

王 瑞,兰恒星,刘世杰,等.森林火灾对于岩土体物理力学特性的影响[J].地球科学与环境学报,2022,44(1):114-123.

WANG Rui,LAN Heng-xing,LIU Shi-jie,et al. Influence of Forest Fire on Physical and Mechanical Properties of Rock and Soil[J].

Journal of Earth Sciences and Environment,2022,44(1):114-123.

DOI:10.19814/j.jese.2021.08026

森林火灾对岩土体物理力学特性的影响

王 瑞¹,兰恒星^{1,2*},刘世杰¹,伍宇明²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101)

摘 要:2020年3月30日四川省西昌市森林火灾发生后,该地区的地质灾害显著增多,火灾对表层土壤产生一定影响,但目前对火灾影响土壤的物理力学性质的机制及致灾特征研究尚浅。以未遭受火灾区域和遭受火灾区域的表层土样为研究对象,进行了总有机碳、颗粒级配和X射线衍射分析,并结合室内相关力学试验研究了火灾前后土样的黏土矿物含量及力学强度特性。试验结果表明:①火灾发生后土壤有机质含量降低,导致不稳定的无机土壤裸露;土壤团粒结构稳定性降低,土壤中细小颗粒含量增高,细小颗粒容易阻塞土壤表层孔隙,不利于雨水或地面径流的下渗;②火灾的高温过程使得土壤中黏土矿物含量变化,高岭石(Kao)相对含量减少了10%,伊利石/蛭石混层增加了1%,伊利石(It)减少了20%,蛭石(V)增加了29%,变化最为明显;③火灾发生后土壤黏聚力(c)、内摩擦角(Φ)明显衰减,应变软化现象更为明显,这是土壤黏土矿物含量的变化,即蛭石矿物含量增高导致的。森林火灾会从颗粒粒径,矿物含量和强度参数3个方面显著影响土壤的物理力学性质,从而导致火烧迹地遭受泥石流、滑坡等地质灾害的风险增加。

关键词:地质灾害;森林火灾;有机碳;粒径级配;黏土矿物;力学性质;蛭石;应变软化

中图分类号:P642.3;S762.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)01-0114-10

Influence of Forest Fire on Physical and Mechanical Properties of Rock and Soil

WANG Rui¹, LAN Heng-xing^{1,2*}, LIU Shi-jie¹, WU Yu-ming²

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: After the forest fire in Xichang city of Sichuan province on March 30th, 2020, the geological disasters in the burned areas increase. At present, the research on the physical and mechanical properties of the burned soil and the disaster-causing mechanism is not in-depth. The organic carbon content, particle size and X-ray diffraction analysis were carried out on the surface soil samples in the areas covered by fire and the areas uncovered by fire, and the clay mineral content and mechanical strength characteristics of the soil samples before and after fire were

收稿日期:2021-08-14;**修回日期:**2021-12-04 **投稿网址:**<http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA23090301);国家自然科学基金项目(42041006,41927806)

作者简介:王 瑞(1997-),男,山东聊城人,工学硕士研究生,E-mail:2019126012@chd.edu.cn.

* **通讯作者:**兰恒星(1972-),男,山东招远人,长安大学教授,中国科学院地理科学与资源研究所研究员,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lanhx@igsnrr.ac.cn.

studied in combination with related laboratory mechanical tests. The results show that: ① the content of soil organic matter decreases after the fire, resulting in the exposure of unstable inorganic soil; the stability of soil aggregate structure decreases, and the content of fine particles in soil increases; fine particles tend to block the pores in the surface layer of soil, which is not conducive to the infiltration of rainwater or surface runoff. ② The high temperature process of the fire causes the content of clay minerals in the soil to change, with kaolinite (Kao) relative content decreasing by 10%, illite/vermiculite mixed layer increasing by 1%, illite (It) decreasing by 20% and vermiculite (V) increasing by 29%, and the increase of vermiculite is most obvious. ③ After the fire, the cohesion c value and internal friction angle φ value of soil decrease obviously, and the shear strength of soil samples with high vermiculite mineral content decreases obviously, and the strain softening phenomenon becomes more obvious. The occurrence of forest fire will significantly affect the basic physical and mechanical properties of soil, and the burned area has great development risk of geological disasters such as debris flow and landslide.

Key words: geological disaster; forest fire; organic carbon; particle size distribution; clay mineral; mechanical property; vermiculite; strain softening

0 引言

森林火灾是一种常见的自然灾害,除了对植被、大气环境和地表温度等产生直接影响外,还会影响土壤的物理、化学、矿物学和生物学特性^[1-2],使得植被覆盖率和土壤的稳定性遭受到破坏,导致土壤容易被侵蚀。土壤在燃烧过程后最直观的变化是有机物的损失;根据火灾的严重程度,其对有机物的影响包括轻微蒸馏(次要成分挥发)、碳化和完全氧化等^[2]。火灾除了会导致土壤养分含量和微生物生物量的显著降低外,随着火烧时间的延长,土壤表层C、N、P等含量明显下降^[3]。火灾过程对土壤物理特性的直接影响是产生一个平行于地表的连续防水锋,从而降低土壤的渗透性,易产生坡面径流^[4-5]。针对火烧迹地泥石流等灾害多发的地质现象,Vega等研究发现火灾强度显著影响研究区的年径流量和侵蚀程度,年径流量与枯枝落叶层厚度、裸露土壤和植被的百分比密切相关^[6];王丽等发现火烧迹地枯枝落叶层和腐殖质层的破坏,会严重降低土壤表层的持水能力,导致地表径流的增加和水土流失灾害的加剧^[7]。加之火灾发生后,火烧迹地地表大片裸露,土体表面堆积了大量灰烬,一旦遭遇暴雨天气,诱发火后泥石流的概率极大^[8]。

火烧迹地主要是指森林中经火灾烧毁后尚未长起新林的土地^[9]。火灾发生后植被覆盖率显著降低,火烧迹地土壤表面温度升高^[10]。由于火灾发生后土壤组分及物理力学条件的变化^[11-12],在集中降雨影响下,火烧迹地完全暴露的、不稳定的土体表面

容易引发泥石流、滑坡等二次灾害^[13]。例如,2018年,美国加利福尼亚州圣巴巴拉县、文图拉县等火烧迹地遭遇暴雨,引起洪水和滑坡灾害,部分住房被摧毁,道路受阻,造成至少17人死亡、28人受伤;2020年,中国四川省凉山彝族自治州发生火后泥石流和滑坡灾害,386人紧急撤离,灾害造成房屋、桥梁等不同程度受损,直接经济损失高达数百万美元。

任云等在对火后泥石流成灾机理分析时指出,表层岩土经林火烘烤后物理、水理、力学性质均发生了改变^[14];陈中学等研究发现黏粒含量显著影响着泥石流灾害的启动机制^[15];Cook等研究认为火灾发生后泥石流等地质灾害多发是土壤渗透率的降低增加了土壤结皮和促进了径流趋势造成的^[16]。不同于以上研究,本文工作主要针对火灾发生后土壤黏土矿物含量的微观变化及土壤宏观物理力学特性两方面开展。

中国西南部具有较高的滑坡等地质灾害危险性^[17-20]。2020年3月30日,四川省西昌市森林火灾发生后,该地区泥石流、滑坡灾害多次复发,亟需对火后土体的物理力学性质改变进行系统研究。因此,本文针对火灾发生后该地区滑坡、泥石流等灾害复发的地质现象,对该地区未遭受火灾区域及遭受火灾区域的表层土体进行了对比研究,分析了火灾过程导致土壤有机质含量、黏土矿物含量及土体物理力学特性的变化特征,研究了火灾过程对土壤物理力学性质的影响机制,以期对火烧迹地地质灾害防治提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区域及采样方法

2020 年 3 月 30 日,四川省西昌市泸山发生森林火灾,火灾持续近 10 d,各类土地过火总面积超过 3 000 hm²,综合计算受害森林面积近 800 hm²,造

成直接经济损失超过 9 700 万元。西昌市植被为亚热带常绿阔叶林带。根据美国国家航空航天局(NASA)定期发布的空间分辨率为 250 m 的 MODIS 数据,对火灾发生前后西昌市的归一化植被指数(NDVI)进行了分析,发现火灾导致该地区植被覆盖率明显降低(图 1)。

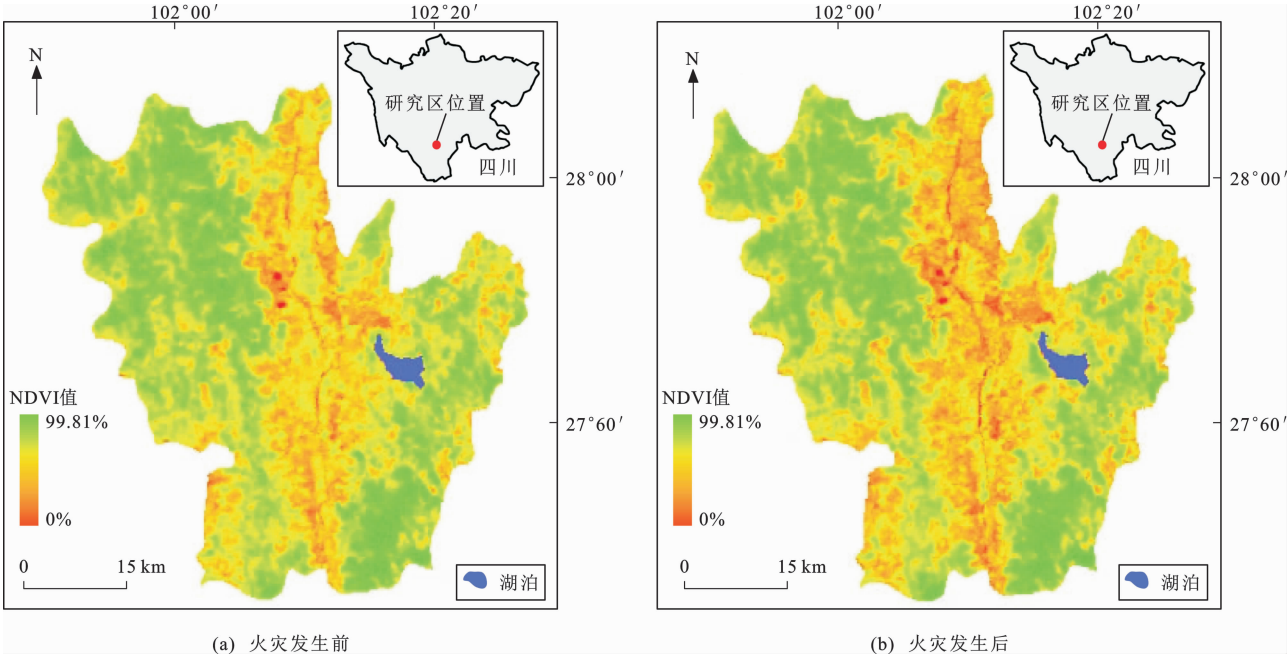


图 1 四川西昌地区火灾前后归一化植被指数对比

Fig. 1 Comparison of NDVI in Xichang Area of Sichuan Before and After Fire

本次试验所用土样取自西昌市森林火灾发生后的一处火烧迹地(27°70'N,102°10'E)。该地区构造变形强烈,地质结构复杂,主要地质灾害问题是泥石流和滑坡。山地林火发生后,0~20 cm 土壤温度及土壤组分含量变化明显^[21]。因此,本文对未遭受火灾区域和遭受火灾区域不同位置厚度为 20 cm 的表层土进行了采样研究,采样时间为 2020 年 10 月。取样地未遭受火灾区域土体干密度为 1.41 g·cm⁻³,天然含水率为 19.1%;遭受火灾区域土体干密度为 1.40 g·cm⁻³,天然含水率为 18.6%。试验前,首先对现场采集的土样在 105℃ 温度环境下烘干 48 h。为了排除大块砾石(>2 mm)在实验室样品尺度带来的差异,将烘干土经过筛分后取粒径小于 2 mm 的土样进行试验研究。如图 2 所示,未遭受火灾区域的土样呈黑灰色,土中含有较多的植物根系,土壤颗粒团聚体较多;遭受火灾区域土样呈黄褐色,植物根系很少,颜色更浅。

1.2 土壤颗粒直径与微观结构

土壤颗粒直径和结构是其物理力学特性的影响因素。通过标准筛分析法得到未遭受火灾区域和遭

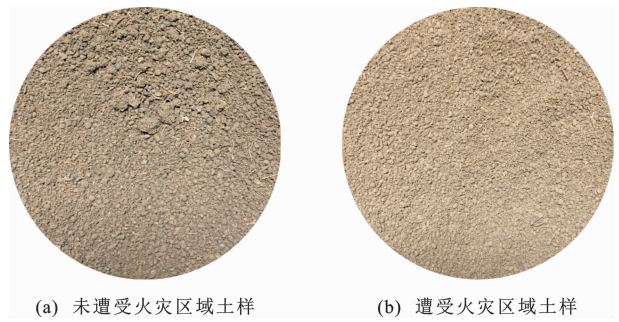


图 2 西昌地区火灾火烧迹地土样

Fig. 2 Soil Samples from the Burned Areas in Xichang Area 受火灾区域两种土样 0.075~2.000 mm 粒径范围的粒径数据,并通过 Bettersize2000 激光粒度分布仪得到粒径(d)小于 0.075 mm 的粒径分布数据,从而得到两种土样的粒组划分(表 1)和粒径级配曲线(图 3)。根据 DT-92-2 版中华人民共和国地质矿产部土工试验规程^[22],粒径小于 0.005 mm 的颗粒为黏粒。未遭受火灾区域土样黏粒含量 $P_{\leq 0.005 \text{ mm}} = 1.267\%$ ($P_{\leq 0.005 \text{ mm}}$ 表示粒径小于 0.005 mm 颗粒累积质量占总质量的百分比),遭受火灾区域土样 $P_{\leq 0.005 \text{ mm}} = 3.122\%$ 。

表 1 火烧迹地土样粒组划分

Table 1 Classification of Grain Groups for Soil Samples in Burned Area

粒组统称	粒组划分	粒径范围	未遭受火灾区域土样占比	遭受火灾区域土样占比
粗粒	粗砂	$2.0 \geq d > 0.5$	51.253%	48.394%
	中砂	$0.50 \geq d > 0.25$	29.851%	22.444%
	细砂	$0.250 \geq d > 0.075$	13.274%	13.473%
细粒	粉粒	$0.075 \geq d > 0.005$	5.622%	12.567%
	黏粒	$d \leq 0.005$	1.267%	3.122%

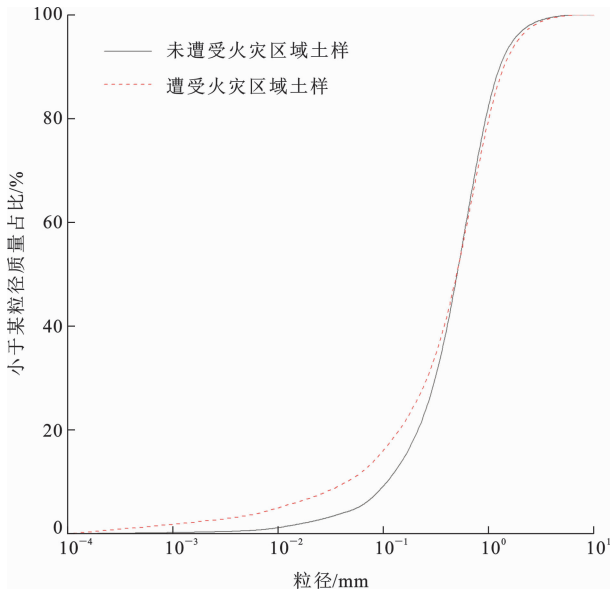


图 3 土样粒径级配曲线

Fig. 3 Grain Size Distribution Curves of Soil Samples

土体的微观结构作为土体的一个重要质量指标,一方面反映了土体的形成条件,另一方面又是决定土体物理、力学及其他工程性质的一个重要因素^[23]。通常,土壤中较小的土颗粒对环境变化(如水分、温度和荷载等)非常敏感。火灾造成的土壤中细小颗粒含量的增加会改变土体的力学特性等。扫描电子显微镜(SEM)为研究岩土微观结构的常用手段^[24]。通过对烘干的散土试样进行喷金导电处理,基于 FEI Q45 环境扫描电子显微镜,扫描得到了放大 250 倍的两种土样的颗粒尺寸图像(图 4)。测试结果显示遭受火灾区域的土壤颗粒粒径更小。其原因有两点:一是由于根系、落叶等的燃烧灰烬以细小颗粒的形式存在;二是火灾的高温环境导致土壤中部分结合水汽化,土壤团聚体的稳定性降低,在火灾发生后的风化、降雨影响下,土壤团聚体更容易解体。

1.3 实验方法

1.3.1 土壤组分研究

火灾过程对土壤组分最直观的影响是有机物的

损失及黏土矿物含量的变化^[25-27]。本研究基于 CS-230 碳硫分析仪,通过有机碳燃烧法对未遭受火灾区域和遭受火灾区域不同位置的土样进行了总有机碳(TOC)的测定;基于 X 射线衍射分析(XRD)技术对土样的黏土矿物含量进行了测试分析,每个区域测试 3 个土样并取数据均值,所分析黏土矿物种类包括高岭石(Kao)、伊利石/蛭石混层、蛭石(V)和伊利石(It)。

1.3.2 土壤力学特性研究

为研究火灾过程对土壤力学特性的影响,分别对未遭受火灾区域土样和遭受火灾区域土样进行了直接剪切试验研究。取样地的原状土含有大量大于 5 mm 的较大粗砾粒,给试验制样带来了一定困难,并且在实验室样品尺度(直剪样品厚度 20 mm)下,会带来显著的样品差异性。因此,本文选取了筛分过后的重塑土,参考研究区土壤的物理性质,通过干密度测定和击实条件控制,配制试验土样含水率为 19%,干密度为 1.4 g·cm⁻³,试验设置平行试样 3 组。试验中选取法向应力为 50、100、150、200 kPa。试验通过 ZJ 型应变控制式直剪仪配合数字采集系统进行,试验过程中全程记录剪切位移、应力环读数等数据。试验中设置剪切速率为 0.8 mm·min⁻¹,设置剪切试验机上部剪切盒剪切位移为 8 mm,数据采集系统每间隔 1 s 记录一次数据。

2 结果分析

2.1 火灾前后土壤组分变化

2.1.1 土壤总有机碳(TOC)变化特征

通过表 2 发现:火灾导致四川省西昌市遭受火灾区域土壤中总有机碳大幅减少,遭受火灾区域土样较未遭受火灾区域土样有机质含量减少 41.58%。这在一定程度上反映了火灾的严重程度,火灾造成土壤大部分有机质、根系、原生动物和微生物等烧毁或死亡。细小的根系与土壤接触面积大,是土壤有机质的主要碳源。火灾发生后土壤有机质含量的大幅减少导致植物根系开始腐烂,微生物群落加速分解^[28],这会导致土壤团粒结构稳定性降低,无机土壤裸露,再经雨水冲刷,土壤团粒结构容易解体。

表 2 土样中总有机碳

Table 2 Total Organic Carbon of Soil Samples

土样类别	总有机碳/%
未遭受火灾区域土样	2.020
遭受火灾区域土样	1.182

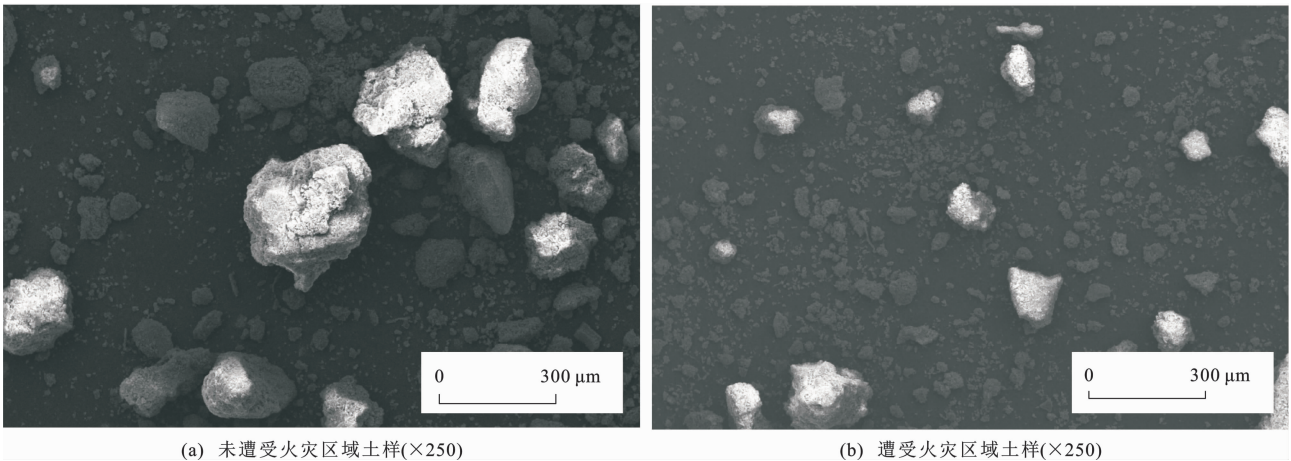


图 4 土样电镜照片
Fig. 4 SEM Photos of Samples

2.1.2 土壤黏土矿物含量变化特征

X 射线衍射分析结果如图 5 所示。火灾过程后高岭石矿物相对含量减少了 10%，伊利石/蛭石混层相对含量增加了 1%，蛭石矿物相对含量增加了 29%，伊利石矿物相对含量减少了 20%。其中，伊利石($\text{KAl}_2[(\text{Al},\text{Si})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$)生长在低温低压环境；蛭石($(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_3[(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)具有多级层状结构，受热高膨胀性是其独特的特性。火灾过程对土样中这两种黏土矿物含量影响最大。黏土矿物特别是表生黏土矿物含量的显著变化，是由于在高温作用下，黏土矿物层间交换反应、失水改性等活动的进行。火灾发生后土壤组分含量显著变化，这也会影响土体特殊的物理、水理及力学特性，进而对土体结构和稳定性具有重要的影响^[29]，导致土体宏观力学性质的改变^[30-31]。

2.2 火灾前后土样力学强度变化

未遭受火灾区域土样和遭受火灾区域土样剪切过程中剪切应力-剪切位移曲线如图 6 所示。根据直接剪切试验结果，绘制得到土样强度包络线如图 7 所示。

根据 DT-92-2 版中华人民共和国地质矿产部土工试验规程^[22]，以剪切应力与剪切位移关系曲线的峰值作为抗剪强度的取值，若无明显峰值，则取剪切位移等于 4 mm 对应的剪应力作为抗剪强度。由图 6 可以看出，在不同的法向应力条件下，遭受火灾区域土样比未遭受火灾区域土样抗剪强度均明显降低。计算得到未遭受火灾区域土样黏聚力 c 值为 12.568 kPa，内摩擦角 ϕ 值为 10.642°；遭受火灾区域土样黏聚力 c 值为 8.078 kPa，内摩擦角 ϕ 值为 9.375°。火灾发生后土样黏聚力 c 值、内摩擦角 ϕ

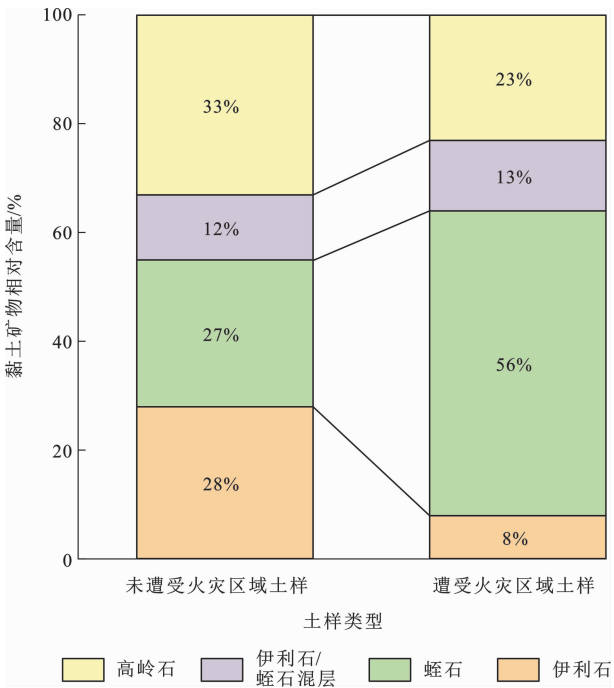


图 5 黏土矿物相对含量变化
Fig. 5 Changes of Relative Contents of Clay Minerals
值均减小。土壤强度的衰减不利于岩土体的稳定。

土样黏聚力主要与含水率、颗粒之间的引力作用、胶结作用等有关，内摩擦角主要与颗粒大小、结构、形状和密实度相关^[32]。在相同的干密度和含水率条件下，黏聚力 c 值、内摩擦角 ϕ 值减小的原因是火灾发生后，土壤颗粒之间的作用、粒径、黏土矿物等基本性质的改变影响了其力学性质。

2.3 火灾前后强度衰减机制

参考火灾前后土壤组分变化特征测试结果，火灾发生后土壤中蛭石矿物相对含量为 56%，成为主流黏土矿物，且蛭石矿物高温膨胀后体密度减小，可能会导致土体力学性质发生改变。为研究蛭石矿物

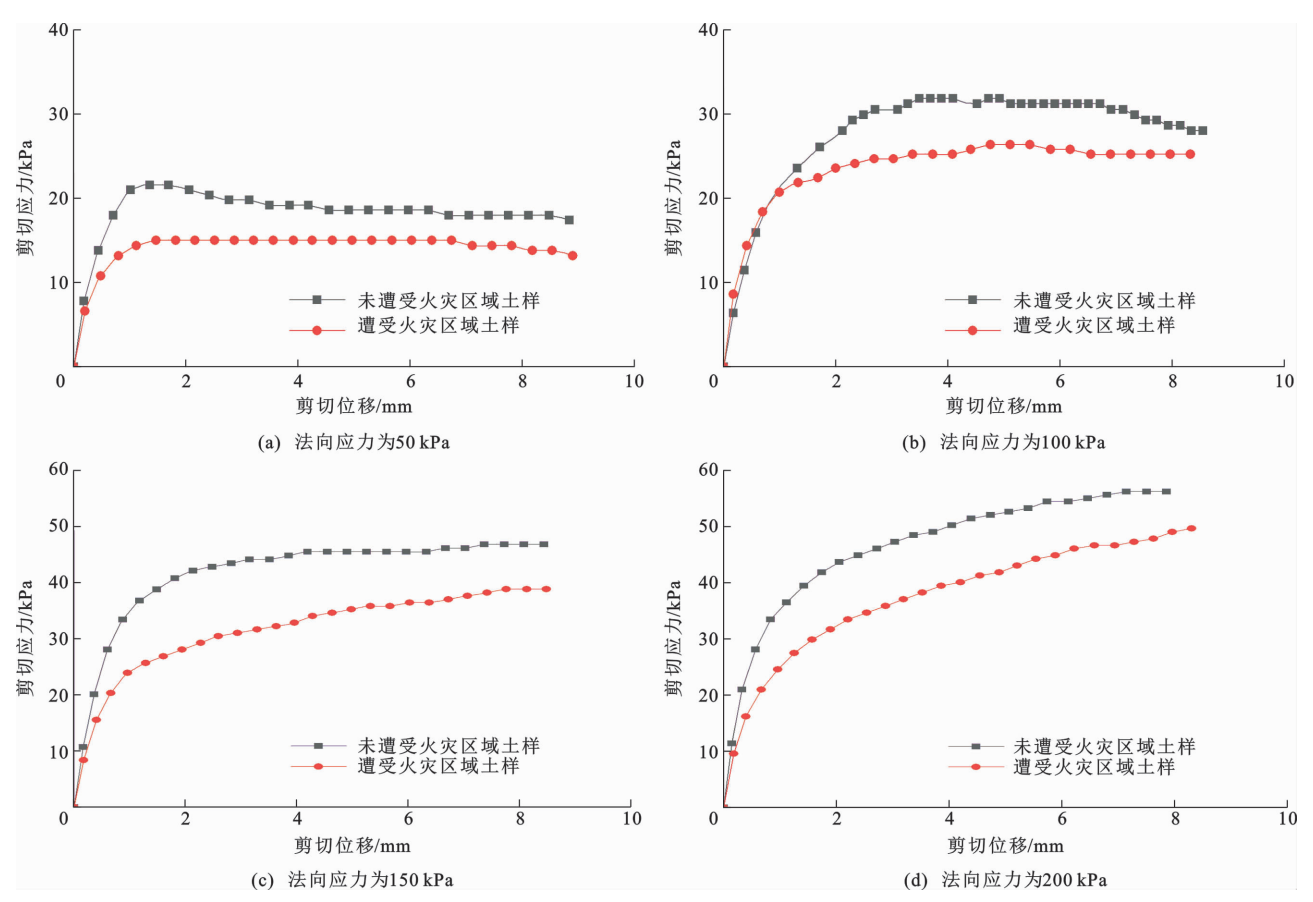
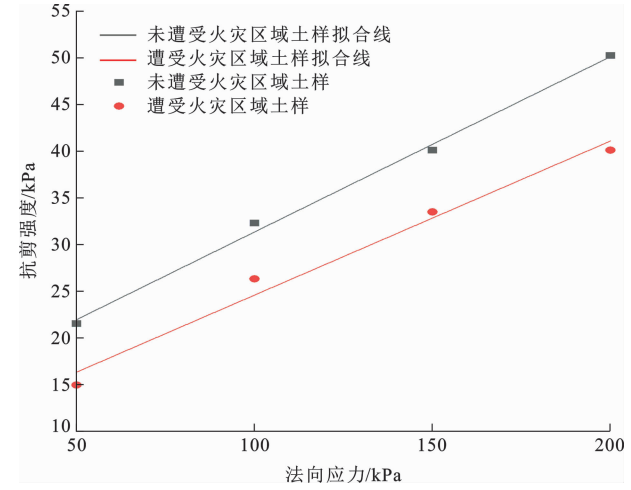


图 6 火烧迹地两种土样剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 6 Shear Stress-shear Displacement Curves of Two Kinds of Soil Samples in Burned Area



相对含量的显著增多对土壤力学特性的影响,在未遭受火灾区域土样中掺入不同含量高温处理过的蛭石矿物,设计配置了蛭石矿物相对含量为 0%、1%、5%和 10%的混合土样,通过直接剪切试验对土样的抗剪强度进行了研究。实验条件与第 2.1 节保持一致。不同蛭石矿物掺入比的混合土体剪切应力-剪切位移关系曲线如图 8 所示。

根据图 8 混合土体剪切应力-剪切位移关系曲线可知:相同的法向应力条件下,随着蛭石矿物掺入比的增加,混合土体的抗剪强度明显降低;在剪切过程中,蛭石矿物掺入比高的混合土体应变软化现象更为明显,尤其是在 50、100 kPa 的低法向应力状态下,随着剪切应变的持续增大,蛭石矿物掺入比带来的剪切应力差距更大。如图 8(c)所示,随着法向应力持续增加,蛭石矿物混合土体在剪切过程中的应变软化现象变得不明显,但在剪切位移达到 5 mm 后的局部剪切阶段,蛭石矿物掺入比高的混合土体仍然会出现应力衰减现象。土体在局部剪切阶段的剪切应力对土体承载能力的影响同样重要^[32],是滑坡稳定性评价中的核心问题之一^[33-34]。应变软化现象容易导致雨后土质边坡的失稳滑动。

参考第 2.1 节,火灾对土壤中蛭石矿物的含量变化影响最为明显。火灾发生后,蛭石矿物相对含量高达 56%,且蛭石结构中含有可膨胀的层间域;在高温环境下,蛭石体积会发生膨胀转化为膨胀蛭石,体积可膨胀 10~30 倍^[35]。通过光学显微镜观察(图 9),蛭石矿物的膨胀机理主要是层间水分子受热汽化,体积变大,层间水是影响蛭石膨胀的主要

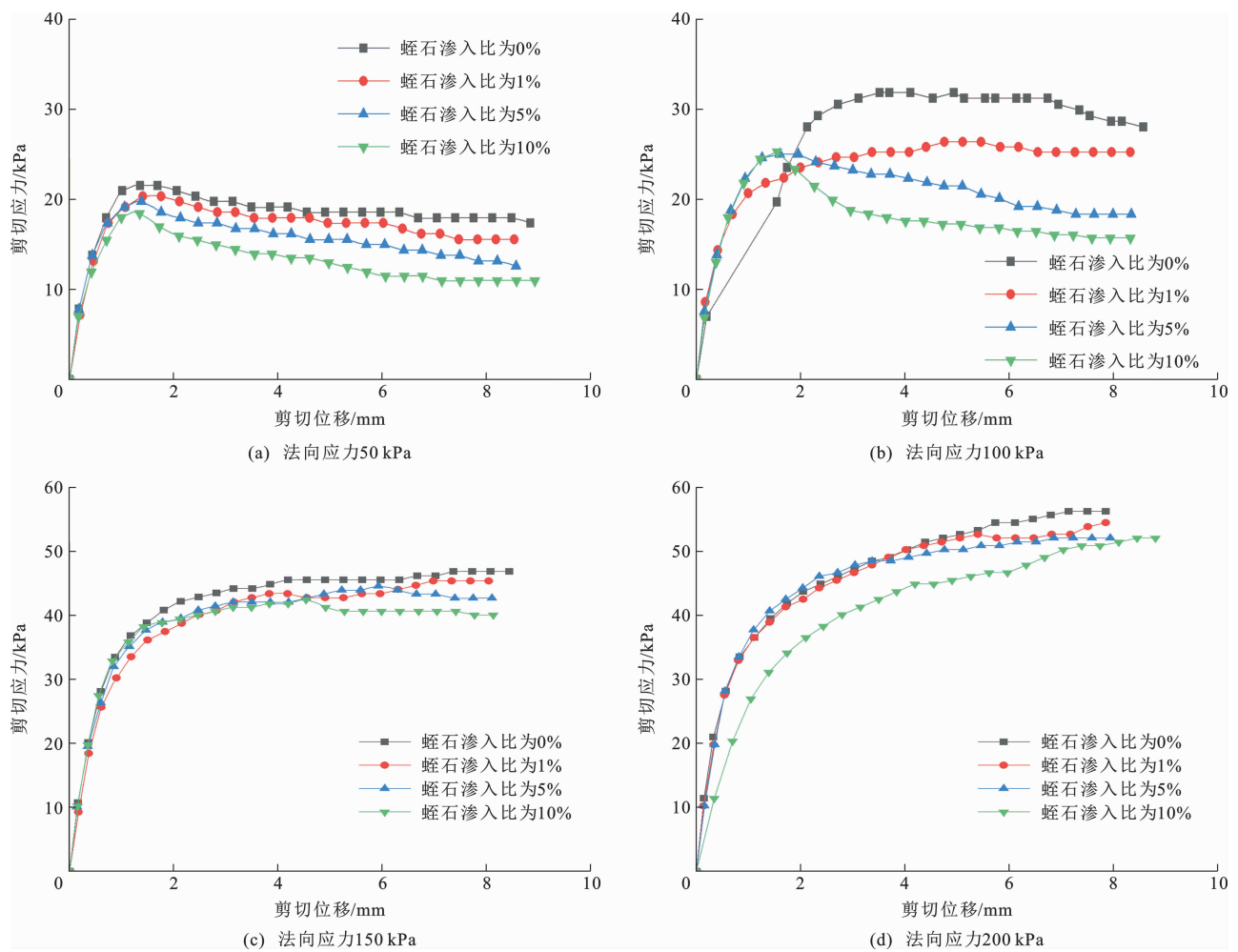


图 8 混合土体剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 8 Shear Stress-shear Displacement Curves of Mixed Soil

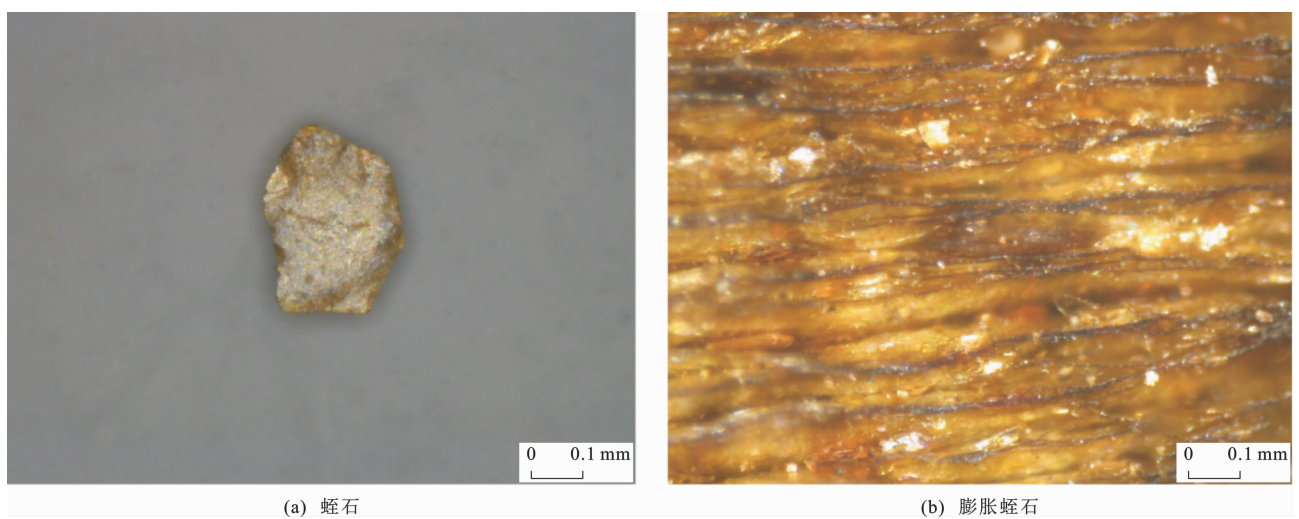


图 9 蛭石矿物微观图像

Fig. 9 Microscopic Images of Vermiculite

因素^[36]。Robichaud 等研究发现火烧迹地表面燃烧后矿物土壤上方的吸收和储水能力大大降低(海绵效应),火灾发生后膨胀蛭石含量的显著增加会导致

土体中水分分布不均匀^[37]。且由于火灾的高温环境导致蛭石矿物体积膨胀,体密度减小,不利于土壤颗粒间的连接和胶结作用,故火灾发生后土体强度

衰减和应变软化很大程度上是土壤中膨胀蛭石含量的增高造成的。黏土矿物颗粒及结构的变化会导致土体的物理力学及工程特性发生改变^[29]。不同蛭石矿物掺入的设计试验结果表明:火灾发生后蛭石矿物含量增高,体积膨胀,体密度减小,对火烧迹地土壤力学强度的衰减具有一定影响。

MacDonald 等指出随着时间的推移,火烧迹地植被和土壤功能逐渐恢复^[38]。火灾发生一年后,火烧迹地土壤物理特性无统计上的显著差异,火烧迹地灾害规模及频次明显降低^[39]。这方面研究尚显不足,后续可对火灾发生后火烧迹地土壤的恢复能力开展研究。

3 结 语

本文对四川省西昌市一处火烧迹地的土样进行了土壤有机质含量、粒径级配和黏土矿物含量等基本物理特性的测试分析,研究了不同土样的抗剪强度参数差异,并设计研究了不同蛭石矿物含量土样的力学特性。

(1)火灾过程改变了土壤的有机质含量和粒径级配,由于植物根系、微生物等的烧毁和死亡,土壤有机质含量减少,无机土壤裸露,土壤团聚体结构性遭受破坏,更易解体溃散;火灾发生前后土壤黏粒含量增加,会阻塞土壤表层的孔隙,使得火烧迹地土壤表层容易板结。

(2)火灾的高温环境导致土壤中黏土矿物含量大幅改变。高岭石、伊利石矿物含量的降低会抑制土壤成孔效应,改变孔隙状态;蛭石矿物含量增加超一倍,且体积发生膨胀,使得火烧迹地表层土体密度减小,降低了土壤的持水能力。

(3)火灾发生后抗剪强度衰减明显,黏聚力、内摩擦角土体力学强度参数显著减小。掺入不同含量蛭石矿物混合土样的剪切应力-剪切位移关系曲线显示:蛭石矿物含量高的土样抗剪强度明显衰减,在剪切过程中应变软化现象更为明显。在集中降雨环境下,火烧迹地的泥石流、滑坡等地质灾害的发育风险显著上升。

参 考 文 献 :

References :

[1] 杨 伟,姜晓丽.森林火灾火烧迹地遥感信息提取及应用[J].林业科学,2018,54(5):135-142.
YANG Wei,JIANG Xiao-li. Review on Remote Sensing Information Extraction and Application of the Burned Forest Areas[J]. Scientia Silvae Sinicae,2018,

54(5):135-142.

- [2] CERTINI G. Effects of Fire on Properties of Forest Soils: A Review [J]. *Oecologia*,2005,143(1):1-10.
- [3] DUMONTET S,DINEL H,SCOPA A,et al. Post-fire Soil Microbial Biomass and Nutrient Content of a Pine Forest Soil from a Dunal Mediterranean Environment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,1996,28(10/11):1467-1475.
- [4] IMESON A C,VERSTRATEN J M,MULLIGEN E V,et al. The Effects of Fire and Water Repellency on Infiltration and Runoff Under Mediterranean Type Forest[J]. *Catena*,1992,19(3/4):345-361.
- [5] 于振江,胡卸文,曹希超.火烧迹地土壤斥水特性研究及其对火后泥石流诱发机理[J].地质灾害与环境保护,2020,31(2):93-99.
YU Zhen-jiang,HU Xie-wen,CAO Xi-chao. Research on the Soil Water Repellency in Burned Area and Its Inducing Effect on Debris Post-fire Debris Flow[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*,2020,31(2):93-99.
- [6] VEGA J A,FERNÁNDEZ C,FONTURBEL T. Thoroughfall,Runoff and Soil Erosion After Prescribed Burning in Gorse Shrubland in Galicia (NW Spain) [J]. *Land Degradation and Development*,2005,16(1):37-51.
- [7] 王 丽,千葉喬三.山地林火烧迹地水土流失动态变化的研究[J].水土保持研究,2007,14(6):44-47.
WANG Li,KCHIBA. Research on the Dynamic Analysis of Water and Soil Losses in the Burned Area of Forest Field[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2007,14(6):44-47.
- [8] 胡卸文,王 严,杨 瀛.火后泥石流成灾特点及研究现状[J].工程地质学报,2018,26(6):1562-1573.
HU Xie-wen,WANG Yan,YANG Ying. Research Actuality and Evolution Mechanism of Post-fire Debris Flow[J]. *Journal of Engineering Geology*,2018,26(6):1562-1573.
- [9] 余哲修,何 超,李昔纯,等.基于归一化燃烧率火烧迹地遥感提取识别规则研究[J].西北林学院学报,2018,33(1):216-224.
YU Zhe-xiu,HE Chao,LI Xi-chun,et al. Extraction and Recognition of Burned Area Based on Normalized Burn Ratio by Remote Sensing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2018,33(1):216-224.
- [10] GODEFROID S,RUCQUOIJ S,KOEDAM N. Spatial Variability of Summer Microclimates and Plant Species Response Along Transects Within Clearcuts in a Beech Forest[J]. *Plant Ecology*,2006,185:107-121.

- [11] MORALES H A, NÁVAR J, DOMÍNGUEZ P A. The Effect of Prescribed Burning on Surface Runoff in a Pine Forest Stand of Chihuahua, Mexico[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 137 (1/2/3): 199-207.
- [12] 刘发林, 陈小伟, 曾素平, 等. 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1846-1852.
LIU Fa-lin, CHEN Xiao-wei, ZENG Su-ping, et al. Progress of the Effects of Fire Disturbance on Forest Soil Water Repellency [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1846-1852.
- [13] OH C H, NAM D H, SIK K B. Assessment of the Effects of Forest Fires on Flood and Debris Flow in Gangwon-province [J]. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 2019, 19(6): 75-86.
- [14] 任 云, 胡卸文, 王 严, 等. 四川省九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 150-156.
REN Yun, HU Xie-wen, WANG Yan, et al. Disaster Mechanism of the Sejiao Post-fire Debris Flow in Jiulong County of Sichuan[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, 45(6): 150-156.
- [15] 陈中学, 汪 稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2197-2201.
CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of Content of Clay Particles for Debris Flow Occurrence in Jiangjia Ravine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2197-2201.
- [16] COOK G D, SO H B, DALAL R C. Structural Degradation of Two Vertisols Under Continuous Cultivation[J]. *Soil and Tillage Research*, 1992, 24(1): 47-64.
- [17] LAN H X, ZHOU C H, WANG L J, et al. Landslide Hazard Spatial Analysis and Prediction Using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan, China[J]. *Engineering Geology*, 2004, 76(1/2): 109-128.
- [18] 兰恒星, 王苓涓, 周成虎. 云南小江流域滑坡关键影响因素研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(1): 103-109.
LAN Heng-xing, WANG Ling-juan, ZHOU Cheng-hu. Study on the Key Landslide Factor by Means of CIS in Xiaojiang Valley, Yunnan[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(1): 103-109.
- [19] 兰恒星, 周成虎, 高 星, 等. 四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(4): 499-504.
LAN Heng-xing, ZHOU Cheng-hu, GAO Xing, et al. Secondary Geological Hazard Assessment and Hazard Mitigation Countermeasures in Lushan, Ya'an Earthquake, Sichuan Province[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(4): 499-504.
- [20] 兰恒星, 仇义星, 伍宇明. 岩体结构效应与长远程滑坡动力学[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1): 108-122.
LAN Heng-xing, ZHANG Yi-xing, WU Yu-ming. Effect of Rock Mass Structure on the Dynamics of Long-runout Landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 108-122.
- [21] 何 斌, 袁 霞, 刘运华, 等. 马尾松采伐迹地炼山前后土壤养分变化的研究[J]. *广西农业生物科学*, 2002, 21(3): 216-218.
HE Bin, YUAN Xia, LIU Yun-hua, et al. Studies on the Change of Soil Nutrient Before and After Controlled Burning All Cutting Woodland of Pinus Massoniana Plantation[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2002, 21(3): 216-218.
- [22] 地质矿产部水文地质专业测试中心. 中华人民共和国地质矿产部土工试验规程 DT-92-2 版[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
Hydrogeology Professional Testing Center of Ministry of Geology and Mineral Resources. Code for Geotechnical Test of Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China DT-92-2 Edition [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [23] 孙银磊, 汤连生, 刘 洁. 非饱和土微观结构与粒间吸力的研究进展[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1095-1122.
SUN Yin-lei, TANG Lian-sheng, LIU Jie. Advances in Research on Microstructure and Intergranular Suction of Unsaturated Soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1095-1122.
- [24] 兰恒星, 陈俊辉, 伍宇明. 三轴压缩试验前后含气页岩微纳尺度裂隙空间分布特征研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 24-35.
LAN Heng-xing, CHEN Jun-hui, WU Yu-ming. Spatial Characterization of Micro- and Nanoscale Microcracks in Gas Shale Before and After Triaxial Compression Test[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 24-35.
- [25] 胡慧蓉, 马焕成, 罗承德, 等. 森林土壤有机碳分组及其测定方法[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 1018-1024.
HU Hui-rong, MA Huan-cheng, LUO Cheng-de, et al. Forest Soil Organic Carbon Fraction and Its Measure

- Methods[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(4): 1018-1024.
- [26] 胡海清,魏书精,金 森,等. 森林火灾碳排放计量模型研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1423-1434.
- HU Hai-qing, WEI Shu-jing, JIN Sen, et al. Measurement Model of Carbon Emission from Forest Fire: A Review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1423-1434.
- [27] 钱 达,张 虎,何 龙. 火灾区域林地植被变化分析:以大兴安岭和黄石公园地区为例[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2019, 39(3): 60-68.
- QIAN Da, ZHANG Hu, HE Long. Vegetation Changes in Conflagration Area: Case Study of Da Hinggan Mountains and Yellowstone National Park Burned Area[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2019, 39(3): 60-68.
- [28] VERGANI C, SCHWARZ M, SOLDATI M, et al. Root Reinforcement Dynamics in Subalpine Spruce Forests Following Timber Harvest: A Case Study in Canton Schwyz, Switzerland[J]. Catena, 2016, 143: 275-288.
- [29] 徐则民,黄润秋,唐正光,等. 黏土矿物与斜坡失稳[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 729-740.
- XU Ze-min, HUANG Run-qiu, TANG Zheng-guang, et al. Clay Minerals and Failure of Slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 729-740.
- [30] 李洁祥,郭清海,余正艳. 高温地热系统中黏土矿物形成对 Na-K 和 K-Mg 地球化学温标准确性的影响[J]. 地球科学, 2017, 42(1): 142-154.
- LI Jie-xiang, GUO Qing-hai, YU Zheng-yan. Impact of Clay Mineral Formation in High-temperature Geothermal System on Accuracy of Na-K and K-Mg Geothermometers[J]. Earth Science, 2017, 42(1): 142-154.
- [31] 于 鑫,李 皋,陈 泽,等. 川西须家河组致密砂岩高温后的物理力学特征参数试验研究[J]. 地质力学学报, 2021, 27(1): 1-9.
- YU Xin, LI Gao, CHEN Ze, et al. Experimental Study on Physical and Mechanical Characteristics of Tight Sandstones in the Xujiahe Formation in Western Sichuan After High-temperature Exposure[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 1-9.
- [32] 邓华锋,原先凡,李建林,等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 4065-4072.
- DENG Hua-feng, YUAN Xian-fan, LI Jian-lin, et al. Research on Failure Characteristics and Determination Method for Shear Strength of Earth-rock Aggregate in Direct Shear Tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 4065-4072.
- [33] SKEMPTON A W. Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory[J]. Géotechnique, 1985, 35(1): 3-18.
- [34] KAYA A, KWONG J K P. Evaluation of Common Practice Empirical Procedures for Residual Friction Angle of Soils: Hawaiian Amorphous Material Rich Colluvial Soil Case Study[J]. Engineering Geology, 2007, 92(1/2): 49-58.
- [35] 田维亮,葛振红. 蛭石功能材料研究进展[J]. 精细化工, 2019, 36(4): 541-548.
- TIAN Wei-liang, GE Zhen-hong. Research Progress on Functional Materials of Vermiculite [J]. Fine Chemicals, 2019, 36(4): 541-548.
- [36] YANG W, ZHENG Y, ZAOUI A. Swelling and Diffusion Behaviour of Na-vermiculite at Different Hydrated States[J]. Solid State Ionics, 2015, 282: 13-17.
- [37] ROBICHAUD P R, LEWIS S A, ASHMUM L E. New Procedure for Sampling Infiltration to Assess Post-fire Soil Water Repellency[R]. Fort Collins: USDA, 2008.
- [38] MACDONALD L H, HUFFMAN E L. Post-fire Soil Water Repellency: Persistence and Soil Moisture Thresholds[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1729-1734.
- [39] MCGUIRE L A, RENGERS F K, OAKLEY N, et al. Time Since Burning and Rainfall Characteristics Impact Post-fire Debris-flow Initiation and Magnitude[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2021, 27(1): 43-56.