

引用格式: 陈伯洲, 胡建华, 吴威, 刘豫猛, 邓茹月. 白龙江流域不同植被类型修复模式下土壤理化性质与边坡稳定性[J]. 山地学报, 2024, 42(2): 260-277.

CHEN Bozhou, HU Jianhua, WU Wei, LIU Yuanmeng, DENG Ruyue. Physicochemical properties of soil under restoration of different vegetation types and resulting slope stability in the Bailong River Basin, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 260-277.

白龙江流域不同植被类型修复模式下 土壤理化性质与边坡稳定性

陈伯洲, 胡建华*, 吴威, 刘豫猛, 邓茹月

(福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350116)

摘要: 植被修复是边坡生态治理的有效手段。目前, 植被对边坡稳定性影响的研究侧重在根系的锚固作用, 而有关植被对土壤物理化学性质的影响所导致的土体边坡稳定性的变化研究比较少。本研究以白龙江流域滑坡区植被修复林地、灌木-草地、草地与裸地为研究对象, 测量了修复 14 年后不同植被类型下土壤的基本物理化学特性与力学特性, 主要分析了粒度、团聚体、土壤矿物等理化性质与抗剪强度的关系, 并通过数值模拟软件综合对比了不同植被修复模式下土体的边坡稳定性。得到了以下结果: (1) 植被修复可以显著改变土壤的物理化学性质, 灌木-草地相对于其他两种修复模式可以明显提升细颗粒(黏粒、粉粒)和粘土矿物的含量, 林地对土壤团聚体形成的促进效果最好。(2) 土壤的平均重量直径越大, 内摩擦角越大, 细颗粒的含量与粘聚力呈高度拟合的指数关系($R^2=0.99$)。粘土矿物含量与土壤粘聚力呈正相关。(3) 经过 14 年的修复, 不同植被修复模式下土体的边坡稳定性都得到了一定程度的提升, 其中灌木-草地群落对土体边坡稳定性的加强效果最好。极端降雨条件下, 边坡稳定性安全系数从大到小依次为灌木-草地(3.20~2.58)、林地(3.03~2.44)、草地(2.91~2.41)、裸地(2.68~2.25)。本研究有助于加强对不同植被类型对土体边坡稳定性的作用机制的认识, 也可为该区域植被修复模式提供一定的建议。

关键词: 植被修复; 抗剪强度; 土壤粒度; 团聚体; 粘土矿物; 边坡稳定性; 白龙江流域

中图分类号: P694

文献标志码: A

植物修复被广泛应用于边坡生态修复治理工程^[1]。植被修复是通过植物根系的抗拉与锚固作用, 增加土壤附加粘聚力和抗剪强度^[2], 或通过改变土壤的理化性质来强化土壤结构稳定性^[3]。

植物的根际作用可以增强土壤基质的结构和强度, 干扰土壤物理和化学过程^[4-6], 提高土质边坡稳定性。研究表明, 植被影响土壤边坡稳定性的因素包括植被根系类型^[7]、根系密度^[8]、林龄^[9]和根系

形态^[10]。

土壤的结构、粒度、水稳性团聚体和矿物组成等理化性质影响土壤抗剪强度。土壤结构的形成与颗粒的分布密切相关, 在饱和状态下, 土壤的紧密程度越高, 它的抗剪强度就越大^[11], 土壤中细颗粒损失会降低土壤的抗剪强度^[12]。水稳性团聚体代表土壤抵抗水的侵蚀能力, 土壤的临界剪应力与土壤水稳性聚集量呈对数函数关系^[13]。土壤矿物组成也

收稿日期(Received date): 2023-03-31; 改回日期(Accepted date): 2024-03-14

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41672298); 福州大学省级大学生创新创业训练计划(S202310386110)。[National Natural Science Foundation of China (41672298); Provincial Student Innovation and Entrepreneurship Training Program Project of Fuzhou University (S202310386110)]

作者简介(Biography): 陈伯洲(2003-), 男, 甘肃兰州人, 本科生, 主要研究方向: 地质灾害与修复。[CHEN Bozhou (2003-), male, born in Lanzhou, Gansu province, B.S. candidate, research on geological hazards and remediation] E-mail: chenbzh2023@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 胡建华(1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 工程稳定性。[HU Jianhua (1975-), male, Ph.D., professor, specialized in engineering stability] E-mail: hujh789@126.com

是影响土壤结构的重要因素之一^[14],粘土矿物直接影响土壤的孔喉连通性及尺寸分布,粘土矿物含量越高的土壤的致密性越好^[15],强度更高。

上述研究结果表明植被修复一方面通过根系的锚固作用直接提升边坡稳定性^[7-10],另一方面通过改变土壤理化性质,间接影响土壤的结构稳定性与强度^[11-15]。在震后灾区,不同植被修复模式下,根系的锚固作用短期内显著提升边坡稳定性^[16-18],长期来看,边坡稳定性主要取决于土壤理化特性的改变与稳定。然而,较少研究聚焦不同植被修复模式下土体边坡稳定性的差异性以及植被类型对土壤稳定性的影响机制。

白龙江流域位于青藏高原、黄土高原和四川盆地的交汇处^[16],区域地质构造活跃,地形复杂多样,高山河谷从立,表层土壤疏松,加之灾害性气候影响,流域水土流失严重,地质灾害频发^[17]。2008年汶川地震后,白龙江流域地质构造遭受巨大破坏,地表大面积裸露,震后滑坡、泥石流等地质灾害广泛发育,生态环境恶化。为了修复当地受损的生态环境,各种类型的生态修复措施相继开展。

本研究以白龙江流域陇南市武都区河岸区为研究样地,采用野外采样、室内测试等方法,获得了不同修复模式下土壤的基本理化特性,然后探讨土壤理化特性与土壤抗剪强度之间的关系,最后采用强度折减法分析不同植被修复模式下边坡稳定性,提出植被对土壤稳定性的作用机制。研究结果对白龙江流域水土流失与滑坡生态治理、植被恢复模式下护坡植物的合理选择、植物群落的科学合理配置以及土地管理实践具有一定的指导意义。

1 研究区概况

白龙江流域($32^{\circ}36'N \sim 34^{\circ}24'N$, $103^{\circ}00'E \sim 105^{\circ}30'E$),地处中国甘肃省的南部,该区域地势相对较高,海拔为561~5393 m,地势西北高、东南低,区域内高山与河谷交错分布,相对落差大(图1),且该区域地质构造复杂,山体坡度大,岩土土体易破碎,边坡在降雨条件下极易失稳。据统计,该地区泥石流沟数量达到1400多条,各沟每年发生三次左右较大的滑坡、泥石流活动,是地质灾害频发区之一^[19],加之该区域为亚热带气候区,气候条件复杂,降雨时空分布差异性很大,降雨集中在6—8月份且

多为暴雨,极端降雨频发^[20],因而滑坡、泥石流等地质灾害愈发严重,地质灾害治理迫在眉睫。

该区域同时也是中国重要的生态保护区之一,境内自然资源丰富,是熊猫、金丝猴等20多种珍稀野生动物的栖息地。然而,受2008年汶川地震的影响,该区域滑坡、泥石流等地质灾害频发,生态环境遭到严重破坏。尽管后续实施了相应的生态修复措施,但近年来极端降雨频繁,地质灾害时有发生,生态修复效果不理想。

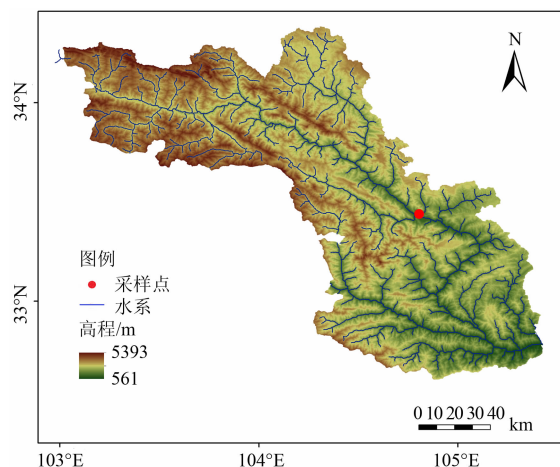


图1 白龙江流域地形图与采样点位置

Fig. 1 Topographic map of the Bailong River basin in China and the sampling points

2 研究方法

2008年汶川地震后,研究区组织实施了多种植被类型下的土壤修复工作,可以提供不同植被修复模式下的土壤样本。研究样地位于陇南市武都区河岸附近的修复区内(图1),区内土壤为褐土,是白龙江流域分布最广的土壤类型。选取修复区内的三种不同植被样地和一个裸地(对照组)(图2),每种样地设置了三个平行组,每一个样点采集了四个剖面的土壤样品,剖面深度为50 cm,每10 cm取一次土壤样本,然后按四分法均匀混合后作为分析土样。采集的土壤样本部分烘干后,过2 mm粗筛后重新制备样本,用于后续在实验室开展力学性能指标测试。然后分析土壤理化性质与抗剪强度之间的相关关系,并通过COMSOL Multiphysics 5.6软件对不同植被修复下土体的边坡稳定性进行建模分析。

2.1 土壤基本理化性质的测定

土壤粒度通过激光粒度分析仪(Master Sizer



图 2 不同植被类型:

(a) 林地; (b) 灌木-草地; (c) 草地; (d) 裸地

Fig. 2 Different vegetation types:

(a) woodlands; (b) shrub-grassland; (c) grasslands; (d) bare lands

2000, 马尔文仪器, 英国) 进行检测, 测量范围为 $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$; 采用湿筛法对土样进行水稳性团聚体测试, 实验中团聚体分析仪的筛子分 6 层 (5、2、1、0.5、0.25、0.053 mm); 使用 X 射线衍射 (X-Ray Diffraction, XRD) (Ultima IV, 日本理学, 日本) 分析土壤样品的矿物成分, 扫描范围为 $4^\circ \sim 80^\circ$, 步长为 0.02。除上述指标外, 还测量了土壤的容重、含水率、孔隙度、渗透性能、总氮含量、有机碳含量等基本理化指标。

2.2 土样抗剪强度参数的测定

设定烘箱温度为 105°C , 烘干土壤样品 8 h 至恒定重量, 然后过 2 mm 筛, 将过筛后土壤样品铺于不吸水铝盘中, 喷洒预计水量^[21], 用保鲜膜密封, 均匀分散一昼夜。设置 8%、14%、20%、26%、30% 的含水率土壤样品, 通过静压装置直接在环刀内压制成型^[22], 按原位土壤的实际密度压制土样, 共计 60 个直剪样品。直剪试验采用《GB/T50123—2019》标准^[23], 使用应变控制式直剪仪, 分别在 100、200、300 和 400 kPa 四级垂直压力下, 以 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 匀速进行土壤样品的剪切。借助配套的数据采集软件, 基于摩尔-库伦强度理论公式分析得到相应土壤样品的粘聚力和内摩擦角。摩尔-库伦强度理论公式如下:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, τ 为土样抗剪强度 (kPa); c 为土样粘聚力

(kPa); σ 为土样的正应力; φ 为土样内摩擦角 ($^\circ$)。

2.3 土壤的持水特性的测量

用张力计 (GmbH München Art. Nr. T5) 测量土壤的持水特性, 基于 Van Genuchten 模型, 将测得的土壤水分和基质吸力数据进行拟合, 得到不同植被修复模式下土壤的土-水特征曲线的形状参数。

Van Genuchten 模型^[24] 如下所示:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[(1 + \alpha h)^n]^m} \quad (2)$$

式中, θ 为土壤体积含水率 (%); θ_r 为土壤残余体积含水率; θ_s 为土壤饱和体积含水率; h 为土壤水势或基质吸力 (kPa); α 、 n 、 m 为土-水特征曲线形状参数。

2.4 土壤团聚体分析方法

土壤团聚体是指土壤颗粒经过凝聚胶结作用形成的个体, 主要由无机与有机复合体组成。有研究^[25]表明它的形成与植物根系的分泌物以及根系加固作用相关。根据抗水分散能力的不同, 团聚体可分为水稳定的团聚体和非水稳定的团聚体。水稳性团聚体在水浸润后不会立即散开并保持土壤结构不被破坏, 根据水稳性团聚体粒径的大小将其分为大团聚体 (直径 $> 0.25 \text{ mm}$) 与微团聚体 (直径 $< 0.25 \text{ mm}$)。有研究^[26]指出, 土壤中大团聚体含量较高时, 土壤更加稳定。土壤稳定性的重要评估指标之一是平均重量直径 (Mean Weight Diameter, MWD), MWD 数值越大, 表示土壤的稳定性越高。计算公式^[27] 如下:

$$MWD = \sum_i^n x_i w_i \sum_i^n w_i \quad (3)$$

式中, w_i 为第 i 级尺寸的团聚体的比例 (%); x_i 为第 i 级尺寸的团聚体的平均尺寸 (mm)。

2.5 边坡稳定性分析

边坡稳定性分析是边坡工程核心问题之一。COMSOL Multiphysics 是一款多物理场数值模拟软件, 它是以有限元法为基础, 运用求解偏微分方程、多微分方程来实现实际物理场的仿真计算。因其在多物理场耦合计算方面拥有很大的优势, 目前被广泛运用于边坡稳定性分析。在一定程度上, 该方法能有效解决岩土工程中的实际问题。有关研究表明植物会影响土壤的结构进而影响土壤的厚度, 且该厚度与植物根系长度有一致性^[28]。当地林地多为橄榄林, 灌木为酸枣、杠柳、胡枝子, 草地为白茅、狗

牙根等,其根系都比较发达。基于现场边坡植被与浅层滑坡情况,植被影响区设置为 3 m。二维数值边坡模型如图 3 所示,设置坡高 15 m,边坡宽度为 30 m,坡顶宽度为 10 m,边坡角度为 33°,共划分植被影响区、非影响区以及地下潜水层三个区域,2463 个计算单元。水平方向为指定位移方向,底边为固定约束,边坡设置为均质材料,竖直方向全域考虑重力荷载。降雨条件设置为 250 mm/d,斜坡表面为入渗面。在模型中输入不同植被修复模式下土壤抗剪强度参数、水力特征参数以及基本物理参数对边坡进行二维稳定性分析,最终模型计算达到收敛,则假定边坡稳定性分析结束^[29]。

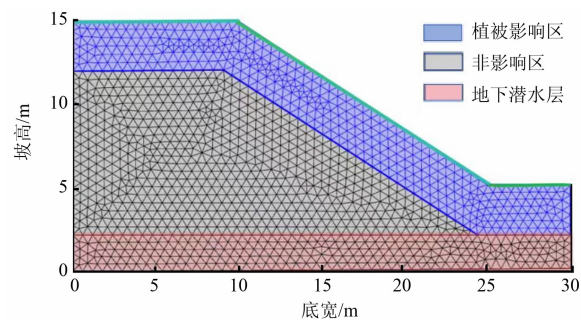


图 3 二维数值边坡模型
Fig. 3 Numerical slope model

在模型中,运用辅助扫描对边坡进行强度折减^[30],可以获得边坡稳定性的安全系数(Factor of Safety, FoS),边坡稳定性的 FoS 可以结合土壤各种基本物理因素来分析不同植被修复下土体的边坡稳定性,其原理是利用土体最大的粘聚力与内摩擦角,不断地除以折减系数,直到土体无法维持稳定,这个时候的折减系数(F_r)就为该处的 FoS。FoS = 1 为临界状态,FoS < 1 表示边坡已经破坏,FoS > 1 表示稳定

状态,其值越大边坡越稳定。计算公式^[31]如下:

$$F_r = \frac{c_{\max}}{c} = \frac{\tan \varphi_{\max}}{\tan \varphi} \tag{4}$$

式中, c_{\max} 为土壤能够提供的最大粘聚力(kPa); φ_{\max} 为土体可以提供的最大的内摩擦角(°)。

3 结果与分析

3.1 不同植被修复模式下土壤的基本理化性质分析

不同植被修复模式下土壤基本理化性质的描述统计如表 1 所示。经过 14 年的修复,土壤理化性质在不同植被类型之间存在明显的差异,主要体现在土壤容重、含水率、饱和导水率、pH、电导率和有机碳含量等方面。土壤容重是用来评估土壤固体颗粒和孔隙状况的综合指标。土壤密度越小,则土壤比较疏松,孔隙较多,而土壤密度越大,则土壤较紧实,孔隙较少^[32]。结果显示:土壤的密度和孔隙度呈现相反的变化趋势,密度由大到小依次为灌木-草地、林地、草地。经过植被修复后,土壤的含水率明显提高,其中灌木-草地的提升效果最好,表明该植被群落对水的保持能力效果最好,可能是因为植被修复提高了土壤中亲水性物质(如粘土矿物)的含量。土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)相对于裸地有明显的提升,其中林地的 SOC 含量最高,这可能是林地凋落物数量较其他两种植被类型更多^[33]。土壤 pH 与 SOC 呈正相关,土壤中 SOC 含量越高,体现为 pH 越高,因此植被修复一定程度可以防止土壤酸化。土壤的饱和导水率的实验结果表明,植被修复后土壤的渗透性能下降,这可能与土壤细颗粒物质增加有关。电导率能一定程度上反映土壤的肥力情况^[34],多年的植被修复使得土壤肥力得到了

表 1 不同植被修复模式下土壤的基本理化性质

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of soils under diverse vegetation restoration modes

样地类型	pH	电导率/ ($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	含水率/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤 孔隙度/%	饱和导水率/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	总氮含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机碳含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
灌木-草地	8.08 ± 0.10b	2.13 ± 0.47a	15.15 ± 2.90a	1.60 ± 0.08a	42.01 ± 2.24c	19.60 ± 1.39c	0.58 ± 0.11b	5.23 ± 1.05b
林地	8.39 ± 0.29a	0.45 ± 0.17c	12.82 ± 3.85b	1.55 ± 0.05a	45.31 ± 2.78b	36.26 ± 1.99a	0.54 ± 0.14b	6.22 ± 0.91a
草地	7.98 ± 0.11b	1.15 ± 0.58b	11.40 ± 3.02b	1.42 ± 0.05b	47.13 ± 2.32b	22.42 ± 2.37c	0.68 ± 0.09a	4.47 ± 0.36b
裸地	7.19 ± 0.28c	0.30 ± 0.10c	9.72 ± 2.02c	1.38 ± 0.08b	51.04 ± 3.79a	60.83 ± 3.73a	0.47 ± 0.10c	3.59 ± 0.78c

注:表中数值为平均值 ± 标准误差;a、b、c、d 表明不同土壤类型间存在显著差异($p < 0.05$)。

明显的提升,其中灌木-草地的提升效果最为明显,而林地多为经济林,土壤营元素消耗过大,土壤肥力提升不明显。

3.2 不同植被修复模式下抗剪强度分析

通过设置的 8%、14%、20%、26%、30% 的含水率的土壤样品,进行直剪实验,结果如图 4 所示。

图中拟合线的斜率代表土样的内摩擦角(φ)的正切值,其与纵向轴的截距为土样的粘聚力(c)。随着土壤含水率的增加,土壤抗剪强度下降。整体来看,经过植被修复过后,土壤内摩擦角与粘聚力都得到了提升,不同植被修复下土壤的抗剪强度相较裸地都有所提升,抗剪强度由大到小依次为灌木-草地、林地、草地和裸地,其中土壤粘聚力提升最明显的是灌木-草地,林地的土壤内摩擦角增加最大。在低含水率时,灌木-草地以及林地的土壤抗剪强度明显强于草地与裸地,但随着含水量的增加其抗剪强度减小趋势明显。

3.3 不同修复模式下土壤的持水特性分析

探究不同修复模式下土壤的持水特性,结果如

表 2 所示。经过修复后,土壤的保水能力增强,残余体积含水率显著增大,提高了土壤水分截留能力,减少了土壤水分的流失。特别是在灌木-草地的修复模式下,土壤残余体积含水率最大。有研究^[35]表明灌木群落的持水能力要强于草地群落,这与本文结论一致。有关研究^[36]也表明,土壤表层湿度增加有助于提高土壤颗粒之间的凝聚力。土壤的饱和体积含水率则呈相反的趋势,灌木-草地的最小,可能是因为土壤细颗粒的增加导致土壤更加的紧密,孔隙度减小^[5],因此饱和体积含水率出现一定程度

表 2 不同植被修复模式下土壤持水特性参数

Tab.2 Parameters of soil water-holding characteristics under diverse vegetation restoration modes

样地类型	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	α	n
灌木-草地	45.2	16.2	0.09	2.61
林地	46.5	13.8	0.08	2.42
草地	47.6	12.5	0.08	2.01
裸地	49.7	9.5	0.07	1.91

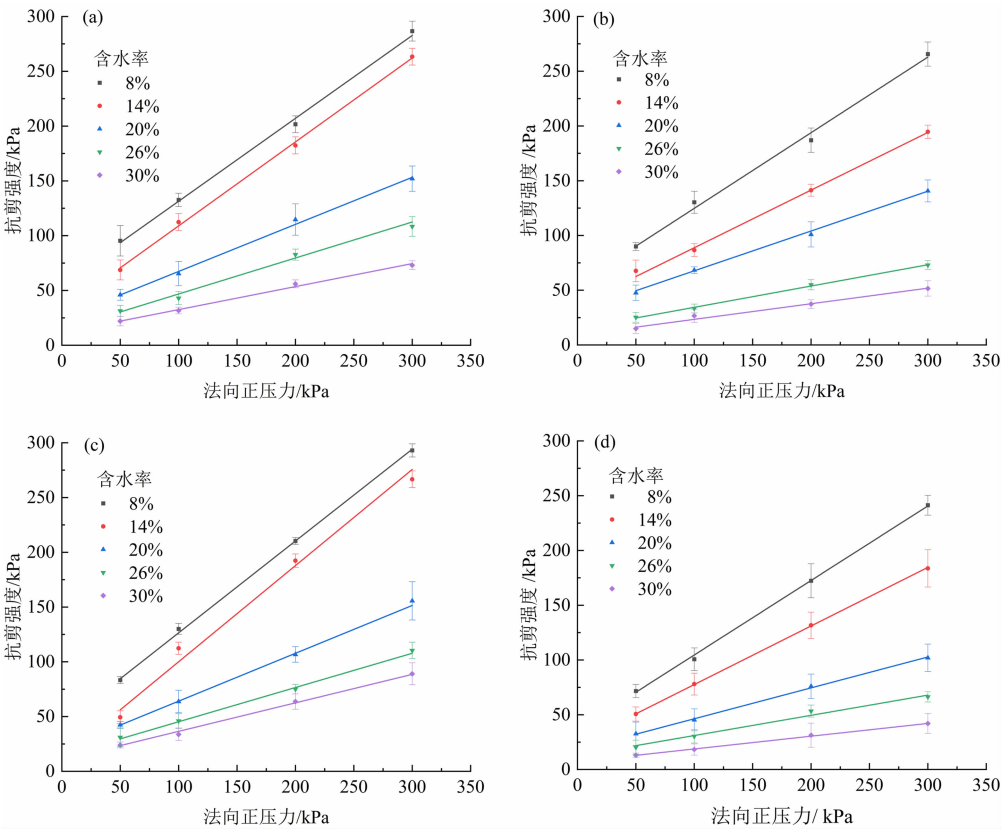


图 4 不同植被修复下土壤的抗剪强度: (a) 灌木-草地; (b) 草地; (c) 林地; (d) 裸地

Fig.4 Shear strength of soil under various vegetation restoration modes:
(a) shrub-grasslands; (b) grasslands; (c) woodlands; (d) bare lands

的降低。

3.4 不同修复模式下土壤理化性质的分析

3.4.1 不同植被修复模式对土壤粒度的影响

国际上将土壤粒度划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、砂粒(0.02~2 mm)。实验结果显示(图5),该区域的土壤主要由砂粒组成,黏粒含量较少。三种植被修复模式下,土壤中的粉粒都明显增加,黏粒无显著变化,其中土壤粉粒在灌木-草群落和草地的积累效果最好,且灌木-草群落和草地对细颗粒(黏粒、粉粒)的提升效果相近。

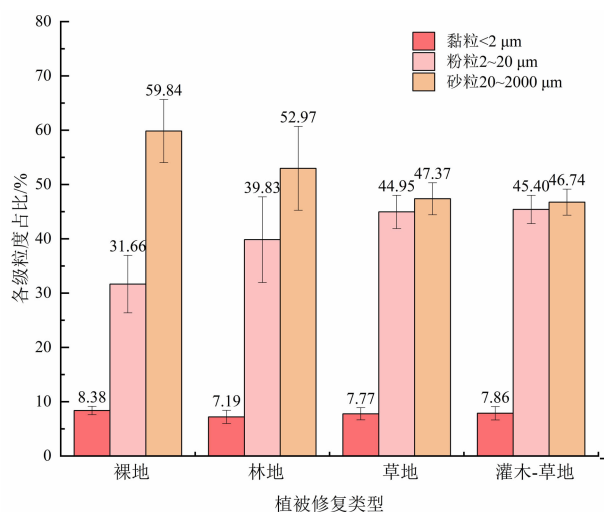


图5 不同植被修复模式下土壤的粒度分布情况

Fig. 5 Particle size distribution of soil under various vegetation restoration modes

通过对土壤细颗粒的含量与土壤粘聚力的关系开展回归分析,发现两者呈高度拟合的指数关系(图6),这也证明土壤细颗粒对土壤的粘聚力起到加强作用。有研究^[5]发现,土壤中黏粒和粉粒含量越高,土壤的抗侵蚀和冲刷能力越强。此外,土壤分形维数对土壤的水力性质和抗剪强度参数也有影响,细颗粒的损失会降低沟壑区红土的抗剪强度^[12],这与本研究结论一致。

综上所述,植被可以提高土壤细颗粒的含量,防止土壤砂化,提高土壤的抗剪强度,其中灌木-草地和草地对细颗粒的提升都比较明显。

3.4.2 不同植被修复模式下土壤水稳性团聚体分析

土壤水稳性团聚体分级如图7所示,三种植被类型修复模式下土壤的大团聚体(直径>0.25 mm)

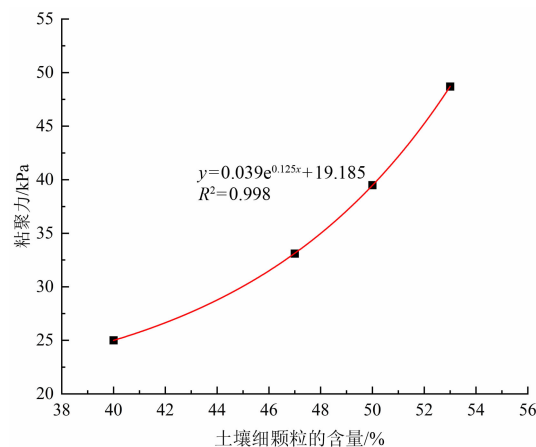


图6 土壤的细颗粒含量与土壤粘聚力的关系

Fig. 6 Relationship between the fine particle content of the soil and soil cohesion

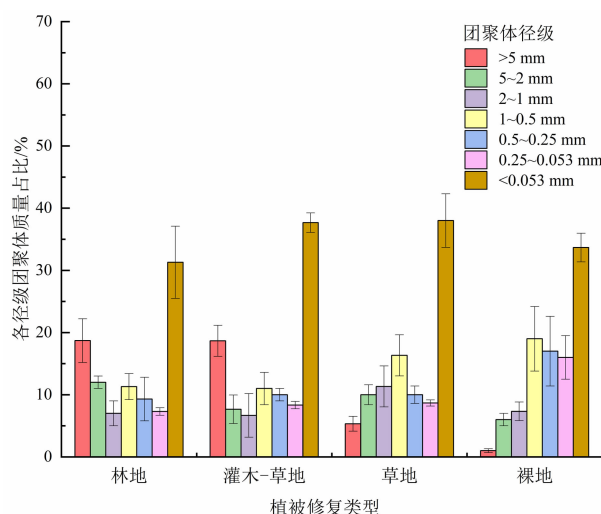


图7 不同植被修复模式下的土壤团聚体分级

Fig. 7 Grading of soil aggregates under various vegetation restoration modes

含量占比由高到低依次为林地、灌木-草地、草地。如表3所示,该研究区域的土壤稳定性较低,多年修复后,土壤团聚体的稳定性都得到了相应提升,其中林地的土壤团聚体稳定性最好。裸地中大颗粒的块状物占比较高,浸润后观察多为原生矿物(即一些大颗粒砂粒)。结合XRD土壤全岩矿物检测,裸地中土壤矿物组成多为石英、方解石等原生矿物。因此通过对比三种植被修复模式下土壤团聚体分布情况,林地修复模式能明显的增加土壤大团聚体的含量。

土壤有机质是土壤重要的组成部分,主要来源于植物枯枝落叶、植物根系、动物及微生物残体等,

表 3 不同植被修复模式下土壤团聚体的
平均重量直径

Tab.3 MWD of soil agglomerates under diverse
vegetation restoration modes

土壤类型	MWD/mm
林地	1.15
灌木-草地	0.95
草地	0.85
裸地	0.63

注:MWD>2 mm 为非常稳定, 1.3~2.0 mm 为稳定, 0.8~1.3 mm 为中等稳定, 0.4~0.8 mm 为不稳定, <0.4 mm 为极不稳定^[27]。

是土壤结构中很重要的因素^[33]。对不同植被修复模式下土壤有机碳含量进行测定以分析植被是如何影响土壤团聚体,土壤的 SOC 由高到低依次为林地(6.22 mg·g⁻¹)、灌木-草地(5.23 mg·g⁻¹)、草地(4.51 mg·g⁻¹)、裸地(3.59 mg/g)。土壤的 SOC 含量与土壤的 MWD 呈高度的正相关性(图 8),说明植物可以通过增加土壤中 SOC 的含量来促进土壤大团聚体的形成。相关研究^[37]表明土壤有机质可作为土壤颗粒胶结物质,使土壤形成大且稳定结构的水稳定性团聚体,这与本研究结果一致。

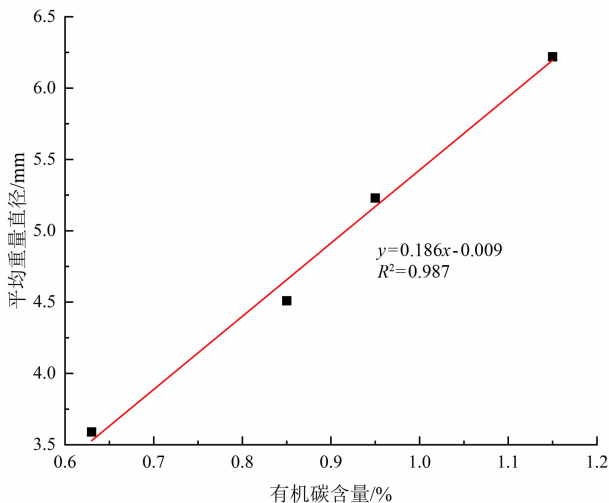


图 8 土壤有机碳含量与土壤平均重量直径的关系

Fig.8 Relationship between SOC content and soil MWD

通过分析土壤的内摩擦角与 MWD 的关系,发现土壤的 MWD 与内摩擦角成指数关系(图 9),这表明土壤团聚体颗粒越大其内摩擦角越大。

综上所述,植被修复可以通过提升土壤水稳性

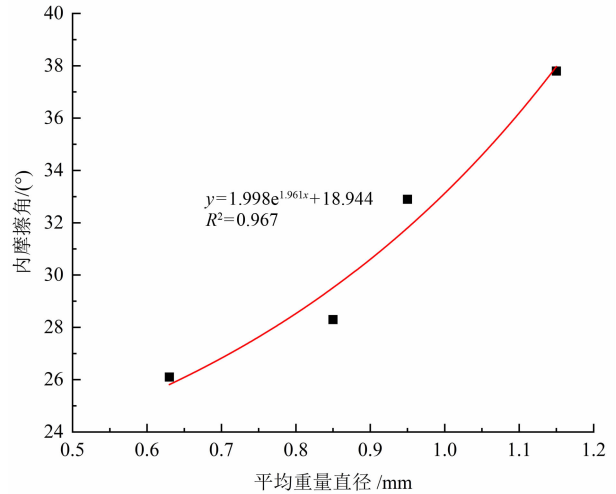


图 9 土壤的内摩擦角随平均重量直径的变化

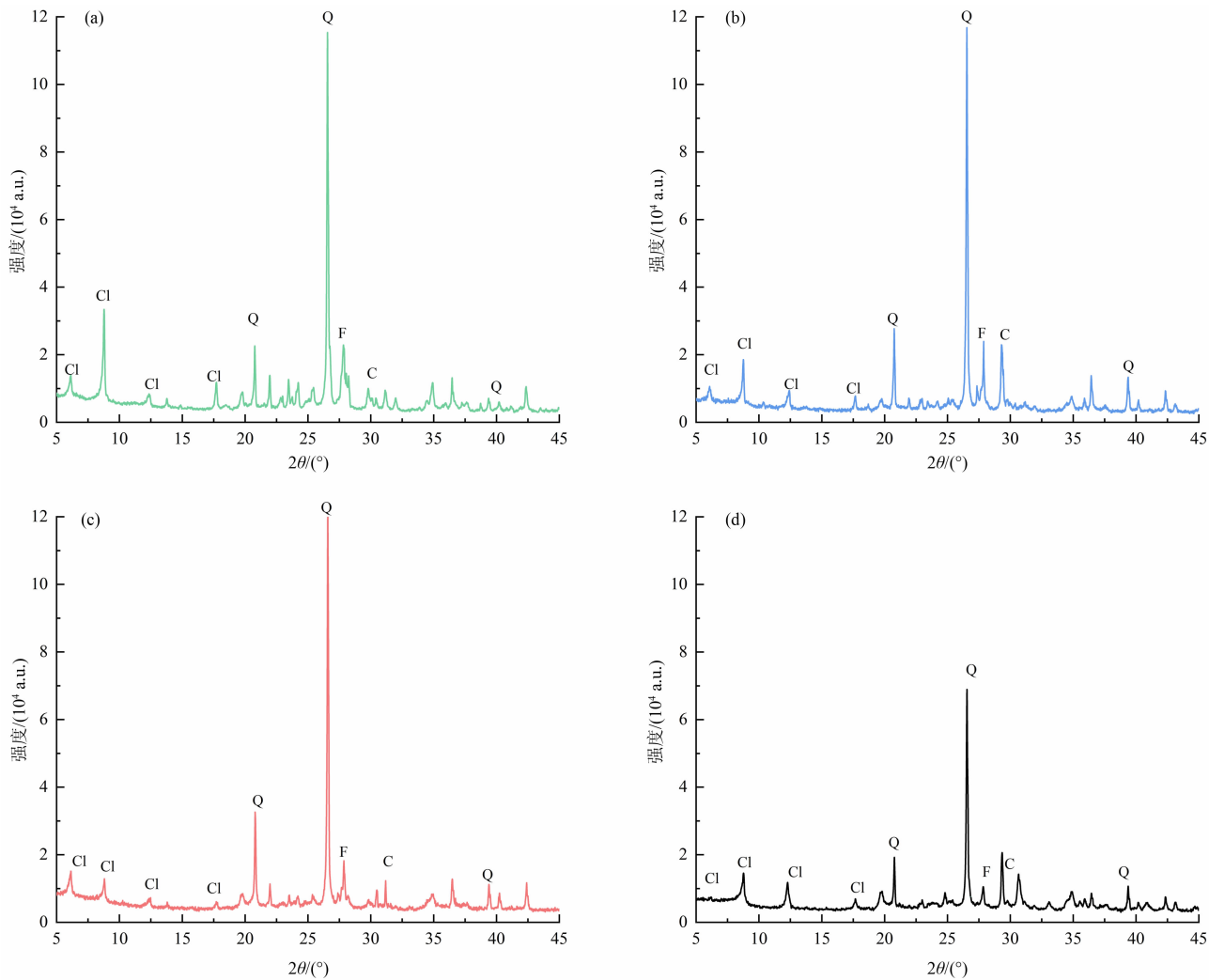
Fig.9 Variation of internal friction angle of soil with MWD

团聚体的聚集来增加土壤内摩擦角,进而增强土壤的抗剪切性能。其中林地对土壤大团聚体的形成促进作用最好,这可能是因为林地凋落量大、土壤中 SOC 含量较高^[38],有助于土壤团聚体的形成。

3.4.3 不同植被修复模式对土壤矿物的影响

土壤矿物组成与土壤结构密切相关,土壤矿物主要可分为非粘土矿物和粘土矿物两类。非粘土矿物如石英、方解石、斜长石等是土壤骨架的组成部分,而粘土矿物则由于其独特的理化特性,影响土壤颗粒的胶结与衔接。因此,本研究主要统计了非粘土矿物和粘土矿物的总含量。通过对土壤进行 XRD 全岩矿物检测发现,不同修复模式下土壤矿物种类大致相似(图 10),主要含有石英、方解石等原生矿物,具体含量如表 4 所示。同时,非粘土矿物的含量占比在 60% 以上,这表明研究区土壤的风化程度较低,稳定性较差。

对比不同植被修复模式下土壤总的粘土矿物含量,结果显示,经过长时间的植被修复,土壤中粘土矿物的含量都得到了不同程度的增加。其中灌木-草地的增加最多,粘土矿物增加量由多到少依次为灌木-草地、林地、草地、裸地。对比三种植被修复模式下土壤孔隙度(表 1),孔隙度由大到小依次为草地、林地、灌木-草地。这表明粘土矿物含量越多土壤孔隙度越小,土壤颗粒越紧密。分析粘土矿物含量与土壤粘聚力的关系,结果表明土壤粘聚力与粘土矿物含量呈正相关(图 11),这表明在研究区粘土



Cl 为粘土矿物;Q 为石英;F 为长石;C 为方解石。

图 10 不同植被修复模式下土壤的全岩矿物分析结果:(a) 灌木-草地;(b) 草地;(c) 林地;(d) 裸地

Fig. 10 Results of whole-rock mineral analysis of soil under various vegetation restoration mode;

(a) shrub-grasslands;(b) grasslands; (c) woodlands; (d) bare lands

表 4 不同植被修复模式下土壤的矿物组成

Tab. 4 Mineral composition of soil under diverse vegetation restoration modes

样地类型	土壤矿物含量/%						
	粘土矿物	石英	斜/钾长石	方解石	硬石膏	白云石	其他
灌木-草地	26.93	41.11	15.13	10.30	1.30	3.50	1.73
草地	22.50	43.71	14.01	11.20	0.44	6.87	1.27
林地	19.07	45.03	13.62	13.43	0.57	6.63	1.65
裸地	14.91	47.97	12.61	9.55	0.33	2.55	0.57

矿物对边坡的抗剪强度起加强作用。总的来看,植被修复可以通过增加土壤中粘土矿物的含量,从而提高土壤的粘聚力,使土壤颗粒更紧密结合,进而增强土壤的抗剪强度。

3.5 降雨条件下不同植被修复模式下土体边坡稳定性分析

为了更加直观综合地比较不同植被修复模式下土体的边坡稳定性,设置降雨条件为 250 mm/d(大

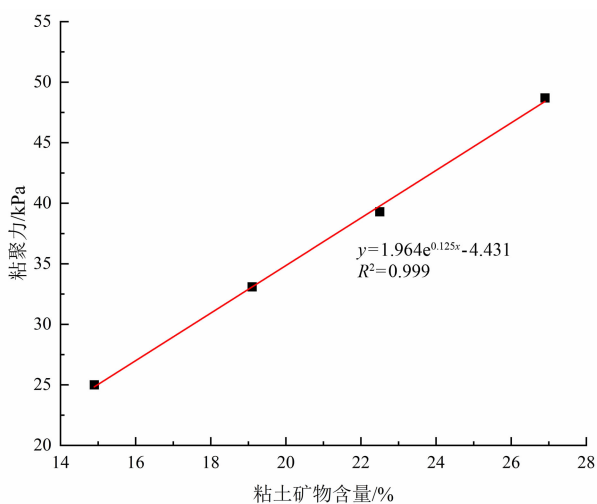


图 11 土壤粘土矿物含量与土壤粘聚力的关系
Fig. 11 Relationship between clay mineral content of soil with soil cohesion

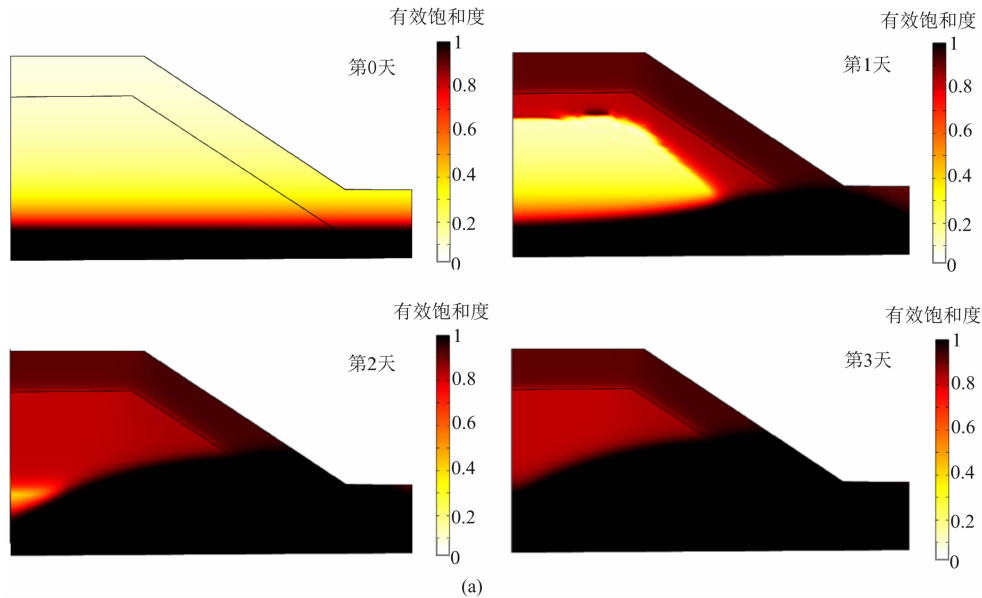
暴雨),持续 3 d,取 14% 的含水率(该含水率符合实际情况,且土壤的抗剪强度数据拟合较好)的土壤抗剪强度参数进行建模分析。

在模型中输入不同植被修复模式下土壤抗剪强度参数、水力特征参数以及基本物理参数(表 5)对边坡进行二维稳定性分析。通过 COMSOL Multiphysics 软件模拟分析得到降雨条件下边坡的有效饱和度变化云图(图 12)、边坡位移云图(图 13)与边坡破坏的塑性云图(图 14)。边坡有效饱和度云图表明,随着降雨的进行,边坡的有效饱和度逐渐增加,灌木-草地与林地较快达到饱和。从边坡位移云图中的结果可以看出,边坡中位移较大的部分主要集中在坡脚位置,且不同植被修复模式下最大位移由多到少依次表现为灌木-草地、林地、草地、裸地,这可能与土壤自身的密度和粘聚力有关。从边坡塑性破坏云图可以看出,模拟得到的滑动面呈弧形,且最大塑性变形发生在坡脚位置,潜在的滑动面积由大到小依次为灌木-草地、林地、草地、裸地,且随着降雨的进行,潜在滑动面有变大的趋势并整体上移。潜在滑动面积与土壤的容重、粘聚力、

表 5 模型中的土壤物理参数
Tab. 5 Soil physical parameters in the model

样地类型	c/kPa	$\varphi/^{\circ}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	v	E/MPa	$K_s/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	θ_s	θ_r	a	n
灌木-草地	48.7	32.9	1550	0.3	10	19.6	43.2	16.2	0.09	2.61
林地	33.1	37.8	1600	0.3	10	36.2	46.5	13.8	0.08	2.42
草地	39.3	28.3	1420	0.3	10	22.42	47.6	12.5	0.08	2.01
裸地	25.0	26.1	1380	0.3	10	60.83	50.7	9.5	0.07	1.91

注: ρ 为土壤容重; E 为材料弹性模量; v 为材料泊松比; K_s 为饱和渗透系数。



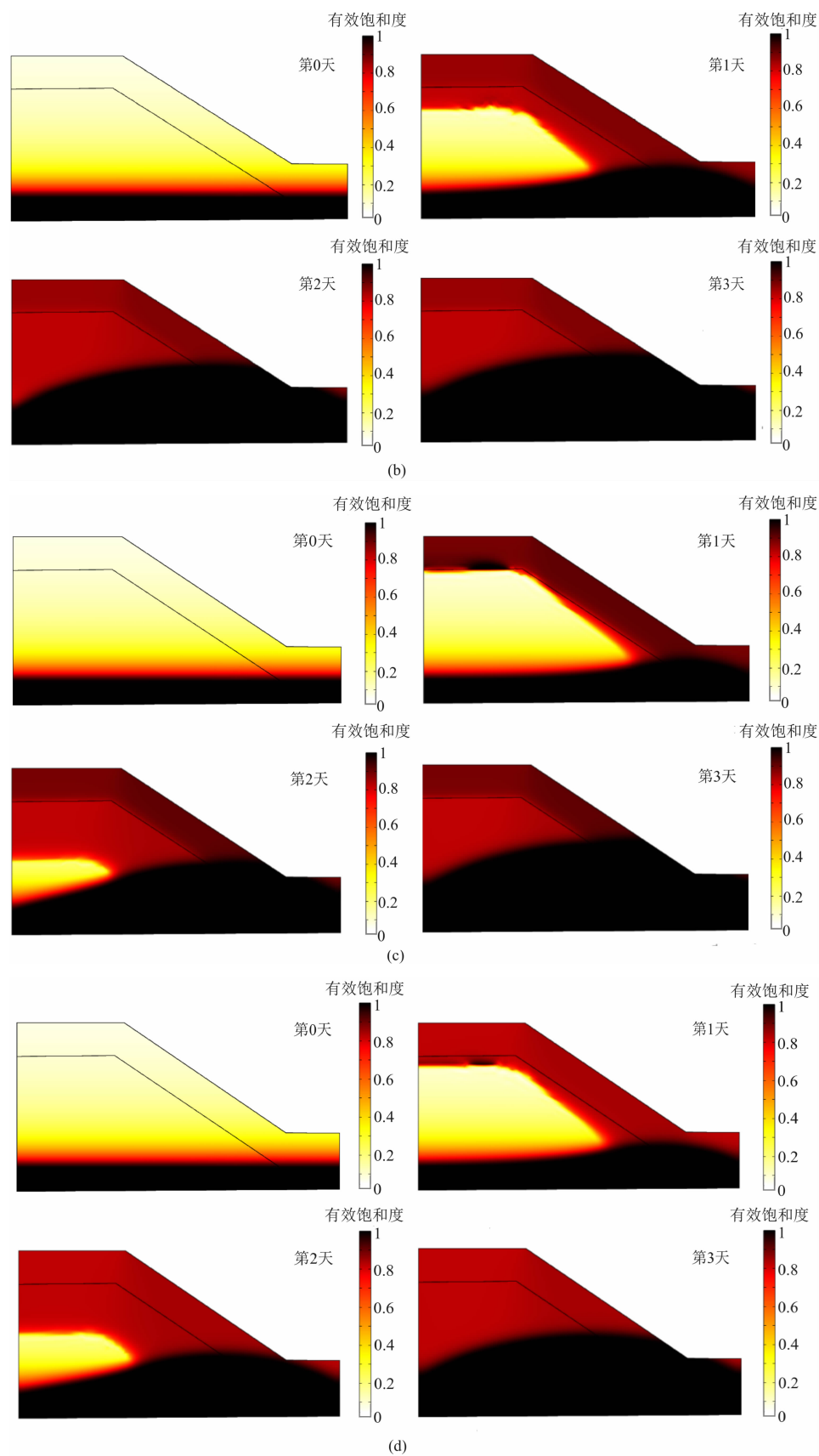
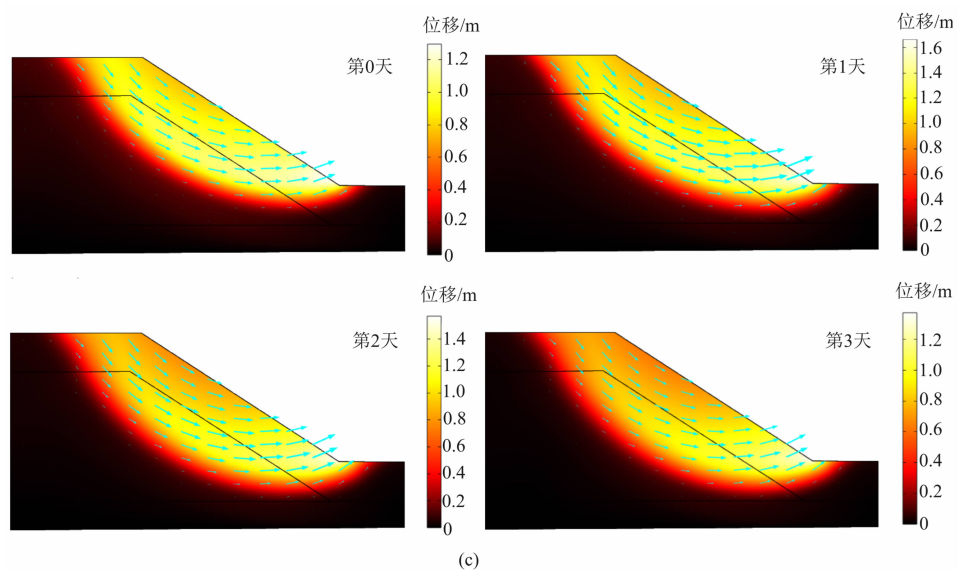
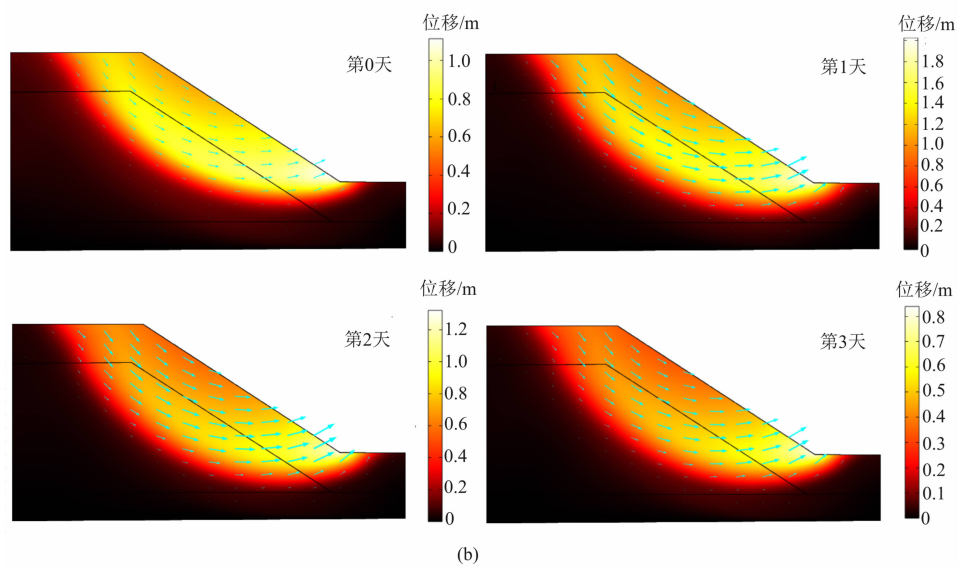
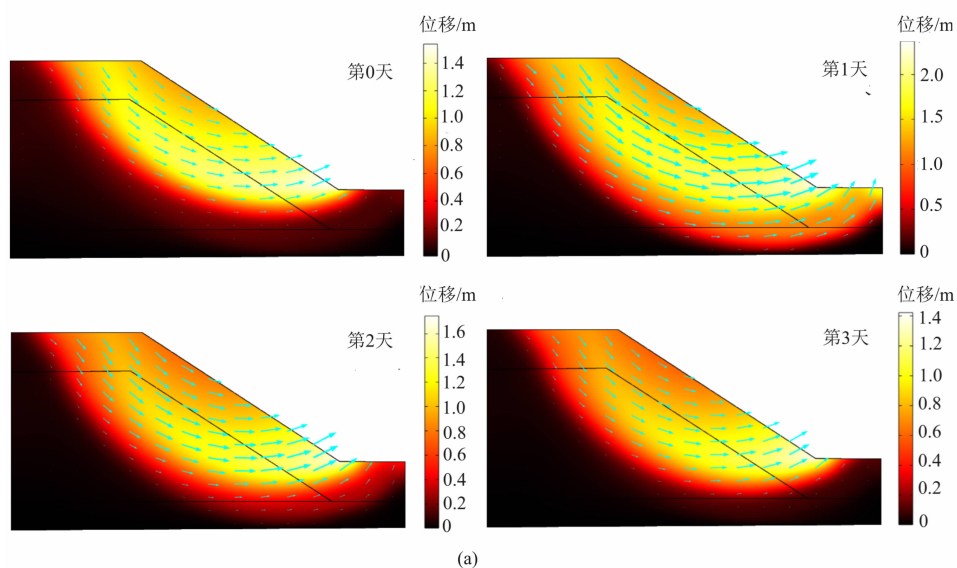


图 12 降雨条件下不同植被修复模式下边坡的有效饱和度:(a) 灌木-草地; (b) 林地; (c) 草地; (d) 裸地

Fig. 12 Effective saturation of slopes under rainfall conditions with different vegetation restoration modes;
(a) shrub-grasslands; (b) woodlands; (c) grasslands; (d) bare lands



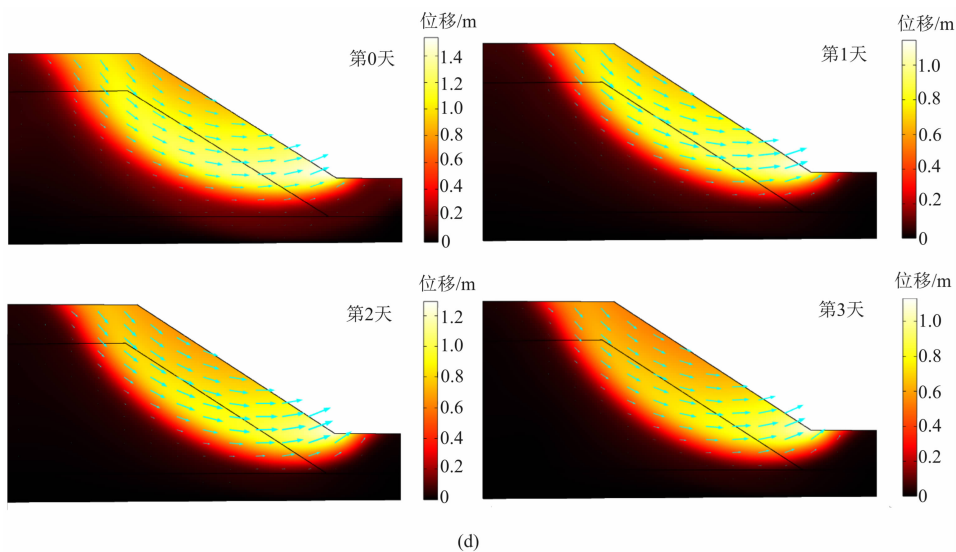
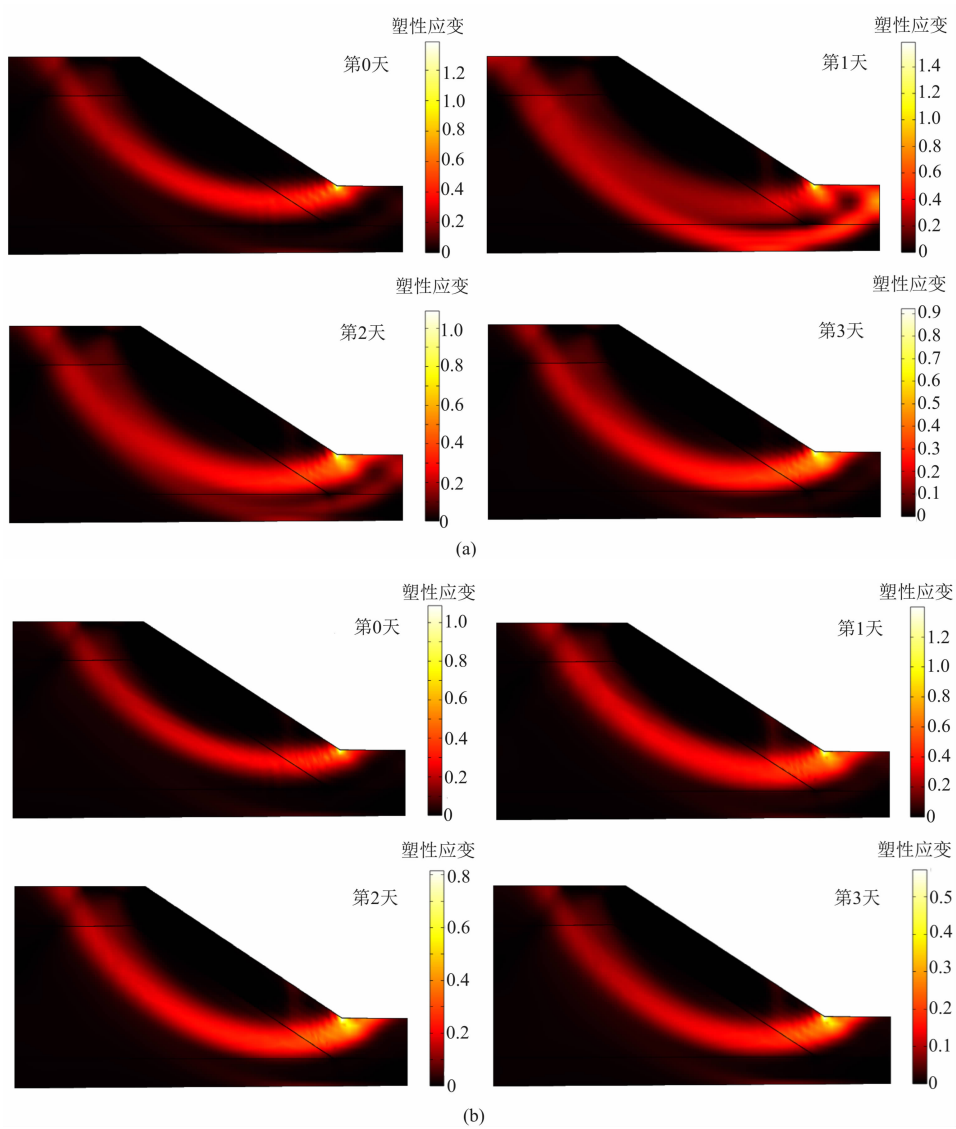


图 13 降雨条件下不同植被修复模式下边坡的位移云图: (a) 灌木-草地; (b) 林地; (c) 草地; (d) 裸地

Fig. 13 Clouds of slope displacement under rainfall conditions with different vegetation restoration modes:

(a) shrub-grasslands; (b) woodlands; (c) grassland; (d) bare lands



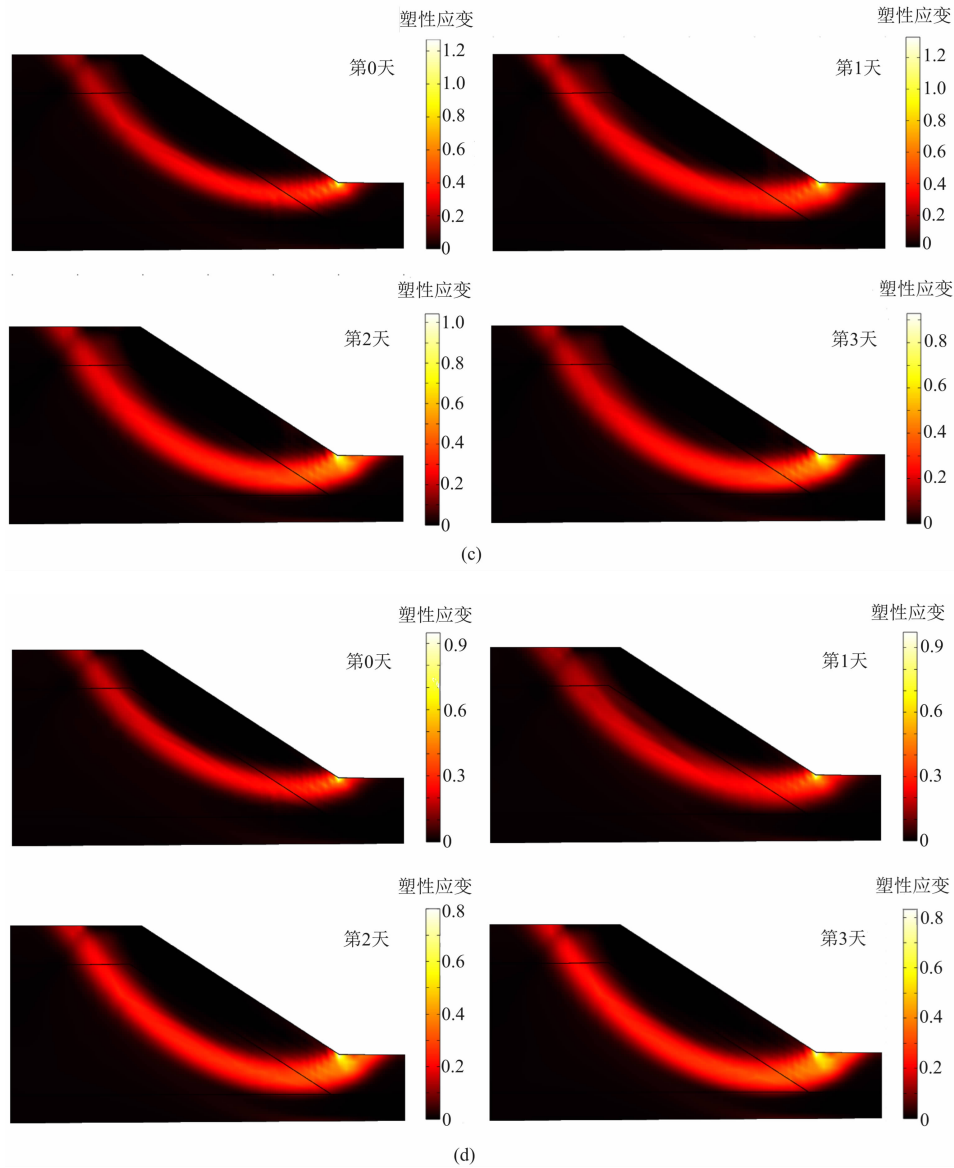


图 14 降雨条件下不同植被修复模式下边坡的塑性应变云图:(a) 灌木-草地;(b) 林地;(c) 草地;(d) 裸地

Fig. 14 Plastic strain clouds of slopes under rainfall conditions with different vegetation restoration modes;

(a) shrub-grasslands; (b) woodlands; (c) grasslands; (d) bare lands

内摩擦角以及静水压强密切相关。需要注意的是,边坡稳定性较好的土壤一旦内部应力达到滑坡的条件,滑动的危害性可能更大。综上,在评估滑坡的危害性时,需要从多个角度进行综合分析。

利用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件结合边坡的内部塑性应变,通过强度折减得到了降雨条件下不同植被修复模式下土体边坡稳定性安全系数 (FoS) (图 15)。结果表明三种植被修复模式下植被都能一定程度提高土体的边坡稳定性,裸地的 FoS 为 2.68 ~ 2.25,灌木-草地修复模式下边坡稳定性最好, FoS 为 3.2 ~ 2.58,其次为林地 (3.03 ~

2.44),草地 (2.91 ~ 2.41) 对边坡稳定性的提升作用要小很多。初始阶段灌木-草地与林地的 FoS 下降较快,随着降雨的进行,灌木-草地与林地的 FoS 下降趋势变缓,这与不同修复模式下土壤的持水性能有关。

4 讨论

本研究分析不同植被修复模式下土壤基本理化性质与土壤的抗剪强度,并探究了它们之间的关系,通过边坡模拟综合分析了不同植被修复模式下土体

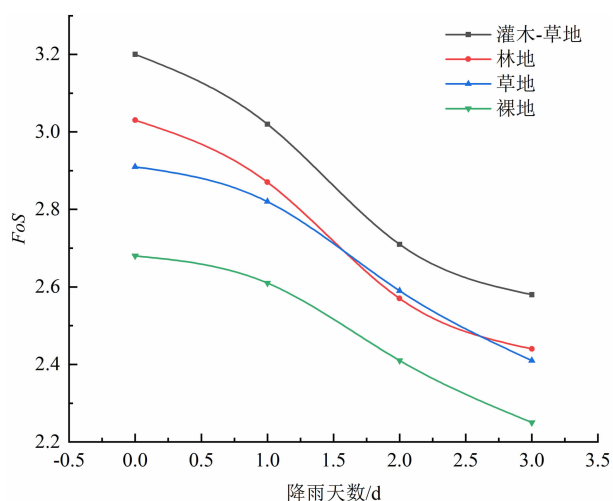


图 15 降雨条件下不同植被修复模式下土体
边坡稳定性安全系数

Fig. 15 FoS for soil slope stability with rainfall
under diverse vegetation restoration modes

边坡稳定性。结果表明经过 14 年的植被修复,土壤的抗剪强度与边坡稳定性都得到了一定程度的提升,这可能与土壤中的胶结物质有关,土壤中常见的胶结物质有粘土矿物、有机质、黏粒等^[39-40]这些胶结物质会影响土壤颗粒间的连接方式,进而影响土体的边坡稳定性。

对不同植被修复模式下土壤的基本理化性质进行分析探究。结果显示,植被修复过后,土壤中的小颗粒物质、有机碳含量、粘土矿物以及水稳性团聚体都得到了不同程度的增加。结合经典力学,土体的边坡稳定性主要取决于土壤的抗剪强度,因此本研究探讨了这些土壤基本理化性质与抗剪强度的关系。分析发现土壤细颗粒与粘土矿物含量越高,土壤的粘聚力(c)越大,土壤中有机碳(SOC)含量与土壤的 MWD 呈正相关, MWD 与土壤的内摩擦角(φ)起正向作用。上述结果表明不同植被类型可以通过影响土壤的粒径分布、团聚体的形成、改变土壤矿物组成等方式来影响土壤的力学性能,最终影响土体的边坡稳定性。

其中灌木-草地可以显著增加土壤细颗粒物质与粘土矿物的含量,这可能是因为灌木-草地增加表层土壤的植被覆盖度,更有助于细颗粒物质的积累^[41],且粘土矿物的形成与水分有很大关系^[42],而灌木-草地的土壤含水率、残余体积含水量明显高于其他植被类型修复下的土壤,因此灌木-草地更有助于土壤水分的积累(表 1、表 2)。林地可以显著增

加土壤的有机碳含量,有利于土壤中水稳性团聚体的形成。研究表明土壤团聚体有机物含量越高,土壤团聚体越稳定^[43],这与本文土壤 MWD 和土壤有机碳含量呈正相关的结论一致。

对比不同植被修复下土体边坡稳定性,灌木-草地土壤的边坡稳定性最好(3.20 ~ 2.58),林地的边坡稳定性(3.03 ~ 2.44)与灌木-草地土壤差距不大。有研究表明植被能明显增强土壤的抗侵蚀能力,进而提高边坡的安全性,且林地对土壤的抗侵蚀能力的增强效果强于灌木-草地^[44]。然而,部分结果却显示灌木林修复下土壤的抗侵蚀能力要强于其他林地类型^[45]。通过分析发现,虽然林地的大团聚体含量多于灌木-草地,但灌木-草地的黏粒、粉粒含量多于林地,而且灌木-草地粘土矿物含量最高。这可能就是灌木-草地的边坡的 FoS 高于林地的原因。研究区降雨多集中在 5—8 月,且当地土壤多为褐土,具有较强渗透性,抗侵蚀能力较弱,土壤颗粒容易被水带走^[46]。灌木-草地群落的地表覆盖度较好,且根系的密度较大,有助于黏性小颗粒的聚集,粘土矿物含量明显提升,使得土壤的抗侵蚀性能更强。植被类型会影响地面表层生物群落的生长^[47]。林地由于顶层的覆盖度较大,导致底层受光照少,且当地多为油橄榄林,有一定经济价值,因此地表杂草、灌木会被人为清理。这些因素导致地表植被群落缺失,对水土的拦截效果相对于灌木-草地较低。灌木-草地与草地多为天然状态,无人工干预。杨慧玲^[48]的研究表明天然植被下的土壤粒径分布结构要好于人工林,尤其是天然混交林的修复效果最好,这与本研究的结论一致。草地虽能明显增加土壤的细颗粒,但它对水稳性团聚体的提升效果有限,这可能是草地对边坡稳定性的提升效果较小的原因。因此,在考虑林地植被修复时,应考虑适度增加灌木和草本植物,以提升土壤的稳定性。

综上所述,研究区不同的植物修复模式可以通过改变土壤中小颗粒占比、大团聚体以及粘土矿物含量等方式来改变土壤的力学性能,植被修复对土壤的理化性质的改变有助于提升边坡稳定性,其中灌木-草地群落的提升效果最佳。

5 结论与展望

(1) 不同植被修复模式下土壤的颗粒分布不

同,植被修复模式下土壤的粉粒增加效果最明显,其中灌木-草地群落修复下的土壤粉粒增加最多。植被修复能增加土壤细颗粒的含量,增强土壤的抗侵蚀性能。

(2) 植被能促进土壤大团聚体(直径大于 0.25 mm)生成,大团聚体占比由多到少依次为林地、灌木-草地、草地。土壤的 *MWD* 与内摩擦角呈指数函数关系,植被修复可以通过提升土壤水稳性团聚体的形成来增强土壤的抗剪切性能。

(3) 不同植被都能一定程度增加土壤中粘土矿物的含量,粘土矿物含量由多到少依次为灌木-草地、林地、草地、裸地,且粘土矿物含量与土壤的粘聚力正相关。植被可以通过增加土壤中粘土矿物的含量来提高土壤的粘聚力,使土壤结合更紧致,进而增强土体的边坡稳定性。

(4) 经过 14 年的修复,不同植被修复模式下土体边坡稳定性都得到不同程度的加强,其中灌木-草地群落对土体边坡稳定性加强效果最好。在降雨条件下,边坡稳定性安全系数由高到低依次为灌木-草地(3.20 ~ 2.58)、林地(3.03 ~ 2.44)、草地(2.91 ~ 2.41)、裸地(2.68 ~ 2.25)。

植被修复会影响土壤的理化性质,导致土壤内部结构发生变化,进而影响边坡的稳定性。综合来看,灌木-草地群落的修复效果更好,能增加土壤中细颗粒的含量,防止土壤沙化,还能促进粘土矿物的增加,使土壤结构更紧致,也能一定程度促进大团聚体的形成,使土壤中的细颗粒不易被水冲刷而流失,进而使土壤边坡更加稳定。因此该研究区可以种植适合的灌木与草本植物,以期达到更好的修复效果。

鉴于研究区植被恢复存在一定的人为干预,取样点在地理位置上也受到一定的限制,且白龙江流域土壤类型差异较大,不同土壤类型在不同植被修复模式下的效果需要进一步分析。不能只局限于边坡稳定性视角来分析土壤稳定性的影响,未来需要从多方面、多角度综合评价植被对土壤特性的影响。

参考文献(References)

- [1] FAIZ H, NG S, RAHMAN M. A state-of-the-art review on the advancement of sustainable vegetation concrete in slope stability [J]. Construction and Building Materials, 2022, **326**: 126502. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126502
- [2] WANG Xia, HONG Miaomiao, HUANG Zheng, et al. Biomechanical properties of plant root systems and their ability to

- stabilize slopes in geohazard-prone regions [J]. Soil and Tillage Research, 2019, **189**: 148 – 157. DOI: 10.1016/j.still.2019.02.003
- [3] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, **52**(11): 2105 – 2138. [LI Zhongkai, LI Xiaoyan, ZHOU Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. Science China: Earth Sciences, 2022, **52**(11): 2105 – 2138] DOI: 10.1360/N072021-0358
- [4] HINSINGER P, BENGOUH A G, VETTERLEIN D, et al. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance [J]. Plant and Soil, 2009, **321**(1/2): 117 – 152. DOI: 10.1007/s11104-008-9885-9
- [5] XIA Jiangbao, REN Ranran, CHEN Yinping, et al. Multifractal characteristics of soil particle distribution under different vegetation types in the Yellow River Delta chenier of China [J]. Geoderma, 2020, **368**: 114311. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114311
- [6] ZHANG Yaohua, XU Xianli, LI Zhenwei, et al. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2657 – 2665. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.372
- [7] 洪苗苗. 浅层滑坡多发区不同乔木根系对坡体稳定性影响研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 54 – 55. [HONG Miaomiao. Effect of arbors root systems to stabilize slope in a geological hazard-prone region [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 54 – 55]
- [8] LI Jia, WANG Xia, JIA Haixia, et al. Effect of herbaceous plant root density on slope stability in a shallow landslide-prone area [J]. Natural Hazards, 2022, **112**: 2337 – 2360. DOI: 10.1007/S11069-022-05268-0
- [9] 柳洋. 陇中黄土丘陵区不同林龄刺槐林根系特征及边坡稳定性研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 10 – 11. [LIU Yang. Research on the root system characteristics and slope stability of Robinia Pseudoacacia L. forests with different stand ages in the loess hilly area of central Gansu [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 10 – 11] DOI: 10.27204/d.cnki.glzhu.2021.002518
- [10] 安然, 柴军瑞, 覃源, 等. 植被根系形态对边坡稳定性的影响分析[J]. 水利水电技术, 2018, **49**(3): 150 – 156. [AN Ran, CHAI Junrui, QIN Yuan, et al. Analysis of the influence of vegetation root-system morphology on slope stability [J]. Water Resources and HydropowerEngineering, 2018, **49**(3): 150 – 156] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.03.022
- [11] 魏玉杰, 吴新亮, 皮江平, 等. 土沙混合对土壤粒度分维值及物理特性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, **11**(6): 74 – 80. [WEI Yujie, WU Xinliang, PI Jiangping, et al. Fractal dimension and physical characteristics of clay-sand mixtures [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, **11**(6): 74 – 80] DOI: 10.16843/j.sswc.2013.06.012
- [12] ZHANG Yue, ZHONG Xiaoyan, LIN Jinshi, et al. Effects of

- fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China [J]. *Geomorphology*, 2020, **351**: 106956. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106956
- [13] ZHANG Baojun, ZHANG Guanghui, YANG Hanyue, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2019, **173**: 375 – 383. DOI: 10.1016/j.catena.2018.10.036
- [14] 何蕾. 矿物成分与水化学成分对粘性土抗剪强度的控制规律及其应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 125 – 126. [HE Lei. Impact of mineralogical composition and water chemistry on shear strength of clay and its application [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2014: 125 – 126]
- [15] WANG Ren, SHI Wanzhong, XIE Xiangyang, et al. Clay mineral content, type, and their effects on pore throat structure and reservoir properties: Insight from the Permian tight sandstones in the Hangjinqi area, north Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, **115**: 104281. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104281
- [16] 洪苗苗, 汪霞, 赵云飞, 等. 浅层滑坡多发区典型植被恢复树种根系对土壤抗剪强度影响[J]. *山地学报*, 2018, **36**(1): 107 – 115. [HONG Miaomiao, WANG Xia, ZHAO Yunfei, et al. Effects of ecological restoration plants root on slope reinforcement in shallow landslide prone region [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(1): 107 – 115] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000306
- [17] 何斌, 徐新兰, 贾贵义, 等. 甘肃省白龙江流域主要地质灾害发育特征及分布规律研究[J]. *地下水*, 2017, **39**(3): 174 – 176 + 179. [HE Bin, XU Xinlan, JIA Guiyi, et al. Characteristics and distribution of main geological hazards in Gansu Bailongjiang River Basin [J]. *Groundwater*, 2017, **39**(3): 174 – 176 + 179]
- [18] WANG Xia, WANG Kaichang, DENG Tao, et al. Contribution of soil matric suction on slope stability under different vegetation types [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, **24**(2): 575 – 588. DOI: 10.1007/s11368-023-03653-1
- [19] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, **33**(4): 1 – 15. [MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong River basin: Progress and prospect [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, **33**(4): 1 – 15] DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.04001
- [20] KEEFER D K, LARSEN M C. Assessing landslide hazards [J]. *Science*, 2007, **316**: 1136 – 1138. DOI: 10.1126/science.1143308
- [21] 李佳, 汪霞, 贾海霞, 等. 浅层滑坡多发区典型灌木根系对边坡土体抗剪强度的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(14): 5117 – 5126. [LI Jia, WANG Xia, JIA Haixia, et al. Ecological restoration with shrub roots for slope reinforcement in a shallow landslide-prone region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(14): 5117 – 5126] DOI: 10.5846/stxb201809141986
- [22] 赵振勇, 周春儿, 曹喜仁. 重塑土简易制技术及工程应用[J]. *广东公路交通*, 2006(1): 57 – 60. [ZHAO Zhenyong, ZHOU Chuner, CAO Xiren. Remodeling soil simple system technology and engineering application [J]. *Guangdong Highway Traffic*, 2006(1): 57 – 60]
- [23] 解邦龙, 张吾渝, 张丙印, 等. 不同龄期下粉煤灰水泥土的UU抗剪强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2021, **29**(4): 1216 – 1223. [XIE Banglong, ZHANG Wuyu, ZHANG Bingyin, et al. Experimental study on unconsolidated and undrained shear strength of fly ash cement soil at different ages [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, **29**(4): 1216 – 1223] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-541
- [24] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**: 892 – 898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- [25] SHI Xiaoqing, QIN Tianling, YAN Denghua, et al. A meta-analysis on effects of root development on soil hydraulic properties [J]. *Geoderma*, 2021, **403**: 115363. DOI: 10.1016/J.GEODERMA.2021.115363
- [26] KHAN K Y, POZDNYAKOV A I, SON B K. Fabric of soil aggregates and characterization of their structural and functional stability [J]. *Eurasian Soil Science*, 2008, **41**(13): 1417 – 1423. DOI: 10.1134/S1064229308130103
- [27] ZENG Quanchao, DARBOUX F, MAN Cheng, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China) [J]. *Catena*, 2018, **167**: 276 – 283. DOI: 10.1016/j.catena.2018.05.009
- [28] AMUNDSON R, HEIMSATH A, OWEN J, et al. Hillslope soils and vegetation [J]. *Geomorphology*, 2015, **234**: 122 – 132. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.12.031
- [29] CHENG Y M. Location of critical failure surface and some further studies on slope stability analysis [J]. *Computers and Geotechnics*, 2003, **30**(3): 255 – 267. DOI: 10.1016/S0266-352X(03)00012-0
- [30] LIU Fuming. Stability analysis of geotechnical slope based on strength reduction method [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, **38**: 3653 – 3665. DOI: 10.1007/s10706-020-01243-3
- [31] 周磊, 李琦, 章璐玮. 基于COMSOL的露天边坡流固耦合稳定性分析及加固对策[J]. *中国矿山工程*, 2022, **51**(5): 20 – 23. [ZHOU Lei, LI Qi, ZHANG Luwei. COMSOL stability analysis of open-pit slope fluid-structure interaction and control measures [J]. *China Mining Engineering*, 2022, **51**(5): 20 – 23] DOI: 10.19607/j.cnki.cn11-5068/tf.2022.05.002
- [32] MARISCAL I, PEREGRINA F, TEREFE T, et al. Evolution of some physical properties related to soil quality in the degraded ecosystems of “rana” formations from SW Spain [J]. *Science of*

- the Total Environment, 2007, **378**(1-2): 130-132. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.025
- [33] 王君惠, 喻武. 地形对色季拉山典型植被过渡带土壤有机碳含量的影响[J]. 高原农业, 2021, **5**(5): 444-451. [WANG Junhui, YU Wu. The effect of topography on soil organic carbon content in typical vegetation transition zones of Sejila Mountain, southeast Tibet [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2021, **5**(5): 444-451] DOI: 10.19707/j.cnki.jp.a.2021.05.002
- [34] 王静娅, 张风华. 干旱区典型盐生植被群落土壤养分特征[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(5): 235-241. [WANG Jingya, ZHANG Fenghua. Soil nutrient properties under typical halophytic vegetation community in arid region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(5): 235-241] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2014.05.04
- [35] 李航, 严方晨, 焦菊英, 等. 黄土丘陵区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J]. 生态学报, 2018, **38**(11): 3889-3898. [LI Hang, YAN Fangchen, JIAO Juying, et al. Soil water availability and holding capacity of different vegetation types in hilly-gullied region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(11): 3889-3898] DOI: 10.5846/stxb201705170914
- [36] 李永平. 黄土高原不同防护类型农田土壤风蚀防控效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 100-101. [LI Yongping. Effects of different protective types on the prevention and control of farming soil wind erosion in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011: 100-101]
- [37] ALBIACH R, CANET R, POMARES F, et al. Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil [J]. Bioresource Technology, 2001, **76**(2): 125-129. DOI: 10.1016/S0960-8524(00)00090-0
- [38] 王建林, 王忠红, 张宪洲, 等. 不同植被对高寒草原生态系统土壤有机碳组成和水稳性团聚体含量的影响[J]. 草地学报, 2010, **18**(6): 749-757. [WANG Jianlin, WANG Zhonghong, ZHANG Xianzhou, et al. Effect on alpine vegetation of different grassland ecosystems composed of soil organic carbon water stable aggregates content [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, **18**(6): 749-757]
- [39] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 204-208 + 239. [SHANG Yingni, HU Feinan, ZHAO Shiwei, et al. Effects of cementing materials on the formation of loessial soil aggregates [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2): 204-208 + 239] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.02.034
- [40] NIU Ziru, SU Yongzhong, LI Juan, et al. Effect of attapulgite application on aggregate formation and carbon and nitrogen content in sandy soil [J]. Sustainability, 2023, **15**(16): 12511. DOI: 10.3390/SU151612511
- [41] SU Wei, GAO Yuemeng, GAO Peng, et al. Effects of different vegetation restoration types on the fractal characteristics of soil particles in Earthy-Rocky Mountain area of northern China [J]. Forests, 2022, **13**(8): 1246. DOI: 10.3390/F13081246
- [42] DEEPHY R, BALAKRISHNAN S. Climatic control on clay mineral formation: Evidence from weathering profiles developed on either side of the western Ghats [J]. Journal of Earth System Science, 2005, **114**(5): 545-556. DOI: 10.1007/BF02702030
- [43] GAO Lili, WANG Bisheng, LI Shengping, et al. Soil wet aggregate distribution and pore size distribution under different tillage systems after 16 years in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2019, **173**: 38-47. DOI: 10.1016/j.catena.2018.09.043
- [44] LI Songyang, GAO Ruoyun, HUANG Maowei, et al. Multifractal features of particle-size distribution and their relationships with soil erosion resistance under different vegetation types in debris flow basin [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, **10**: 927862. DOI: 10.3389/feart.2022.927862
- [45] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 等. 黔中杠寨小流域不同植被类型土壤抗蚀性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(8): 64-70. [WU Peng, ZHU Jun, CUI Yingchun, et al. Study on soil anti-erodibility of different vegetation types in Gangzhai small watershed of central Guizhou province [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2012, **32**(8): 64-70] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2012.08.018
- [46] 潘佑静, 杨智, 韩文君, 等. 喀斯特地区退耕还林下不同植被恢复阶段土壤渗透性研究[J]. 现代农业科技, 2016(8): 191-193 + 196. [PAN Youjing, YANG Zhi, HAN Wenjun, et al. Different vegetation restoration stages soil permeability study in karst area which returning farmland to forest [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(8): 191-193 + 196]
- [47] 雷波, 包维楷, 贾渝, 等. 不同坡向人工油松幼林下地表苔藓植物层片的物种多样性结构特征[J]. 生物多样性, 2004, **12**(4): 410-418. [LEI Bo, BAO Weikai, JIA Yu, et al. Ground bryophyte composition and structures under young Pinus tabulaeformis forests along the upper Minjiang River [J]. Biodiversity Science, 2004, **12**(4): 410-418]
- [48] 杨慧玲, 高鹏, 王华伟, 等. 大黑山生态修复区不同植被类型土壤颗粒的分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, **7**(5): 52-57. [YANG Huiling, GAO Peng, WANG Huawei, et al. Characteristics of soil particles fractal dimension under different forest stands of the ecological restoration area in Dahei Mountain area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, **7**(5): 52-57] DOI: 10.16843/j.sswc.2009.05.010

Physicochemical Properties of Soil under Restoration of Different Vegetation Types and Resulting Slope Stability in the Bailong River Basin, China

CHEN Bozhou, HU Jianhua^{*}, WU Wei, LIU Yuanmeng, DENG Ruyue

(School of Zijin Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Vegetation restoration is an effective means of ecological control of unstable slopes. Although past research elaborated the anchoring effects of vegetation root systems on stabilizing unstable slopes, most studies neglected the influence of vegetation on the physicochemical properties of soil with the subsequent changes in slope stability.

In this study, lands including woodland, shrub-grassland, grassland and bare land in a landslide area of the Bailong River basin, Gansu province, China, were selected for examining the changes in fundamental physicochemical and mechanical properties of soils under restoration of different vegetation types after fourteen years of artificial rearing. The relationships between physicochemical properties such as particle size, aggregates, soil minerals and shear resistance were analyzed, and the slope stability of soil bodies under different vegetation restoration was comprehensively compared by numerical simulation software.

(1) Vegetation restoration significantly changed the physicochemical properties of soil. The mode of shrub-grassland planting can significantly enhanced the content of fine particles (clay and silt) and clay minerals in slope soil relative to the other two restoration modes of woodland and grassland planting, and the woodland planting had the best effect on promoting the formation of soil macroaggregates.

(2) An increase in the mean weight diameter (MWD) of soil resulted in a greater internal friction angle (φ). There was an exponential relationship between fine particle content and soil cohesion ($R^2 = 0.99$). Furthermore, the clay mineral content fitted a positive correlation with soil cohesion (c).

(3) After fourteen years of restoring, the restoration of land with different types of vegetation, led to an improvement in slope stability to a certain extent. Among the different types of vegetation, the shrub-grassland community was found to be the most effective at enhancing soil slope stability. Under extreme rainfall conditions, the factor of safety (FoS) for slope stability was highest in the shrub-grasslands (3.20 – 2.58), followed by woodlands (3.03 – 2.44), grasslands (2.91 – 2.41), and bare lands (2.68 – 2.25).

This study would help to promote the understanding of the mechanism of vegetation planting on slope stability and may also provide suggestions for vegetation restoration model selection in the study area.

Key words: vegetation restoration; shear strength; soil particle size; soil aggregate; clay minerals; slope stability; the Bailong River basin

(责任编辑 朱颖彦)