

前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响

马仁明^{1,2}, 蔡崇法^{1,2}, 李朝霞^{1,2*}, 王军光^{1,2},
冯君园^{1,2}, 吴新亮^{1,2}, 朱惠荣³

(1. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070;
3. 秭归县园林绿化管理所, 秭归 443600)

摘要: 为了探究前期含水率对南方红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响, 选取泥质页岩和第四纪红黏土发育的 4 个典型红壤为研究对象, 就 5 个前期含水率 (3%、5%、10%、15%、20%) 条件下 3~5 mm 团聚体水稳定性特征及其与溅蚀的关系进行了初步的探讨。结果表明, 消散作用是团聚体破碎最有效的机制, 土壤前期含水率越大, 团聚体破碎程度越小。随着前期含水率的升高, 泥质页岩发育的 2 种红壤水稳性团聚体平均质量直径 (MWD_{wa}) 显著增大; 第四纪红黏土发育的 2 种红壤水稳性团聚体平均质量直径 (MWD_{wa}) 先增大后减小, 拐点出现在含水率为 15% 条件下。泥质页岩发育 2 种红壤溅蚀量随前期含水率的升高显著减小; 第四纪红黏土发育 2 种红壤溅蚀量随前期含水率的升高呈现先减小后增大的趋势, 在含水率为 15% 时达到最小。团聚体水稳性较高的土样, 溅蚀粒径分布呈双峰曲线分布, 主要分布 1~0.5 和 <0.05 mm 范围内, 且前期含水率越高, <0.05 mm 溅蚀颗粒含量越大; 而团聚体水稳性较差的土样, 除前期含水率为 20% 外, 溅蚀粒径分布呈单峰曲线分布, 主要分布在 0.25~1mm。该结果为红壤区农业水土工程及机侵蚀机理研究提供一定的参考, 对完善坡面水蚀模型具有一定的参考价值。

关键词: 土壤; 含水率; 降雨; 团聚体稳定性; 溅蚀

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.013

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0095-09

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.

Ma Renming, Cai Chongfa, Li Zhaoxia, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 95-103. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤前期含水量是降雨入渗、产流和产沙的重要影响因子^[1-3]。Le Bissonais 和 Singer^[4]指出土壤在预湿润条件下可有效地降低结皮的生成, 极大地减小径流和细沟间侵蚀。降雨条件下, 前期含水量还与土壤抗剪强度及养分流失密切相关, 从而影响边坡稳定性及土地退化、地表水质、农业面源污染等问题^[5-6]。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元, 在侵蚀力作用下其稳定性对地表物质组成和结构变化、径流和泥沙特性具有显著作用^[7]。国外已有前期含水量对团聚体稳定性的相关研究, Truman^[8]选取了 5

种类型的土壤, 测定了每种土样下 3 个粒径团聚体在 3 种前期含水量下的团聚体水稳定性, 结果表明预湿润状态下的团聚体水稳性均高于风干状态下的团聚体水稳性, 但预湿润状态下的团聚体并未都表现出含水量越高其稳定性越大; Vermang^[9]测定了佛兰芒阿登地区的黄土团聚体在 3 种前期含水率下的团聚体水稳性, 得出团聚体水稳性随着含水量的增加。但也有研究表明增加含水量会降低团聚体抗张强度和土壤黏聚力^[10-11]。国内针对前期含水量对团聚体稳定性的影响研究相对较少, 王恩姮^[12]通过研究不同前期土壤含水量下机械压实黑土的团聚体干湿筛粒径分布特征, 发现低含水量时, 机械碾压在一定程度上能够促进土壤团聚体的团聚; 而在高含水量时, 机械碾压相对更易对黑土团聚体产生负效应, 加剧破坏、抑制团聚, 降低其水稳定性和机械稳定性。可见, 土壤前期含水量在农业生产及土壤侵蚀当中扮演了重要的角色, 然而由于测定手段及测定样品的差异, 前期含水量对团聚体稳定性的影响规律不尽相同。

溅蚀是降雨侵蚀的最初形式, 发生在降雨-土壤-

收稿日期: 2013-07-24 修订日期: 2014-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40930529)。

作者简介: 马仁明 (1986-), 男, 内蒙赤峰人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀机理与应用研究。武汉 华中农业大学资源与环境学院, 430070。

Email: marenming521@hotmail.com

*通信作者: 李朝霞 (1976-), 女, 湖北丹江口人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀和水土保持、土壤物理相关研究。武汉 华中农业大学资源与环境学院, 430070。Email: zxli@mail.hzau.edu.cn

径流的作用过程。前期含水率作为土壤的一个重要因素,它不仅影响到降雨径流侵蚀的速率^[13],还影响到土壤抵抗雨滴侵蚀分离的能力^[14-15]。赵晓光和吴发启^[16]通过研究不同含水量下黄壤土的击溅试验,得出土壤含水量越大,溅蚀开始越早,证明土粒分散由孔隙压力造成。Wuddivira 等^[17]在 2 种湿润速率和 3 个含水量相互组合条件下,对不同有机质含量和不同黏粒含量土壤进行降雨试验得出,在湿润速率较小的情况下,提高土壤含水量可有效降低土壤溅蚀率。

中国南方红壤丘陵区受季风气候所控制,一般具有高温多雨、干湿季明显的特点,降雨大部分集中在 3~6 月,且多暴雨,7、8 月份蒸发量大,而降水减少,造成水热不同步^[18]。在这种自然条件下势必会造成地表土壤水分在时间上的分布不均。目前关于含水量研究大多应用在全土条件下,较少的去关注含水量对团聚体稳定性的作用特征。而团聚体稳定性是南方红壤丘陵区坡面侵蚀过程的主控因子^[19],因此研究该区域次降雨作用下不同前期含水率(即初始含水率)对团聚体稳定性特征以及降雨溅蚀规律的影响十分必要,对于更好地揭示降雨作用下团聚体的破碎及输移规律,完善对降雨侵蚀子过程侵蚀机理的研究,有一定参考价值。

1 材料与方法

1.1 采样点及土样理化性质

供试土壤采集于湖北省咸宁市贺胜桥镇,该区域属亚热带季风湿润气候区,年均温 16.8℃,降水量 1 572 mm,地处江汉平原和鄂东南丘陵山地的过渡带。

该研究区成土母质以泥质页岩和第四纪红黏土为主,供试土样选择这两种母质发育下土地利用为茶园和林地且坡度<5°的 4 种红壤。文中分别用符号 *S* 和 *Q* 表示母质泥质页岩和第四纪红黏土。采样时按“S”形采集表层土(0~15 cm),每种土样在相应地块共计采集 5 个点、15 kg 左右。将土样置于塑料框内运回室内混合均匀后,一部分风干制样,用于基本性质的分析;另一部分过筛用于团聚体的制备,进行团聚体稳定性测定及降雨溅蚀特征分析。

土样性质分析:机械组成采用吸管法,容重采用环刀法,有机质采用重铬酸钾外加热法,阳离子交换量采用乙酸铵交换法。黏土矿物采用 X 射线衍射法测定,测定条件为:CuKα($\lambda=0.15406$ nm)辐射,测试电压 40 kV,测试电流 40 mA,步进扫描,速度为 10°/min,步长 0.01°。各供试土样基本理化性质详见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of soils

土样 Soils	机械组成 Particle-size distribution/(g·kg ⁻¹)			容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg ⁻¹)
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay			
S1	225.90±4.52	408.93±2.46	365.17±2.01	1.13±0.01	16.26±1.37	13.13±0.26
S2	285.50±9.65	374.73±9.49	339.77±2.34	1.34±0.03	19.01±0.87	10.15±0.08
Q1	157.11±7.57	435.43±16.12	407.46±6.62	1.28±0.01	8.69±2.13	14.80±0.76
Q2	128.27±5.15	392.31±13.60	479.42±1.72	1.19±0.05	12.21±1.76	16.28±0.76

注: S、Q 分别表示页岩和第四纪红黏土; 数字 1、2 分别代表土地利用类型为茶园和林地。

Note: S, Q represents Shale and Quaternary red soil, respectively; the numbers of 1 and 2 represent land use types for tea garden and forest land, respectively.

1.2 团聚体前期含水率的控制

为了获得试验设计的土壤质量含水量的团聚体,首先,干筛得到 3~5 mm 团聚体,置于 40℃ 的烘箱内烘干 24 h 以确定相同的含水量。称取 50 g 团聚体置于湿滤纸上进行慢速湿润,湿润过程中要控制土样的湿润速度,以防湿润速率过快而引起的消散破碎。同时,湿润过程中用软毛刷轻轻翻动团聚体,以保证团聚体水分分布均匀。待团聚体充分湿润后,此时含水量即为团聚体湿润的最终含水量,将团聚体转移至直径为 15 cm,高 1 cm,孔径为 0.25 mm 已知质量的筛盘上均匀铺平,静置于恒温(20℃)无风条件下的百分天平上,通过静置不同时间以达到试验设置的不同质量含水量。本研究所能达到的最大含水率即在慢速湿润作用下的充分湿润状态下的含水率(20%),在此条件下设定

5 个前期含水率,分别是风干条件下(3%)、5%、10%、15%和充分湿润条件下(20%)。

1.3 团聚体稳定性分析

土壤团聚体稳定性测定用湿筛法,即将不同前期含水率土样轻轻放入置于水桶中的套筛(孔径依次为 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm)顶部,2 min 后开动马达,使套筛在水中以上下移动距离为 4 cm,震荡速度为 30 次/min 的频率振动 0.5 h。然后使套筛离开水面,待水稍干后,用洗瓶冲洗留在筛上的团聚体,洗入已知质量的烧杯中,烘干称质量,精确至 0.01 g,每个处理重复 3 次。

团聚体水稳定性用平均质量直径(MWD_{wa})表示,平均质量直径越大,土壤团聚体越稳定。

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

式中： x_i 为筛分该粒级前后两个筛子孔径的均值，mm； w_i 为第 i 个粒径团聚体质量分数，%。

1.4 人工模拟降雨

人工模拟降雨器采用美国 SPRACO 公司生产的锥形喷头，喷头距地面垂直高度 4.75 m，供水压力 0.08 MPa，降雨强度由喷头数来控制，降雨动能约为等雨强天然降雨的 90%，均匀度为 0.9^[19]。按当地一年一遇暴雨频率，雨强控置为 60 mm/h。试验使用溅蚀盘由内环溅蚀盘和外环收集盘 2 部分组成，高 30 cm 的倒圆台形装置。外环直径 30 cm，高 30 cm，内环直径 15 cm，高 10 cm，外环与内环中间用玻璃胶填充为光滑斜面，斜面最低处连接出水口；溅蚀盘为直径为 15 cm、高 1 cm、孔径为 0.25 mm 的筛盘，放于内环上，下面连接一等直径漏斗便于盛接渗漏泥沙。此装置是在 Morgan 溅蚀盘基础上改进的^[20]。

将率定好前期含水率的团聚体置于溅蚀盘内环上，降雨前用挡板先盖在溅蚀盘上，待雨强稳定后撤走挡板并开始计时，降雨时间根据前期预试验设定为 45 min，以防表土结皮形成后表层水膜造成的影响。降雨过程中用洗瓶随时冲洗溅在外环收集盘上的团聚体颗粒，以防雨滴二次打击造成的破碎。将收集到的团聚体颗粒湿筛分级，即将团聚体洗入套筛（2、1、0.5、0.25 mm）中，轻轻振荡 10 次，小于 0.25 mm 团聚体用荷兰 Eyetech 激光粒度仪测定粒径分布（>0.2~0.25、>0.15~0.2、>0.1~0.15、0.05~0.1、<0.05 mm）。将湿筛分级后的团聚体颗粒烘干并用精确度为 0.01 的天平称质量。每个土样设置 3 个重复。

1.5 数据处理

采用 Excel2007 和 SPSS17.0 进行数据分析，方差分析运用 LSD（最小显著差数法）进行多重比较，显著水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

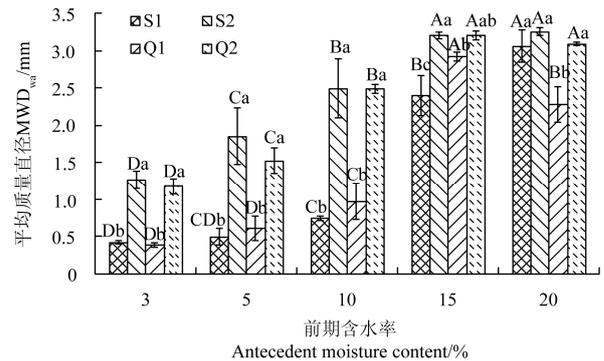
2.1 不同前期含水率条件下团聚体水稳性特征

2.1.1 团聚体平均质量直径变化特征

图 1 是不同前期含水率条件下 MWD_{wa} 分布。通过对比发现，2 种母质发育红壤 MWD_{wa} 随着前期含水率的升高表现出不同的变化趋势，S1 和 S2 MWD_{wa} 随含水率的升高逐渐增大，其中在 15% 和 20% 含水率条件下 MWD_{wa} 显著增大（ $p < 0.05$ ）。而 Q1 和 Q2 MWD_{wa} 随前期含水率的升高表现出先增大后减小的趋势，即在含水率为 15% 时最大。在含水量为 20% 条件下，S1 和 S2 团聚体水稳性相对含水率为 3% 条件下分别升高了 7.3 和 2.6 倍，Q1 和 Q2 团聚体水稳性在含水率为 15% 条件下相对

含水率为 3% 条件下分别升高了 5.8 和 2.6 倍，说明提高前期含水率，能显著增强 4 种土样团聚体水稳性，而值得注意的是 Q1 和 Q2 在前期含水率为 20% 条件下团聚体水稳性较含水率为 15% 条件下降低。

相同前期含水率条件下，S2 和 Q2 在 3%~10% 含水率条件下团聚体 MWD_{wa} 显著高于 S1 和 Q1（ $p < 0.05$ ）（图 1）。除含水率在 3% 和 20% 条件下以外，4 种土样团聚体稳定性顺序为 S2>Q2>Q1>S1。有研究得出红壤黏粒含量的升高会提高团聚体稳定性^[21]，但本研究中 S2 黏粒质量分数最少（34%），其高稳定性可能与有机质含量相对其他土样较高有关^[22]。



注：不同大写字母表示相同土样在不同含水率条件下平均质量直径差异显著，不同小写字母表示相同含水率条件下土样之间平均质量直径差异显著， $p < 0.05$ 。

Note: Different capital letters indicate difference of significance at $p < 0.05$ in mean weight diameter for the same soil at different antecedent moisture content and different small letters indicate difference of significance at $p < 0.05$ in mean weight diameter among soils at the same antecedent moisture content.

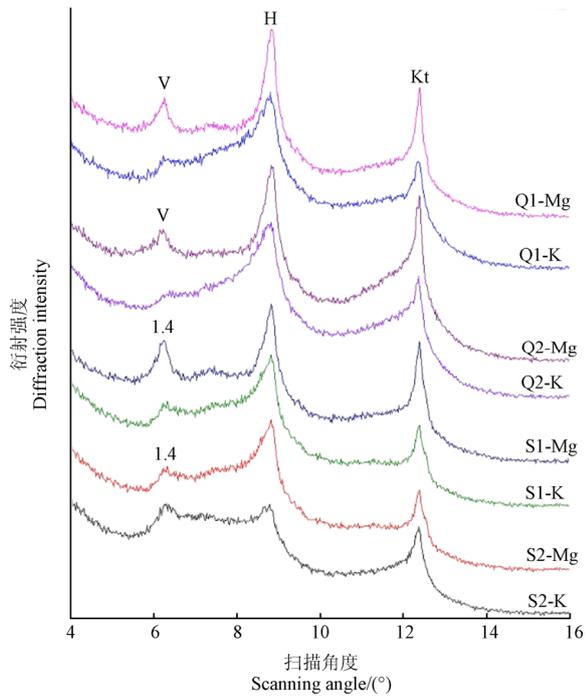
图 1 不同前期含水率条件下水稳性团聚体平均质量直径分布

Fig.1 Mean weight diameter of water-stable aggregates at different antecedent moisture content

Warkentin^[23]曾指出黏粒含量高的土壤其稳定性取决于黏粒的理化性质。供试 4 种土样的黏土矿物类型及相对质量百分含量见图 2 和表 2，通过对比镁-甘油饱和片与钾饱和片的衍射峰峰位与峰面积变化可判定，供试 4 种土样主要黏土矿物均为水云母和高岭石，但 Q1 和 Q2 分别含有 6% 和 3% 的 2:1 型膨胀性黏土矿物蛭石^[24]。

2.1.2 水稳性团聚体粒径分布特征

土壤水稳性团聚体数量和组成对土壤结构的稳定性具有重要作用，影响土壤通透性、抗蚀性，是土壤肥力的主要指标之一^[25]。从图 3 可以看出，含水率为 3% 条件下，土样 S2 和 Q2 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量高达 60%，而 S1 和 Q1 仅为 20%，显著低于 S2 和 Q2（ $p < 0.05$ ）。随着含水率的升高，团聚体大颗粒含量显著增加，当含水率达到 15% 时，4 种土样 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量均高于 80%。



注: -Mg 表示氯化镁-甘油饱和片, -Kt 表示氯化钾饱和片, K 代表高岭石, H 代表水云母, V 代表蛭石, 1.4 代表 1.4nm 过渡矿物。
 Note: -Mg represents glycerol solvated Mg-saturated (orientated) film, -Kt represents K-saturated (orientated) film, K=kaolinite, H=hydromica, V=vermiculite, 1.4= indicates 1.4 nm intergrademineral.

图 2 供试土样的黏土矿物的 X 射线衍射图谱
 Fig.2 Oriented X-Ray diffraction patterns for samples

表 2 供试 4 种土样黏土矿物相对质量百分含量
 Table 2 Relative content of clay mineral composition for samples

矿物类型 Types of clay mineral	S1	S2	Q1	Q2	%
蛭石 Vermiculite	0	0	6	3	
水云母 Hydromica	62	75	71	67	
高岭石 Kaolinite	26	22	23	30	
1.4 nm 过渡矿物 1.4 nm intergrademineral	12	2	0	0	

在含水率升高过程中, 4 种供试土样 >2 mm 水稳定团聚体含量逐渐增加, 其中母质为泥质页岩的土样在含水率为 20% 时 >2 mm 团聚体含量较含水率为 3% 时: S1 增加了 82%、S2 增加了 72%; 母质为第四纪红黏土的土样在含水率为 15% 时 >2 mm 水稳性团聚体含量较含水率为 3% 时: Q1 增加了 77%、Q2 增加了 73%, 在含水率 20% 时又分别减小 27.7% 和 4.4% (图 3)。而 0.25~0.5、>0.5~1、>1~2 mm 水稳性团聚体含量则有不同程度的变化, 但均未达到显著 ($p < 0.05$)。可见, 在本研究条件范围内, 提高团聚体前期含水率可有效减小小团聚体在水中的破碎程度, 增加大粒径水稳性团聚体含量。

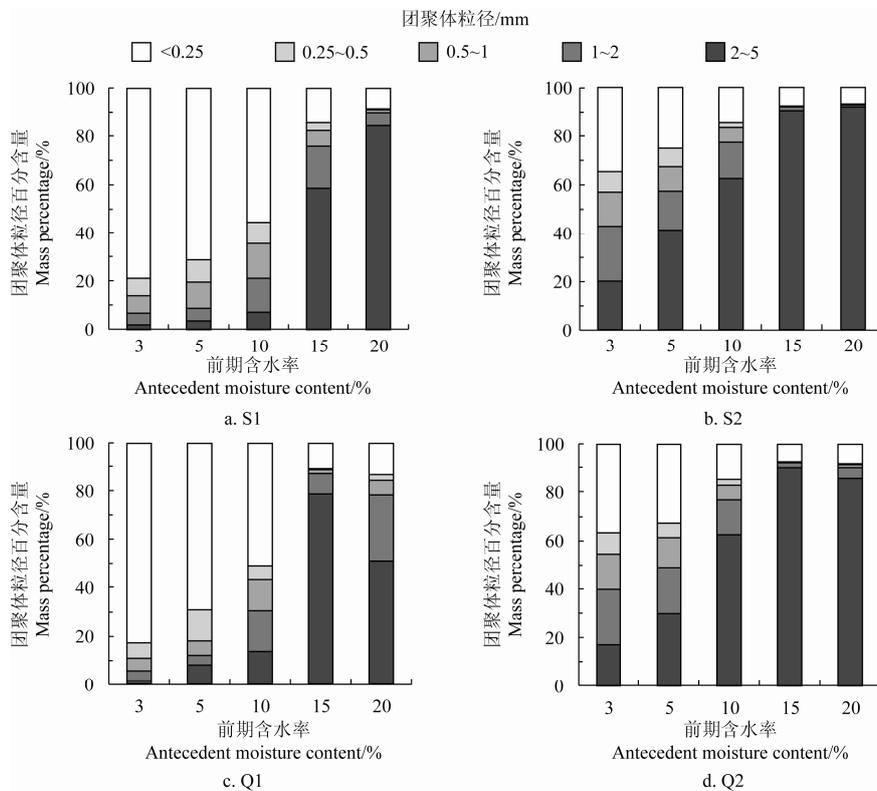
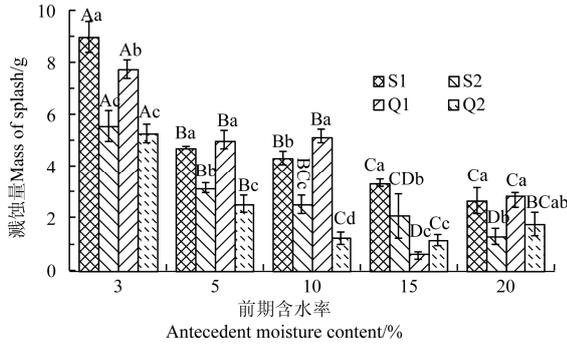


图 3 不同前期含水率条件下水稳性团聚体粒径分布
 Fig.3 Size distribution of water-stable aggregates at different antecedent moisture content

2.2 前期含水率对团聚体溅蚀的影响

2.2.1 溅蚀总量特征

降雨溅蚀过程中的土壤分离是雨滴作用力和表土之间的响应过程，本研究中降雨雨强及表面状况基本一致，雨滴分离过程主要受表土团聚体稳定性的影响。供试土样溅蚀量随着前期含水率的升高逐渐减小（图 4）。泥质页岩发育 2 种红壤溅蚀量在含水率为 20 % 时达到最小，而第四纪红黏土发育



注：不同大写字母表示相同土样在不同含水率条件下溅蚀量差异显著，不同小写字母表示相同含水率条件下土样之间溅蚀量差异显著， $p < 0.05$ 。
 Note: Different capital letters indicate difference of significance at $p < 0.05$ in mass of splash for the same soil at different antecedent moisture content and different small letters indicate difference of significance at $p < 0.05$ in mass of splash among soils at the same antecedent moisture content

图 4 供试土样在不同前期含水率条件下溅蚀量分布

Fig.4 Mass of splash for soils at different antecedent moisture content

2 种红壤溅蚀量呈现先减小后增大的趋势，即在含水率为 15% 最小，当含水率升高到 20% 时 Q1 溅蚀量显著增加，Q2 增加不显著。对于相同前期含水率而言，除含水率在 15% 外，S1 和 Q1 土样溅蚀量均显著高于 S2 和 Q2。

2.2.2 溅蚀颗粒粒径特征

溅蚀量的大小只能反映溅蚀为径流搬运提供的“物质量”的多少，而不能体现出溅蚀过程团聚体分离及输移能力。为此，通过对收集到的溅蚀颗粒粒径的分析，更能有效地阐明团聚体在不同前期含水率条件下的降雨溅蚀特征。试验结果表明，供试 4 种土样溅蚀颗粒在不同前期含水率条件下存在较为明显的峰值分布特征（图 5）。对于团聚体水稳性较低的 S1 和 Q1，溅蚀颗粒分布主要呈单峰曲线分布，除含水率为 20 % 下的 < 0.05 mm 外，溅蚀颗粒粒径主要分布在 0.25~1 mm 范围内，其中含水率在 3%~10% 范围内峰值分布尤为明显；而团聚体水稳性相对较高的 S2 和 Q2，溅蚀颗粒分布主要呈双峰曲线分布，溅蚀颗粒粒径主要分布在 1~0.5 和 < 0.05 mm 范围内，并且 < 0.05 mm 峰值明显高于 0.5~1 mm 峰值。随着前期含水率的升高，4 种土样溅蚀颗粒粒径分布均显示出由大粒径颗粒逐渐向小粒径颗粒过渡的趋势，而这种趋势对于 S2 和 Q2 更加迅速。

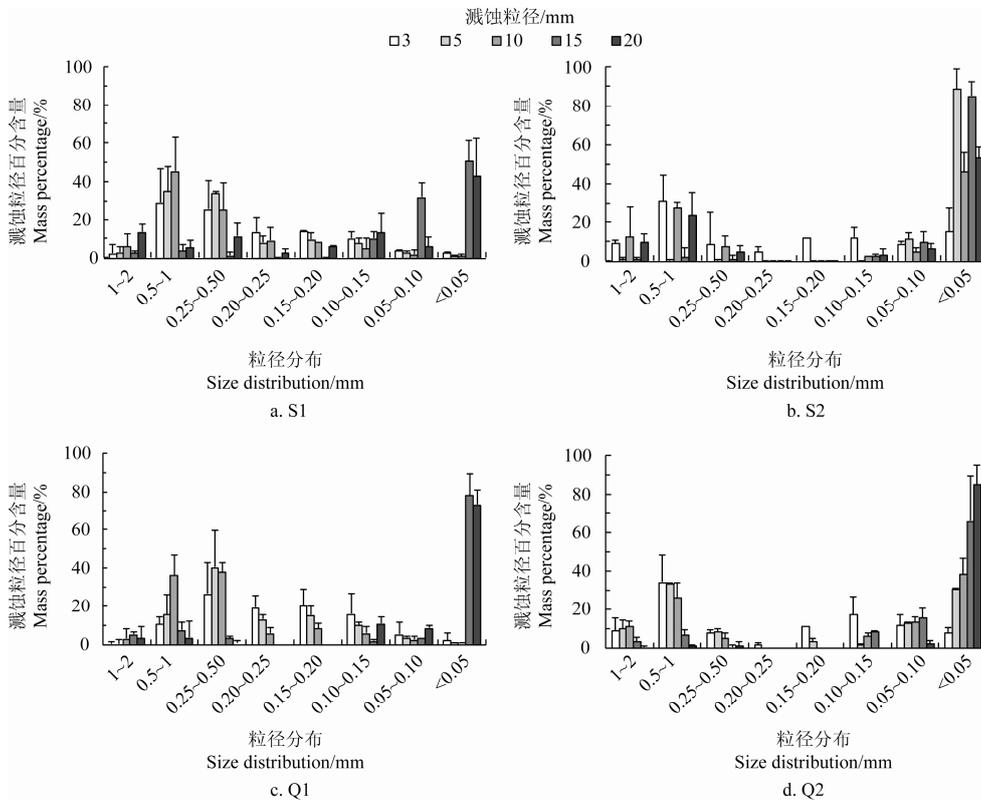


图 5 不同前期含水率条件下溅蚀粒径分布

Fig.5 Size distribution of splash at different antecedent moisture content

3 讨论

土壤团聚体破碎方式包括消散作用(快速湿润条件下空气被压缩产生的应力而引起破碎)、机械外力作用(雨滴打击、径流剪切等)、土壤矿物湿润后非均匀膨胀引起的破裂^[26]。本研究中,团聚体在低含水率条件下团聚体内部空气含量相对丰富,当把团聚体放入套筛的瞬间,土壤团聚体破碎主要是由于快速湿润引起的消散作用。有研究证明,消散作用下团聚体的破碎更加剧烈,且快速湿润引起的消散作用为该区域红壤团聚体的主要破碎机制^[27]。随着前期含水率的升高,团聚体内部空气被慢速湿润过程中的水分逐渐排出,导致消散作用逐渐减弱,湿筛过程中的破碎力主要以机械作用和土壤矿物湿润后非均匀膨胀的作用为主,因此四种土样 MWD_{wa} 及水稳性大团聚体含量随含水率的增加而增大(图1、图3)。

在前期含水率为20%条件下,Q1和Q2水稳性团聚体粒径主要分布(大于80%)在 >0.25 mm范围内,较前期含水率为3%~10%条件明显增加,消散作用明显减弱。有研究表明土壤矿物对黏粒分散具有重要的影响,从而会影响团聚体的稳定性^[28]。本研究中Q1和Q2含有少量的2:1型膨胀性黏土矿物蛭石(表2),据此可判断Q1和Q2团聚体稳定性的降低是由于高含水条件下(20%)黏粒膨胀性造成不均匀胀缩^[29-30],加之前期含水率的提高造成土壤黏聚力和内摩擦力减小^[31],从而导致的土壤颗粒间作用力减弱。

本研究中雨水可从溅蚀盘筛孔直接流出,基本没有薄层积水,所以不考虑薄层水膜对溅蚀的影响。团聚体稳定性影响土壤分离、搬运、水文入渗和结皮等过程^[32],特别是易形成结皮的红壤,团聚体稳定性对雨滴溅蚀的影响更为明显^[33]。前期含水率的升高改善了团聚体的稳定性,团聚体在降雨过程中破碎程度减弱,因而破碎后大团聚体分布较多,可提供溅蚀的物质就减少^[20]。

研究表明,在雨强及降雨动能一定的条件下,溅蚀过程中雨滴对土壤颗粒具有分选特性,而这一特性主要取决于表土颗粒粒径分布及表土结构^[34-35],而雨滴对迁移小粒级团聚体具有优先选择性^[36]。综合团聚体水稳性测定结果(图3),在前期含水率为3%~10%条件下,S1和Q1 <1 mm的水稳性团聚体质量分数高达80%~90%,S2和Q2仅为40%~60%,为溅蚀作用提供了大量的可迁移的物质;另一方面,由于S2和Q2具有较高的水稳性,加之大粒径水稳性团聚体含量较高,可以判断S2和Q2在降雨过程中表土具有较多的大孔隙结构,小粒级团聚体

容易随水流下渗到底层,而不容易被雨滴迁移^[37],因此在这种情况下0.5~1 mm溅蚀颗粒含量相对较高。S1和Q1团聚体破碎程度剧烈,表土结构较致密,小粒径颗粒尽管不易随水流下渗,但随着表层密实度增大,以及在水分的作用下土壤颗粒间黏结力增大,反而抑制了雨滴对小粒级团聚体的分选作用^[38],因此溅蚀颗粒主要集中在0.15~1 mm。在含水率为15%~20%条件下,团聚体稳定性显著提高,水稳性团聚体主要集中在2~5 mm(图3)。尽管表层结构疏松,但仍有部分小粒径颗粒分布在表层,加之雨滴能量的限制,不能搬运大粒径团聚体,因此雨滴对土壤颗粒的分选相对集中在 <0.05 mm。

4 结论

1) 前期含水率对团聚体稳定性的影响主要体现在团聚体破碎机制不同,低含水率条件下的团聚体破碎机制主要是快速湿润引起的消散作用,随着前期含水率的升高,团聚体破碎机制以机械作用和土壤矿物湿润后非均匀膨胀作用为主。消散作用是引起团聚体破碎的最有效的机制。

2) 泥质页岩发育的2种红壤其团聚体水稳性随前期含水率的升高而显著增大;第四纪红黏土发育的2种红壤由于其黏粒中含有少量2:1型膨胀性黏土矿物,其团聚体水稳性随着前期含水率的升高呈现先增大后减小的趋势,团聚体水稳性在含水率为15%时最大。

3) 团聚体前期含水率对降雨溅蚀量影响显著。泥质页岩发育2种红壤溅蚀量随前期含水率的升高显著减小;第四纪红黏土发育2种红壤溅蚀量随前期含水率的升高呈现先减小后增大的趋势,在含水率为15%时达到最小。降雨过程中,前期含水率对团聚体破碎后粒径分布和表土结构产生重要影响,从而影响雨滴对土壤颗粒的分选特性。

该研究初步确定了咸宁贺胜桥镇4种红壤团聚体在不同前期含水率条件下的破碎机制和稳定性的变化趋势,为南方红壤地区水土管理和侵蚀研究提供参考。土壤含水量和团聚体稳定性的模拟以及水蚀过程的物理模型还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Defersha M B, Melesse A M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio[J]. *Catena*, 2012(90): 47-52.
- [2] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 65-68.

- Wang Hui, Wang Quanjie, Shao Mingan. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 65—68. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 23—29.
- Zhang Xiangyan, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Effects of antecedent soil moisture on hillslope runoff-generation and soil erosion over red soil-mantled landscapes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 23—29. (in Chinese with English abstract)
- [4] Le Bissonnais Y, Singer M J. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1898—1903.
- [5] 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对黄土坡面氮磷流失的影响及最优含水量的确定[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1571—1578.
- Wang Hui, Wang Quanjie, Shao Mingan. Effect of antecedent soil moisture on Nitrate-N and Phosphorus loss from loess slope-land and determination of optimal moisture values[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(8): 1571—1578. (in Chinese with English abstract)
- [6] 赵晓光, 石辉. 水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 12—16.
- Zhao Xiaoguang, Shi Hui. Prescription of soil anti-erosion capability under water erosion[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 12—16. (in Chinese with English abstract)
- [7] Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1992—1999.
- [8] Truman C C, Bradford J M, Ferris J E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown[J]. Soil Science Society of American, 1990, 54(5): 1385—1392.
- [9] Vermang J, Demeter V, Cormeyer W M, et al. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil[J]. Soil Science Society of American, 2009, 73(3): 718—726.
- [10] Kemper W, Rosenau R. Soil cohesion as affected by time and water content[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(5): 1001—1006.
- [11] Munkholm L J, Kay B D. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 702—709.
- [12] 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[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 241—247.
- Wang Hengen, Zhao Yusen, Chen Xiangwei. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 241—247. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wei Linhong, Zhang Bin, Wang Mingzhu. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94: 54—62.
- [14] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 5—10.
- Zhang Yubin, Zheng Fenli. Effects of near-surface soil water conditions on soil erosion process[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(2): 5—10. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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, 2008, 17(1): 397—402.
- Liu Zhenbo, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Effect of antecedent soil moisture on soil erodibility using simulation rainfall[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 397—402. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵晓光, 吴发启. 单雨滴击溅规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 43—49.
- Zhao Xiaoguang, Wu Faqi. Single raindrop splash law and its selection role on soil particles splashed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 43—49. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wuddivira MN, Stone RJ and Ekwue E I. Clay, organic matter, and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 226—232.
- [18] 何园球, 孙波. 红壤质量演变与调控[M]. 科学出版社, 2008: 3.
- [19] Shi Zhihua, Yan Fengling, Li Lu, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical china[J]. Catena, 2010, 81(3): 240—248.
- [20] 马仁明, 王军光, 李朝霞, 等. 降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 779—785.
- Ma Renming, Wang Junguang, Li Zhaoxia, et al. Effects of aggregate sizes change of red soils on splash erosion

- under rainfall[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(6): 779—785. (in Chinese with English abstract)
- [21] Yan Fengling, Shi Zhihua, Cai Chongfa, et al. Wetting rate and clay content effects on interrill erosion in ultisols of southeastern china[J]. Pedosphere, 2010, 20(1): 129—136.
- [22] Goebel M O, Bachmann J, Woche SK, et al. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter[J]. Geoderma, 2005, 128: 80—93.
- [23] Warkentin B. Clay soil structure related to soil management[J]. Tropical Agriculture, 1982: 59.
- [24] 李学垣. 土壤化学及实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 229—235.
- [25] 陈安强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 108—113.
- Chen Anqiang, Zhang Dan, Xiong Dongyuan, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 108—113. (in Chinese with English abstract)
- [26] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425—437.
- [27] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面水流中不同层次红壤团聚体剥蚀程度研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 78—84.
- Wang Junguang, Li Zhaoxia, Cai Chongfa, et al. Research of red soil aggregate abrasion degree of different layers in overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 78—84. (in Chinese with English abstract)
- [28] Lado M, Ben-Hur M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss[J]. Applied Clay Science, 2004, 24(3/4): 209—224.
- [29] 张晓媛, 范昊明, 杨晓珍, 等. 容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 214—218.
- Zhang Xiaoyuan, Fan Haoming, Yang Xiaozhen, et al. Effects of soil bulk density and water content on hydrostatic disintegration rate of sandy clay loam[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 214—218. (in Chinese with English abstract)
- [30] Six, J, Elliott, ET, Paustian, K, et al. Soil structure and organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000(64): 1042—1049.
- [31] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 21—25.
- Chen Hongxing, Li Fahu, Hao Shiling, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [32] Leguédou S, Le Bissonnais Y. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(9): 1117—1129.
- [33] 李朝霞, 王天巍, 史志华, 等. 降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 1—4, 9.
- Li Zhaoxia, Wang Tianwei, Shi Zhihua, et al. Relationship between top soil structure changes and erosion process of red soil under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 1—4, 9. (in Chinese with English abstract)
- [34] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005, 124(3): 279—292.
- [35] Wan Y, El-Swaify S. Characterizing interrill sediment size by partitioning splash and wash processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(2): 430—437.
- [36] Sutherland R, Wan Y, Lee C T, et al. Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an oxisol[J]. Catena, 1996, 26(3): 187—208.
- [37] Poesen J, Savat J. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash: Part ii detachability and transport ability measurements[J]. Catena, 1981, 8(1): 19—41.
- [38] 高学田, 包忠谟. 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.
- Gao Xuétian, Bao Zhongmo. Study on effects of rainfall and soil structure on raindrop splash[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 24—26, 47. (in Chinese with English abstract)

Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozem

Ma Renming^{1,2}, Cai Chongfa^{1,2}, Li Zhaoxia^{1,2*}, Wang Junguang^{1,2},
Feng Junyuan^{1,2}, Wu Xinliang^{1,2}, Zhu Huirong³

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation, Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 2. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Administrative Office of Landscape Greening, Zigui 443600, China)

Abstract: Rainfall splash erosion, usually the first step in soil loss and sediment transport, is a critical process in hillslope water erosion. It is recognized that antecedent moisture content influences the re-aggregation of soil particles and their subsequent enhanced ability to resist exogenic soil erosional forces. The purpose of this study was to determine the effect of antecedent moisture on aggregate stability and splash for Ustisols in subtropical China. Four soil samples derived from Shale and Quaternary red soil and five antecedent moisture contents (3 %, 5 %, 10 %, 15 %, and 20 %) were tested in this study. Effects of antecedent moisture on aggregate stability and splash erosion were discussed based on the analysis of aggregate water stability using wet-sieving method and rainfall simulation with an intensity of 60 mm/h for 45 minutes in laboratory. Mean weight diameter of aggregate water stability (MWD_{wa}) was used as the aggregate stability index. The fragments splashed out were measured by wet sieving with sieves of 2.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, respectively. And fragments less than 0.25 mm in size were then measured by a laser diffraction sizer in five classes (0.2-0.25 mm, 0.15-0.2 mm, 0.10-0.15 mm, 0.05-0.10 mm, and < 0.05 mm). The results showed that aggregate water stability significantly increased with increasing antecedent moisture content and slaking was the most efficient breakdown mechanism. With the increase of antecedent moisture content, MWD_{wa} values of the soils derived from Shale significantly increased. However, the MWD_{wa} values of soils derived from Quaternary red clay increased initially then decreased, with the most stable value at the moisture of 15%. With antecedent moisture content increasing, the total mass of splash for soils derived from Shale decreased, but decreased first then increased for soils derived from Quaternary red clay, with a minimum value at the moisture of 15%. The size-selectivity was determined by the size distribution and surface structure at different antecedent moisture contents. For more stable soils, size distribution of the splashed fragments is bimodal with a major peak at 1-0.5 mm and < 0.05 mm. For less stable soils, size distribution of splashed is unimodal with a large peak at 1-0.25 mm except the ones at the moisture of 20 %. The results can provide a reference for agricultural water-soil engineering and water erosion mechanisms of Ustisols, which has great significance for improving soil erosion models.

Key words: soils; moisture; rainfall; aggregate stability; splash erosion

(责任编辑: 曾懿婷)