

粗颗粒土壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征

杨青松, 倪世民, 王军光, 蔡崇法

(华中农业大学水土保持研究中心, 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为揭示粗颗粒土壤坡面侵蚀机理, 采用湖北通城县、江西赣县、福建长汀县、广东五华县 4 个样地的 4 种粗颗粒土壤(分别定义为 TCA、GXA、CTA、WHA)进行室内模拟降雨试验, 研究粗颗粒土壤坡面侵蚀过程及侵蚀泥沙颗粒组成的变化规律。结果表明:(1)4 种土壤的地表径流随着降雨时间的增长呈现出先增加后递减并趋于稳定的规律;(2)4 种土壤的侵蚀特征存在差异, 土壤侵蚀速率表现为 $WHA > TCA > GXA > CTA$;(3)4 种土壤的侵蚀泥沙中颗粒分布百分比大小均为砂粒 > 黏粒 > 粉粒 > 砾石。不同土壤侵蚀泥沙富集率表现出明显差异;(4)水流功率与土壤侵蚀速率的相关性显著, 用幂函数可以准确描述其关系。在表达式中引入土壤黏粒含量、砾石含量后模型更加可靠($D_r = 0.001\omega^{1.163} C_l^{-4.069}$, $R^2 = 0.82$; $D_r = 0.003\omega^{1.149} G_r^{-1.934}$, $R^2 = 0.84$), 提高了模型预测土壤侵蚀速率的精度, 在实际应用中具有更广的适应范围与现实价值。

关键词: 粗颗粒土壤; 土壤侵蚀; 土壤颗粒; 水流功率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0030-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.005

Characteristics of Erosion and Sediment Particles on Coarse Texture Soil Slope

YANG Qingsong, NI Shimin, WANG Janguang, CAI Chongfa

(Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River) in Ministry of Agriculture, Wuhan 430070)

Abstract: To reveal the slope erosion mechanism of coarse texture soil in China, we conducted the indoor rainfall simulation experiments with the four coarse texture soils (sieved soils of TCA, GXA, CTA, WHA from the counties of Tongcheng, Ganxian, Changting and Wuhua, China) to discuss the slope erosion process and sediment particle composition of coarse texture soil. The results showed: (1) The changes of surface runoff characteristics of the soils were significant. The surface runoff increased with the extension of rainfall time, and then decreased and tended to be stable. (2) The erosion characteristics of the soils were different, and the soil erosion rate decreased in the order of $WHA > TCA > GXA > CTA$. (3) The percentage of grain distribution in erosion sediment of the soils decreased in the order of Clay > Silt > Sand > Gravel. The enrichment ratio of different soils showed obvious difference. (4) There was a significant correlation between water flow power and soil erosion rate, and the relationship between them could be accurately described by power function. The model was more reliable after introducing the soil clay and gravel contents in the expression ($D_r = 0.001\omega^{1.163} C_l^{-4.069}$, $R^2 = 0.82$; $D_r = 0.003\omega^{1.149} G_r^{-1.934}$, $R^2 = 0.84$). The accuracy of predicting soil erosion rate was improved with a wider range of application and more realistic value in practice.

Keywords: coarse texture soil; soil erosion; soil particle; water flow power

水力侵蚀包括雨滴击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分离、泥沙输移和沉积三大过程^[1-2]。径流分离和输移泥沙的主要来源于表土破碎的团聚体和表面松散物质^[3]。侵蚀泥沙的运动形式和输移距离受土壤类型和坡面径流的水动力学特性的影响。侵蚀所导致的土壤颗粒流失会导致严重的土壤质量退化和生态环境恶化问题。因此, 研究侵蚀泥沙的分选特性对土壤侵蚀机

制、评价土壤侵蚀程度研究有着十分重要的意义。

近年来, 国内外相关学者对侵蚀泥沙颗粒研究开展了大量的研究工作。富集率被应用到描述侵蚀泥沙颗粒的分布^[4]; 降雨对表土团聚体的破坏程度决定侵蚀泥沙的颗粒组成^[5]。肖培青等^[6]使用双土槽径流小区研究上方水流的汇入和降雨强度对侵蚀泥沙含量的影响, 得出了上方水流汇入影响显著、降雨强

收稿日期: 2021-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(42177317)

第一作者: 杨青松(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: yqsynl_4545@163.com

通信作者: 王军光(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀机理与过程研究。E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

度影响不显著;吴凤至等^[7]使用黄绵土、瘠土进行人工模拟试验,得出了土壤的泥沙侵蚀黏粒含量随着坡长和雨强的增大而增加,随坡度的增大而减小;也有其他学者^[3,8-9]以不同土壤作为研究对象,取得了丰富结果。但他们的研究主要集中在质地分布均匀或以细颗粒为主的土壤,对粗颗粒土壤的泥沙分选特征研究较少,使得研究结果缺乏横向对比。

花岗岩风化后会形成一个深而松散、粗颗粒含量高的红壤,其结构疏松、黏聚力低、稳定性差、可蚀性高^[10-11]。研究花岗岩红壤坡面的侵蚀泥沙颗粒分选特征有助于揭示粗颗粒土壤的坡面侵蚀机理^[12]。鉴于此,本文以4种花岗岩母质发育的红壤为研究对象,在室内进行人工模拟降雨研究粗颗粒土壤坡面产流产沙特征,探讨粗颗粒土壤坡面径流水动力学特性及其产流产沙特性之间的定量关系,以期为粗颗粒土壤水土流失防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

土壤样品采集于广东省五华县华城镇、湖北省通

城县五里镇、江西省赣县田村镇、福建省长汀县河田镇(分别定义为 WHA、TCA、GXA、CTA),采样深度为0—15 cm,土壤类型是由花岗岩母质发育的红壤,气候类型为亚热带季风气候。样地基本信息见表1。将野外采取的土样带回实验室,进行自然风干处理,研磨后通过10 mm筛网除去其中的石块及杂草,进一步进行土壤性质测定和模拟试验。其中土壤容重的测定采用环刀法;土壤密度的测定采用比重瓶法;pH采用pH计测定,水土比为2.5:1;土壤有机质的测定采用重铬酸甲外加热法;机械组成的测定采用吸管法,颗粒分级根据美国制,分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)和砾石(>2 mm)。土壤基本理化性质见表2。

表1 各样地基本信息

采样点	纬度(N)	经度(E)	年平均 气温/℃	年平均 降水量/mm	主要 物种
五华	24°05'60"	115°35'05"	21.4	1528	铁芒萁、岗松
通城	29°12'39"	113°46'26"	17.1	1556	马尾松、铁芒萁
赣县	26°11'22"	115°10'39"	19.6	1446	马尾松、铁芒萁
长汀	25°37'58"	116°27'29"	18.5	1720	马尾松、油茶

表2 试验土样的基本理化性质

土样	容重/ (g·cm ⁻³)	土粒密度/ (g·cm ⁻³)	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	砾石/%
TCA	1.29±0.02	2.55±0.02	4.19	20.02±0.64	18.21	13.05	62.55	6.19
GXA	1.33±0.01	2.62±0.03	4.07	25.93±0.14	21.08	12.21	58.05	8.66
CTA	1.35±0.02	2.56±0.02	4.15	33.37±0.55	24.19	8.97	54.64	12.20
WHA	1.27±0.02	2.59±0.02	4.17	15.17±0.12	13.60	16.91	66.02	3.47

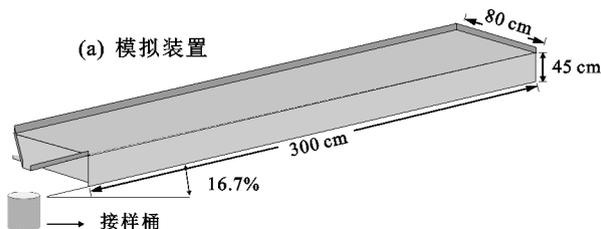
注:容重、土粒密度和有机质的数据为平均值±标准差。

1.2 试验方法

试验模拟降雨装置采用垂直向下喷式自动模拟降雨系统(QYJY-503T)。该降雨器通过不同规格的喷头组合可以达到15~220 mm/h范围的降雨强度,降雨的均匀度高于90%。在所填土槽表面土壤的10

m以上高度布置降雨器喷头,以确保所有雨滴均能达到自然雨滴的极限速度^[13]。

从图1可以看出,土槽规格为3 m(长)×0.80 m(宽)×0.45 m高。试验土槽角度可调节,调节的范围为0~30°。



注:1为水泵;2为喷头组;3为接样桶;4为土槽;5为稳定支架。

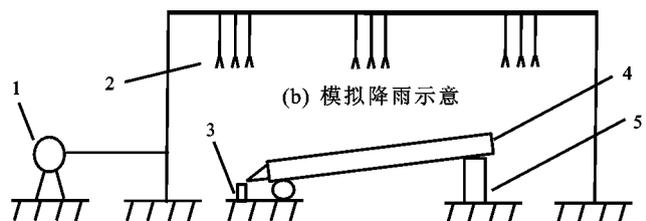


图1 试验模拟装置和模拟降雨示意

依据野外实测的土壤容重在填土槽中填土。在进行土样填充时,土槽的最底部先填入10 cm厚的砂层,在砂层上部覆盖1层可透水的细纱布,便于入渗水分能够自由下渗排漏。采用分层填土填入30 cm厚的试验土壤,每次填入5 cm,填土同时进行压实,并对表层进行轻耙,确保土壤不同部分之间的连续性

和均匀性。土壤填充完成后,用调平仪使土壤表面平整,同时尽力把试验土槽四周的边壁压实,达到减小小边界效应的作用。平整、压实后的土壤自沉降48 h。

本次研究采用我国坡耕地典型坡度16.7%为模拟降雨坡度、南方亚热带地区的实际暴雨强度90 mm/h为模拟降雨强度^[8,11]。试验于2021年4月在

华中农业大学资源与环境学院水土保持研究中心降雨大厅进行。在试验正式开始之前,需要以 30 mm/h 的雨强对土槽土样进行预湿润处理,待坡面产流后,放置 24 h。试验中单次降雨历时 1 h,以土壤坡面形成细沟为降雨结束时间,WHA 土壤累计降雨时间为 1 h,TCA 土壤累计降雨时间为 3 h,GXA 土壤累计降雨时间为 10 h,CTA 土壤累计降雨时间为 20 h。试验中水宽采用直尺法测定,采用铝盒和塑料桶收集泥沙样,每隔 3 min 用铝盒与塑料桶接 1 次样,接样时间为 1 min,测得产沙量与径流量,用于进行土壤侵蚀速率、水流功率的计算。表面流速采用高锰酸钾染色法测得,乘以相应的系数得到平均流速。通过湿筛法和吸管法测定侵蚀泥沙颗粒粒径:黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)和砾石(>2 mm)。

1.3 参数获取

水流功率表示作用到单位面积的水流所引起的功率消耗^[14],其表达式为:

$$\omega = \rho g S q \quad (1)$$

式中: ω 为水流功率(W/m^2); ρ 为水的密度(假设为 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$); g 为重力加速度(常数为 $9.8\text{ m}/\text{s}^2$); S 为斜率; q 为单位宽度径流量(m^2/s)。

土壤侵蚀速率(土壤剥蚀率)为单位时间、单位侵蚀面积上的土壤被水流剥蚀的土壤颗粒质量,用于表

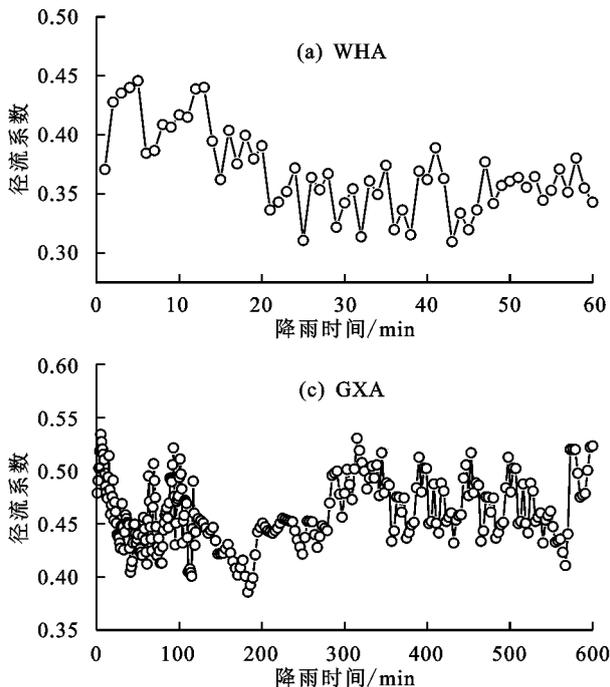


图 2 不同土壤径流系数随降雨时间的变化

4 种土壤的坡面径流系数有着相似的变化趋势。在降雨开始前期,4 种土壤的径流系数都急剧增加随后减小,经过一段时间后趋于稳定。其原因是在降雨初期,土壤含水量低,在土壤表面径流以超渗产流为主,随着降

征坡面径流对土壤的分离能力^[15],其表达式为:

$$D_r = \frac{m_t}{BLT} \quad (2)$$

式中: D_r 为土壤侵蚀速率($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$); m_t 为累计产沙量(kg); B 为水宽(cm); L 为沟长(m); T 为时间(min)。

富集率表示在坡面侵蚀过程中泥沙粒径的富集情况^[16],其表达式为:

$$ER = \frac{P_s}{P_o} \quad (3)$$

式中: ER 为富集率(%); P_s 为侵蚀泥沙各粒径的百分比(%); P_o 为土壤各粒径原始百分比(%).

径流系数是指一个时段里降雨转换成径流的比例^[17],其表达式为:

$$a = \frac{R}{P} \quad (4)$$

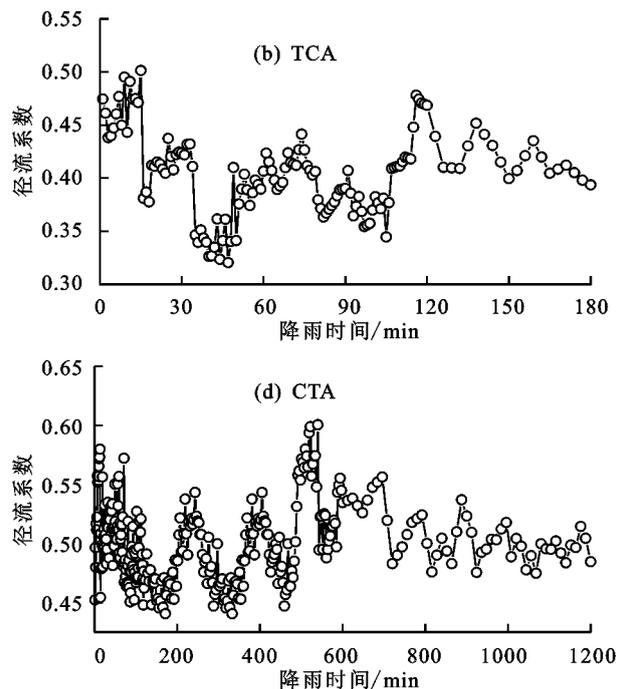
式中: a 为径流系数; R 为径流深(mm); P 为降水深(mm)。

数据处理与分析在 Excel 2016、Origin 2021b 与 SPSS 19.0 软件完成。

2 结果与分析

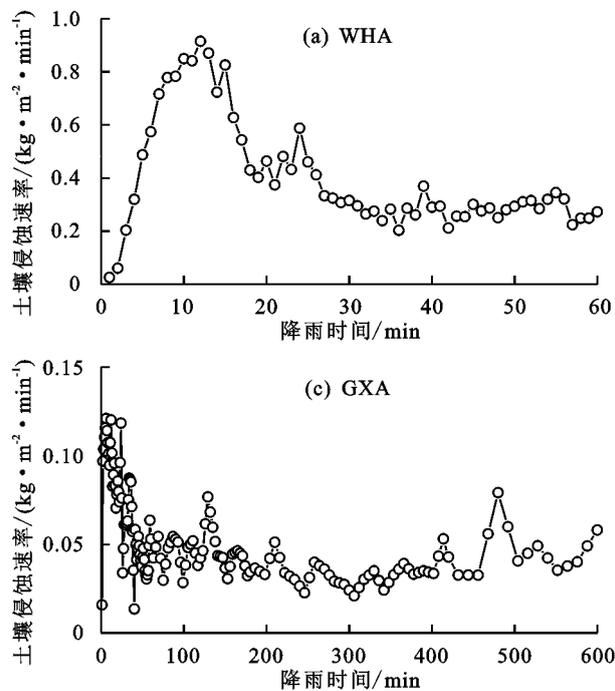
2.1 不同土壤对地表径流及产沙的影响

采用径流系数对地表径流特征进行定量描述。降雨主要转化为坡面径流和入渗 2 个部分。不同土壤的地表径流随降雨时间的变化见图 2。



雨时间的增加,土壤含水率逐渐达到饱和,土壤表面径流以则以蓄满产流为主,此时的径流系数也趋于稳定。4 种土壤的平均径流系数差异显著,总体表现为 $CTA > GXA > TCA > WHA$,其中 CTA 土壤的平均径流系数最

大为0.50, WHA土壤的平均径流系数最小为0.37。其原因在于坡面径流特征除了取决于降雨特征,还取决于土壤性质,土壤有机质含量、粒径分布对其有着重要影响^[18-19]。土壤的有机质含量越高,粒径分布越均匀,径



流入渗透率则越小,坡面径流量越多,径流系数越大。

采用土壤侵蚀速率对不同土壤的产沙特征进行定量描述。4种土壤的土壤侵蚀速率表现出不同的变化趋势(图3)。

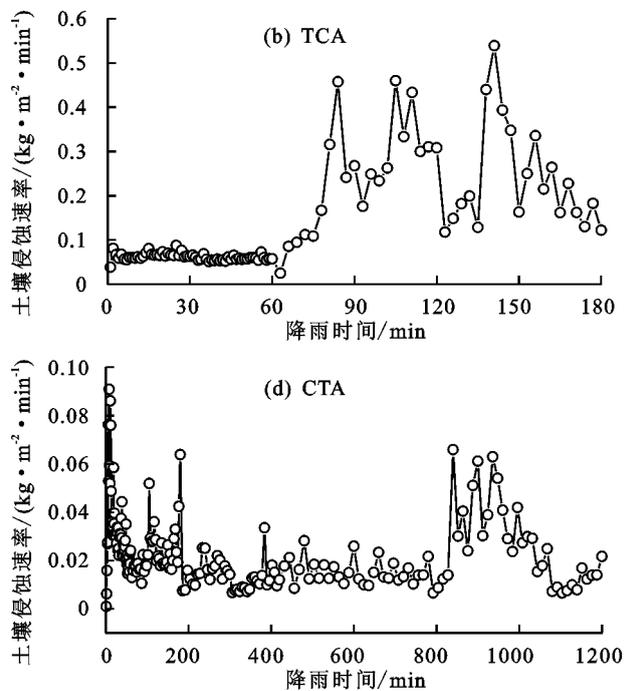


图3 不同土壤的土壤侵蚀速率随降雨时间的变化

WHA、GXA、CTA土壤的土壤侵蚀速率急剧增加,随后随着降雨时间迅速降低并在一定范围内达到稳定。TCA土壤的土壤侵蚀速率在降雨初期1 h过程中逐渐减小随后增大,在后2 h过程中保持相对稳定。4种土壤的平均土壤侵蚀速率差异明显,具体表现为WHA>TCA>GXA>CTA,其中WHA土壤的平均土壤侵蚀速率最大为0.40 kg/(m²·min),CTA土壤的平均土壤侵蚀速率最小为0.02 kg/(m²·min)。究其原因,4种土壤中WHA土壤的黏粒含量(3.47%)、有机质含量(15.17%)最低,土壤黏结性差,团聚体稳定性差,土壤抗蚀性差。而CTA土壤却与之相反,黏粒含量(24.19%)、有机质含量(33.37%)最高,土壤团聚体稳定,抗蚀性强。所以在降雨过程中,WHA坡面土壤颗粒易被剥蚀,CTA坡面土壤不易剥蚀。4种土壤的土壤侵蚀速率呈现出不同的变化趋势,主要原因与土壤的质地有着密切联系^[20]。4种土壤的粒径分布存在着明显差异(表2)。在降雨初期,土壤表面存在着许多可以被搬运的细颗粒,随着径流的增强,水流侵蚀能力也在逐渐增大,细颗粒被搬运的数量也就越来越多,侵蚀速率随着也迅速增大。但是随着细颗粒的搬运,土壤坡面的砾石开始裸露出来,加剧了坡面的粗化程度,对地表起到一定的保护作用,搬运的颗粒则开始减少并逐渐趋于稳定。

2.2 不同土壤坡面的泥沙分选差异

降雨使得径流泥沙的粒径分布呈现出动态变化,各个粒级的浓度随着降雨时间的变化而变化(图4)。4种土壤侵蚀泥沙中砂粒和黏粒所占百分比呈现出一致的趋势。4种土壤侵蚀泥沙中均为砂粒所占百分比最高,占泥沙重量的40%~60%,其次为黏粒百分比,占泥沙重量的15%~27%,砾石含量最低,占泥沙重量的1%~6%。此外,砂粒和黏粒所占百分比均低于原始土壤中所占百分比,且与原始土壤中的粒径分布比例相对应(表2),这与郝燕芳等^[21]对不同典型土壤泥沙粒径分布特征的研究结论相同。土壤侵蚀泥沙粒径分布与原土接近。

土壤泥沙中不同粒径颗粒的富集比可以用来反映土壤侵蚀过程中泥沙颗粒的富集现象。图5是4种土壤黏粒、粉粒、砂粒、砾石的富集比。4种土壤泥沙颗粒均出现砾石的分散,而黏粒、粉粒、砂粒在不同的土壤泥沙中具有不同的富集或分散情况。同时,4种土壤泥沙颗粒中砾石ER值都较小,平均值分别为0.11(WHA),0.52(CTA),0.72(GXA),0.38(TCA)。究其原因主要是由于原始土壤砾石分布及砾石特性不同造成。由表2可知,原始土壤中各个土壤中砾石含量均较低。在降雨强度一定的降雨过程中,水流能够搬运细颗粒及部分较小的砾石,较大的砾石颗粒需要更大的能量

才能将其搬运,一定的降雨强度无法提供更大的能量。所以,此时水流的搬运能力难以将其搬运,较大

的砾石颗粒裸露于土壤表面对其形成保护。最终造成只有少部分砾石被搬运,从而出现砾石的分散。

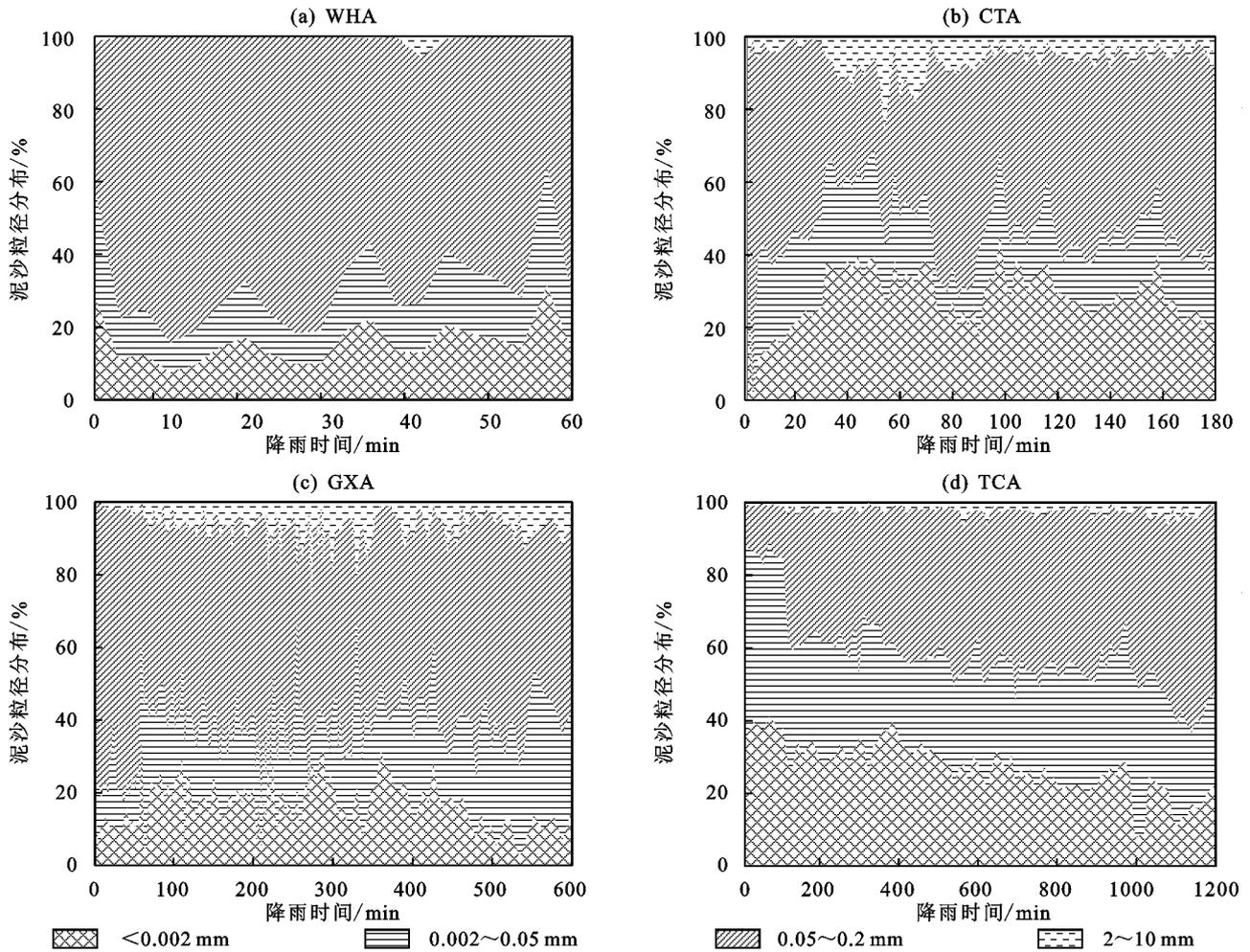


图 4 不同土壤泥沙颗粒随降雨时间的变化

对于黏粒颗粒,WHA、CTA、TCA 土壤泥沙均出现富集,而在 GXA 土壤泥沙中则出现分散。对于粉粒、砂粒,CTA、GXA、TCA 土壤泥沙均出现了粉粒的富集和砂粒的分散,WHA 则出现相反的情况。不同土壤泥沙颗粒出现不同的富集和分散现象,土壤表面团聚体的破碎程度决定泥沙颗粒的富集^[22]。在降雨过程中,大颗粒被雨滴击溅成较小的颗粒,进而使侵蚀泥沙颗粒中细颗粒的含量增加、大颗粒的含量减少。侵蚀泥沙中大颗粒的含量较少从而意味着其在坡面地表的富集。本研究中,WHA 土壤的侵蚀泥沙中出现粉粒的分散,其砂粒的富集比为 1.03,几乎与原土壤含量一致。出现粉粒的分散,可能是由于其有机质含量较低,土壤易形成碎散颗粒,在雨滴打击作用使其以更小的颗粒(黏粒)的形式被搬运,与将芳市等^[23]的研究不同,GXA 土壤的侵蚀泥沙中出现黏粒的分散。其原因可能是由于在雨滴打击作用下,黏粒以团聚体的形式被分离、搬运。

2.3 水动力学参数与土壤侵蚀速率的关系

土壤侵蚀速率的函数涉及到水力学参数和土

壤参数,建立土壤侵蚀物理预测模型需要深入理解坡面侵蚀产沙对水动力学参数的响应关系^[20]。对土壤侵蚀速率进行描述的参数,不同学者^[24-25]差异明显。经分析发现,本研究中采用水流功率与土壤侵蚀速率的幂函数关系能够较好描述 4 种土壤的土壤侵蚀速率。

$$\text{WHA}; D_r = \omega^{31.16} \quad R^2 = 0.47 \quad (5)$$

$$\text{TCA}; D_r = \omega^{2.79} \quad R^2 = 0.75 \quad (6)$$

$$\text{GXA}; D_r = \omega^{0.072} \quad R^2 = 0.48 \quad (7)$$

$$\text{CTA}; D_r = \omega^{0.208} \quad R^2 = 0.45 \quad (8)$$

Wirtz 等^[26]通过试验研究发现,泥沙输移和沉积过程具有很高的时空变异性,土壤侵蚀速率无法用单独的水力学参数进行预测,应考虑到土壤性质的影响。国内也有研究^[27]认为土壤分离的能力与土壤特征有关。综上结论,除考虑到单一的水动力学参数外,还需要结合其他影响因素进行讨论。王云琦等^[28]研究认为,土壤机械组成是土壤特征呈现出差异的主要原因。因此,本研究尝试在应用水动力学参

数描述土壤侵蚀速率的基础上,引入表征4种土壤(TCA、GXA、CTA、WHA)机械组成的土壤黏粒含量、土壤砾石含量,参与建立总土壤侵蚀速率与土壤

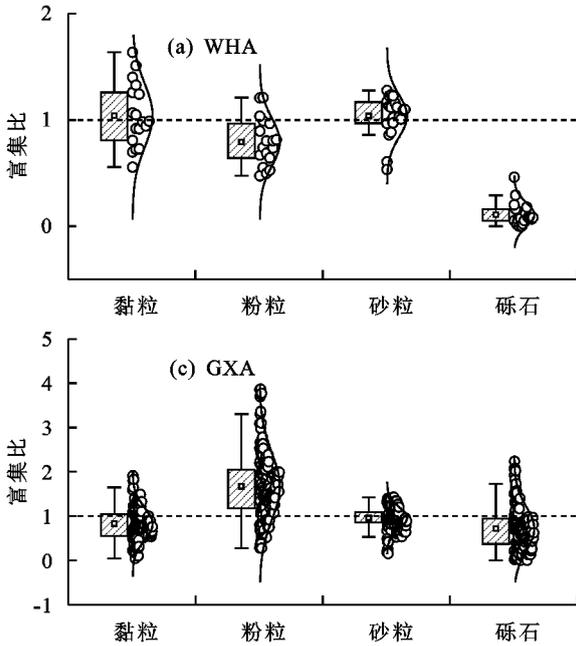


图5 不同土壤泥沙颗粒的富集比

土壤侵蚀速率与水流功率、黏粒含量之间的关系:

$$D_r = 0.001\omega^{1.163}C_l^{-4.069} \quad R^2 = 0.82 \quad (9)$$

式中: C_l 为黏粒含量。

土壤侵蚀速率与水流功率、砾石含量之间的关系:

$$D_r = 0.003\omega^{1.149}G_r^{-1.934} \quad R^2 = 0.84 \quad (10)$$

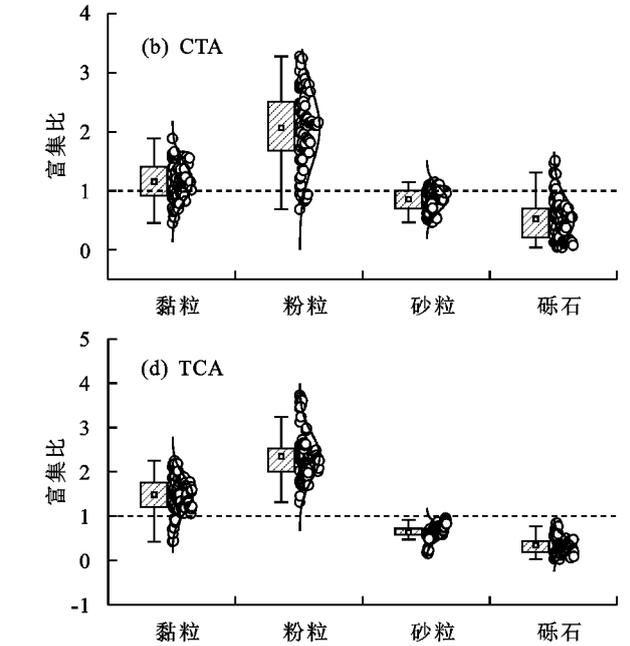
式中: G_r 为砾石含量。

由公式(5)~(10)可得,拟合效果在土壤黏粒含量引入关系方程后取得显著提高,使定量方程对土壤侵蚀速率的解释更好。土壤黏粒含量是影响土壤黏聚力的主要因素,在方程中,土壤黏粒含量的指数为负数,说明土壤的黏聚力与土壤侵蚀速率负相关,土壤质地越黏重,土壤侵蚀速率越小。将土壤砾石含量引入定量方程后拟合效果也取得显著提高,砾石含量的指数为负数,说明土壤砾石覆盖对土壤侵蚀速率表现出消极影响。王蕙等^[29]研究呈现出一致的结果,砾石在一定条件下可以阻碍坡面侵蚀。单独运用水动力学参数发展的预测模型精准度低、适应性差。本研究考虑到土壤性质对坡面土壤侵蚀过程的作用并对其进行量化,使得在预测坡面土壤侵蚀速率时方程有更好的精准度与适应性。

3 结论

(1)不同土壤的地表径流特征变化规律显著,随着降雨时间增加,呈现出初始阶段剧烈增加,再不断递减趋于稳定的趋势,径流系数表现为CTA>GXA>TCA>WHA;土壤之间的侵蚀规律差异显

性质、水动力学参数的定量关系,并用于评价粗颗粒土壤坡面侵蚀过程中的土壤侵蚀速率,见公式(9)和公式(10)。



著,表现为WHA>TCA>GXA>CTA。

(2)不同土壤侵蚀泥沙中,颗粒的粒径分布呈现出相同的规律,所占百分比的大小分别为砂粒>黏粒>粉粒>砾石。不同土壤的侵蚀泥沙颗粒的富集呈现差异。WHA土壤侵蚀泥沙出现黏粒、砂粒的富集,粉粒、砾石的分散;CTA土壤侵蚀泥沙出现黏粒、粉粒的富集,砂粒、砾石的分散;GXA土壤侵蚀泥沙出现黏粒、砾石的分散,粉粒的富集;TCA土壤侵蚀泥沙出现黏粒、粉粒的富集,砂粒、砾石的分散。

(3)可以用幂函数表达水流功率与土壤侵蚀速率的定量关系,但是在预测土壤侵蚀速率时精度较低,在关系式中引入土壤黏粒含量会使得模型更加精准可靠。土壤砾石含量在引入关系式后,也能够提高预测土壤侵蚀速率的精度,因此在防治粗颗粒土壤的土壤侵蚀工作中也应该考虑到砾石覆盖的保护作用。

本文选用4种不同地点的粗颗粒土壤进行研究,相较于单一的粗颗粒土壤研究更加具有普遍性。本文的研究结果为粗颗粒土壤侵蚀预测模型的发展提供了参考依据,在对粗颗粒土壤的实际防治应用中有更加广泛的应用范围和现实价值。

参考文献:

- [1] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J, et al. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill[J]. Geoderma, 2008, 144(3/4): 628-633.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展

- [J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [3] 曹丹妮,杜一凡,郝好鑫,等.人工模拟降雨条件下红壤团聚体流失特征研究[J].水土保持学报,2017,31(4):141-147.
- [4] 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(3/4):261-275.
- [5] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development[J].European Journal of Soil Science,2009,60(1):84-93.
- [6] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J].泥沙研究,2003(5):64-68.
- [7] 吴凤至,史志华,方怒放,等.不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J].环境科学,2012,33(7):2497-2502.
- [8] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J].Journal of Hydrology,2014,512:168-176.
- [9] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J].生态学报,2018,38(5):1590-1599.
- [10] Jiang F S, Zhan Z Z, Chen J L, et al. Rill erosion processes on a steep colluvial deposit slope under heavy rainfall in flume experiments with artificial rain[J].Catena,2018,169:46-58.
- [11] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J].Soil Science Society of America Journal,2014,78(5):1741-1752.
- [12] 张德谦,倪世民,王军光,等.不同侵蚀程度花岗岩红壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究[J].土壤学报,2020,57(6):1387-1398.
- [13] 倪世民,杨伟,王杰,等.不同类型土壤团聚体斥水性及其对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):167-173.
- [14] Bagnold R A. Bed load transport by natural rivers[J].Water Resources Research,1977,13(2):303-312.
- [15] Zhang Q W, Lei T W, Zhao J. Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method[J].Geoderma,2008,147(1/2):8-15.
- [16] Lin J S, Huang Y H, Zhao G, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes using colluvial deposits in a permanent gully[J].Catena,2017,157:47-57.
- [17] 梁于婷.降雨径流系数影响因素的试验研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [18] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.
- [19] 赵清贺,冀晓玉,徐珊珊,等.河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J].农业工程学报,2018,34(13):170-178.
- [20] 倪世民,张德谦,冯舒悦,等.不同质地重塑土坡面水沙定量关系研究[J].土壤学报,2019,56(6):1336-1346.
- [21] 郝燕芳,刘宝元,杨扬,等.中国 5 种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J].水土保持学报,2018,32(2):150-159.
- [22] 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.
- [23] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J].土壤学报,2014,51(5):974-982.
- [24] 郑腾辉,周旺,刘涛,等.连续模拟降雨下岩溶区含砾石堆积体坡面径流产沙特征[J].水土保持学报,2020,34(3):55-60.
- [25] 蒋芳市,陈培济,黄炎和,等.集中水流下土石混合崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J].水土保持学报,2017,31(6):8-14,99.
- [26] Wirtz S, Seeger M, Zell A, et al. Applicability of different hydraulic parameters to describe soil detachment in eroding rills[J].PLoS One,2013,8(5):e64861.
- [27] 张冠华,胡甲均.径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J].水科学进展,2019,30(2):294-304.
- [28] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.
- [29] 王蕙,卢德宝,黄冬菁,等.不同砾石存在形式红壤坡面侵蚀特征的比较[J].中国水土保持科学,2019,17(4):49-58.