

# 黄麻土工布覆盖对花岗岩红壤表土坡面侵蚀特性的影响

董博文, 孙耀清, 梁祥鹏, 胡强

(信阳农林学院 林学院, 河南 信阳 464000)

**摘要:** [目的] 探究黄麻土工布覆盖条件下花岗岩红壤表土坡面侵蚀特性, 为花岗岩红壤区坡面土壤侵蚀防治提供科学依据。[方法] 通过室内模拟降雨试验, 在2个坡度(5°和15°坡度)、3种密度(无覆盖, 6 cm × 6 cm 及 3 cm × 3 cm 网格)的黄麻土工布覆盖条件下, 研究极端降雨条件下(90 mm/h)花岗岩红壤表土的坡面侵蚀特性, 并观测径流系数、土壤侵蚀速率、泥沙颗粒变化规律及富集率等指标。[结果] 坡面径流随降雨历时增加而增加, 土壤侵蚀速率则相反, 表明侵蚀过程是一个分离受限的过程。和对照组相比, 黄麻土工布覆盖在不同试验条件下都具有明显的减流减沙作用。另外, 由侵蚀泥沙的粒径分选规律可知, 坡面土壤中的黏粒和粉粒大小的颗粒倾向于被优先选择性搬运, 其结果致使坡面石英粗颗粒富集, 在缓坡(5°)与高密度黄麻土工布覆盖条件下(3 cm × 3 cm 网格)尤为突出。坡面石英粗颗粒随降雨历时增加不断富集进一步增加了原位坡面的侵蚀抗性, 产生了土壤侵蚀速率随降雨历时不断降低的现象。[结论] 高密度黄麻土工布的覆盖能够有效地减流减沙, 增加原位坡面抗蚀性, 是一种有效的水土保持措施, 在今后的土壤侵蚀防治和劣地恢复工作中应该被重视。

**关键词:** 黄麻土工布; 花岗岩红壤; 模拟降雨; 土壤侵蚀速率; 泥沙富集率

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2020)04-0017-08

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 董博文, 孙耀清, 梁祥鹏, 等. 黄麻土工布覆盖对花岗岩红壤表土坡面侵蚀特性的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 17-24. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 04. 003; Dong Bowen, Sun Yaoqing, Liang Xiangpeng, et al. Effects of jute geotextile covering on erosion characteristics of granite red soil slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 17-24.

## Effects of Jute Geotextile Covering on Erosion Characteristics of Granite Red Soil Slope

Dong Bowen, Sun Yaoqing, Liang Xiangpeng, Hu Qiang

(College of Forestry, Xinyang Agricultural and Forestry University, Xinyang, He'nan 464000, China)

**Abstract:** [Objective] The slope erosion characteristics in the granite red soil under different jute geotextile covering conditions were studied in order to provide a scientific basis for regional soil erosion control. [Methods] The slope erosion characteristics of granite red topsoil were investigated in terms of runoff coefficient, soil erosion rate, particle size distribution, and the enrichment ratio of eroded sediment through rainfall simulation experiments under the extreme rainfall intensity (90 mm/h) at slopes with 5° and 15° slope gradients and three different jute geotextile mulching conditions (uncovered, 6 cm × 6 cm, and 3 cm × 3 cm). [Results] The runoff increased with rainfall duration, in contrast to a decrease in the soil erosion rate, indicating a detachment-limited erosion process. Compared to the uncovered treatment, jute geotextile mulching obviously reduced runoff and sediment under different experimental conditions. Additionally, sorting of the eroded sediment revealed that the clay-and silt-sized particles along the slope were preferentially

收稿日期: 2020-02-12

修回日期: 2020-04-13

资助项目: 河南省林木种质资源普查项目(豫林种[2016]171)

第一作者: 董博文(1993—), 男(汉族), 河南省信阳市人, 硕士, 助教, 主要从事水土保持与生态修复研究。Email: ablejusise@163.com。

通讯作者: 孙耀清(1965—), 男(汉族), 河南省驻马店市人, 硕士, 教授, 主要从事林业资源与环境研究。Email: 371559567@qq.com。

and selectively transported, resulting in the enrichment of quartz coarse particles on the slope surface, especially at the gentle slope ( $5^\circ$ ) and high jute geotextile coverage ( $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ ). With rainfall duration, the continuous enrichment of quartz coarse particles on the slope further enhanced the erosion resistance of in-situ slope, corresponding to the gradual decrease of soil erosion rate with rainfall duration. [Conclusion] High-density jute geotextile covering can effectively reduce the runoff and sediment, and can increase the erosion resistance of in-situ slope, suggesting its potential as an effective measure for soil erosion prevention and restoration.

**Keywords:** jute geotextile; granite red soil; simulated rainfall; soil erosion rate; enrichment ratio

南方红壤区是我国水土流失的严重区域之一,其中面积在  $2.00\times 10^5\text{ km}^2$  以上的花岗岩区尤为突出。南方高温湿润的气候特点有助于母岩风化,形成深厚的风化壳<sup>[1]</sup>。日益紧张的人地关系、滥砍乱发、无序开发建设等人为因素诱导、加速了低山丘陵区的土壤侵蚀。花岗岩结构松散,富含石英砂砾,具有不同于其他母质发育的土壤的特殊型。一旦花岗岩红壤坡面发生土壤侵蚀,坡面细沟侵蚀极易演变成沟蚀,形成危害巨大的“生态溃疡”——崩岗侵蚀。这类侵蚀治理难度大,会毁坏房屋道路,沙压农田,淤积水库塘堰,严重影响当地社会、生态、经济的发展和安<sup>[1]</sup>。从崩岗的侵蚀类型演变来看,崩岗大多数由地面径流形成的细沟侵蚀发育而来,是坡面侵蚀沟谷发育的高级阶段<sup>[1-2]</sup>。降雨达到地表后,雨滴和薄层径流呈点状、片状或面状地剥蚀表面土壤。当坡面形成径流后,径流对花岗岩风化残积土产生下切侵蚀,在切穿表土后,坡面形态由无定型的细沟发育到永久性、固定型的浅沟、切沟和冲沟<sup>[1]</sup>。尤其是在植被被破坏后,裸坡演化为沟蚀的速度更迅速。因此,花岗岩地区红壤坡面侵蚀的发生机制和防治工作近些年来一直是学者们的研究热点<sup>[3]</sup>。如蔡崇法等<sup>[4]</sup>研究了花岗岩红壤表土特征及对坡面侵蚀的影响,认为花岗岩红壤稳定的表土是一个上部多砾石、下部较紧密的紧实层,紧实层的存在影响地表入渗和坡面产流产沙量。张德谦等<sup>[5]</sup>研究了花岗岩红壤各层次土体的坡面侵蚀特性和各粒径泥沙的分选规律,指出淋溶层具有较强的抗侵蚀能力,在侵蚀过程中坡面细颗粒流失严重。对于花岗岩风化壳上粘下砂、上紧下松的特点,表土对于表下层土壤具有重要的保护作用,一旦表土被切穿、剥离,表下层极易发生更严重的侵蚀<sup>[5]</sup>。近年来,生物工程防治、坡面削坡开级、坡面覆盖物的生态治理等新兴措施逐渐兴起,越来越发挥重要的作用。因此,部分学者将红壤坡面侵蚀防治的研究重心集中在坡面覆盖因子的影响上,合适的覆盖物能够有效地减少坡面的土壤侵蚀和径流<sup>[6-8]</sup>。目前,已有的

研究中使用的坡面覆盖物主要为秸秆覆盖<sup>[6-7]</sup>、砾石覆盖<sup>[8]</sup>等措施。黄麻土工布是用低等麻或麻纺下脚料织成的网状物,是国内一种常见的农业工程材料。近些年来,土工布逐渐被引入了坡面水土保持技术中,在防治工程边坡侵蚀方面有一定应用前景<sup>[9]</sup>。它含有良好的天然纤维,具有良好的透水性、隔离性、防渗防护,工程效益见效快,能迅速建立植被,在改善土壤结构,拦蓄径流泥沙等方面有巨大优势<sup>[9-10]</sup>。张勇等<sup>[11]</sup>报告了花岗岩红壤在黄麻土工布覆盖影响下的坡面侵蚀特性,包括坡面产流产沙、泥沙粒径分选等。然而,该试验只考虑了有黄麻覆盖与无黄麻土工布覆盖条件及陡坡条件,在不同坡度梯度和网格大小的黄麻土工布覆盖条件下的坡面侵蚀特性尚未见报道,尤其是花岗岩红壤表土的坡面侵蚀特性还需进一步的研究。基于以上研究背景,本试验以花岗岩红壤表土层为研究对象,通过室内模拟降雨试验的方法,探究黄麻土工布控制条件下花岗岩红壤的坡面侵蚀特性,以为花岗岩红壤区坡面侵蚀的防治工作提供一定的科学参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤

采样点位于湖北省咸宁市通城县五里镇( $29^\circ 12' 39''\text{N}$ ,  $113^\circ 46' 26''\text{E}$ ),该地区气候属于北亚热带季风气候,气候温和,年平均气温为  $17.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,无霜期为 260 d 左右,平均年降雨 1 604 mm。通城县广泛出露着花岗岩母质发育的松散土体,花岗岩占全县地层岩石面积的 80% 以上。采样点的土地利用方式为林地,主要植物有马尾松、金樱子、铁芒萁等。在前期野外调查的基础上,选取了典型土壤剖面,并将其上部 0—15 cm 厚度的表层土壤采集并运回实验室。同时,3 个  $100\text{ cm}^3$  环刀原状土样被采集用于测定自然状态下土壤容重。将土样自然风干并过 10 mm 筛网,剔除石块、根系等杂质。土壤理化性质采用常规方法测定<sup>[12]</sup>,土壤容重和土壤含水率通过烘干环刀

样获得;pH值通过1:2.5土水比混合浸提后,电极法测定;土壤的机械组成(国际制)采用湿筛法和吸管

法测定;有机质为重铬酸钾外加加热法。上述试验每组重复3次进行,结果见表1。

表1 研究区土壤基本性质

容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土粒密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	土壤含水率/ %	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH值	机械组成/%			
					黏粒	粉粒	砂粒	砾石
1.35	2.58	19.91	23.37	4.07	29.40	33.20	31.60	5.80

## 1.2 试验方法

1.2.1 试验设备 模拟降雨通过自动模拟降雨系统提供,该降雨器通过控制供水压力和不同的喷头组合可以实现15~220 mm/h降雨强度范围,且降雨均匀度>90%,降雨高度为10 m,雨滴到达坡面表面时可以达到终点速度。试验土槽规格为2.0 m(长)×1.2 m(宽)×0.4 m(高),坡度可在0°~30°自由调节(见图1)。

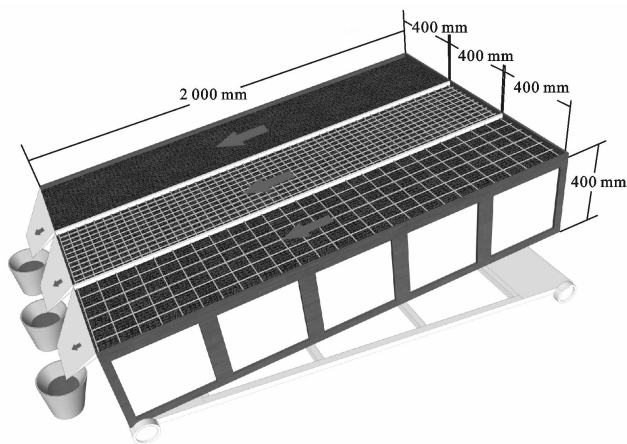


图1 试验土槽示意图

1.2.2 土槽制备 在填装土壤前,将土槽底部填装15 cm鹅卵石与细沙以便坡面自由排水。根据野外采集的环刀测定的容重,将试验土壤填入土槽。土壤采用分层填装的方法,以每层5 cm的增量进行填装,逐层填至40 cm。为保证土壤颗粒分布均匀、贴合紧密,在填入上层土壤前将下层土壤刮毛处理。每组试验重复进行2次。土槽完成填装后,在土壤表面覆盖一层纱布以减少预湿润降雨对坡面的影响。试验开始前以30 mm/h的雨强对坡面进行预湿润处理,直至坡面开始产流,然后将其放置24 h自由排掉重力水。当通过TDR(time domain reflectometry)测定的坡面土壤含水率将至20%时,开始进行降雨试验。

1.2.3 试验设置 试验于2018年3月至2019年3月在华中农业大学降雨大厅进行,每个处理试验重复

2次。针对我国亚热带气候区典型的强风暴<sup>[13]</sup>,试验设置了90 mm/h的降雨强度。丁光敏等<sup>[14]</sup>对福建崩岗侵蚀成因的调查发现10°~25°是最易产生侵蚀的坡度,同时也是崩岗侵蚀区集水坡面的常见坡度,因此,试验设置了缓坡5°和陡坡15°的2个坡度。本试验中使用的黄麻土工布与张勇等<sup>[11]</sup>的材料一样,黄麻直径为5 mm。依据坡面覆盖度和黄麻土工布的网格大小,试验依次设置了对照无覆盖组(CK)、6 cm×6 cm组(T<sub>1</sub>)和3 cm×3 cm组(T<sub>2</sub>)3个处理(图1)。

1.2.4 观测指标和数据处理 在降雨试验开始前,将土槽调整至目标坡度,并将降雨强度校准到目标强度(误差<5%)。当坡面开始产流后,试验开始计时,每场降雨持续60 min。试验过程中,通过放置在土槽四周的雨量筒实时监测降雨强度。降雨过程中通过铝盒与塑料桶收集泥沙样,采集间隔为2 min。将铝盒中的泥沙样称重、烘干后,结合塑料桶收集的泥沙样,获得坡面产流量、含沙量等数据。径流系数为坡面产流量与坡面实时降雨量之比。在本研究中,考虑到花岗岩红壤土壤团聚体的弱稳定性,选择最终粒径分布(分散处理)来表征泥沙的粒径分布,其通过湿筛法和吸管法得到。由于>0.1 mm泥沙粒径在沉降筒中沉降太快,因此将上述烘干铝盒(每4 min)中的土壤转移进烧杯,移除有机质并分散后,过0.1 mm的筛网。粒径>0.1 mm的泥沙过2 mm的筛网进一步筛分,粒径<0.1 mm的泥沙通过吸管法获取泥沙的粒径分布。泥沙粒径被划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)及砾石(2~10 mm)。

本研究选取下列相关参数。土壤侵蚀速率 $[g/(m^2 \cdot \text{min})]$ 为单位时间、单位侵蚀面积上土壤在坡面径流侵蚀力的作用下被剥蚀的土壤颗粒质量<sup>[15]</sup>:

$$E = \frac{m_t}{BLT} \quad (1)$$

式中: $E$ 为土壤侵蚀速率 $[g/(m^2 \cdot \text{min})]$ ;  $m_t$ 为 $T$ 时间内的累计产沙量(kg);  $B$ 为水面宽度(这里用土槽

宽度代替)(cm);  $L$  为坡长(m);  $T$  为时间(min)。泥沙颗粒的富集率,用于研究土壤侵蚀过程中泥沙中各粒级泥沙颗粒的富集现象<sup>[6]</sup>,具体计算公式为:

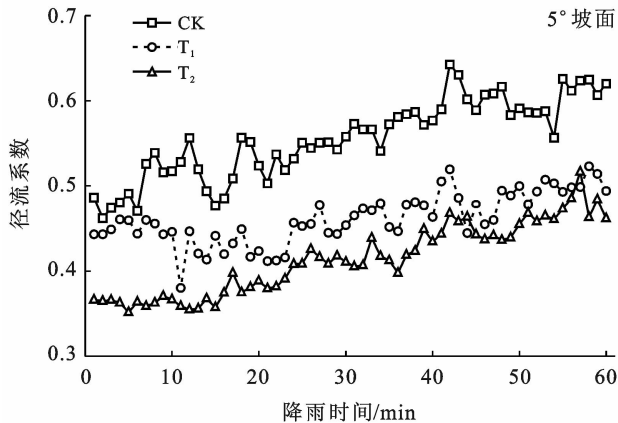
$$E_R = \frac{P_s}{P_o} \quad (2)$$

式中: $E_R$  为富集率;  $P_s$  为各粒径泥沙颗粒的质量占泥沙总质量百分比(%);  $P_o$  为相应粒径的土壤颗粒占原始土壤的百分比(%). 富集率 $>1$  表示泥沙中该粒径颗粒比原始土壤中相应颗粒所占的比例更大,富集率 $<1$  则表示泥沙中该粒径颗粒小于原始土壤中相应颗粒所占的比例。平均重量(MWD)直径(mm)为用以表征泥沙和土壤粒径分布的指标:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i+1} + r_i}{2} \times m_i \quad (3)$$

式中: $r_i$  为第  $i$  个筛子孔径(mm),  $r_0 = r_i$ ,  $r_n = r_{n+1}$ ;  $m_i$  为第  $i$  个筛网中颗粒的质量分数;  $n$  为筛子的数量。

本试验中,数据处理通过 Excel 与 Origin 2020 软件完成。



## 2 结果与分析

### 2.1 坡面产流产沙过程

在本试验中,坡面侵蚀属于溅蚀-片蚀(细沟间侵蚀)过程的范畴,泥沙的分离与输移是由雨滴的击溅作用和降雨引起的坡面薄层径流所驱动。图 2 表示不同试验条件下坡面径流系数随降雨历时的变化。由图 2 可知,坡面径流系数随降雨历时呈逐渐增加的趋势。在降雨初期,雨水下渗延缓了径流的产生<sup>[6]</sup>。随着降雨的持续,土壤含水率逐渐饱和,同时大团聚体破碎形成的细颗粒逐渐堵塞土壤孔隙,从而促进了径流的产生与增加,当坡面入渗率趋于稳定时,径流率也趋于稳定<sup>[5]</sup>。另外,坡面径流量随着坡度的增加呈现增加的趋势,而随黄麻土工布覆盖密度(无覆盖 CK 至 6 cm×6 cm 网格 T<sub>1</sub>, 3 cm×3 cm 网格覆盖 T<sub>2</sub>) 的增加呈现减小的趋势。如在 T<sub>1</sub> 覆盖条件下缓坡与陡坡的平均径流系数分别为 0.56 和 0.46,而当坡面覆盖由无覆盖(CK)增加到 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> 时,缓坡条件下坡面的平均径流系数分别为 0.64, 0.56 及 0.49。

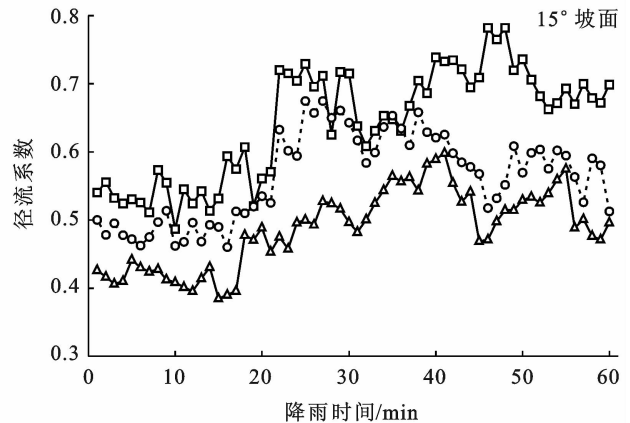


图 2 径流系数随降雨历时变化过程

如图 3 所示,本试验采用了土壤侵蚀速率对坡面侵蚀产沙进行了定量化表达。在各试验条件下,土壤侵蚀速率随降雨历时呈现逐渐减小的趋势。结合上述坡面径流随降雨历时逐渐增加的规律,表明坡面侵蚀过程是一个侵蚀分离受限的过程。和径流系数的规律相似,土壤侵蚀速率随着坡度的增加而增加。坡度的增加一方面使坡面土体稳定性降低,另一方面增加了径流在坡面方面的重力分力,使其侵蚀力和能量增加,更易侵蚀及搬运土壤<sup>[6,16]</sup>。同时,当坡面覆盖由无覆盖(CK)增加到 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> 时,土壤侵蚀速率逐渐减小,如在陡坡条件下 3 种覆盖处理的坡面土壤侵蚀速率分别为 55.05, 38.20 及 22.92 g/(m<sup>2</sup>·min),相

比之下,2 种黄麻土工布处理使土壤侵蚀分别减少了 28.0% 和 56.8%。本试验中尽管与其他研究所使用的土壤类型和覆盖物不同,但同样达到了相应的减流减沙效果。

### 2.2 泥沙分选过程

整体上,在缓坡和陡坡条件下各粒径泥沙颗粒的变化呈现了相似的规律(见图 4)。泥沙中黏粒和粉粒颗粒的含量随黄麻土工布覆盖密度的增加而增加,而砂粒和砾石颗粒的含量则相反。各粒径颗粒随降雨历时的变化则表现出相反的规律,黏粒和粉粒颗粒的百分比均随降雨历时而逐渐减少,粒径较大的砂粒和砾石颗粒的百分比均随降雨历时而逐渐增加。其

原因是在坡面片蚀阶段,坡面的土壤被薄层径流层状剥蚀,径流搬运能力不足,悬移是主要的搬运机制,细颗粒倾向于被径流优先选择性搬运<sup>[7]</sup>,石英粗颗粒由于其质量较大而难以搬运。然而,随着降雨的持续,

一方面土壤表面细颗粒逐渐耗尽,另一方面土壤表面形成结皮,侵蚀受到限制,径流能量逐渐更多地消耗在粗颗粒的搬运上<sup>[16]</sup>。虽然,随着降雨的持续粗颗粒含量在逐渐增加,但泥沙中仍以细颗粒为主。

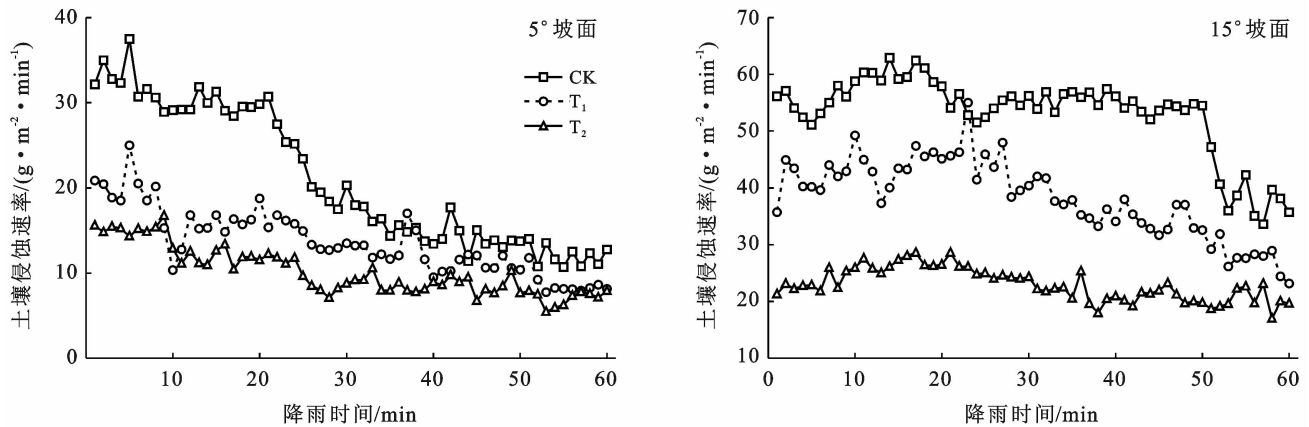


图 3 土壤侵蚀速率随降雨历时变化过程

各试验条件下侵蚀泥沙颗粒的富集率变化如图 5 所示。从图 5 可以看出,泥沙中黏粒和粉粒颗粒呈现富集的规律,而砂粒和砾石颗粒呈现亏损的规律。这一结果间接表明随着降雨的持续,坡面土壤中的石英粗颗粒逐渐倾向于被留在坡面,并不断在坡面富集形成一层粗粒覆盖层,这与我们在野外观察到的现象一致。另外,在本试验的短时强降雨条件下,缓坡更有利于泥沙中细颗粒的富集,坡度的增加使泥沙趋于粗化(见图 5)。如  $T_1$  处理下,当坡度由  $5^\circ$  增加到  $15^\circ$  时,泥沙中黏粒的富集率由 1.27 减少到了 1.17,而砂粒的富集率由 0.60 增加到了 0.74。坡度的增加使难以搬运的粗颗粒开始倾向于被搬运,加之径流能量增加,导致泥沙中粗颗粒所占的比例增加,进而造成细颗粒的相对含量下降<sup>[17]</sup>。

黄麻土工布的存在明显有利于泥沙中细颗粒的富集(见图 5)。随着黄麻土工布覆盖密度的增加,泥沙中细颗粒的富集率呈现增加的趋势,粗颗粒的富集率则相反。在缓坡条件下,当黄麻土工布覆盖密度增加时,黏粒的富集率由 1.19 增加到了 1.27,1.38。和无覆盖试验相比,即使在陡坡条件下,黄麻土工布对径流搬运的大颗粒也具有明显的拦截效应,其结果导致石英粗颗粒更多地富集在坡面表面。泥沙颗粒的平均重量直径(MWD)提供了更直观的证据(见图 6)。泥沙颗粒的 MWD 越大,说明泥沙越粗糙。对 MWD 分析可知,缓坡条件下,3 个处理的泥沙 MWD 平均值分别为 0.37,0.30,0.22 mm,陡坡条件下泥沙

MWD 平均值分别为 0.44,0.37 和 0.31 mm,表明泥沙随坡度的增加呈现越加粗糙的规律,随着黄麻土工布覆盖密度的增加呈相反的规律。和无覆盖处理相比,黄麻土工布覆盖处理进一步使土壤中的粗粒富集在坡面,对坡面的侵蚀过程具有重要影响。

### 3 讨论

水力侵蚀涉及了由降雨溅蚀和地表径流引起的土壤分离、泥沙输移、泥沙沉积 3 个过程<sup>[7]</sup>。雨滴和薄层径流的能量用于克服土壤颗粒之间的黏结力,并将剥离的土壤颗粒运输到其他位置<sup>[18]</sup>。在本试验中,坡面径流量和土壤侵蚀速率随着黄麻土工布覆盖密度(CK 至  $T_1$ ,  $T_2$ )的增加而减小。试验中使用的网格状黄麻土工布与 Shi 等<sup>[7]</sup>的研究中使用秸秆覆盖措施的效果相似,他指出当坡面覆盖率分别增加 12.7% 和 86.6% 时,坡面稳定产流率分别减少了 8.2% 和 75.5%,同时坡面覆盖极大地减少了土壤侵蚀,尤其是在高密度覆盖条件下坡面含沙量减少了 20 多倍。Lin 等<sup>[6]</sup>报告了在高密度覆盖条件下由于入渗的增加导致土壤侵蚀量出现了转折。究其原因,一方面黄麻土工布能够增加土壤表面糙度,增加入渗能力,减少径流量及流速,削减径流能量,从而减少径流的侵蚀能力及挟沙能力;另一方面黄麻土工布能够削减、分散降雨能量,阻止雨滴直接打击土壤表面,减少土壤颗粒的侵蚀和破碎,抑制土壤结皮的发生与发展<sup>[8]</sup>。

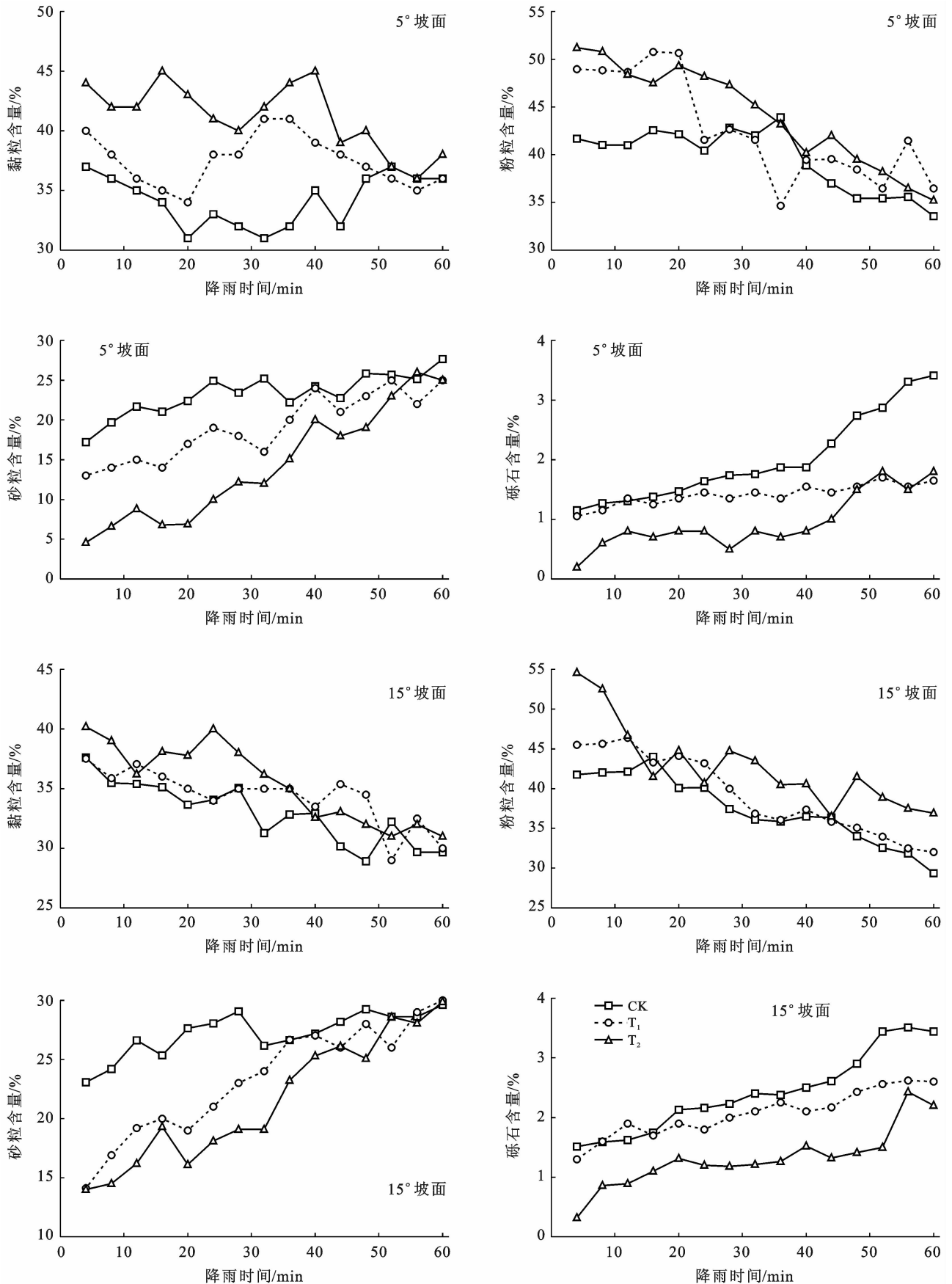


图 4 不同试验条件下各粒径泥沙颗粒随降雨历时的变化规律

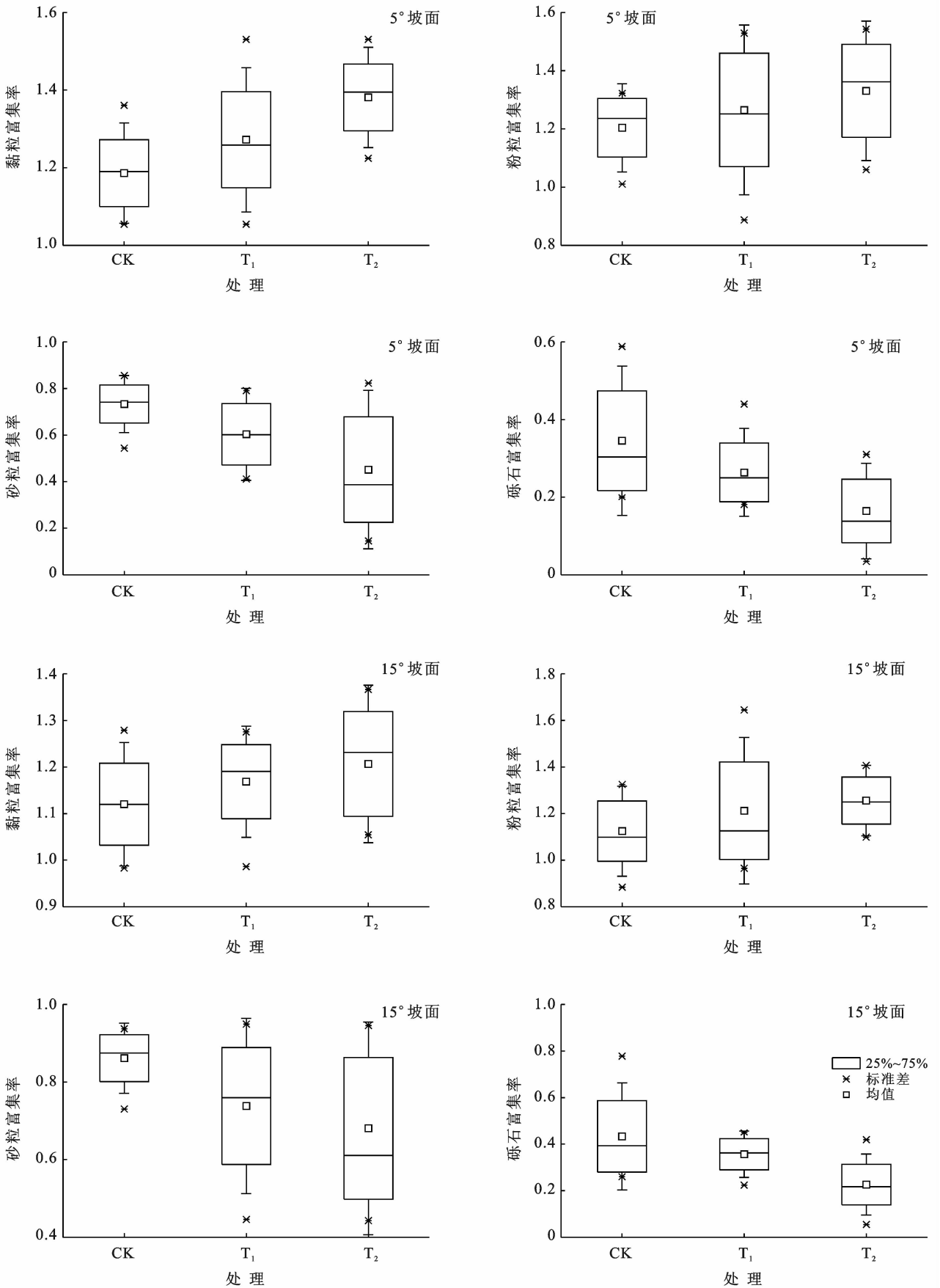


图 5 不同试验条件下各粒径泥沙颗粒富集率

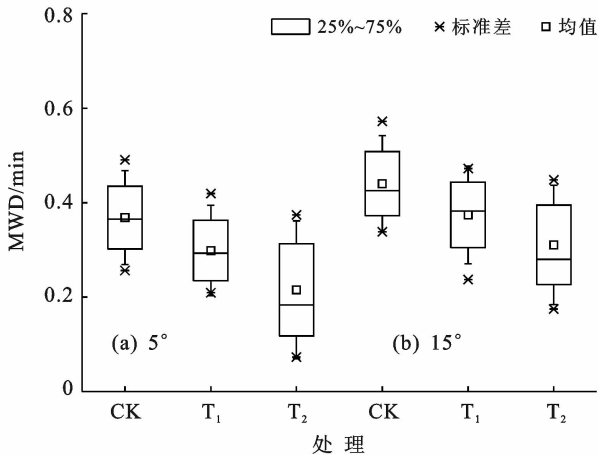


图 6 不同试验条件下泥沙颗粒的平均重量直径(MWD)

坡面的侵蚀过程是一个泥沙颗粒的分选过程,泥沙的粒径分布与富集率可以为坡面的原位和异位侵蚀提供更多的信息<sup>[7]</sup>。泥沙中黏粒和粉粒颗粒的含量随黄麻土工布覆盖密度的增加而增加,而砂粒和砾石颗粒的含量则相反。黄麻土工布覆盖密度的增加不仅导致了坡面径流量的减少,也增加了土壤表面糙度,致使径流剥蚀、搬运泥沙时需要消耗更多的能量,使易蚀的细颗粒被优先剥蚀、搬运。然而,泥沙中黏粒和粉粒颗粒的含量通常高于原始土壤,砂粒和砾石颗粒的含量低于原始土壤,这个结果直接反映在各粒径颗粒的富集率上:黏粒和粉粒颗粒的富集率 $>1$ ,而砂粒和砾石颗粒的富集率 $<1$ 。这与 Lin 等<sup>[6]</sup>采用崩积堆土壤获得的研究结果相似。尤其是,黄麻土工布覆盖密度对泥沙中细颗粒的富集有积极的作用。黄麻土工布覆盖密度越高,泥沙中黏粒和粉粒颗粒的富集率越高,相应地,石英粗颗粒随之更多地富集在坡面表面。Shi 等<sup>[7]</sup>指出在坡面秸秆覆盖率较低时( $\leq 30\%$ )坡面分离受限机制占主导地位。在本试验中,分离受限机制和黄麻土工布对降雨和径流能量的削减有关,黄麻土工布覆盖密度越高,径流能量越小,越难以搬运质量较大、启动难度大的石英粗颗粒,这与前文的分析结果一致。研究<sup>[8]</sup>表明,砾石覆盖对土壤的物理性质起重要作用。石英粗粒覆盖层的存在类似于坡面覆盖物的作用,不仅能够直接削减降雨和径流能量,减少雨滴的直接打击作用,还增加了坡面糙度,能够拦截被侵蚀的泥沙,尤其是泥沙中的大颗粒<sup>[7]</sup>。对于花岗岩红壤这种特殊类型的土壤,石英粗颗粒的不断富集也是造成坡面侵蚀分离受限机制、土壤侵蚀速率随降雨的持续而逐渐降低的原因(见图 3)。相比裸坡,黄麻土工布覆盖导致坡面原位在后续侵蚀过程中有更高的侵蚀抗性,并形成一个正反馈过程。但是,原位产生的含沙量少的径流有可能会增加下坡异位的侵蚀。

## 4 结论

(1) 各试验条件下,坡面径流系数和土壤侵蚀速率随坡度的增加呈现增加的趋势,随黄麻土工布覆盖密度的增加呈现减少的趋势。土壤侵蚀速率随降雨历时的增加呈现减小的趋势,径流系数则相反。黄麻土工布覆盖的存在能够有效地减少坡面径流量与土壤侵蚀速率。

(2) 侵蚀泥沙中黏粒和粉粒颗粒的百分比均随降雨历时逐渐减少,砂粒和砾石颗粒的百分比则相反,同时泥沙中黏粒和粉粒颗粒的含量通常高于原始土壤,砂粒和砾石颗粒的含量低于原始土壤。黏粒和粉粒颗粒倾向于被优先输移。

(3) 不同粒径大小的泥沙颗粒的输移过程均具有选择性,泥沙中黏粒和粉粒颗粒呈现富集的规律,而砂粒和砾石颗粒呈现亏损的规律。这间接表明坡面发生了粗颗粒的富集,尤其出现在在缓坡与高密度黄麻土工布覆盖条件下。泥沙颗粒的 MWD 直观地证明了上述结果。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 廖义善,唐常源,袁再健,等. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [2] 阮伏水. 福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1996, 12(S1): 24-31.
- [3] 刘洪鹄,谢浩,钱峰. 南方崩岗侵蚀机理及治理浅见[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 30-34.
- [4] 蔡崇法,丁树文,张光远. 花岗岩红壤表土特征及对坡面侵蚀影响的研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(4): 111-115.
- [5] 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(3): 1-13.
- [6] Lin Jinshi, Zhu Gaoli, Wei Jia, et al. Mulching effects on erosion from steep slopes and sediment particle size distributions of gully colluvial deposits [J]. Catena, 2018, 160: 57-67.
- [7] Shi Zhi Hhua, Yue Benjiang J, Wang Ling, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 257-267.
- [8] 王小燕,李朝霞,蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 38-45.
- [9] 丁树文,胡立勇,彭定祥,等. 黄麻土工布控制红壤坡面侵蚀的研究[J]. 华中农业大学学报, 2000, 19(4): 346-349.



- [19] 王远见,傅旭东,王光谦.黄河流域降雨时空分布特征[J].清华大学学报(自然科学版),2018,58(11):972-978.
- [20] 刘都喜,赵基元,催殿和,等.黄河中游河龙区间水沙特性分析[J].东北水利水电,2011,29(6):40-41.
- [21] 毕彩霞.黄河中游皇甫川流域产沙性降雨及其对径流输沙的影响[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.
- [22] 司海松,沈冰,李洁,等.多沙粗沙区5流域水沙变化及其对人类活动的响应[J].水电能源科学,2017,35(2):86-90.
- [23] Wischmeier W. Use and misuse of universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1976,31(1):5-9.
- [24] 马小晴,郑明国.基于统计检验的降雨侵蚀力简易计算模型比较[J].资源科学,2018,40(8):1622-1633.
- [25] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,30(6):705-711.
- [26] 陈光舟,张晓红.淮河流域面雨量计算方法比较分析[J].安徽农业科学,2009,37(24):11637-11640.
- [27] 邵峰晶,于忠清.数据挖掘的原理与算法[M].北京:中国水利水电出版社,2003:177-186.
- [28] 郑帅,赵晓东.基于距离函数的改进 K-means 算法[J].电脑知识与技术,2015,11(34):167-169.
- [29] 么枕生.聚类统计检验用于气候分类[M].北京:气象出版社,1997.
- [30] 于亚文.洞庭湖水沙变化过程及其对人类活动的响应研究[D].上海:华东师范大学,2018.
- [31] 穆兴民,陈国良.黄土高原降水与地理因素的空间结构趋势面分析[J].干旱区地理,1993,30(2):71-76.
- [32] 穆兴民,徐学选,陈国良.黄土高原降水量的地理地带性研究[J].水土保持通报,1992,30(4):27-32.

(上接第24页)

- [10] 胡立勇,汪在芹,丁树文,等.黄麻土工布与苜蓿结合控制水土流失效应的研究[J].水土保持学报,2001,15(4):55-58.
- [11] 张勇,丁树文,万绍文,等.黄麻土工布对不同层次土体的水土保持效用分析[J].水土保持学报,2014,28(4):23-28.
- [12] 中科院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [13] Jiang Fangshi, Huang Yanhe, Wang Mingkun, 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.
- [14] 丁光敏.福建省崩岗侵蚀成因及治理模式研究[J].水土保持通报,2001,21(5):10-15.
- [15] 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.
- [16] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.坡度和雨强对花岗岩崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].水土保持研究,2014,21(1):1-5.
- [17] 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.
- [18] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review [J]. Hydrological Processes, 2005,19(14):2815-2844.