

红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响

郭 伟¹ ,史志华^{1 2,*} ,陈利顶² ,李朝霞¹ ,闫峰陵¹ ,蔡崇法¹

(1. 华中农业大学 农业部亚热带农业资源与环境重点实验室 ,武汉 430070 ;

2. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室 ,北京 100085)

摘要 :以湖北省咸宁市的 3 种典型红壤为研究对象 ,利用试验土槽 ,采用室内人工模拟降雨方法 ,研究土壤团聚体粒径对坡面径流和侵蚀的影响以及泥沙特性。结果表明 ,在前期含水量、坡度一致的条件下 ,随着团聚体粒径的增大其稳定性减小 ,坡面初始产流时间缩短 ,侵蚀量也随着团聚体粒径的增大而减小 ,供试 3 种土壤中 <2mm 团聚体侵蚀量最大 ,依次为 3.40、2.55、3.33 g m⁻² min⁻¹。侵蚀泥沙平均重量直径随着坡面表土团聚体初始粒径的增大而减小。研究结果有助于深入了解坡面侵蚀机理 ,为泥沙输移模型开发提供必要的土壤参数。

关键词 红壤 ,团聚体粒径 ,坡面侵蚀 ,径流 ,人工模拟降雨

文章编号 1000-0933 (2007)06-2516-07 中图分类号 S154.1 S155 S157 S181 文献标识码 A

Effects of topsoil aggregate size on runoff and erosion at hillslope in red soils

GUO Wei¹ ,SHI Zhi-Hua^{1 2,*} ,CHEN Li-Ding² ,LI Zhao-Xia² ,YAN Feng-Ling¹ ,CAI Chong-Fa¹

1 Key Laboratory of Subtropical Agriculture & Environment ,Huazhong Agriculture University ,Wuhan 430070 ,China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology ,Research Center for Eco-Environmental Sciences ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100085 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (6) 2516 ~ 2522.

Abstract : The red soil hilly region ,located in the tropical and subtropical zones of Southeast China ,consists of 9 provinces and 1 autonomous region. The area of region is about 1.13 million km² ,and hold 30% of the population. Because it has plentiful light ,heat and water resources ,the red soil hilly region has a high potential for agricultural and economic development. However ,soil erosion and seasonal drought are major constraint for sustainable agriculture due to improper land use and uneven distribution of rainfall. Efficient rainfall use and erosion control ,therefore ,are very advantageous from eco-environmental and agricultural perspectives. Soil aggregate stability has substantial effects on soil porosity and ,therefore ,may influence infiltration rate and runoff processes under rainfall. The objects of this study were to investigate the relationship between aggregate size and soil aggregate stability and determine the effect of aggregate size on runoff and soil loss. In this study ,three red soils derived from Quaternary clay were studied. Aggregate size <2 ,2 to 3 ,3 to 5mm of each soil were exposed to simulated rainfall with an intensity of 60mm h⁻¹. The Le Bissonnais' method was applied to simulate the breakdown mechanisms of slaking in fast wetting ,and mechanical breakdown by wet stirring. The aggregate stability index ,normalized mean weight diameter (NMWD) ,indicated that fast wetting caused the most severe disruption to aggregates. The NMWD in the fast wetting treatment ranked in the order of aggregate size <2mm ,2mm to 3mm ,and 3mm

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40401034 #40501040)

收稿日期 2006-12-05 ;修订日期 2007-03-16

作者简介 郭伟 (1980 ~) ,男 ,山西隰县人 ,硕士生 ,主要从事土壤侵蚀机理研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail :pengshi@mail.hzau.edu.cn

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40401034 and 40501040)

Received date 2006-12-05 ;**Accepted date** 2007-03-16

Biography GUO Wei ,Master candidate ,mainly engaged in soil erosion.

to 5mm. There was a significant interaction between soil loss , runoff rate and aggregate size. The results showed that as clod size increased , the runoff rate decreased , ranging from 0.36 to 0.62mm min⁻¹. The small aggregate size is likely to form a seal , consequently , the soil loss increased with decreasing aggregate size. The largest MWD of sediment materials were found in aggregate size <2mm of each soil.

Key Words : reds soil ; aggregate size ; soil erosion ; runoff ; simulated rainfall

土壤侵蚀是导致土地资源退化、土壤质量下降、生态系统受损的主要原因之一^[1]。计算土壤流失量是合理利用和管理土地资源的重要科学依据,在计算土壤流失量时,土壤可蚀性是土壤侵蚀预报模型中的必要参数^[2]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其粒径分布决定着孔隙的数量搭配和形态特征以及对外界应力的敏感性^[3]。而土壤孔隙特征(如孔隙度、孔径分布、连接度等)影响水分在土表及土体内的运移方式和途径,与地表径流间有密切关系。地表径流则是表征土壤侵蚀的重要指标^[4],因此,土壤团聚体与土壤可蚀性之间存在着必然的内在联系。虽然对土壤团聚体与可蚀性之间关系已进行了较多研究,但综合看来,已有研究主要采用径流小区或室内模拟的方法针对全土进行^[5-8]。土壤是由大小不同团聚体或单粒复合而成,这些粒径不同团聚体在降雨过程中稳定性差异显著,而目前关于团聚体大小对坡面侵蚀过程的作用研究甚少。我国红壤丘陵区地处热带、亚热带,面积 113 万 km², 水热资源丰富,是我国重要的农业生产区域。由于土地资源的不合理开发与利用,土壤侵蚀退化已成为本区农业生产严重障碍。有鉴于此,本研究选取第四纪粘土发育的 3 种典型红壤作为研究对象,通过人工模拟降雨,定量研究团聚体大小对坡面侵蚀过程的影响,探讨坡面侵蚀机理,以期能为土壤侵蚀过程模拟提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品

供试土样取自湖北省咸宁市境内,该市位于东经 114°06′~114°43′,北纬 29°39′~30°02′,为亚热带季风湿润气候区,年均温 16.8℃,降水量 1572mm,4~8 月份降水占年降雨量的 70%。咸宁地处江汉平原和鄂东南丘陵山地的过渡带,成土母质以第四纪粘土和泥质类页岩为主,土壤类型主要有红壤和水稻土。植被有常绿阔叶林、落叶阔叶林及针叶林。

根据研究区土壤特性,选择有代表性的 3 种土壤,每种土壤取表层(0~15cm)原状土,风干后用干筛法筛出<2mm、2~3mm、3~5mm 三级团聚体供试。试验点基本情况及土壤性质见表 1,土壤性质分析采用常规方法,即有机质采用重铬酸钾外加热法,容重采用环刀法,机械组成采用吸管法^[9]。

表 1 试验地点基本情况及土壤性质
Table 1 Basic soil properties of studied field

土壤代号 Soil code	母质 Parent material	容重 (g cm ⁻³) Soil density	有机质 (g kg ⁻¹) Organic mater	机械组成 (g kg ⁻¹) Mechanical composition		
				砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
QP1	第四纪粘土 Quaternary clay	1.21	15.4	152	497	351
QP2	第四纪粘土 Quaternary clay	1.13	22.7	107	307	586
QP3	第四纪粘土 Quaternary clay	1.19	17.4	96	463	441

1.2 人工模拟降雨

人工模拟降雨器采用美国 SPRACO 锥形喷头,喷头距地面垂直高度 4.75m,供水压力 0.08MPa,降雨强度由喷头数来控制,本试验控制在 60mm h⁻¹左右,模拟降雨动能约为等雨强天然降雨的 90%,均匀度约 0.9^[10]。坡面降雨试验采用冲蚀槽,规格为 60cm×30cm×30cm,坡度控制在 15°,在冲蚀槽的下端径流出口处安装“V”型钢槽收集径流,并在土槽两侧设置 5cm 的缓冲带。冲蚀槽底板均匀打孔,便于土壤水分自由渗透。

冲蚀槽填土根据采样点耕作层和犁底层的容重分别填 20cm 和 10cm 两层 ,QP1、QP2、QP33 种供试土壤耕作层的容重分别为 1.21、1.13、1.19 g cm⁻³ ,犁底层容重分别为 1.66、1.47、1.58 g cm⁻³。降雨前湿润土壤 ,控制其含水量为 10%。降雨持续时间为坡面产流后 1h ,其间每 6min 采集 1 次径流样 ,用烘干法测定泥沙量 ,同时记录径流体积。各个粒径降雨重复 3 次 ,因此 ,实际有效降雨 27 场。

1.3 土壤团聚体稳定性分析——Le Bissonais 法^[1]

首先 ,将干筛法筛出的 <2mm 2~3mm 3~5mm 三级团聚体置于 40℃ 的烘箱内烘 24h ,使团聚体土壤含水量一致后进行以下两种处理 : (1)快速湿润 (Fast Wetting , FW) ,取 5g 团聚体浸没在盛有 50ml 去离子水的 250ml 烧杯中 ,10min 后用移液管把水吸掉 ; (2)预湿润后震荡 (Wet Stirring , WS) ,取 5g 团聚体浸没在盛有 50ml 酒精的 250ml 锥形瓶中 ,10min 后用移液管把酒精吸掉 ,然后加水至 200mL ,用橡皮塞把锥形瓶塞紧 ,上下颠倒 20 次 ,静置 30min 使粗分散体沉淀 ,用吸管吸去多余的水 ;其次 ,将已湿润处理的土壤移到浸没在酒精中的 50μm 孔径筛子中 ,上下震荡 20 次 (幅度 2cm) ,再把筛子放入 40℃ 烘箱至酒精蒸发完 ,最后将土壤移至已编号称重的铝盒中 ,在 40℃ 下烘干 ,称重。将烘干土壤通过一组孔径依次为 3、2、1、0.5、0.25、0.1mm 和 0.05mm 的筛子 ,称重得到每个粒径的破碎团聚体。

团聚体稳定性一般采用平均重量直径 (MWD)表示 (式 1) ,本文为使不同粒径团聚体稳定性具有可比性 ,采用 Zhang^[12]等提出的标准化平均重量直径 (式 2) :

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \tag{1}$$

$$NMWD = \frac{MWD}{r_{max} - r_{min}} \tag{2}$$

式中 r_i 是第 i 个筛子孔径 (mm) $r_0 = r_i$ $r_n = r_{n+i}$ m_i 是第 i 个筛子的破碎团聚体重量百分比 , $NMWD$ 表示标准化平均重量直径 r_{max} 为最大初始筛孔径 r_{min} 为最小筛子孔径。则分别用 $NMWD_{FW}$ 和 $NMWD_{WS}$ 和表示快速湿润 (FW)与预湿润后震荡 (WS)测定结果。

1.4 侵蚀泥沙分析

由于收集的泥沙样品较少 ,故将降雨分成 0~20min、20~40min、40~60min 3 个时段 ,各个时段收集的泥沙用一组金属筛进行湿筛 ,测定其粒径分布状况 ,用平均重量直径表示。

2 结果与讨论

2.1 团聚体稳定性分析

LB 法测定不同粒径团聚体的标准化平均重量直径 (NMWD)见图 1。在这两种不同破碎机制处理中 ,团聚体稳定性是快速湿润小于预湿润震荡 ,这是因为在实际降雨中 ,机械外力破坏具有累积性 ,施加于团聚体上的能量是持续增加的 ,而在预湿润震荡测定中 ,机械外力能量只达到了一个可以克服土壤中胶结物质影响的较低值 ,对土壤团聚体的破坏不大。由图 1 知团聚体的标准化平均重量直径随着团聚体粒径的减小而增大。在快速湿润处理中 3 个粒径团聚体 $NMWD_{FW}$ 差异不显著 ($p \leq 0.05$) ,但在湿润震荡处理中 3~5mm 与 <2mm 团聚体 $NMWD_{WS}$ 差异显著。在这两种不同破碎机制测定中 ,QP2 各个粒径的 $NMWD$ 均高于 QP1 和 QP3 ,其主要原因是 QP2 开垦时间短 ,有机质和粘粒含量高 ,团聚体较稳定。

2.2 团聚体粒径对坡面产流过程的影响

坡面径流过程是降雨与土壤界面之间的响应过程 ,主要受降雨过程和下垫面变化影响 ,下垫面特征是由地形、土壤、地表覆盖等因素决定。在降雨、地形、土壤前期含水量、地表覆盖等基本相同条件下 ,主要受土壤特性的控制。在持续降雨过程中 ,由于团聚体粒径不同 ,径流过程差异明显 (图 2)。

对于不同粒径的团聚体 ,其径流强度差异显著。3~5mm 团聚体稳定性最差 ,产流最快 ,10min 左右径流强度趋于稳定 ,QP2 与 QP1、QP3 差异达到显著 ,三者分别稳定在 0.36 0.52 mm min⁻¹ 和 0.47 mm min⁻¹。观察 2~3mm 团聚体径流过程 ,稳定产流时间较 3~5mm 滞后 10min 左右 ,但是稳定径流强度与 3~5mm 团聚体差异不显著 ,QP1、QP2、QP3 分别稳定在 0.54、0.45、0.50 mm min⁻¹。 <2mm 团聚体与 3~5、2~3mm 团聚体

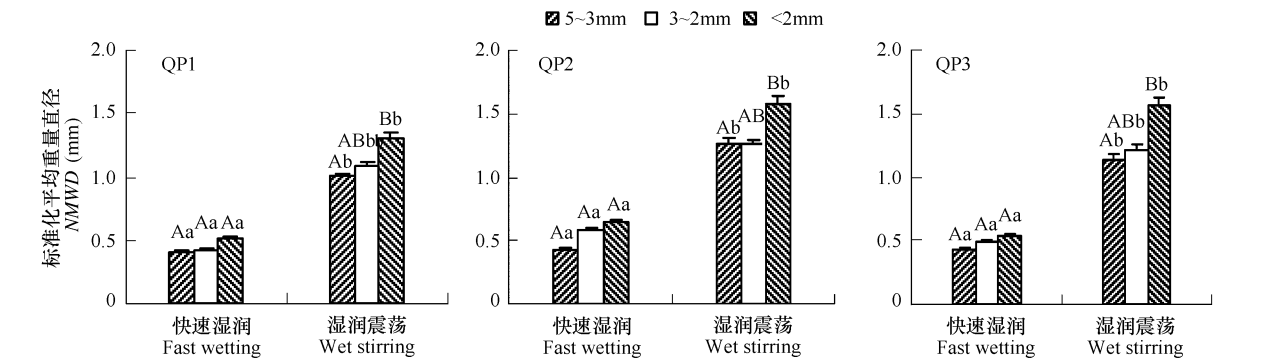


图 1 LB 法测定不同处理团聚体标准化平均重量直径

Fig.1 Normalized mean weight diameter of soils for different treatment by LB method

不同大写字母表示粒径之间显著水平,不同小写字母表示不同处理之间显著水平 $p \leq 0.05$ Different capital letters indicate the significant at $p \leq 0.05$ among aggregate sizes and different small letters indicate the significant at $p \leq 0.05$ among treatments

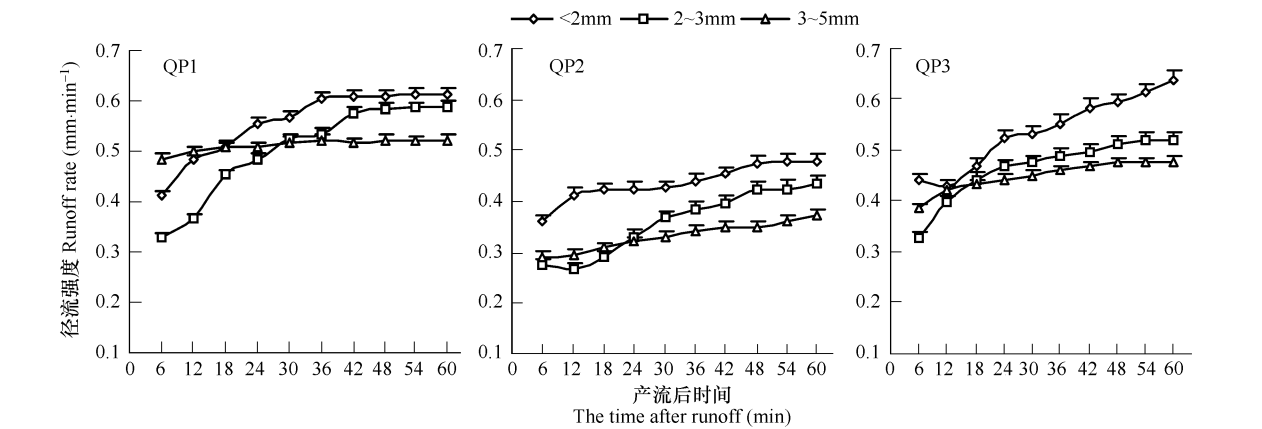


图 2 不同粒径团聚体的径流过程

Fig.2 Runoff for processes each aggregate size

径流强度差异显著,不仅产流时间推迟,而且稳定产流强度较 2~3mm 团聚体都显著增大,QP1、QP2、QP3 分别增大 13%、12%、24%。可见,小颗粒的团聚体径流强度大,大颗粒的反之,主要是由于大颗粒团聚体孔隙多,孔径大,入渗率高,导致径流强度小于小颗粒团聚体。

径流系数 (α) 是描述降雨与径流关系的重要参数,计算不同粒径团聚体 27 场降雨的径流系数,发现不同粒径团聚体对径流系数的影响非常显著,变幅较大。其中 3~5mm 最小只有 45.9%, 2~3mm 居中为 47.6%, <2mm 最大达到 50.0%。将不同粒径团聚体径流系数 ($\alpha_{<2}$ 、 α_{2-3} 和 α_{3-5}) 与其 $NMWD_{FW}$ 和 $NMWD_{WS}$ 进行方程拟合后,得到如下经验关系式:

$$\alpha_{<2} = 1.825 - 0.912NMWD_{WS} - 1.25NMWD_{FW} \quad R^2 = 0.88 \quad n = 9 \quad (3)$$

$$\alpha_{2-3} = 1.429 - 0.855NMWD_{WS} - 0.164NMWD_{FW} \quad R^2 = 0.90 \quad n = 9 \quad (4)$$

$$\alpha_{3-5} = 1.124 - 0.699NMWD_{WS} - 0.26NMWD_{FW} \quad R^2 = 0.87 \quad n = 9 \quad (5)$$

由以上方程得出,在不同团聚体粒径条件下,径流系数与快速湿润和湿润震荡条件下的标准化平均重量直径均为负相关。

2.3 团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响

坡面侵蚀过程是侵蚀营力和土壤可蚀性之间相互作用的一系列过程集合。土壤因素是决定坡面侵蚀最重要的因素之一。由于土壤团聚体粒径不同,坡面侵蚀过程差异显著(图 3)。

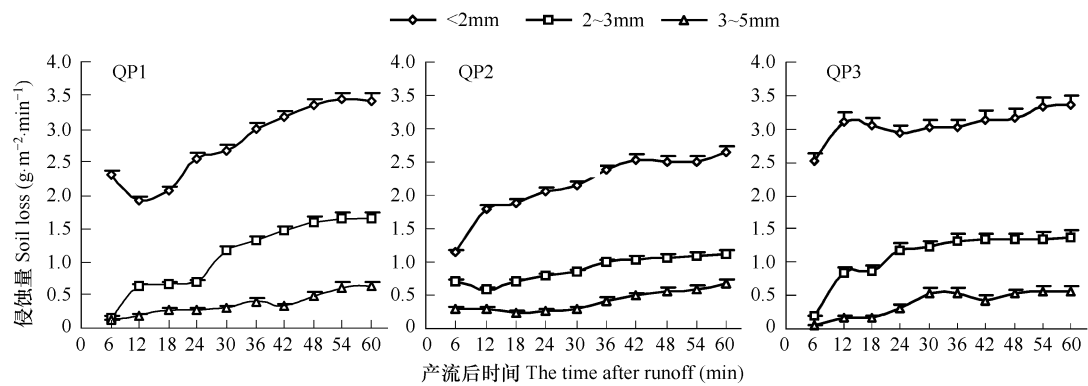


图3 不同粒径团聚体的侵蚀过程
Fig.3 Soil loss processes for each aggregate size

对于不同粒径的团聚体 ,QP1、QP2、QP33 种土壤均表现出 <2mm 团聚体侵蚀量明显高于其他两种粒径 ,差异达到显著。3 ~5mm 团聚体侵蚀量最小 2 ~3mm 介于两者之间。供试 3 种红壤 (QP1、QP2、QP3)不同粒径团聚体稳定侵蚀量具体变化为 2 ~3mm 粒径团聚体比 <2mm 团聚体的稳定侵蚀量分别减小 51.6%、58%、59.2% 3 ~5mm 团聚体较 <2mm 团聚体的稳定侵蚀量分别减小 82%、74.5%、83% ,<2mm 团聚体稳定侵蚀量依次为 3.40、2.55、3.33 g m⁻² min⁻¹。这主要是因为持续降雨过程中 ,<2mm 团聚体相对于其他两级团聚体易形成结皮^[13] 结皮的形成影响土壤孔隙状况 ,显著减小土壤入渗率 ,使得径流强度增大 ,因此侵蚀量剧增。在本实验降雨过程中雨滴动能不足以使 2 ~3mm 和 3 ~5mm 团聚体破碎形成较细颗粒促进结皮的形成 ,所以 <2mm 团聚体的侵蚀量明显大于其他两级团聚体。将不同粒径团聚体标准化平均重量直径与侵蚀量 (E)进行回归分析 ,得到如下经验关系式 :

$$E_{<2} = 19.305 - 17.282NMWD_{WS} - 14.985NMWD_{FW} \quad R^2 = 0.904 \quad n = 9 \tag{6}$$

$$E_{<2} = 5.214 - 3.384NMWD_{WS} - 0.305NMWD_{FW} \quad R^2 = 0.91 \quad n = 9 \tag{7}$$

$$E_{<3-5} = 1.237 - 0.0571NMWD_{WS} - 1.43NMWD_{FW} \quad R^2 = 0.94 \quad n = 9 \tag{8}$$

据以上经验关系式可知 ,红壤表土不同粒径团聚体的侵蚀量与快速湿润和湿润震荡条件下标准化平均重量直径呈负相关。

2.4 团聚体粒径对侵蚀泥沙颗粒特性的影响

侵蚀过程中泥沙颗粒特性与土壤团聚体破碎情况和侵蚀能量密切相关 ,可以反映土壤表面结构变化和径流携带搬运能力以及径流选择性搬运特性。在坡面侵蚀过程中 ,雨滴打击引起团聚体的破碎一般发生在最初几分钟 ,因此细颗粒泥沙一般在产流最初几分钟内形成较多。试验中产流初期 >1mm 的泥沙较少 ,<0.25mm 的泥沙较多 ,随着产流时间推移 ,径流携沙能力增强 ,>1mm 的泥沙增多 ,但 <0.25mm 泥沙含量始终高于其他粒径的泥沙 ,达到 40% 以上 ,供试 3 种土壤均表现出相同的趋势 ,尤其以 QP1 最为明显。不同粒径团聚体对侵蚀泥沙粒径分布影响显著 (图 4) 。其中 <2mm 团聚体侵蚀泥沙中粗颗粒泥沙含量高 ,细颗粒泥沙较少 ,这主要是由于 <2mm 团聚体易形成结皮 ,致使土壤孔隙恶化 ,径流强度增大 ,携带搬运能力增强的原因。

试验中侵蚀泥沙分布采用平均重量直径描述 ,3 种红壤侵蚀泥沙平均重量直径 (MWD)随时间变化很小 ,未显示出差异 ,这可能是由于取样的时间段较长 ,

表2 不同粒径团聚体侵蚀泥沙平均重量直径
Table 2 Mean Weight Diameter of sediment for each aggregate size

不同粒径 (mm) Aggregate size	泥沙平均重量直径 (mm) Mean weight diameter of sediment		
	QP1	QP2	QP3
<2	0.21a	0.33a	0.29a
2~3	0.15b	0.27b	0.17c
3~5	0.17b	0.29b	0.23b

同一列不同小写字母表示不同粒径间差异显著 ,p ≤ 0.05
Different letters in the same columns mean significant at p ≤ 0.05 lever among aggregate sizes

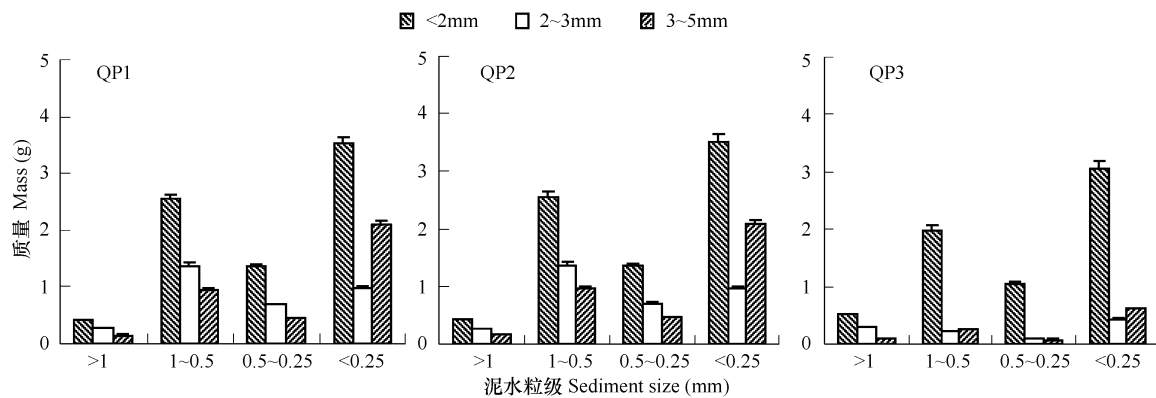


图4 侵蚀泥沙粒径分布
Fig. 4 Distribution of sediment size

掩盖了其变化过程,但是不同粒径的侵蚀泥沙平均重量直径 (*MWD*)变化显著(表2),其中<2mm团聚体的平均重量直径明显大于其它两种粒径,并达到显著差异,除了QP3外,2~3mm和3~5mm团聚体的平均重量直径没有显著差异。这可能是由于<2mm团聚体中含有较多的粘粒和铁铝氧化物,降雨过程中,雨滴打击和径流的搬运破坏的能量不能破碎这些稳定的团聚体,因此泥沙中粗颗粒含量较高,泥沙的*MWD*较高。

综上所述,团聚体的稳定性与土壤侵蚀和径流密切相关,是土壤对径流和侵蚀敏感性的有效指示因子。不同粒径团聚体稳定性差异显著,试验结果表明团聚体粒径与径流强度和侵蚀量有很好的相关性。<2mm团聚体的标准化平均重量直径最大,稳定性最好,但是其径流强度和侵蚀量均大于其他两种粒径,这可能是由于本实验雨滴动能不足以使大团聚体完全破碎,所以雨滴打击对团聚体破碎的影响在本实验中可以忽略不计,再者<2mm团聚体易形成结皮^[13],短时间内径流强度增大,携沙能力增强,入渗率减小,最终导致侵蚀量剧增,试验中径流强度与侵蚀量之间相关性达到0.90($p \leq 0.05$)。不同粒径团聚体对侵蚀泥沙分布影响显著,稳定性高的土壤侵蚀泥沙中粗颗粒较多,且多为稳定团聚体,这主要是降雨和径流期间,雨滴击溅和径流携带可以破坏脆弱的土壤团聚体,但不能破坏粘附力强的稳定土壤团聚体,因此<2mm团聚体泥沙颗粒比其它两种粒径团聚体粗,平均重量直径较大。

3 结论

(1)在LB法中,快速湿润和湿润震荡处理的<2mm团聚体稳定性最高,在快速湿润处理中,3~5mm与<2mm团聚体*NMWD*差异不显著,但在湿润震荡处理中,3~5mm与<2mm团聚体差异显著。说明红壤中小粒径团聚体稳定性高。

(2)在持续降雨条件下,<2mm团聚体径流强度和侵蚀量均是最大,并且3种粒径径流强度和侵蚀量差异显著,稳定性小的3~5mm团聚体产流时间最快,QP1、QP2、QP23种土壤<2mm团聚体的稳定径流强度较2~3mm团聚体的分别增大13%、12%、24%。试验分析得到不同粒径团聚体径流系数(α)与*NMWD_{FW}*和*NMWD_{WS}*呈显著多元线性关系为:

$$\begin{aligned}\alpha_{<2} &= 1.825 - 0.912NMWD_{WS} - 1.25NMWD_{FW} \\ \alpha_{<2\sim3} &= 1.429 - 0.855NMWD_{WS} - 0.164NMWD_{FW} \\ \alpha_{<3\sim5} &= 1.124 - 0.699NMWD_{WS} - 0.26NMWD_{FW}\end{aligned}$$

QP1、QP2、QP23种土壤3~5mm团聚体比<2mm团聚体的稳定侵蚀量分别减小82%、74.5%、83%,不同粒径团聚体标准化平均重量直径与侵蚀量(*E*)之间的经验方程式为:

$$\begin{aligned}E_{<2} &= 19.305 - 17.282NMWD_{WS} - 14.985NMWD_{FW} \\ E_{<2} &= 5.214 - 3.384NMWD_{WS} - 0.305NMWD_{FW} \\ E_{<3\sim5} &= 1.237 - 0.0571NMWD_{WS} - 1.43NMWD_{FW}\end{aligned}$$

③)不同粒径团聚体与侵蚀泥沙颗粒分布存在相关性 ,<2mm 团聚体侵蚀泥沙颗粒较粗 ,>1mm 泥沙较其它两种粒径多 β~5mm 团聚体侵蚀泥沙颗粒较细 ,这是径流携沙能力和团聚体稳定性共同作用的结果 ,因此不同粒径的侵蚀泥沙中 ,<2mm 团聚体的平均重量直径 (MWD)高于其它两种粒径。这可能是由于粒径小的团聚体粘粒和铁铝氧化物含量高 稳定性增加 ,因此侵蚀泥沙中粗颗粒多 ,平均重量直径大。可见侵蚀泥沙粒径分布可以很好的反映径流携沙能力和选择性搬运的特性以及土壤结构变化。

References :

[1] Lal R. Soil Erosion Impact on Agronomic Productivity and Environment Quality. Critical Reviews in Plant Sciences ,1998 ,17 (4) :319 —464.

[2] Liu B Y ,Zhang K L ,Jiao J Y. Soil erodibility and its use in soil erosion prediction model. Journal of Natural Resources ,1999 ,14 (4) :345 —350.

[3] Marshall T J ,Holmes J W ,Rose C W. Soil physics. Cambridge University Press ,1996.

[4] Duiker S W ,Flanagan D C ,Lal R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. Catena ,2001 ,45 :103 —121.

[5] Zhang K L ,Cai Y M ,Liu B Y ,et al. Evaluation of soil erodibility on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica ,2001 ,21 (10) :1687 —1695.

[6] Legout C ,Leguedois S ,Le Bissonnais Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. European Journal of Soil Science ,2005 ,56 :225 —237.

[7] Li Z X ,Cai C F ,Shi Z H ,et al. Aggregate Stability and Its Relationship with Some Chemical Properties of Red Soils in Subtropical China. Pedosphere ,2005 ,15 ,1 :129 —136.

[8] Peng X H ,Zhang B ,Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. Acta Ecologica Sinica ,2003 ,23 (10) :2176 —2184.

[9] Institute of Soil Science ,Chinese Academy of Science. Soil Physical and Chemical Analysis (in Chinese) ,Shanghai :Shanghai Science and Technology Press ,1978.

[10] Luk S H ,Abrahams A D ,Parsons A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphic experiments. Physical Geography ,1986 ,7 :344 —356.

[11] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I . Theory and methodology. European Journal of Soil Science ,1996 ,47 :425 —428.

[12] Zhang B ,Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. Geoderma ,2001 ,99 :123 —145.

[13] Farres P J. The dynamics of rain splash erosion and the role of soil aggregate stability. Catena ,1978 ,14 :119 —130.

参考文献 :

[2] 刘宝元 ,张科利 ,焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用. 自然资源学报 ,1999 ,14 (4) :345 ~350.

[5] 张科利 ,蔡永明 ,刘宝元 ,等. 黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究. 生态学报 ,2001 ,21 (10) :1687 ~1695.

[8] 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团聚体稳定性的影响. 生态学报 ,2003 ,23 (10) :2176 ~2184.

[9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海 :上海科学技术出版社 ,1978.