

紫色土崩解特性对容重和含水率的响应特征

李敬王^{1,2}, 陈林², 史东梅¹, 张佳宝²

(1. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716;

2. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 以紫色土为研究对象, 通过室内重塑土试验, 采用多元回归方程和曲面响应等分析方法, 研究容重和含水率对紫色土崩解特性的影响。结果表明: (1) 在相同容重下, 崩解量随着含水率的增加而减小, 不同含水率的土样崩解时间有所不同; 土样完全崩解时间总体上随着含水率的增加而延长, 且崩解量主要集中在崩解阶段前 3 min。 (2) 在相同含水率下, 崩解量随着容重的增加而减小, 土样完全崩解时间总体上随容重的增大而延长, 且崩解量主要集中在前 4 min。 (3) 在相同容重和含水率下, 土样崩解速率均随着容重和含水率的增大而减小; 较之容重, 含水率对崩解速率的影响较大。容重和含水率的交互作用对崩解速率影响显著, 即随着容重和含水率的增加, 土样崩解速率减小。研究成果为紫色土的侵蚀防治提供了参考。

关键词: 紫色土; 容重; 含水率; 土壤崩解

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0068-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.011

Response Characteristics of Purple Soil Disintegrating Characteristics to Bulk Densities and Water Contents

LI Jingwang^{1,2}, CHEN Lin², SHI Dongmei¹, ZHANG Jiabao²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: In the present study, multiple regression equation and surface response analysis were used to investigate the effects of soil bulk densities and water contents on the amount and rates of disintegration in a purple soil. The results showed that: (1) Under the same bulk density, the amount of soil disintegration decreased with the increase of water contents, and the soil disintegration time varied with water contents. The total time of soil disintegration was extended with the increase of water contents, and the amount of soil disintegration was mainly concentrated in the first three minutes of the soil disintegration stage. (2) Under the same water content, the amount of soil disintegration decreased but the soil disintegration time increased with the increase of soil bulk densities, and the amount of disintegration was mainly concentrated in the first four minutes. (3) Under the same bulk density and water content, the soil disintegration rates decreased with the increase of soil bulk densities and water contents. Compared with bulk density, water content had a greater influence on the soil disintegration rates. The interaction of bulk density and water content had a significant effect on the soil disintegration rates, indicating that the soil disintegration rates decreased with the increase of bulk density and water content. Our findings provided some reference for controlling erosion of the purple soil.

Keywords: purple soil; bulk density; water content; soil disintegration

土壤崩解是指土壤浸水后发生碎裂解体、塌落或强度减弱的现象。土壤浸水后, 不同土壤孔隙进入的水分量不同, 引起土壤颗粒间结合水膜增厚的速率不相等, 进而导致颗粒间的斥力大于其吸力, 产生了应

力集中, 造成土体崩落解体^[1]。土壤的崩解机制与土壤侵蚀的发生过程密切相关, 是土壤侵蚀发生的必要条件之一。土壤崩解量和崩解速率作为评价土壤抗侵蚀能力的重要指标已经在全国得到了广泛的应用。

收稿日期: 2018-10-06

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300802, 2016YFD0200107); 国家自然科学基金项目(41807017); 江苏省自然科学基金项目(BK20171106); 小麦产业技术体系项目(CARS-03)

第一作者: 李敬王(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事砂姜黑土有机质与土壤微生物研究。E-mail: 18223565469@163.com

通信作者: 张佳宝(1957—), 男, 研究员, 主要从事农田生态过程长期演变规律与地力提升机理研究。E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

史东梅(1970—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: shidm_1970@126.com

目前有关土壤崩解的深入研究较多,主要集中在土壤崩解环境^[2-4]、机制^[5-7]和影响因素^[8-14]等,但仍存在不足之处:在研究对象上,主要集中在北方黄土、东北黑土和南方红壤,而针对南方紫色土的崩解特性研究较少;在研究方法上,已有研究多采用 SPSS 数据分析方法,较为单一;在探究土壤崩解原因上少有从土壤物理特征研究。紫色土是我国主要的一种土壤类型,占我国土地面积的 2.2%,其质地疏松、富含大孔隙,浸水后极易发生崩解破坏的特征。在紫色土地区的水土流失、滑坡、泥石流等地质灾害的形成和发育过程中,紫色土特有的崩解特性都发挥重要作用^[15-18]。因此研究紫色土地区土壤崩解特性及其对影响因素的响应机理是必要和迫切的。本文通过室内重塑土试验,研究了紫色土的崩解量、崩解速率分别与容重和含水率之间的量化关系,采用多元回归方程和响应曲面分析紫色土崩解速率对容重和含水率的响应特征,以期深入揭示紫色土壤侵蚀的过程与机理,为紫色土的侵蚀防治提供一定的数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤选用三峡库区代表性紫色土。土壤采自湖北省宜昌市(110°39'E, 31°10'N)紫色土旱田耕层土壤(0—20 cm),类型为黏壤土,土地利用方式为花生—小麦轮作,一年两熟。土壤样品去除秸秆、杂质,风干后过 5 mm 筛备用。土壤的理化性质为:有机质含量 6.34 g/kg,全氮含量 0.46 g/kg,全磷含量 0.43 g/kg,全钾含量 17.40 g/kg, pH 6.18, 颗粒组成以粉粒(58.99%)为主。

1.2 试验设计

调查发现湖北省宜昌市紫色土在自然状态下表层土壤的平均容重为 1.40 g/cm³,平均含水率为 14%。对于农田土壤而言,由于耕作程度、施肥水平等的不同,其容重和含水率有所变化,故容重设定为 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 g/cm³ 5 个水平,含水率设定为 10%, 12%, 14%, 16%, 18% 5 个水平。称取过 5 mm 筛的风干土样平铺于托盘内,按公式(1)计算需水量,然后分 2~3 次用喷壶均匀喷洒于土样上,充分拌匀后填入边长为 5 cm 的自制立方体铁盒中。填入铁盒时,均匀击实,达到设定的容重。然后取出,用塑料薄膜密封放置 48 h,使水分充分均匀。根据试验所需土量与含水率,制备试样所需的加水量计算公式为:

$$m_{\text{水}} = \frac{m_{\text{风干}}}{1 + \omega_{\text{风干}}} \times (\omega_{\text{目标}} - \omega_{\text{风干}}) \quad (1)$$

式中: $m_{\text{水}}$ 为制备试样所需加水量(g); $m_{\text{风干}}$ 为风干土质量(g); $\omega_{\text{风干}}$ 为风干土含水率(%); $\omega_{\text{目标}}$ 为制样目标含水率(%)。

根据铁盒容积和设计的容重,单个试样所需风干土质量计算公式为:

$$m_{\text{风干}} = \rho_d \times V \quad (2)$$

式中: ρ_d 为试样的容重(g/cm³); V 为铁盒容积(cm³)。

1.3 取样及崩解指标的测定

试验于 2018 年 5 月进行。由于崩解水体温度为 23~25 ℃,故温度对试验结果的影响可忽略不计。崩解前,记录崩解架的读数(水中)。试验开始时,轻轻将试样外围的立方体容器打开,将试样放置在崩解架的网板上,然后将放有试样的崩解架挂在数显拉力计(DS2-1000N)上,最后缓缓放入盛水崩解缸中,同时开动秒表,并记录拉力计的初始读数(图 1)。试验过程中,前 3 min 每 10 s 记录 1 次数显拉力计读数,后 12 min 每 1 min 记录 1 次数显拉力计读数,试验共持续 15 min。每个处理水平设置 3 个重复。

试验结束后,土壤崩解量计算公式为:

$$A = \frac{a_0 - a_t}{a_0 - a_e} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A 为时间 t 内的累积崩解量(%); a_0 为崩解开始的读数(g); a_t 为时刻 t 时的读数(g); a_e 为崩解结束时的读数(g)。

土壤崩解速率计算公式为:

$$v = \frac{A_T}{T} \quad (4)$$

式中: v 为崩解速率(%/min); A_T 为完全崩解量(%); T 为完全崩解时间(min)。

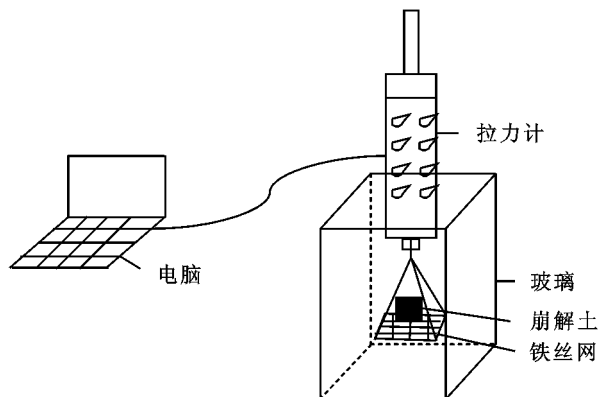


图1 崩解装置示意

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行图表处理和描述性统计分析;交互效应采用麦夸特法(Levenberg-Marquardt)+通用全局优化法(Universal Global Optimization-UGO)通过 1stOpt 1.5 进行多元回归分析,并在 Matlab 软件中编程生成响应曲面。

2 结果与分析

2.1 紫色土崩解量对容重和含水率的响应特征

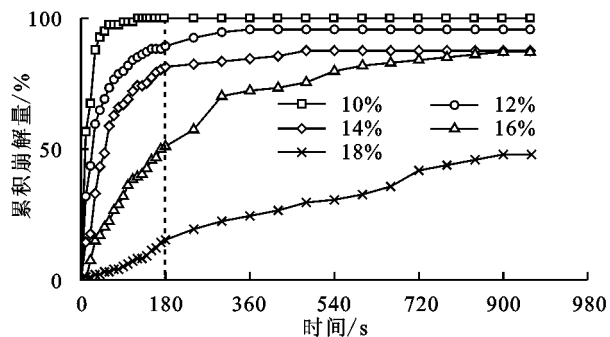
2.1.1 含水率对紫色土崩解量的影响

由图 2 可

知,相同容重条件下,紫色土崩解量随含水率的增加而减小,不同含水率土样的完全崩解时间有所不同。在含水率为 10%,12%,14%,16% 的条件下,相同时间段土样崩解量随含水率的增加而减小,当崩解结束时($t=900$ s),表现为 $10\% (100\%) > 12\% (95.74\%) > 14\% (87.63\%) > 16\% (87.23\%)$ 。当含水率为 18% 时,紫色土崩解曲线较为趋缓,在崩解结束时($t=900$ s),崩解量较低,其值为 47.96%。随着含水率的增加,土样颗粒间的水膜增厚,颗粒间胶结键增强,遇水不易崩解。

土样完全崩解时间总体上随含水率的增加而延长,表现为 $10\% (120\text{ s}) < 12\% (360\text{ s}) < 14\% (480\text{ s}) < 16\%, 18\% (900\text{ s})$ 。在崩解时间为 $t=3$ min 时,含水率为 10% 的土样完全崩解;含水率为 12% 的土样崩解量占全部崩解过程的 93.33% ($A=89.36\%$);含水率为 14% 的土样崩解量占全部崩解过程的 92.94% ($A=81.44\%$);含水率为 16% 的土样崩解量占全部崩解过程的 58.54% ($A=51.06\%$);含水率为 18% 的土样崩解量占全部崩解过程的 31.91% ($A=58.54\%$)。这表明土样崩解量主要集中在崩解阶段前 3 min,即前 3 min 是土样的主要崩解阶段。

试验过程中可以看到,当土样放入水中后,立即产生大量气泡。这是因为在崩解开始阶段,进入土样内部的水分产生了对内部气体的驱逐力,使气体逸出土样表面。土样崩解开始阶段:由于吸水导致土样增加的质量与由于崩解导致土样减小的质量基本相抵消,拉力计读数变化不大。这一阶段持续时间不长,且随着含水率的增加而延长。当土样内水分达到饱和时,在水分作用下,内聚力迅速降低,土样内部的胶结键在水分浸润作用下削弱或断裂,表现为迅速崩解,崩解量呈指数增加^[11]。这一阶段为土样指数崩解阶段,指数崩解阶段崩解量占总崩解量的绝大部分^[8]。最后在残余力的作用下,土样颗粒呈现稳定状态,崩解结束,表现为拉力计读数不发生变化。这一阶段为崩解完成阶段。



注:土壤容重为 1.40 g/cm^3 。

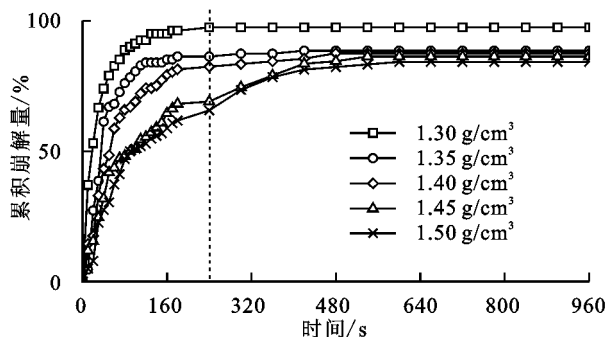
图 2 不同含水率条件下的紫色土崩解曲线

2.1.2 容重对紫色土崩解量的影响 容重是衡量土壤物理性质的重要指标,主要反映土壤的松紧程度,

容重越大,说明土壤越紧实,土壤孔隙相对较少,这会使得在浸水过程中,由水分进入土壤孔隙中产生的驱逐力将会减小;另一方面,由于土壤孔隙所占比例小,容重较大的土壤细颗粒之间接触更充分,土壤颗粒间胶结键也更易形成^[19]。

由图 3 可知,相同含水率条件下,土样的崩解量随着容重的增加而减小,表现为 $1.30\text{ g/cm}^3 (97.53\%) > 1.35\text{ g/cm}^3 (88.64\%) > 1.40\text{ g/cm}^3 (87.63\%) > 1.45\text{ g/cm}^3 (86.36\%) > 1.50\text{ g/cm}^3$ 。随着容重的增加,土样的紧实程度增强,孔隙度相对减小,颗粒之间的胶结程度增强,水分进入土样使颗粒崩解的能力变弱。较于容重 1.30 g/cm^3 ,容重为 1.50 g/cm^3 的土样崩解量减少了 13.55%。

土样完全崩解时间总体上随容重的增大而延长,表现为 $1.30\text{ g/cm}^3 (240\text{ s}) < 1.35\text{ g/cm}^3 (420\text{ s}) < 1.40\text{ g/cm}^3 (480\text{ s}) < 1.45\text{ g/cm}^3 (540\text{ s}) < 1.50\text{ g/cm}^3 (600\text{ s})$ 。在崩解时间为 $t=4$ min 时,容重为 1.30 g/cm^3 的土样停止崩解,其崩解量为 97.53%;容重为 1.35 g/cm^3 的土样崩解量占全部崩解过程的 97.43% ($A=86.36\%$);容重为 1.40 g/cm^3 的土样崩解量占全部崩解过程的 94.11% ($A=82.47\%$);容重为 1.45 g/cm^3 的土样崩解量占全部崩解过程的 80.00% ($A=69.09\%$);容重为 1.50 g/cm^3 的土样崩解量占全部崩解过程的 77.80% ($A=65.59\%$)。这表明土样崩解量主要集中在前 4 min。容重增加后,土样结构变得密实,孔隙度减小,且部分是封闭孔隙,这使得土样渗透性降低,水分渗入困难,从而降低土样的崩解性^[20]。相关研究^[13]表明,当容重较低时,土体结构松散,多架空孔隙。当容重较大时,土样大部分孔隙被颗粒填充,土样结构向紧密方向转变。当容重增大到一定程度时,架空孔隙基本消失,土体微观结构为镶嵌结构,孔隙减少,渗透性降低,崩解性降低^[21]。此外,根据土壤崩解性和水蚀性之间的关系^[22],可初步判断,容重的增加降低了土壤可蚀性。



注:土壤含水率为 14%。

图 3 不同容重条件下的紫色土崩解曲线

2.2 紫色土崩解速率对容重和含水率的响应特征

2.2.1 含水率和容重对紫色土崩解速率的影响 由

图4可知,相同容重条件下,紫色土崩解速率随含水率的增加呈现减小的趋势。在土样容重为1.30,1.35,1.40 g/cm³时,含水率从10%增至16%,土样崩解速率减小程度较大;含水率从16%增至18%时,土样崩解速率呈缓慢减小。在土样容重为1.45,1.50 g/cm³条件下,含水率从10%增至12%时,土样崩解速率迅速减小;12%至18%减小程度趋缓。同一含水率条件下,土样崩解速率随土样容重的增大而减小,土样容重为1.30,1.35,1.40 g/cm³时,土样崩解速率明显减小,当土样容重从1.40 g/cm³增至1.50 g/cm³时,土样崩解速率减小趋势不明显。土样崩解速率在12%含水率下减小效应最明显。容重和含水率是影响土壤崩解速率的2个重要因子,当容重和含水率同时发生变化时,土壤崩解速率表现出较为规律的响应特性。尤其是在理想的试验条件下,其变化规律更为明显。

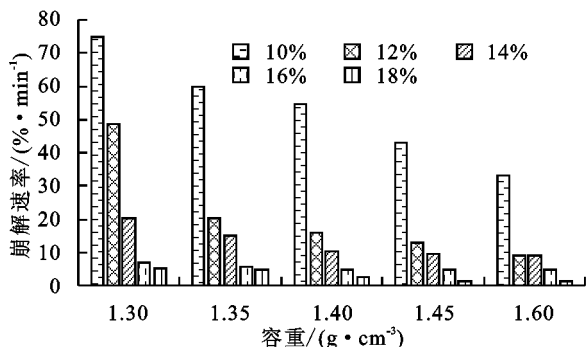


图4 不同容重和含水率下紫色土的崩解速率

2.2.2 容重和含水率的交互作用对紫色土崩解速率的影响 当容重和含水率同时变化时,土壤崩解速率表现为一个曲面。本研究采用麦夸特法(Levenberg-Marquardt)+通用全局优化法(Universal Global Optimization-UGO)进行曲面拟合。以含水率 ω 、容重 ρ_d 为自变量,崩解速率 v 为因变量,采用1stOpt 1.5对试验数据进行多项式回归分析,各项回归模型系数 $P_1 \sim P_9$ 分别为697.5, -8.9, -145.1, 10.2, -0.2, -6.4, -1.9, -1.0和0.1,检验参数中RMSE为2.584, SSE为166.989, R 为0.992, R^2 为0.984, DC 为0.984。各因子拟合所得回归方程为:

$$v = \frac{P_1 + P_2 \times \rho_d + P_3 \times \omega + P_4 \times \omega^2 + P_5 \times \omega^3}{1 + P_6 \times \rho_d + P_7 \times \rho_d^2 + P_8 \times \omega + P_9 \times \omega^2} \quad (5)$$

回归模型的校正决定系数 R^2 为0.984,说明回归模型响应值的变化有98.4%来自所选因变量,只有1.6%的变异,这表明模型的拟合优度较好,从而说明回归模型可以很好地刻画崩解速率与容重和含水率的关系。根据构建的模型,在含水率10%~18%、容重1.30~1.50 g/cm³区间进行模拟。设定含水率变化步长为1%,容重变化步长为0.01 g/cm³,通过多元回归方程生成崩解速率 v 对含水率和容重的响应曲面(图5)。

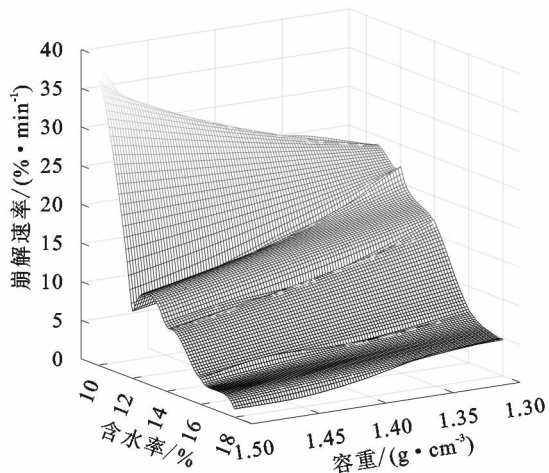


图5 紫色土壤崩解速率对容重和含水率的响应面

响应面的陡峭程度反映了因变量随着自变量的变化情况,沿着某一自变量曲线走势越陡,其影响就越显著;曲线走势越平滑,其影响就越小^[23]。由图5可知,容重和含水率的交互作用对土样崩解速率 v 有显著影响。含水率和容重介于矩形域 $D=[10,18] \times [1.3,1.5]$ 内时,紫色土崩解速率对容重和含水率的响应曲面呈现“总体上沿含水率方向倾斜”。当容重 ρ_d 一定时,崩解速率 v 随含水率 ω 的增大而减小;当含水率 ω 一定时,崩解速率 v 随容重 ρ_d 的增大而减小,这与单因素分析相一致。与崩解速率 v 随含水率 ω 变化趋势相比,崩解速率 v 随容重 ρ_d 变化趋势较缓。这表明含水率对土样崩解速率影响较大。容重和含水率交互效应对崩解速率影响较大,由点(18,1.50)到(10,1.30)响应曲面陡峭,表现为由下向上倾斜,这是因为在含水率10%、容重1.30 g/cm³时,土样颗粒间的水膜较薄,土样孔隙较大,使得颗粒间胶结键较弱,当土样入水后,土样表面有大量气泡逸出,同时迅速崩解;含水率由10%~18%、容重由1.30 g/cm³~1.50 g/cm³变化时,颗粒间的水膜增厚,孔隙相对减小,使得颗粒间胶结键增强,遇水不易崩解。

崩解是土壤侵蚀发生的前提条件^[5]。本研究在容重相同的条件下,崩解速率随着含水率增加而减小;在含水率相同的条件下,崩解速率随着容重的增加而减小。这一发现与张晓媛等^[24]的研究有所不同,与王健等^[4]、张泽等^[10]和高建伟等^[11]研究一致。这是因为紫色土、黄土和黑土的颗粒组成、黏土矿物含量及有机质含量不同所致:(1)从土壤颗粒组成分析,土壤颗粒组成是影响土壤抗蚀性的重要因素,土壤颗粒越细小,在一定程度上颗粒间的胶结键就越强,彼此间越容易黏结,土壤遇水越不易崩解^[25];另外,土壤颗粒组成中细黏粒含量越高,其抗冲击能力也越高^[26]。紫色土颗粒组成中黏粒含量较低,砂粒含量较高,土壤遇水易崩解;黄土颗粒级配均匀,以砂

粒含量为主,土壤呈粉末性,遇水易崩解;黑土颗粒组成以黏粒为主,土壤较为黏重,遇水不易崩解。(2)从土壤中黏土矿物含量分析,土壤颗粒间胶结键的强弱很大程度上取决于胶结物的黏土矿物的含量,土壤中黏土矿物含量越高,颗粒间胶结键就越强,土壤越不易遇水崩解^[11]。紫色土黏土矿物含量较低,颗粒间的胶结键较弱,遇水易崩解;与紫色土类似,黄土中黏土矿物含量也较低,遇水易崩解;黑土以黏土矿物为主,这使得黑土土壤颗粒间胶结键较强,遇水不易崩解。(3)从土壤有机质含量分析,土壤水稳性团聚体大多是由腐殖质与矿物胶结而成,而腐殖质是不可逆转的凝聚胶结物质,在水中不易崩解^[27]。因此土壤有机质含量越高,水稳性团聚体数量越高,土壤越不易遇水崩解。紫色土与黄土有机质含量都较低,土壤中水稳性团聚体数量都较少,遇水易崩解;而黑土具有较高的有机质含量,相应的土壤水稳性团聚体数量较高,遇水不易崩解。因此,具有相似的颗粒组成、黏土矿物含量和有机质含量不同土壤类具有相似的崩解特性,但作用于土壤崩解的黏土矿物和有机质是那些主要成分,以及这些成分对土壤崩解的作用机制还需要进一步的深入研究。

3 结论

(1)相同容重条件下,紫色土崩解量和崩解速率都呈现出在相同时间段内随着含水率的增加而减小的规律,且土样完全崩解时间总体上随含水率的增加而延长。这是因为随着含水率的增加,土样颗粒间的水膜增厚,颗粒间胶结键增强,遇水不易崩散分解。

(2)相同含水率条件下,土样的崩解量和崩解速率随着容重的增加而减小,土样完全崩解时间总体上随容重的增大而延长。随着容重的增加,土样结构变得密实,孔隙度相对减小,且部分是封闭孔隙,颗粒之间的胶结程度增强,水分进入土样使颗粒崩解的能力变弱。

(3)不同土壤类型的颗粒组成、黏土矿物含量和有机质含量不同,这可能是不同土壤类型具有不同的崩解特性的原因。紫色土与黄土具有相似的土壤颗粒组成(以砂粒为主)、较低的黏土矿物含量和较低的有机质含量,2种土壤也具有相似的崩解规律。黑土的颗粒组成以细黏粒为主,且其黏土矿物和有机质含量高,其崩解规律与紫色土和黄土有所不同。

参考文献:

- [1] 唐大雄,刘佑荣,张文殊,等.工程岩土学[M].北京:地质出版社,1999.
- [2] Ruizvera V M, Wu L. Influence of sodicity, clay mineralogy, prewetting rate, and their interaction on aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(6): 1825-1833.
- [3] 郭永春,谢强,文江泉.水热交替对红层泥岩崩解的影响[J].水文地质工程地质, 2012, 39(5): 69-73.
- [4] 王健,马璠,张鹏辉,等.干湿交替对黄土崩解速度的影响[J].土壤学报, 2015, 52(6): 1273-1279.
- [5] 颜波,汤连生,胡辉,等.花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J].水文地质工程地质, 2009, 36(6): 68-71.
- [6] 李家春,田伟平.工程压实黄土崩解试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2005, 24(5): 74.
- [7] 李喜安,黄润秋,彭建兵.黄土崩解性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 3207-3213.
- [8] 唐军,余沛,魏厚振,等.贵州玄武岩残积土崩解特性试验研究[J].工程地质学报, 2011, 19(5): 778-783.
- [9] Lado M, Benhur 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.
- [10] 张泽,马巍, Pendin V V, 等.不同含水量亚黏土的崩解特性实验研究[J].水文地质工程地质, 2014, 41(4): 104-107.
- [11] 高建伟,余宏明,钱玉智,等.重塑黄土崩解特性试验研究[J].长江科学院院报, 2014, 31(10): 146-150.
- [12] Graber E R, Fine P, Levy G J. Soil stabilization in semiarid and arid land agriculture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(2): 190-205.
- [13] Ferrero A, Lipiec J, Nosalewicz A, et al. Stability and sorptivity of soil aggregates in grassed and cultivated sloping vineyards[J]. Polish Journal of Soil Science, 2007, 40(1): 1-8.
- [14] 徐少君,曾波,类淑桐,等.三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J].土壤学报, 2011, 48(1): 160-167.
- [15] 严冬春,文安邦,史忠林,等.三峡库区紫色土坡耕地细沟发生的临界坡长[J].长江科学院院报, 2010, 27(11): 58-61.
- [16] 郑江坤,李静苑,秦伟,等.川北紫色土小流域植被建设的水土保持效应[J].农业工程学报, 2017, 33(2): 141-147.
- [17] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J].中国农业科学, 2016, 49(16): 3162-3173.
- [18] 张祖垚.紫色土抗侵蚀性指标研究[D].武汉:长江科学院, 2009.
- [19] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils[J]. Geoderma, 2011, 163(1/2): 74-82.
- [20] 胡建朋,杨吉华,罗明达,等.山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究[J].水土保持学报, 2011, 25(3): 54-58.
- [21] 郭晓朦,何丙辉,秦伟,等.不同坡长条件扰动地表下土壤入渗与贮水特征[J].水土保持学报, 2015, 29(2): 198-203.

对增强土壤入渗起主导作用。

(2)地下根系层减流和减沙贡献率分别为 17%和 18%;地表结皮层减流和减沙贡献率分别为 43%和 67%;植被冠层减流和减沙贡献率分别为 10%和 4%。地表结皮层减流减沙效果最明显,对产流和产沙具有最好的调控作用。3 种植被覆盖结构减流减沙能力大小顺序为地表结皮层>地下根系层>植被冠层。

(3)植被覆盖结构越复杂,坡面产流产沙过程越稳定,发生突变的时间越晚,突变过程越短,突变幅度越小。

本文在现有的条件下对不同覆盖结构坡面侵蚀产沙过程进行了探讨,还有待结合更多的试验观测,进一步揭示不同植被种类等因素对植被减蚀作用的复杂响应机制。

参考文献:

- [1] Carroll C, Merton L, Burger P, et al. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(2): 313-327.
- [2] Loch R J. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulation rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38: 299-312.
- [3] 张光辉,梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110.
- [4] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [5] 姚文艺,肖培青,申震洲,等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1438-1444.
- [6] 温仲明,焦峰,刘宝元,等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 21-25.
- [7] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 74-80.

- [8] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.
- [9] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 825-834.
- [10] 于国强,李占斌,张霞,等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 10-14.
- [11] 李强,李占斌,尤洋,等. 植被格局对坡面产流产沙影响的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 31-34.
- [12] 曹梓豪,赵清贺,丁圣彦,等. 坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1892-1904.
- [13] 杨坪坪,张会兰,王玉杰,等. 刚性植被空间配置模式对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 90-95.
- [14] 肖培青,姚文艺,牛光辉,等. 不同下垫面条件下坡面蓄水保土效益试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 65-68.
- [15] 陈洪松. 黄土区坡地土壤水分运动与转化试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2003: 32-33.
- [16] 李林,赵允格,王一贺,等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [17] 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.
- [18] 朱永杰,毕华兴,常译方,等. 90%盖度狗牙根草地对次降雨径流削减作用[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 103-109.
- [19] 程圣东,李鹏,李聪,等. 降雨-植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 230-241.
- [20] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 24-29.
- [21] 常玉,余新晓,陈丽华,等. 模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 69-74.
- [22] 于国强,李占斌,李鹏,等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 593-599.

(上接第 72 页)

- [22] 马笑,朱首军. 黄土丘陵沟壑区梯田地埂土壤崩解特性试验研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 21-25.
- [23] 桂劲松,康海贵. 结构可靠度分析的响应面法及其 Matlab 实现[J]. 计算力学学报, 2004, 21(6): 683-687.
- [24] 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.

- [25] 邱陆畅,张丽萍,陆芳春,等. 基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 74-79.
- [26] 吴淑安,蔡强国,靳长兴. 内蒙古东胜地区土壤抗蚀性实验研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 38-45.
- [27] 魏朝富,高明. 有机肥对紫色水稻土水稻性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114-116.