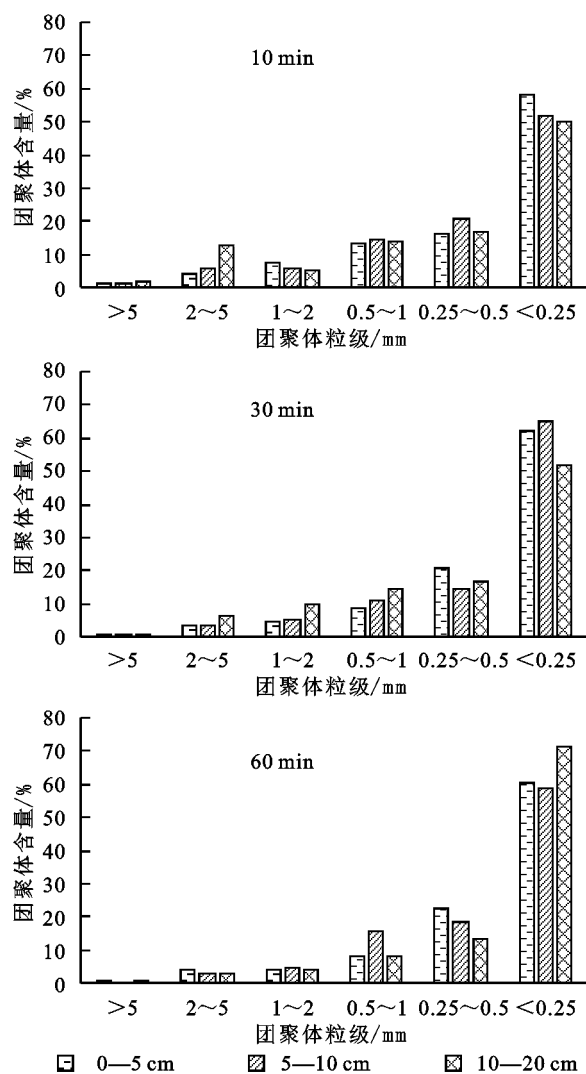


图 2 降雨强度为 43 mm/h 时不同降雨时长下不同土层各粒级团聚体组成

当降雨强度为 71 mm/h 时,随着降雨时长的增加, $>5$  mm 土壤团聚体含量明显减少, $<0.25$  mm 的土壤团聚体明显增多(图 3)。降雨时长为 10 min 时,10—20 cm 土层 $<0.25$  mm 的土壤团聚体含量为

49.95%,当降雨时长增加到 60 min 时, $<0.25$  mm 的土壤团聚体含量变为 75.51%,增加了 51%。表明,雨滴的打击和湿润促使大团聚体转化为微团聚体,并随雨水的入渗向下迁移。与供试土壤相比,3 个降雨时长下 0—5 cm 土层 $>5$  mm 土壤团聚体含量分别降低了 80%,95%和 93%, $<0.25$  mm 的土壤团聚体分别增加了 27%,46%和 42%,30 min 和 60 min 降雨时长下 $>5$  mm 土壤团聚体含量差异变化不大。说明,降雨 30 min 后,各土层 $>5$  mm 土壤团聚体含量趋于稳定。

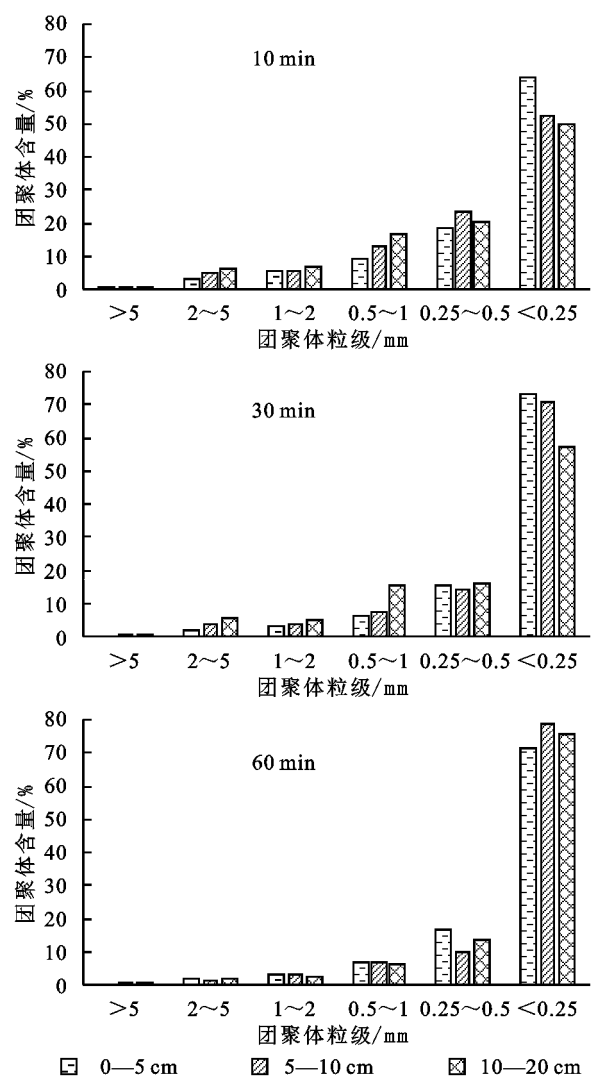


图 3 降雨强度为 71 mm/h 时不同降雨时长下不同土层各粒级团聚体组成

### 2.3 不同降雨强度下土壤团聚体特征

通过对比图 1—3 可以得出,同一降雨时长下,随着降雨强度的增加,3 个土层 $<0.25$  mm 的土壤团聚体含量均表现出增加的趋势, $>5$  mm 的土壤团聚体均表现出降低的趋势。不同降雨强度下耕层土壤团聚体分布不同,降雨强度越大,对团聚体影响越大,在 0—5 cm 土层表现最明显。



降雨时长 10 min 时,当降雨强度由 16 mm/h 增加到 43 mm/h,0—5 cm 土层 >5 mm 和 2~5 mm 粒级团聚体所占比例降低,<2 mm 的土壤团聚体含量增加,且以 1~2 mm 团聚体增加为主。5—10 cm 土层土壤团聚体含量在 43 mm/h 降雨强度下才开始出现变化,变化趋势与 0—5 cm 土层一致,但以 2~5 mm 粒级团聚体增加为主。由于湿润土层深度小于 10 cm,10—20 cm 土层团聚体含量在 16,43 mm/h 降雨强度下没有发生变化。当降雨强度增加到 71 mm/h 时,0—5 cm 土层 >0.5 mm 的各粒级土壤团聚体均降低,其中 >5 mm 的土壤团聚体所占比例降到 0.37%,明显低于前两个降雨强度;0.25~0.5 mm 土壤团聚体相比前两个降雨强度分别增加了 0.78% 和 2.28%,<0.25 mm 的土壤团聚体增加了 9.95% 和 5.47%。表明,随着降雨强度的增加,雨滴打击和雨水湿润作用增强,受影响土层深度增加,>5 mm 的土壤团聚体所占比例降低,微团聚体含量增加。

降雨时长为 30 min 时,与供试土壤相比,16 mm/h 降雨强度下,>5 mm 和 2~5 mm 粒级团聚体所占比例减少,且减少比例为 22%~61%,而 1~2 mm 粒级土壤团聚体所占比例增加最多;降雨强度由 16 mm/h 增加到 43 mm/h 时,>5 mm 和 2~5 mm 粒级团聚体含量继续减少,且 0—5 cm 土层 1~2 mm 粒级土壤团聚体含量也开始减少,说明 1~2 mm 粒级土壤团聚体破碎为小粒级团聚体或向下迁移。降雨强度继续增加到 71 mm/h 时,>0.5 mm 的各粒级土壤团聚体含量均呈减少趋势。说明,30 min 降雨时长下,随降雨强度增加,>2 mm 粒级的大团聚体含量逐渐减少,<0.25 mm 粒级土壤团聚体含量逐渐增多,且土壤团聚体受影响土层由 0—5 cm 土层逐渐向下扩展。

降雨时长为 60 min 时,在 3 种降雨强度下,0—5 cm 土层土壤团聚体含量变化趋势一致:>0.5 mm 的各粒级土壤团聚体含量减少,<0.5 mm 粒级土壤团聚体含量增加。降雨强度为 16 mm/h 时,5—10 cm 和 10—20 cm 土层以 <2 mm 粒级土壤团聚体含量增加,且以 1~2 mm 粒级土壤团聚体含量增加为主;降雨强度增加到 43 mm/h 时,5—10 cm 土层 <1 mm 粒级土壤团聚体含量开始增加。雨强增加到 71 mm/h 时,<0.25 mm 粒级土壤团聚体含量增加了 25%,>0.25 mm 的各粒级土壤团聚体均呈减少趋势,且以 2~5 mm 粒级团聚体含量减少为主,为 11%。说明此降雨时长下,随降雨强度的增加,土壤团聚体含量差异主要体现在 5—10 cm 和 10—20 cm 土层。

## 2.4 土壤团聚体稳定性

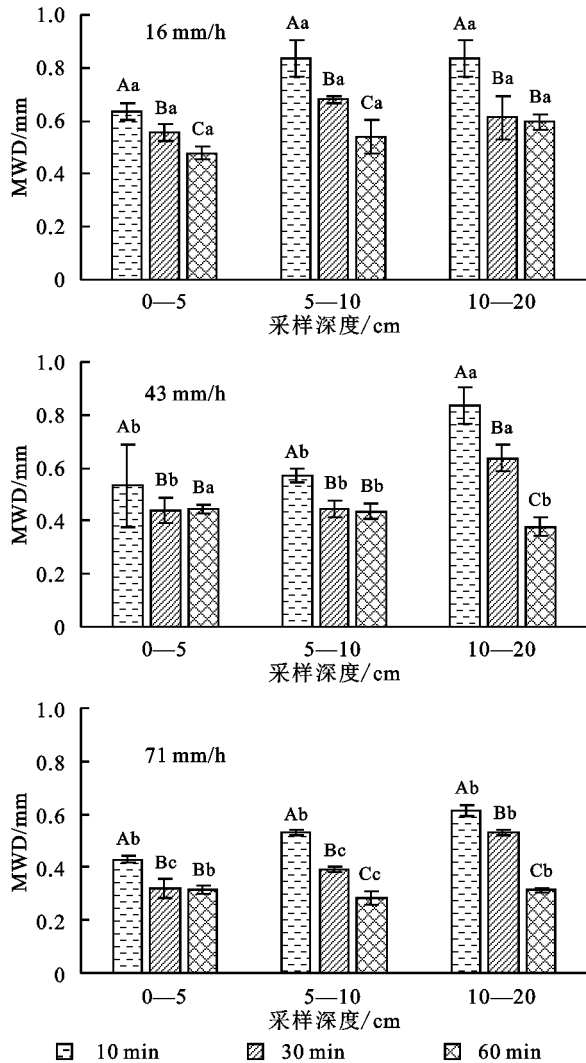
土壤团聚体是土壤结构的基本单元,土壤团聚体

的稳定性与土壤养分流失密切相关,MWD 是评价土壤团聚体稳定性的最重要指标,MWD 值越大,说明土壤团聚体的稳定性越大,土壤抗侵蚀能力也越强。

在降雨强度相同时,随着降雨时长的增加,土壤团聚体稳定性发生改变,且不同土层表现不一致(图 4)。降雨强度为 16 mm/h,降雨时长为 10 min 时,湿润土层深度小于 5 cm,土壤团聚体的 MWD 在 0—5 cm 土层变化较大,与供试土壤相比,由 0.84 mm 降到 0.64 mm,其他深度 MWD 无变化。降雨时长增加到 30 min 时,各土层 MWD 均有所降低,相比降雨时长 10 min 的 MWD 分别降低 13%,19% 和 27%。降雨时长继续增加到 60 min 时,0—5 cm 和 5—10 cm 土层的 MWD 比降雨时长 30 min 的 MWD 分别降低 14% 和 21%,但在 10—20 cm 土层变化不大。说明 30 min 和 60 min 降雨时长下 10—20 cm 土层土壤团聚体稳定性一致。降雨强度为 43 mm/h 时,在 10 min 降雨时长下,0—5 cm 和 5—10 cm 土层 MWD 比供试土壤分别降低 36% 和 31%,10—20 cm 土层无变化。降雨时长为 30 min 时,相比 10 min 降雨时长,各土层 MWD 均显著降低。当降雨时长达到 60 min 时,0—5 cm 和 5—10 cm 土层 MWD 与 30 min 降雨时长差异较小,但 10—20 cm 土层团聚体 MWD 进一步减小。表明,30 min 降雨时长后,0—5 cm 和 5—10 cm 土层土壤团聚体稳定性趋于一致。降雨强度为 71 mm/h,降雨时长 10 min 时,各土层团聚体 MWD 均显著降低,相比供试土壤分别降低 49%,37% 和 27%。降雨时长增加到 30 min 时,各土层团聚体 MWD 均呈降低趋势,且在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层显著降低。当降雨时长达到 60 min 时,各土层团聚体 MWD 值趋于一致。与 30 min 降雨时长相比,5—10 cm 和 10—20 cm 土层团聚体 MWD 均显著降低。表明,30 min 降雨时长后,仅 0—5 cm 土层土壤团聚体稳定性趋于一致。

降雨时长一致,随着降雨强度的增加,土壤团聚体的 MWD 也会发生变化。降雨时长 10 min 下,雨强由 16 mm/h 增加到 43 mm/h 时,0—5 cm 和 5—10 cm 土层团聚体 MWD 显著降低,降低比例达到 16% 和 31%。当降雨强度增加到 71 mm/h 时,10—20 cm 土层团聚体的 MWD 也开始发生变化,且相比前两个雨强显著降低。表明随降雨强度的增加,较深土层土壤团聚体稳定性逐渐发生显著变化。降雨时长 30 min 时,各雨强下各土层的 MWD 均呈降低趋势,其中 16 mm/h 和 43 mm/h 两个雨强下的 10—20 cm 土层 MWD 差异不显著,其余土层 MWD 均随雨强增大呈显著性变化。降雨时长 60 min,16 mm/h 和 43 mm/h 两

个雨强下 0—5 cm 土层 MWD 的值分别为 0.48, 0.45 mm, 差异不显著, 而 71 mm/h 雨强下的值为 0.32 mm, 显著降低。在 5—10 cm 土层, 随雨强强度增加, MWD 显著降低。在 10—20 cm 土层, 43, 71 mm/h 两个雨强下的 MWD 差异不显著, 但均与 16 mm/h 雨强下的 MWD 存在显著差异。说明, 雨强介于 43~71 mm/h, 土壤团聚体稳定性差异不显著。



注: 大写字母表示同一土层和降雨强度下不同降雨时长各指标在  $p < 0.05$  水平上差异显著性, 小写字母表示同一土层和降雨时长下不同降雨强度各指标在  $p < 0.05$  水平上差异显著性。

图 4 不同降雨强度、降雨时长及采样深度下土壤湿筛团聚体平均重量直径

### 3 讨论

(1) 土壤团聚体组成测定方法分析。土壤团聚体按大小可以分为大团聚体(直径  $> 0.25$  mm)和微团聚体(直径  $< 0.25$  mm), 按其抵抗水分散力的大小, 可分成水稳性团聚体和非水稳性团聚体。相比非水稳性团聚体, 土壤水稳性团聚体对土壤侵蚀影响较大, 能够反映土壤潜在抵抗水力侵蚀的能力, 是制约

土壤结构稳定性的重要因子, 因而更为重要<sup>[8,10]</sup>。干筛处理下所得到的团聚体是临时的稳定性团聚体, 湿筛处理后团聚体则表现为水稳性团聚体, 团聚体内闭蓄空气爆破所引起的破坏作用(即消散作用)和外力的机械作用的共同作用是湿筛处理下团聚体破碎的主要原因。正是由于团聚体破碎方式的不同, 导致干筛和湿筛方法处理下团聚体 MWD 差异较大<sup>[8]</sup>。

(2) 不同降雨特征对土壤团聚体分布的影响。不同降雨特征对土壤团聚体分布的影响不同。卢嘉等<sup>[8]</sup>研究发现, 随着降雨强度和时长的增强, 微团聚体的含量增加, 且随雨水迁移。本研究结果也得出, 随着降雨时长和强度的增加, 小团聚体和微团聚体数量增加。这主要是因为随着降雨时长和强度增加, 雨滴动能增强, 对土壤大团聚体的拆分作用增强, 导致土壤团聚体破碎程度增大, 较大的团聚体转化为小团聚体和微团聚体。在相同降雨强度下, 降雨时长为 10 min 时, 大的团聚体转化为小团聚体和微团聚体的现象仅在 0—5 cm 土层表现较为明显, 主要是因为降雨初期雨滴对土壤地表的作用较强; 随着时间推移, 团聚体的破碎程度增强<sup>[24]</sup>, 在 30, 60 min 降雨时长下, 各土层土壤团聚体均表现出大团聚体转化为小团聚体和微团聚体的现象, 且随降雨强度增大, 微团聚体含量增多并逐渐向深土层迁移。在相同降雨时长下, 整个耕层  $> 5$  mm 粒级的土壤团聚体含量随降雨强度的增加而减少, 在降雨初期降低最大, 10 min 降雨时长下团聚体含量降低 3.16%; 而  $< 0.25$  mm 的土壤团聚体含量随降雨强度的增加而增加, 在 60 min 降雨时长下增加了 60.83%, 且深土层含量大于表土层。土壤侵蚀过程中, 团聚体的迁移主要受两方面的综合影响: 一方面随着雨强增加, 雨滴打击裸露的土壤地表, 对土壤结构的破坏作用增强, 土壤的破碎程度增大<sup>[8,25-26]</sup>, 导致  $> 5$  mm 粒级的土壤团聚体破碎为粒径小的团聚体<sup>[27]</sup>, 且雨水的润湿作用也会促使土壤大团聚体快速崩解, 变成小团聚体; 另一方面, 受雨水重力的作用, 部分土粒向下迁移。本研究结果与卢嘉<sup>[8]</sup>、安娟<sup>[18]</sup>等的研究结果一致: 团聚体的迁移是团聚体破碎和径流搬运的耦合结果。本研究中径流搬运作用主要是地下径流, 而卢嘉<sup>[8]</sup>和安娟<sup>[18]</sup>等的研究中主要为地表径流。

(3) 不同降雨特征对土壤团聚体稳定性的影响。基于前人研究结果, 团聚体破碎呈现“两段式”的变化过程, 在降雨初期土壤团聚体会迅速裂解导致 MWD 剧烈下降, 随后破碎过程变缓, 仅有 MWD 的缓慢线

性下降,且这一过程通常在 20 min 即基本完成<sup>[28-30]</sup>。从我们的研究结果可以看到,在 71 mm/h 降雨强度下,0—5 cm 土层 MWD 随降雨时长的增加而迅速降低,降雨 30 min 后由原始土壤的 0.84 mm 降到 0.32 mm,之后趋于稳定。在 43 mm/h 降雨强度下表现出同样的规律,降雨 30 min 后 MWD 值降到 0.44 mm。但在较小降雨强度如 16 mm/h,随降雨时长的增加 MWD 值一直处于缓慢下降的过程。这主要是因为降雨强度较大时雨滴动能增加,对团聚体的拆分作用增强;相反雨强较小时,对团聚体的拆分作用减弱,大团聚体变为微团聚体的速度减慢<sup>[8,27]</sup>。

不同降雨特征下不同土层土壤团聚体 MWD 的变化不一致。降雨时长为 10 min 时,16 mm/h 的降雨强度下仅有 0—5 cm 土层的团聚体 MWD 迅速降低;43 mm/h 的降雨强度下 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的团聚体 MWD 迅速降低;71 mm/h 的降雨强度下各土层的团聚体 MWD 均降低。这说明在短时降雨时,随降雨强度增加,土壤团聚体 MWD 受影响深度增加,且主要受雨水湿润作用影响。10—20 cm 土层的 MWD 随降雨时间的增加而升高。土壤团聚体稳定性主要取决于 >1 mm 粒级团聚体含量<sup>[20]</sup>,降雨强度越大,降雨时间越长,微团聚体含量增加,MWD 值越低<sup>[8]</sup>。本研究结果表明在 71 mm/h 的降雨强度下,降雨 60 min 后各土层 MWD 值趋于稳定。

以上结果表明,随着降雨强度增加,耕作层土壤团聚体稳定性降低,因此需要采取耕作措施减少降雨对土壤团聚体的破坏作用,尤其是在降雨强度较大的季节。比如地表覆盖秸秆,不仅可以增加土壤有机质含量,还能促进土壤团聚体数量和稳定性的增加<sup>[30]</sup>。

## 4 结论

(1) 干筛法测定的供试土壤团聚体以 >5 mm 粒级为主;湿筛后 >1 mm 粒级的土壤团聚体较干筛法减少了 63.50%,其中 >5 mm 粒级的团聚体减少幅度最大,减小率达到 91.91%,说明湿筛处理下 >5 mm 粒级团聚体转化为小粒级的土壤团聚体,其反映了土壤团聚体的不稳定性和水分湿润对土壤团聚体的拆分作用。湿筛后 <0.5 mm 粒级土壤团聚体含量呈增加趋势,其中 <0.25 mm 的微团聚体含量最高,达到 50.23%,是干筛处理下的 2.41 倍。

(2) 随降雨强度和时长增加,土壤各粒级团聚体含量由 0—5 cm 土层到 10—20 cm 土层逐渐发生变化。在降雨初始阶段,以 0—5 cm 土层 >2 mm 粒级

团聚体含量减少为主,转化为小粒级团聚体;随着降雨强度和时间增加,5—10 及 10—20 cm 土层团聚体含量发生变化,微团聚体逐渐增多,团聚体由上层向下层迁移。

(3) 随降雨时长和降雨强度的增加,土壤团聚体 MWD 值逐渐减小,土壤团聚体稳定性降低,表现出雨滴打击和雨水湿润对团聚体的拆分作用。在 60 min 降雨时长下,降雨强度大于 43 mm/h 时,土壤团聚体 MWD 值随土层深度增加而降低,微团聚体发生迁移,降雨强度达到 71 mm/h 时,各土层土壤团聚体 MWD 趋于一致。

## 参考文献:

- [1] 张猛.干湿交替过程中土壤容重,水分特征曲线和热特性的动态变化特征[D].北京:中国农业大学,2017.
- [2] 杨成松,何平,程国栋,等.冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(Z2):2695-2699.
- [3] Bodner G, Scholl P, Loiskandl W, et al. Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties[J]. Geoderma, 2013,204-205(100):120-129.
- [4] Dexter A R. Internal structure of tilled soil[J]. Journal of Soil Science, 1976,27(3):267-278.
- [5] Ojeniyi S O, Dexter A R. Changes in the structure of differently tilled soil in a growing season[J]. Soil and Tillage Research, 1983,3(1):39-46.
- [6] 杨晓娟,李春俭.机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J].中国农业科学,2008,41(7):2008-2015.
- [7] 吴永波,刘爽.土壤压实对土壤性质及植物生长的影响[J].林业科技开发,2010,24(1):15-17.
- [8] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.东北黑土区土壤团聚体迁移特征的模拟降雨试验研究[J].水土保持通报,2012,32(6):6-10.
- [9] 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[J].土壤学报,2007,44(4):577-583.
- [10] 史奕,陈欣,闻大中.东北黑土团聚体水稳性研究进展[J].中国生态农业学报,2005,13(4):95-98.
- [11] 吴新亮.几种典型地带性土壤团聚体稳定机制及坡面侵蚀响应[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [12] 张光远,蔡崇法.黄绵土表层结皮的微形态特征及某些理化性质的研究[M]//晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集.北京:水利电力出版社,1990.
- [13] 蔡强国,王贵平,陈永宗.黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M].北京:科学出版社,1998.



[14]

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.

[15]

刘林林,王孝哲,郭祥胜,等.不同降雨强度条件下黄土边坡稳定性分析[J].人民珠江,2019,40(7):37-41,47.

[16]

Martinez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. Geomorphology, 2002,45(3):261-275.

[17]

李朝霞.降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀特点[D].武汉:华中农业大学,2005.

[18]

安娟,卢嘉,郑粉莉,等.不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J].水土保持学报,2011,25(6):100-104.

[19]

申艳,张晓平,梁爱珍,等.黑土坡耕地土壤流失形态分析:以一次降雨为例[J].干旱地区农业研究,2008,26(6):224-229.

[20]

刘娇.降雨侵蚀对土壤团聚体稳定性及碳氮矿化的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

[21]

Or D, Leij F J, Snyder V, et al. Stochastic model for post-tillage soil pore space evolution [J]. Water Resource Research, 2000,36(7):1641-1652.

[22]

Assouline S. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve[J]. Vadose Zone Journal, 2006,5(2):554-563.

[23]

Liu X, Lu S, Horton R, et al. In situ monitoring of soil bulk density with a thermo - TDR sensor[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(2):400-407.

[24]

石璞, Chiahue D Y,赵鹏志.间歇性降雨对土壤团聚体粒级及磷、铜、锌富集的影响[J].土壤学报,2021,58(4):948-956.

[25]

高学田,包忠漠.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-26,47.

[26]

陈晓燕,牛青霞,周继,等.人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J].水土保持学报,2010,24(5):163-168.

[27]

周一杨,王恩姮,陈祥伟.模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].水土保持学报,2008,22(6):176-179.

[28]

Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J]. European Journal of Soil Science, 2005,56(2):225-238.

[29]

Shi P, Thorlacius S, Keller T, et al. Soil aggregate breakdown in a field experiment with different rainfall intensities and initial soil water contents[J]. European Journal of Soil Science, 2017,68(6):853-863.

[30]

安娟,王富,吴元芝,等.北方土石山区土地利用方式对褐土团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2020,27(5):10-16.



(上接第 91 页)

[12]

王晓李,李叙勇,莫菲,等.基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法:概念与理论框架[J].生态学报,2010,30(20):5491-5500.

[13]

塔娜,王健,张慧荟,等.黄土耕作坡面溅蚀过程中微地形响应特征[J].水土保持通报,2016,36(1):110-114.

[14]

任志国,郭健,李爱光,等.元胞自动机最短路径算法优化[J].遥感学报,2015,19(1):108-115.

[15]

周成虎,孙战利,谢一春.地理元胞自动机研究[M].北京:科学出版社,1999.

[16]

李俊超,马倩,陶钧.基于 ArcGIS 的水文流域分析及应用[J].地理空间信息,2012,10(6):121-123,2,1.

[17]

田凯,李小青,鲁帆,等.坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J].中国水土保持,2010,31(4):44-47.

[18]

张光辉.国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J].水土保持学报,2000,14(3):112-115.

[19]

马廷,周成虎,蔡强国.不同植物篱坡面的土壤侵蚀过程 CA 模拟[J].地理研究,2006,25(6):959-966.

[20]

张娜娜,王兵,张宝琦,等.地表糙度测定方法研究[J].水土保持学报,2020,34(1):135-140,148.

[21]

王鹏飞,郑子成,张锡洲.玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):30-34.

[22]

郑子成,何淑勤,吴发启,等.地表糙度与水力糙率系数的关系[J].山地学报,2004,22(2):236-239.

[23]

王瑾杰,丁建丽,张喆,等.奎屯河流域春季融雪期 SCS-CN 模型参数取值方法[J].生态学报,2017,37(13):4456-4465.

[24]

赵龙山,宋向阳,梁心蓝,等.黄土坡耕地耕作方式不同时微地形分布特征及水土保持效应[J].中国水土保持科学,2011,9(2):64-70.