

# 花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验

孙丽丽<sup>1,3</sup>, 查轩<sup>1,2,3</sup>, 黄少燕<sup>1,2</sup>, 陈世发<sup>1,3</sup>, 白永会<sup>1,3</sup>, 刘川<sup>1,3</sup>, 常松涛<sup>1,3</sup>

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建师范大学地理研究所,  
福州 350007;3.福建省亚热带资源与环境重点实验室,福州 350007)

**摘要:**为探讨花岗岩红壤区不同治理模式下的土壤抗冲性特性,得出适用于花岗岩红壤区水土保持效果最优的植被恢复模式,选取红壤丘陵区不同治理模式下的土壤作为研究对象,运用湿筛法、原状土冲刷法,在3种冲刷流量(1.5,2.5,3.5 L/min)下,对不同治理模式的土壤抗冲性规律及其影响因素进行研究。结果表明:(1)不同治理模式土壤抗冲系数由大到小分别为条沟草灌带>风水林>全坡面播草>芒萁地>封禁>裸露地>开垦地。治理措施封禁、风水林、全坡面播草、芒萁地、条沟草灌带的冲刷产沙量处于低水平平衡状态,3种冲刷流量(1.5,2.5,3.5 L/min)下,其变化范围分别为0.01~1.12,0.02~1.53,0.02~2.57 g;CK1和CK2冲刷产沙量最大,其冲刷产沙量变化范围分别为0.08~65.20,0.07~60.56,0.24~80.60 g。(2)条沟草灌带和风水林的土壤总孔隙度、>0.25 mm水稳性团聚体含量、根系表面积、体积、根长和生物量分别占有治理模式的37.08%,80.38%,44.15%,45.12%,52.11%,57.91%。(3)条沟草灌带和风水林的团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、根长密度和根重密度均较大,分别占有治理模式的55.76%,44.06%,52.18%,54.91%。说明条沟草灌带和风水林水土保持效果较优,研究结果为控制红壤区水土流失和揭示相关侵蚀机理提供参考。

**关键词:**水土保持;土壤抗冲性;植被恢复;土壤侵蚀;根系;土壤团聚体

**中图分类号:**S157.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2019)05-0034-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.006

## Experimental on Soil Anti-scourability Factors Under Different Management Modes in Granite Red Soil Region

SUN Lili<sup>1,3</sup>, ZHA Xuan<sup>1,2,3</sup>, HUANG Shaoyan<sup>1,2</sup>, CHEN Shifa<sup>1,3</sup>,

BAI Yonghui<sup>1,3</sup>, LIU Chuan<sup>1,3</sup>, CHANG Songtao<sup>1,3</sup>

(1.College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2.Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fuzhou 350007)

**Abstract:** In order to explore the soil anti-scourability under different vegetation planting modes and find out the best vegetation planting patterns for soil and water conservation in red soil region, the soil under different planting modes in red soil hilly region was selected as the research object. The soil anti-scourability under three different scouring flow (1.5, 2.5, 3.5 L/min) was studied by wet screening method and the undisturbed soil sample washing experiment. The results showed that: (1) The coefficients of soil anti-scourability under different vegetation planting patterns ranged as: stripe grass shrub belt > geomantic forest > planting grass on the whole slope > mango rake land > closure land > bare land > reclaimed land. The scouring sediment yield of the three scouring flows was in a low level equilibrium state. The scouring sediment yield ranged from 0.01 ~ 1.12, 0.02 ~ 1.53 and 0.02 ~ 2.57 g, respectively. CK1 and CK2 had the largest scouring sediment yield, ranging from 0.08 ~ 65.20, 0.07 ~ 60.56 and 0.24 ~ 80.60 g, respectively. (2) Soil total porosity, > 0.25 mm water-stable aggregates content, root surface area, root volume, root length and root biomass in trench grass irrigation belt and geomantic forest accounted for 37.08%, 80.38%, 44.15%, 45.12%, 52.11% and 57.91% of all modes respectively. (3) The average weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates, root length density and root weight density were the larger in the shrub

**收稿日期:**2019-03-13

**资助项目:**国家重点研发计划项目(2017YFC0505400);福建师范大学研究生科研创新基金项目(QSX20170764);国家科技支撑计划项目(2014BAD15B02)

**第一作者:**孙丽丽(1993—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:17805958627@163.com

**通信作者:**查轩(1961—),男,博士生导师,研究员,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:zxha@fjnu.edu.cn

belts and geomantic forests, accounting for 55.76%, 44.06%, 52.18% and 54.91% of all modes, respectively. The results could provide reference for controlling soil erosion and revealing the mechanism of erosion in red soil region.

**Keywords:** soil and water conservation; soil anti-scourability; vegetation restoration; soil erosion; roots; soil aggregates

土壤退化的主要原因通常是土壤侵蚀,水土流失是世界范围的土壤退化形式<sup>[1]</sup>。南方红壤丘陵考察区的平均侵蚀模数为 3 419.8 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[2]</sup>。长汀县是我国南方红壤区水土流失最为严重的区域之一,也是福建省水土流失最为严重的县份之一,其 2012 年水土流失总面积为 300.84 km<sup>2</sup>,占土地面积的 9.71%,生态环境仍然十分脆弱<sup>[3-4]</sup>,严重影响了当地经济发展。南方红壤丘陵区具有特殊地貌特征和水土流失类型,它既是长江中下游的重要生态屏障,又是南方主要的耕作区,目前关于南方红壤丘陵区土壤抗冲性与水土流失之间内在联系的研究却比较少。

土壤抗冲性即土壤抵抗径流冲刷的能力和抵抗其机械破坏和推动下移的性能,其主要与土壤物理性质与外在的生物因素有关,是评价土壤结构稳定性及其抗侵蚀能力的重要指标<sup>[5]</sup>,是土壤侵蚀机制研究的一个重要方面,能较好地体现区域水土流失过程和规律。土壤剥落能力受剪应力、黏聚力、容重、总孔隙度和根系的显著影响,枯枝落叶和腐殖质层可明显增大土壤抗冲性<sup>[6]</sup>。根系是土壤稳定性的最重要的因素<sup>[7]</sup>。大多研究数考虑了单位土体的根系长度和根系直径,但对根系几何构型的研究较少。

李勇<sup>[5]</sup>测定了黄土高原 33 个小区土壤抗冲性与 13 种土壤物理性质参数关系,利用原状土冲刷槽法研究土壤抗冲性与土壤因子间的关系,结果表明,土壤稳定渗透系数、30 min 土壤渗透速率及渗透总量、总孔隙度是影响土壤抗冲性的主导因素。对金沙江河谷冲沟侵蚀区 4 种不同土地利用类型的土壤的抗冲性研究<sup>[8]</sup>发现,表层土壤的抗冲性随时间增长而增强。侯春镁等<sup>[9]</sup>研究 4 种土地利用类型抗冲系数,表现为灌草地<次生林<人工林<坡耕地的规律,还发现土壤抗冲性大小受土地利用方式、植被覆盖、土壤理化性质等因素的影响,而受坡位影响并不明显。Kukul 等<sup>[10]</sup>对印度西北地区不同土地利用方式对土壤团聚体的影响的研究表明,农耕地土壤团聚体的水稳性最差,草地最强。此外植物的坡位和格局不同均影响土壤对径流冲刷的响应<sup>[11]</sup>。由于各地地域特征、土壤类型、土地利用方式等差异较大,因此,各研究在内容、方法、结果上也不尽相同,表现出一定的区域差异。为了揭示红壤丘陵区土壤侵蚀特性对土壤抗冲性的影响。有必要依据福建省自然地理条件,选

取有代表性的治理模式,通过定量分析,确定水土保持效果最好的治理模式。为了增强研究结果的普遍适用性,选择大、中、小(3.5,2.5,1.5 L/min)3 种冲刷量,通过湿筛法,原状土冲刷槽法比较不同植被恢复模式的土壤抗冲性强弱及其影响因素,为该地区树种选择与搭配提供科学依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

福建省长汀县(25°18′—26°02′N,116°00′—116°39′E),地处中亚热带季风气候区,其中年平均气温 17.5~18.8℃,极端最高气温 39.5℃,极端最低气温-6.0℃,无霜期 269.8 d,年平均日照时间 1 792 h。年平均降水量 1 613.5 mm,降水分布不均,3—6 月降水量占全年降水量的 60%,平均相对湿度 79.2%。长汀县成土母质主要有泥质岩和酸性岩,土壤类型主要有花岗岩红壤和紫色土为主,红壤分布占总面积为 79%。植被以亚热带常绿阔叶林为主<sup>[11]</sup>。

### 1.2 样品采集

试验土样采集于 2018 年 7 月,选取有代表性的 7 种植被种植模式的样地,样地大小 20 m×20 m,每个类型样地设置 3 个重复,样地间距大于 10 m。测定和记录样地基本信息(编号、海拔、林冠郁闭度、草本层覆盖度和主要植被),为减少其他因素对土壤物理性质和抗冲性的影响,文中所选样地坡向和坡度大致相同,各样地土壤类型和土壤特征尽可能相似。在每个植被种植模式样地中心和四角均匀布设 5 个 2 m×2 m 小样方,表层 0—10 cm 土层最容易发生水土流失,因此,在各个小样方内用直径为 4 cm 的土钻取 0—10 cm 层土样;为了使所取土壤有代表性,5 个采样点在同一土层深度的土样均匀混合后采用四分法取出大概 1 kg 的土,装入采样盒以避免挤压破坏团聚体,拿回实验室风干磨碎,测定土壤理化性质。以同样的方法,用 25 cm×15 cm×10 cm(长×宽×高)的特制取样器,在每个样方的 0—10 cm 的土层中取土样,用于原状土冲刷试验。根据研究区自然地理条件,依据因地制宜原则,长汀县水土保持局在福建省长汀县设立了不同治理模式,见表 1。

### 1.3 测定方法

2018 年 7 月采集土样,随即带回实验室进行室内分析,土壤干容重采用环刀法取样测定,计算公式

为： $r=w/v$ 。式中： $w$  为环刀中土壤被烘干后的质量(g)； $v$  为环刀的体积( $100\text{ m}^3$ )。土壤水稳性团聚体采用四分法取样，将野外采集的新鲜土壤充分混匀。并去掉土壤中可见植物根系和残体，均匀平铺在干净透气的纸上，放在室内阴凉通风处自行干燥。剔除石块、根系、钙核、动植物残体等杂物，倒入陶瓷研钵中研细，使其全部过 100 目筛，采用沙维诺夫湿筛法<sup>[12]</sup>，分别测定  $>5, 5\sim 2, 2\sim 1, 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25$  mm 的水稳性团聚体的含量。团聚体 MWD(平均重量直径)和 GMD(几何平均直径)是反映土壤团聚体

大小分布状况的常用指标，大团聚体比小团聚体含有更多的碳、氮、颗粒有机质和不稳定有机质<sup>[13]</sup>，因此，计算土壤团聚体平均重量直径(MWD, mm)和土壤团聚体几何平均直径(GMD, mm)来表示土壤中团聚体分布情况，计算公式为：

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n W_i \overline{X}_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \overline{X}_i\right) \quad (2)$$

式中： $W_i$  为第  $i$  粒级团聚体质量(g)； $X_i$  为第  $i$  级团聚体平均粒径(mm)。

表 1 试验样地基本情况

治理模式	海拔/ m	林冠 郁闭度	草本层 覆盖度/%	主要植被
开垦治理(CK1)	320	0	0	无
裸露地(CK2)	320	0	0	无
封禁(M1)	330	0.60	50	马尾松和枫香, 套种胡枝子
风水林(M2)	330	0.75	65	马尾松和木荷, 黄瑞木、赤楠、毛冬青、卵叶小蜡、油茶、黄桅子、石斑木、苦楝, 芒萁
全坡面播草(M3)	320	0.60	68	宽叶雀稗草
芒萁地(M4)	320	0.70	70	芒萁
条沟草灌带(M5)	329	0.80	90	胡枝子, 宽叶雀稗, 穴内种植枫香、木荷、香樟

根系指标测定：冲刷试验结束后，确认土样已被水泡软，将其倒入筛孔为 20 目的筛网，用水冲洗，重复几次，将洗净后的根放入白色的塑料盆内，注入少量水，然后分检植物根系。之后采用扫描仪(EPSON Perfection V700 PHO-TO)对根系进行扫描，根系间无重叠堆积，扫描分辨率为 300 dpi，图片设置为灰度，位深度为 8，保存格式为 bmp 格式，将得到的根系图象用软件(Regent WinRHIZO 2009a)分析得出总根长度、总根系表面积、平均直径、根系总体积，以及各分级的根系参数，之后将根系置于铝盒中，在  $80\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱进行烘干 24 h，用电子天平称重(精确到  $0.001\text{ g}$ )，测定其生物量。根长密度 RLD 和根重密度 RWD 在反映根系生理生态功能方面有重要意义，因此，通过计算根长密度 RLD 和根重密度 RWD 来表示根系吸收养分和水分的能力<sup>[14-15]</sup>。根长密度(RLD)和根重密度(RWD)计算公式为：

$$\text{RLD} = \frac{L}{V} \quad (3)$$

$$\text{RWD} = \frac{Mr}{V} \quad (4)$$

式中：RMD 为根重密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $L$  为烘干根系总重(kg)； $V$  为取样器容积( $\text{m}^3$ )；RLD 为根长密度( $\text{km}/\text{m}^3$ )； $L$  为根系总长度(km)； $V$  为取样器容积( $\text{m}^3$ )。

土壤抗冲性测定：土壤抗冲性采用原状土冲刷法进行测量<sup>[3]</sup>，特制取样器规格  $25\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)，取土深度 10 cm，采集原状土土样带

回室内，为减少取样过程中对原状土的扰动，在取样器上面垫 1 块厚木板，用皮锤缓缓砸下取样器，取样器取好土样后，用铁铲铲掉取样器周围多余土壤，用铁铲沿着取样器底部将土样削平，将取样器放在带小孔的铝制底片上。在冲刷前为保持土壤前期含水量一致，将含有土样的取样器连同带孔铝制底片放入水盘中，注入清水并浸泡 12 h 直至达到饱和，将达到饱和的土样静置于平地上 8 h 以去除重力水，用电子天平称重，之后放置到水槽末端放样室进行土壤冲刷试验，冲刷槽尺寸为规格  $2\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.05\text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的钢制边坡水槽。抗冲装置见图 1。研究区地形坡度范围在  $10^\circ \sim 20^\circ$ ，因此确定试验过程中冲刷坡度为  $15^\circ$ 。以恒压水箱控制水流量，依据当地不同雨量降雨在标准小区的产流情况，选取 3 个冲刷流量 1.5, 2.5, 3.5 L/min。当地平均暴雨历时为 15 min，因此冲刷时间设为 15 min，每个处理 3 次重复。坡面产流后开始计时，每间隔 1 min 用取样瓶取 1 次浑水样。试验结束后水样静置 24 h，之后将取样瓶内上清液倒掉，用清水将泥沙冲至铝盒，置于  $105\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至恒重后称得干土重量。土壤的抗冲性采用抗冲系数表示，抗冲系数为每冲刷掉 1 g 干土所需的时间和水量之积，用 AS (Anti-Scourability,  $\text{g}/\text{min}$ )表示，AS 愈大，土壤的抗冲性愈强<sup>[16]</sup>。

$$\text{AS} = q \times t / M_s \quad (5)$$

式中： $q$  为冲刷流量(L/min)； $t$  为冲刷时间(min)； $M_s$  为烘干泥沙质量(g)。

### 1.4 数据处理与分析

采用 Arcgis 10.1 软件制作研究区地理位置图, CAD 软件制作抗冲装置图, Excel 软件计算土壤容重, 孔隙度和土壤抗冲系数, SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析和多重比较, LSD 法分析不同植被措施下土壤孔隙度、水稳性团聚体、根系特征间的显著性差异, 并用 Pearson 相关系数分析不同影响因子与土壤抗冲性的相关关系。

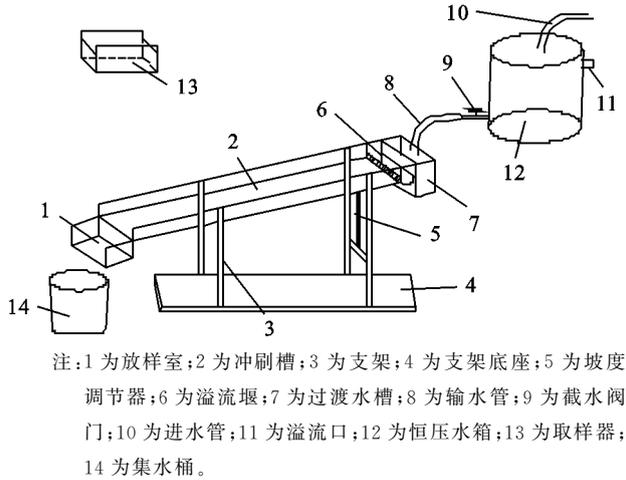


图 1 抗冲装置示意

## 2 结果与分析

### 2.1 不同治理模式下土壤抗冲性特征

不同治理模式对其土壤的物理性质影响不同, 因此抗冲性不同。由图 2 可知, 治理模式不同, 冲刷产沙量有很大差异, CK1 和 CK2 的冲刷产沙量明显高于 M1、M2、M3、M4、M5 的冲刷产沙量, 且有植被治理模式的 M1、M2、M3、M4、M5 的冲刷产沙量基本在低水平平衡状态, 3 种冲刷流量 (1.5、2.5、3.5 L/min) 下, 变化范围分别为 0.01~1.12、0.02~1.53、0.02~2.57 g; 对照组 CK1 和 CK2 的产沙量最大, 其冲刷产沙量变化范围分别为 0.08~65.20、0.07~60.56、0.24~80.60 g。3 种冲刷流量 (1.5、2.5、3.5 L/min) 下, CK1 和 CK2 冲刷产沙量分别为 113.36、177.06、233.66 g, 分别为 M1、M2、M3、M4、M5 冲刷产沙量的 23.85、18.56、15.58 倍, 其中, M5 和 M2 的草本层覆盖度均较高, 其冲刷产沙量在所有治理模式中仅占 2.18%, 说明植被覆盖能降低径流输沙率。不同治理模式的抗冲系数整体上随降雨历时呈减小趋势。从冲刷历时上看, 前 6 min 不同治理模式的冲刷产沙量变化幅度较大, 尤以 CK1 和 CK2 的冲刷产沙量下降幅度最大, 6 min 之后不同治理模式的冲刷产沙量均处于低水平平稳状态。整体上, 冲刷流量越大, 冲刷产沙量越大, 冲刷流量为 1.5 L/min 时, 其冲刷产沙量为 3.5 L/min 时的 47.50%, 为 2.5 L/min 时的 63.30%。

由图 3 可知, CK1、CK2 抗冲系数变化范围为 1.08~

3.21 g/min, 平均值为 2.14 g/min。治理模式 M1、M2、M3、M4、M5 的抗冲系数变化范围为 9.29~41.39 g/min, 平均值为 28.46 g/min, 为 CK1、CK2 的 13.28 倍, 其中 M5 和 M2 的抗冲系数在占有所有治理模式高达 50.66%。不同治理模式土壤抗冲系数由大到小分别为 M5 > M2 > M3 > M4 > M1 > CK2 > CK1。

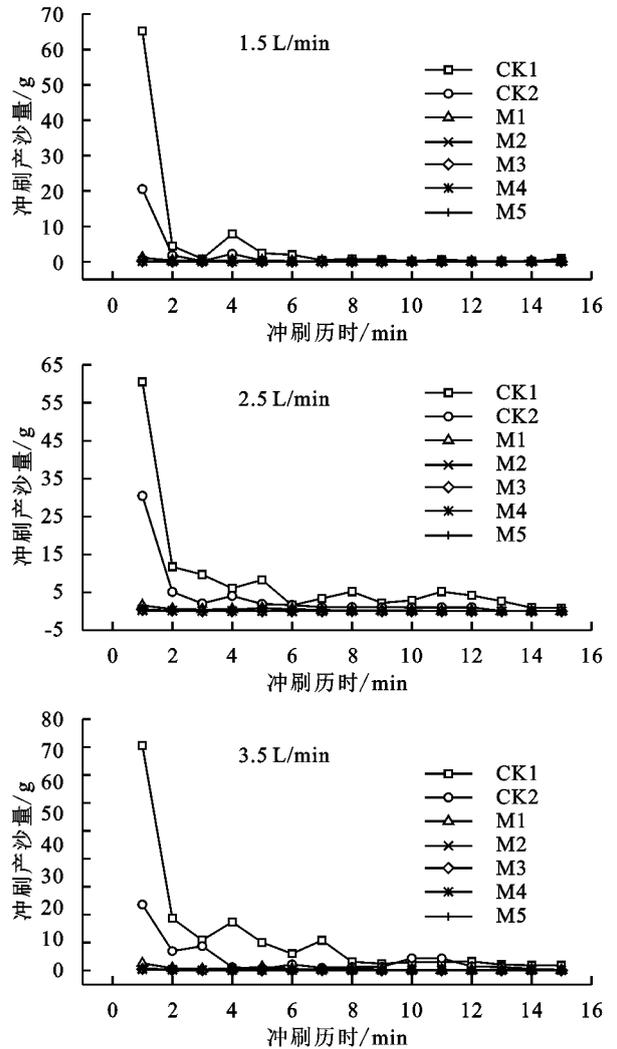


图 2 不同治理模式的冲刷产沙量随冲刷历时变化

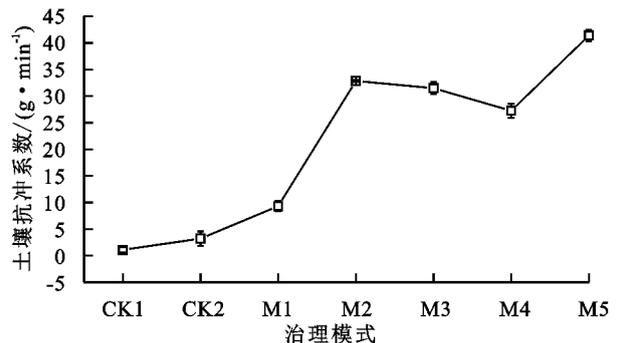


图 3 不同治理模式土壤抗冲系数

### 2.2 土壤抗冲性与土壤总孔隙度相关性

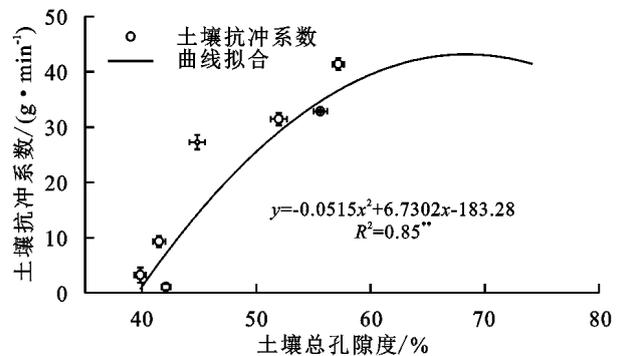
土壤总孔隙度和土壤含水量的大小反映了森林植被滞留水分以及发挥涵养水源和削减洪水的能力。CK1、CK2、M1、M2、M3、M4、M5 土壤孔隙度分别为

41.48%, 39.83%, 42.08%, 55.59%, 51.96%, 44.83%, 57.17%。M2、M5 土壤总孔隙度最高, 占有植被的 37.08%, 比 CK1、CK2 增加了 58.42%, 孙国均等<sup>[17]</sup>也认为, 人工草地比裸露土壤下的入渗能力高。这说明 M2 和 M5 的治理模式可以显著改善其林下土壤的物理性质。土壤容重被认为是影响表层土壤抗冲性的重要因素<sup>[18]</sup>, 试验中 CK1、CK2、M1、M2、M3、M4、M5 的土壤容重分别为 1.60, 1.55, 1.54, 1.18, 1.27, 1.46, 0.68 g/cm<sup>3</sup>。其中 CK1、CK2 最大, M2、M5 最小, 且仅占有所有措施的 20.06%, 仅为 CK1、CK2 的 59.05%, 其土壤质地疏松, 透气性好。CK1、CK2、M1、M2、M3、M4、M5 的土壤含水率分别为 9.38%, 14.61%, 17.24%, 18.40%, 17.63%, 17.31%, 31.46%, 其中治理模式 M2、M5 的土壤含水率最高, 占有所有治理模式的 44.58%, 因此, 其土壤容重越小其孔隙度越大, 径流渗透能力越强, 土壤抗冲性强。将土壤总孔隙度与土壤抗冲系数进行相关分析, 土壤抗冲系数与土壤总孔隙度为一元二次函数关系, 相关系数  $R^2 > 0.80$  (图 4)。

### 2.3 土壤抗冲性与土壤水稳性团聚体的相关性

土壤中水稳性团聚体的数量与土壤抗冲性之间有极好的相关性, 是评价土壤抗侵蚀能力的理想指标。土壤团聚体团聚作用的强弱影响着土壤颗粒间黏聚力的大小, 也影响着土壤抵抗径流对其冲刷破坏

能力<sup>[19]</sup>。由表 2 可知, 不同治理模式的土壤水稳性团聚体含量不同, 与其他治理模式相比, M5、M2 中  $< 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体的含量最小, 共 36.66 g, 仅占有所有治理模式的 19.50%, CK1、CK2 治理模式中  $< 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量最高, 为 76.36 g, 占有所有治理模式的 38.13%, 是 M5、M2 的 1.96 倍。大团聚体含量越多, 说明团聚体结构越稳定<sup>[20]</sup>。CK1、CK2 治理模式中  $> 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体含量最少, 共 123.64 g, M5、M2 治理模式中  $> 0.25$  mm 的土壤水稳性团聚体的含量最大, 共 153.88 g, 是 CK1、CK2 的 1.34 倍, 占有所有治理模式的 80.38%, 因此植被治理模式 M5、M2 的团聚体结构稳定性较强, 径流冲刷引起的土壤团聚体的分离少, 侵蚀泥沙量少。



注: \*\* 表示 0.01 水平上显著相关。

图 4 土壤抗冲性与土壤总孔隙度的关系

表 2 不同治理模式土壤团聚体含量

单位: g

土壤团聚体/mm	CK1	CK2	M1	M2	M3	M4	M5
$> 0.25$	68.24 ± 1.39	55.40 ± 1.12	66.54 ± 1.23	79.04 ± 1.39	76.66 ± 1.36	69.58 ± 1.24	84.30 ± 1.50
$< 0.25$	31.76 ± 1.49	44.60 ± 1.56	33.46 ± 1.23	20.96 ± 1.42	23.34 ± 0.94	30.42 ± 1.21	15.70 ± 0.71

注: 表中数据为平均值 ± 标准差。下同。

将水稳性团聚体含量与土壤抗冲系数进行拟合,  $< 0.25$ ,  $> 0.25$  mm 水稳性团聚体含量与土壤抗冲系数分别拟合为一元二次函数关系和一元一次线性函数关系 ( $P < 0.01$ ), 且相关系数  $R^2$  均大于 0.60。土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 可以表征土壤团聚体的稳定性。由图 5 可知, M5 的植被治理模式下 MWD 和 GMD 最大, 分别为 2.71, 1.94 mm, M2 的 MWD 和 GMD 次之, 分别为 2.13, 0.99 mm。植被治理模式 M5 和 M2 的 MWD 占有所有植被治理模式的 55.76%, 平均比其他模式高出 39.40%, GMD 占有所有治理模式的 44.06%, 平均比其他治理模式高出 10.15%。说明 M5 和 M2 的团聚体稳定性和团聚度高于其他治理模式, 其土壤的抗侵蚀性能最强。

### 2.4 土壤抗冲性与根系特征相关性

植物根系是影响土壤抗冲性的重要生物因素之一, 研究不同植被恢复方式下的植物根系情况, 是研究土壤抗冲性的基础<sup>[21]</sup>。由表 3 可知, 所有治理模式

中, CK1 和 CK2 的根系长度、表面积、体积和生物量最小, M5 的最大, M2 次之。M5 的根系长度、表面积、体积和生物量分别为 CK1 的 7.65, 4.20, 39.30, 34.76 倍。CK2、M1、M3、M4 的根系长度、表面积、体积和生物量的范围分别为 837.18~3 984.27 cm, 462.22~1 520.33 cm<sup>2</sup>, 1.00~20.07 cm<sup>3</sup>, 0.43~4.66 g/cm<sup>3</sup>。M5 和 M2 的根系表面积占有所有治理模式根系表面积的 44.15%, 根系体积占 45.12%, 根系长度占 52.11%。

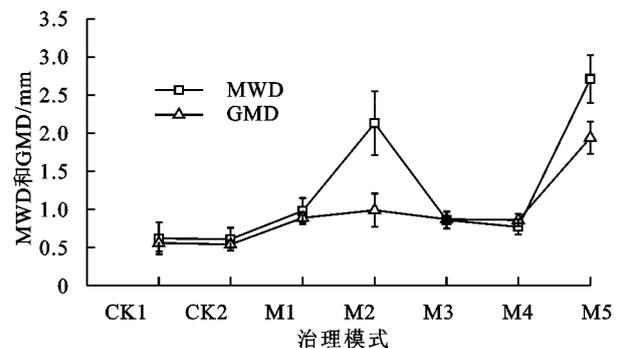


图 5 不同治理模式土壤团聚体 MWD 和 GMD

将根系的表面积和体积与土壤抗冲系数进行拟合(表 4)可知,3 种冲刷流量下,与土壤抗冲系数均拟合为一元一次线性函数关系( $P < 0.01$ ),且相关系数  $R^2$  均大于 0.80。植物对土壤水分和养分的竞争能力首先取决于其根系占据的土壤空间,并与植物的根长密度、根重密度密切相关<sup>[22]</sup>。由图 6 可知,M5 的治理模式下 2 种径级( $<0.5, 0.5 \sim 1$  mm)根系的根长密度均最大,M2 次之。治理模式 M5 和 M2 中, $<0.5$  mm 根系根长密度分别为 1.33,0.82  $m/m^3$ , $0.5 \sim 1$  mm 根系根长密度分别为 1.08,1.04  $m/m^3$ 。治理模式 M5 和 M2 中, $<0.5$  mm 根系的根长密度为其他治理模式的 1.06 倍,在所有治理模式中占 51.42%, $0.5 \sim 1$  mm 的根长密度为其他治理模式总和的 1.09 倍,占有治理模式的 52.18%,对对照地 CK1 和 CK2 的根长密度最小,是治理模式 M5 和 M2 的 15.24%。由图 6 可知,不同治理模式下的土壤中根系的根重密度有所不同,治理模式 M5 根重密度最大,M2 次之,二者根重密度分别为 0.003 8,0.003 4  $g/m^3$ ,占有治理模式的 54.91%,是其他治理模式的 1.38 倍,对对照地 CK1

和 CK2 的根重密度最小,仅为 M5 和 M2 的 3.86%。不同治理模式中根系根重密度和根长密度由大到小均表现为  $M5 > M2 > M3 > M4 > M1 > CK2 > CK1$ 。

表 3 不同治理模式根系参数特征

治理模式	生物量/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	根系长度/ cm	根系体积/ $cm^3$	根系表面积/ $cm^2$
CK1	0.28±0.13	789.24±17.32	0.67±1.35	390.22±10.12
CK2	0.43±0.12	837.18±15.65	1.00±1.29	462.22±7.11
M1	3.53±0.26	1880.30±20.12	5.69±1.78	826.06±11.23
M2	8.71±0.24	4638.99±18.65	22.52±1.65	1561.51±10.31
M3	4.66±0.32	3984.27±23.28	20.07±2.59	1520.33±13.20
M4	4.39±0.53	2440.49±34.97	18.21±3.56	807.29±14.97
M5	9.56±0.54	6031.94±45.33	23.39±4.69	1589.49±17.64

表 4 土壤抗冲系数与植物根系相关性

根系特征	拟合方程	相关系数 $R^2$
根系表面积	$Y = 0.028X_1 - 7.847$	0.85**
根系体积	$Y = 1.312X_2 + 0.70$	0.99**

注:Y 为抗冲系数( $g/min$ ); $X_1$  为根系表面积( $cm^2$ ); $X_2$  为根系体积( $cm^3$ );\* 表示 0.05 水平上显著相关;\*\* 表示 0.01 水平上显著相关。

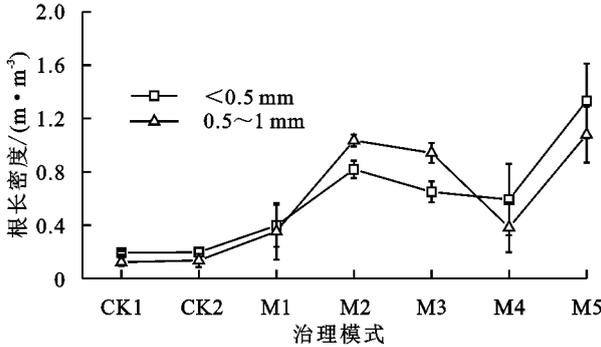
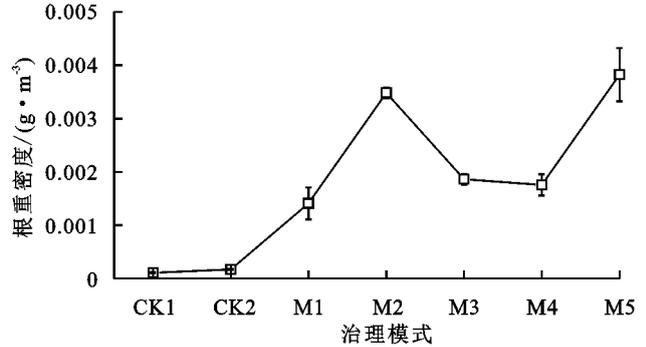


图 6 不同治理模式根系根长密度和根重密度



### 2.5 土壤抗冲性方程

通过以上的分析及众多的研究发现,土壤抗冲性是由植物根系、土壤水稳性团聚体等多因素决定的一个综合性指标。在 SPSS 中对孔隙度( $X_1$ )、表面积( $X_2$ )、根长度( $X_3$ )、根体积( $X_4$ )、根系生物量( $X_5$ )、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量( $X_6$ )与土壤抗冲性(Y)进行回归分析得到土壤的抗冲性方程:

$$Y = -6.387 \times 10^{-17} - 0.23X_1 - 0.041X_2 + 0.468X_3 + 0.963X_4 - 0.157X_5 - 0.026X_6 \quad (6)$$

## 3 讨论

在影响土壤抗冲因素中,植物根系发挥着最重要的作用<sup>[21]</sup>,本研究结果显示,根系的表面积和体积与土壤抗冲系数之间为正相关关系,且均拟合为一元一次线性函数关系( $P < 0.01$ ),相关系数  $R^2$  均大于 0.80。这与 Vannoppen 等<sup>[23]</sup>研究认为,具有纤维状根系的植物物种在减少土壤侵蚀率方面比主根根系更有效的研究结果一致。根系控制土壤侵蚀主要是

通过根系网络串连、根土黏结以及增加土壤有机质和水稳性团聚体。相比于其他治理模式,治理模式 M5 和 M2 的根系长度、表面积和体积均较大,治理模式 M5 和 M2 中, $<0.5$  mm 根系的根长密度为其他措施的 1.06 倍, $0.5 \sim 1$  mm 的根长密度为其他治理模式总和的 1.09 倍,有利于根系水平方向和垂直方向上加固土壤,对对照地 CK1 和 CK2 的根长密度最小,仅为措施 M5 和 M2 的 15.24%,因此,M5 和 M2 的土壤抗冲系数明显高于其他治理模式。根系生物量也是影响土壤入渗的主要因素之一<sup>[17]</sup>,治理模式 M5 和 M2 的根系生物量最高,根重密度最大,土壤抗冲性增强,刘红岩等<sup>[18]</sup>也证明,在不同的土层中土壤团聚体含量和根系生物量对土壤抗侵蚀能力有重要作用。治理模式 M1、M2、M3、M4、M5 的抗冲系数为 CK1、CK2 的 13.28 倍,其中 M5 和 M2 的抗冲系数在占有治理模式高达 50.66%,这可能是因为 CK1 和 CK2 的土壤稳定性大团聚体较少,有机质归还较少,而植被

治理模式样地 M1、M2、M3、M4、M5 的植物根系可通过在土壤中形成大孔隙,增加了土壤入渗速率,同时根表附近的根际土壤内,根系分泌物丰富,加上根系生长和枯落物分解作用,增加了土壤有机质和土壤抗冲性。

<0.25, >0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤抗冲系数的关系分别为负相关和正相关,并且分别拟合为一元二次函数关系和一元一次线性函数( $P < 0.01$ ),且相关系数  $R^2$  均大于 0.60。马中浩<sup>[24]</sup>研究发现,不同玉米生长期,土壤抗冲性与 <0.25 mm 水稳性团聚体含量呈负相关( $P < 0.01$ ),这与本研究结果一致。治理模式 M5 和 M2 的 MWD 平均比其他治理模式高出 39.40%, GMD 平均比其他治理模式高出 10.15%,这可能因为土壤中有有机碳的含量,尤其是新形成的有机碳的含量,受土地用方式的影响<sup>[13]</sup>,土壤中水稳性团聚体又离不开土壤中的有机碳,因此,不同的植被种植模式形成不同的团聚体稳定性。治理模式 M5 和 M2 植物种类丰富,其根系的多样性和有机质丰富,团聚体的稳定性强,治理模式 CK1 和 CK2 地表裸露严重,缺乏植物根系和土壤有机质,团聚体稳定性弱导致土壤抗冲性差;同时土壤团聚体稳定性也随着根长密度、微生物群落多样性和植被覆盖率的增加而增大,因此治理模式 M1、M2、M3、M4、M5 的植物根系可通过提高土壤团聚体稳定性,限制了土壤侵蚀。

M2、M5 土壤总孔隙度比 CK1、CK2 增加了 58.42%,相比于对照样地 CK1 和 CK2,可能因为植被可增加径流曲折度,加大坡面入渗,增加土壤黏着性、毛细孔隙度和孔隙率。草地的地上和地下生物量可显著降低土壤侵蚀,对土壤抗冲性有积极影响<sup>[20]</sup>;同时粗矮的植物也更容易阻碍径流冲刷,治理模式 M2 和 M5 不仅粗矮植物的类型丰富,其林分结构也复杂,植物多样性丰富,有木荷、赤楠、毛冬青、油茶、芒萁、胡枝子、宽叶雀稗等植物种类,枯落物积累充足,土壤生物量高,土壤抗冲性强,是适合红壤区推广的治理模式。

## 4 结论

(1)不同治理模式土壤抗冲系数由大到小分别为  $M5 > M2 > M3 > M4 > M1 > CK2 > CK1$ , M1、M2、M3、M4、M5 的冲刷产沙量基本在低水平平衡状态,冲刷历时初始阶段,CK1 和 CK2 的冲刷产沙量下降幅度最大;且冲刷流量越大,冲刷产沙量越大。土壤抗冲系数与土壤总孔隙度为一元二次函数关系。土壤总孔隙度增大可明显提高土壤的抗冲性。M5 和 M2 土壤总孔隙度最高,CK2 和 CK1 最低。

(2)>0.25 mm 水稳性团聚体可提高土壤抗冲性。M5 和 M2 治理模式下土壤中 <0.25mm 土壤水稳性团

聚体含量最少,>0.25 mm 水稳性团聚体含量最大,CK2 和 CK1 治理模式下土壤中 <0.25mm 土壤水稳性团聚体含量最大,>0.25 mm 水稳性团聚体含量最小。M5 和 M2 的 MWD 和 GMD 最大,土壤团聚体稳定性强。

(3)根系的根长、表面积,以及体积和生物量可提高土壤抗冲性。M5 和 M2 根系表面积和根系体积与土壤抗冲系数均拟合为一元一次线性函数关系。M5 和 M2 土壤的根长、表面积,以及体积和生物量最高,CK2 和 CK1 最低。M5 和 M2 的根长密度(RLD)和根重密度(RWD)最高,水土保持效果较优。

## 参考文献:

- [1] 熊晓姣,张家来,闫峰陵,等.国内外水土流失与土壤退化现状及特点分析[J].湖北林业科技,2006(4):41-44.
- [2] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):50-53.
- [3] 石香琼,查轩,陈世发.基于马尔柯夫模型的红壤退化地水土流失动态变化预测研究[J].水土保持研究,2009,16(4):19-23.
- [4] 陈文祥.福建省长汀县水土流失地形因子影响分析[J].亚热带水土保持,2016,28(1):5-8.
- [5] 李勇.黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J].科学通报,1990,35(5):390-390.
- [6] 蒙朝阳,谢元贵,刘济明.小蓬竹水土保持效应的研究[J].安徽农业科学,2008,36(4):1431-1433.
- [7] 杨闻达,王桂尧,张永杰,等.主直根系植物对边坡土壤渗透性影响的原位试验研究[J].中外公路,2018,240(2):43-47.
- [8] Yulin P U. Effects of hedgerow patterns on soil shear strength and anti-scourability on slope farmland in purple soil area [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(5):934-945.
- [9] 侯春镁,王克勤,李玲,等.不同土地利用类型土壤大团聚体与抗冲性关系[J].人民长江,2017,48(11):46-50.
- [10] Kukal S S, Kaur M, Bawa S S, et al. Water-drop stability of PVA-treated natural soil aggregates from different land uses [J]. Catena, 2007, 70:475-479.
- [11] 苏远逸,李鹏,李占斌,等.坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):32-39.
- [12] 康佩佩,查轩,刘家明,等.不同植被种植模式对红壤坡面侵蚀影响试验研究[J].水土保持研究,2016,23(4):15-18,22.
- [13] 江仁涛,李富程,沈淞涛.不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):197-203.
- [14] 乔冬梅,齐学斌,樊向阳,等.再生水分根交替滴灌对马铃薯根-土系统环境因子的影响研究[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2359-2367.

- [2] 李思平.崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):29-35.
- [3] 陈晓安,杨洁,熊永,等.红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J].水利学报,2013,44(10):1175-1181.
- [4] 林敬兰,黄炎和,张德斌,等.水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):55-58.
- [5] 张晓明,丁树文,蔡崇法.干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J].农业工程学报,2012,28(5):241-245.
- [6] 卫杰,张晓明,张鹤,等.干湿循环对崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):107-111.
- [7] 汪和青,刘伟平.崩岗区岩土固结特性试验研究[J].南昌大学学报,2016,38(1):28-31.
- [8] 魏玉杰,吴新亮,蔡崇法.崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J].农业机械学报,2015,46(6):153-159.
- [9] Venkataramana K, Rao B, Singh D. A critical review of the methodologies employed for determination of tensile strength of fine-grained soils [J]. Journal of Testing & Evaluation, 2009, 37(2): 532-532.
- [10] 李昊达,唐朝生,徐其良,等.土体抗拉强度试验研究方法的进展[J].岩土力学,2016,37(增刊2):175-186.
- [11] 叶朝良,何世鑫,侯艳乐,宝兰铁路重塑黄土的轴向拉伸试验研究[J].路基工程,2017(1):88-92.
- [12] He S X, Bai H B, Xu Z W. Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess [J]. Energies, 2018, 11(8): 1974-1991.
- [13] Tang C S, Pei X J, Wang D Y, et al. Tensile strength of compacted clayey soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 141 (4): e04014122.
- [14] 胡磊,张云,史卜涛,等.重塑黏土抗拉特性试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):98-104.
- [15] Tollenaar R N, Paassen L A V, Jommi C. Experimental evaluation of the effects of pull rate on the tensile behavior of a clay [J]. Applied Clay Science, 2017, 144: 131-140.
- [16] 丁树文,蔡崇法,张光远.鄂东南花岗地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J].南昌工程学院学报,1995(增刊1):50-54.
- [17] Hillel D. Fundamentals of soil physics [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [19] Lu N William J, Likos. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 131-142.
- [20] Schubert H. Tensile strength of agglomerates [J]. Powder Technology, 1975, 11(2): 107-119.
- [21] Orr F M. Pendular rings between solids: Meniscus properties and capillary force [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 67(4): 723-742.
- [22] Lu N, Wu B L, Tan C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2007, 133(2): 144-154.
- [15] 隋鹏祥,张文可,梅楠,等.不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):255-261.
- [16] 史东梅,陈晏.紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J].中国农业科学,2008,41(5):1400-1409.
- [17] 孙国均,王晓凌,徐进章,等.半干旱黄土丘陵区垄沟集雨对紫花苜蓿人工草地土壤水分和产草量的影响[J].植物生态学报,2007,31(3):470-475.
- [18] 刘红岩,周正朝,刘俊娥,等.黄土区草被生长过程中土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].水土保持学报,2017,31(2):72-78.
- [19] Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, 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, 2012, 28(5): 108-113.
- [20] 谢贤健,张继.巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2012,26(6):175-179.
- [21] 陈浩,余毅敏,唐旭栋,等.浦阳江下游江岸草本植物根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):60-63.
- [22] 王宝驹,李隆,李鲁华,等.南疆枣麦复合系统中冬小麦根长密度、根表面积密度分布特征研究[J].广东农业科学,2013,40(17):1-4.
- [23] Vannoppen W, Baets S D, Keeble J, et al. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species? [J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 186-195.
- [24] 马中浩.南方红壤区玉米生育期坡地土壤抗侵蚀性特征[D].武汉:华中农业大学,2016.

(上接第40页)