

火烧迹地土壤团聚体稳定性原位快速测定方法

周永豪, 胡卸文, 金涛, 段雯超, 龚学强, 席传杰, 曹希超

An in-situ method for assessing soil aggregate stability in burned landscapes

ZHOU Yonghao, HU Xiewen, JIN Tao, DUAN Wenchao, GONG Xueqiang, XI Chuanjie, and CAO Xichao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province

张绍科, 胡卸文, 王严, 金涛, 杨瀛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 79-85

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County

殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61-69

基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16

山东黄河北矿区土壤盐渍化特征分析

Soil salinization characteristics in Huanghebei mining area

郝启勇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 65-69

基于主成分层次聚类模型的采空塌陷场地稳定性评价

Goaf-collapse sites stability evaluation based on principal component hierarchical clustering model

郭松, 郭广礼, 李怀展, 杨向升 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 116-121



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209022

周永豪, 胡卸文, 金涛, 等. 火烧迹地土壤团聚体稳定性原位快速测定方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 97-104.

ZHOU Yonghao, HU Xiewen, JIN Tao, et al. An in-situ method for assessing soil aggregate stability in burned landscapes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 97-104.

火烧迹地土壤团聚体稳定性原位快速测定方法

周永豪, 胡卸文, 金涛, 段雯超, 龚学强, 席传杰, 曹希超
(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756)

摘要: 森林火灾后因火烧迹地土壤斥水性, 导致坡面径流和土壤可蚀性增强, 提高了火后泥石流易发性, 而土壤团聚体稳定性是影响土壤入渗能力和侵蚀敏感性的关键指标。目前常用于火烧迹地土壤团聚体稳定性测定的水滴冲击测定方法 (counting the number of water drop impacts, CND), 不适用于原位测定且耗时较长 (滴定一组团聚体需要数小时)。因此文章提出一种基于冲击振荡破坏效应的团聚体稳定性测定方法 (shock and vibration damage method, SVD)。充分考虑容重、有机质含量和斥水性对土壤团聚体稳定性的影响, 通过室内火烧模拟试验, 制备了 13 种类型的土壤团聚体。采用自制的试验仪器进行 SVD 法正交试验测定土壤团聚体质量损失率, 并与传统 CND 法测得的破坏团聚体的水滴数量进行对比。结果表明: SVD 法的测定 MT-6 方案 (冲击高度 1 m、容器含水量 40%、冲击 5 次、测定团聚体 20 颗) 与 CND 法的测定结果具有很强的一致性 (Kendall 系数=0.797) 和相关性 ($R^2=0.634$), 测定时间较短 (测定一组团聚体约 5 min), 且测定结果区分度较好 (约 62% 的团聚体 MLR 位于区分度良好的 40%~60% 区间), 将其作为 SVD 法的最优测定方案。此外, SVD 法试验装置结构简单、便携易拆卸, 可用于原位快速且定量地区分火烧迹地不同火烈度下土壤团聚体稳定性水平, 对火烧迹地土壤侵蚀、水土流失治理以及火后泥石流起动机理研究具有重要指导意义。

关键词: 土壤团聚体稳定性; 火烧迹地; 质量损失率; 冲击振荡破坏; 火后泥石流

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)06-0097-08

An in-situ method for assessing soil aggregate stability in burned landscapes

ZHOU Yonghao, HU Xiewen, JIN Tao, DUAN Wenchao, GONG Xueqiang, XI Chuanjie, CAO Xichao
(Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: Due to soil repellency in burned areas, slope runoff and soil erodibility escalates following forest fires, increasing the vulnerability to post-fire debris flows. Soil aggregate stability is a critical determinant of soil infiltration capacity and erosion susceptibility. The prevalent method of assessing soil aggregate stability in burned areas, the counting the number of water drop impacts (CND) method, is time-intensive and impractical for in-situ measurements. In response, this study introduces a novel technique based on the shock and vibration damage (SVD) effect for evaluating soil aggregate stability in burned areas. Thirteen distinct soil aggregate types were meticulously prepared for indoor simulated fire testing, with due consideration to factors such as bulk weight, organic matter content, and water repellency, which influence stability of soil aggregates. Employing a custom-built test apparatus, the mass loss rate (MLR) of soil aggregates was determined through orthogonal experiments using the SVD method and compared against the standard CND technique's quantification of water droplet-induced aggregate destruction. The

收稿日期: 2022-09-16; 修订日期: 2022-11-29

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42377170)

第一作者: 周永豪 (1997-), 男, 重庆涪陵人, 博士研究生, 主要从事地质灾害研究工作。E-mail: zhouyonghao@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 金涛 (1993-), 男, 四川广安人, 博士研究生, 主要从事工程地质方面的研究工作。E-mail: jintao@my.swjtu.edu.cn

findings demonstrated that SVD method, employing Test Scheme 6 (testing 20 aggregates, 1-meter impact height, 40% water content, and five impacts), exhibits excellent agreement (Kendall coefficient = 0.797) and correlation ($R^2 = 0.634$) with CND method outcomes. This testing scheme, characterized by rapid determination and effective discrimination, is identified as the optimal testing approach. The SVD testing apparatus is straightforward, portable, and easily disassembled, rendering it suitable for on-site use. It can be used to distinguish the stability level of soil aggregates swiftly and quantitatively under various fire intensities in burned areas in situ, which is an important guiding significance for the study of soil erosion, erosion control, and post-fire debris flow initiation mechanism in burned areas.

Keywords: soil aggregates stability; burned area; mass loss rate; shock and vibration damage; post-fire debris flows

0 引言

近年来,川西南山区森林火灾频发,森林大火不仅造成生态系统破坏,还增大了火烧迹地暴发火后泥石流的可能性^[1]。林火可以通过影响土壤斥水性、团聚体稳定性或有机质含量改变土壤的坡面径流和侵蚀响应^[2],尤其是通过清除保护性植被和枯枝落叶层,使团聚体稳定性成为火灾后影响土壤入渗能力和侵蚀敏感性的关键因素^[3]。早期研究发现,火烈度会显著改变土壤团聚体稳定性^[4-5]。在轻—中度火烧区土壤会产生或增强斥水性,斥水性降低了水和土壤团聚体或颗粒之间的吸引力,并起到了“黏合剂”的作用,增强了团聚体稳定性^[6]。而重度火烧区,以有机质为主要稳定剂的土壤极易因高温而发生降解,导致团聚体失稳^[7],土壤保水能力降低,地表径流量增加,从而诱发火后泥石流^[8]。因此合理的土壤团聚体稳定性测定方法对确定火烧迹地土壤稳定性,指导森林火灾后山坡土壤侵蚀、水土流失治理以及火后泥石流起动机理研究具有重要的意义^[3,7]。

测试土壤团聚体稳定性的常规方法主要有固定水头水滴法、人工模拟降雨法、湿筛法、分散法、Emerson法、Le Bissonnais法^[9]、超声波测试法^[10]等,其测试原理大多是模拟团聚体的破坏模式:摇动、黏土分散、黏土膨胀和雨滴影响^[11-12]。固定水头水滴法、人工模拟降雨法等应用广泛但不适用于团聚体稳定性相对较强的土壤^[9,11-12]。超声波等测试方法克服了这一缺陷,但不适用于模拟田间土壤分散^[10,13]。大量学者采用水滴冲击试验(counting the number of water drop impacts, CND)来测定火烧迹地土壤团聚体稳定性^[2,4-5],其测定原理与传统水滴法相同,通过降雨模拟试验装置形成单个固定体积的液滴,撞击到单个土壤团聚体上以测定团聚体水稳性^[13];但该方法耗时较长,试验过程中水滴对准较困难,且不利于原位试验^[6,14]。

目前,针对有机质含量高、稳定性水平分布广泛的火烧迹地土壤团聚体,还没有既能适用于原位试验,又

能快速且定量评价其稳定性的测定方法。因此,本文针对火烧迹地土壤团聚体稳定性提出一种经济、高效且适用于原位试验的定量测定方法—基于冲击振荡破坏效应的团聚体稳定性测定方法(shock and vibration damage method, SVD)。通过室内火烧模拟试验制备了13种类型的土壤团聚体,采用自制的试验仪器分别进行SVD法正交试验和水滴冲击试验(CND法)。并通过分析SVD法与CND法测定结果的一致性及相关性,来验证SVD法的可信度和适用性。研究成果可为火烧迹地土壤团聚体稳定性测定提供一种适用于原位测试且高效便捷的新方法。

1 土壤团聚体稳定性测定方法

1.1 SVD法

针对有机质含量高、稳定性水平分布广泛的火烧迹地土壤团聚体,本文提出的基于冲击振荡破坏效应的团聚体稳定性测定方法(SVD法),是通过引入冲击振荡能,模拟火烧迹地土壤团聚体在坡面径流冲击振荡作用下受到的水分解、冲击和振荡崩解机制^[10,13],以确定团聚体的结构稳定性。参考水锤振荡器冲击力的计算原理^[15],结合动量定理得到冲击振荡能量的简易计算公式。其计算公式如下:

$$W = n \frac{F^2 h}{mg} \quad (1)$$

$$F = \rho v_{\max} c s \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \sqrt{1 + \frac{kd}{Ee}} \quad (3)$$

式中: W ——冲击振荡能/J;

n ——冲击次数;

F ——团聚体受到水的最大冲击力/N;

m ——容器和容器中水的总质量/kg;

h ——冲击高度/m;

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

- v_{\max} ——容器撞击底板时,容器中水的最大速度/
($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
- ρ ——容器中水的密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$;
- s ——容器底面面积/ m^2 ;
- c ——冲击时容器中水波传播速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$;
- k ——水的弹性模量/ Pa ;
- d ——塑料瓶直径/ mm ;
- E ——PET 塑料的弹性模量/ Pa ;
- e ——塑料瓶底板厚度/ mm 。

其试验装置如图 1(a)所示。装置主要分为三个部分:模拟冲击振荡效应的塑料瓶、控制塑料瓶运动路径的 PVC 管以及固定 PVC 管的支架见图 1(b)。出于便携考虑容器选用 550 mL 的 PET 塑料瓶。根据需要,设置 5 根不同长度的 PVC 管代表冲击高度即能量见图 1(c)。试验时,先缓慢湿润土壤团聚体,使其达到饱和含水量^[12],并测定其初始饱和质量 M_a 。其次,按图 1 所示装置进行试验:1)在塑料瓶中加入所需的水量;2)放入水饱和和团聚体;3)从 PVC 管顶端放入塑料瓶,使其自由落体。最后,将冲击振荡后的水和饱和团聚体过 2.8 mm 孔径的筛子^[16],测得直径 $>2.8 \text{ mm}$ 饱和团聚体质量 M_b ,计算团聚体质量损失率(MLR)如式(4)所示:

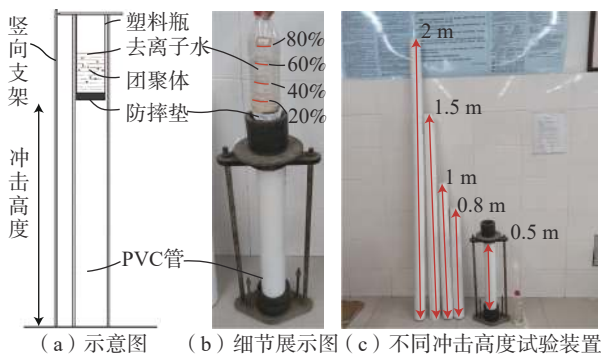


图 1 SVD 法测定装置

Fig. 1 Measurement setup for the SVD method

团聚体质量损失率(MLR)为

$$MLR = (M_a - M_b) / M_a \times 100\% \quad (4)$$

式中: MLR ——土壤团聚体的质量损失率;

M_a 、 M_b ——冲击振荡前饱和土壤团聚体重量和冲击振荡后饱和土壤团聚体重量/ g 。

该方法试验装置结构简单、便携易拆卸可用于原位快速且定量获取不同火烈度下火烧迹地土壤团聚体稳定性。

1.2 CND 法

水滴试验在 1944 年首先被 Mccalla 引入团聚体稳定性测定^[17]。后经 ABBAS 等^[18]不断改进,逐渐标准化。

本试验装置根据 JORDAN 研究的试验要求进行改装^[5],如图 2 所示。试验装置主要分为三个部分,控制水头高度和水滴大小的导水管、放置土壤团聚体的 2.8 mm 筛网和固定下落高度的支架。

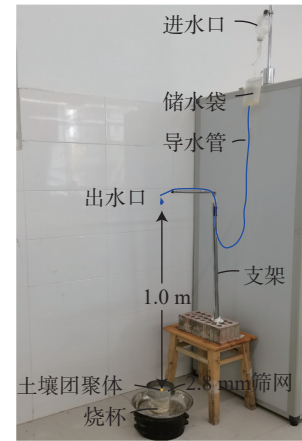


图 2 CND 法试验装置

Fig. 2 Experimental setup for the CND method

试验时,将缓慢湿润饱和后的土壤团聚体,进行水滴冲击试验(CND法)^[5]。把直径为 4~5 mm 的单一团聚体放在孔径为 2.8 mm 的筛网表面,使体积约 0.05 mL 的去离子水滴落在其上,下落高度为 1 m^[19],滴落速度为 1 滴/秒。记录破坏每一团聚体所需的滴数。每类团聚体测定了 20 个单独的团聚体,并选择平均破坏水滴数作为该类团聚体稳定性的指标。

2 试验设计

2.1 试验材料

本研究土壤样品取自四川省凉山彝族自治州冕宁县,该区属于亚热带季风气候,主要植被为云南松,岩性以千枚岩、泥页岩为主,土壤类型主要为壤质砂土^[20]。2019 年 4 月,冕宁县腊窝乡长脚村突发森林火灾,同年 7—8 月,位于火烧迹地的华岩子沟因夏季强降雨而暴发数次火后泥石流^[20]。本文在该火后泥石流灾害点松林下未火烧区选取土壤样品,用于室内模拟火烧试验。

采用直径 10 cm、高 10 cm 的环刀收集了 60 个原状土芯。将风干的土芯去除掉表面枯枝落叶和半分解层,按 0~2 cm、2~4 cm 和 4~6 cm,分层获取了直径为 4~5 mm 的土壤团聚体干筛样^[4]。充分考虑土壤斥水性^[6]、有机质含量和土壤容重^[2]对不同火烈度下团聚体稳定性的影响,通过室内模拟火烧试验^[6],制备了 13 种土壤团聚体,分别用于 SVD 法和 CND 法测试,如表 1 所示。其中,土壤初始有机质含量和容重分别由烧失量法^[21]和环刀法^[22]测定;土壤斥水性由水滴渗透

时间(water drop penetration times, WDPT)测试测定^[4]。 燃物的消耗程度校核,将火烧迹地分为重度火烧、中度研究区火烈度分区源自遥感解译并结合现场火烧后可 火烧、轻度火烧和未火烧区^[20]。

表 1 供试土壤主要物理化学性质
Table 1 Key physical and chemical properties of the studied soils

指标	高温亲水组			天然对照组			轻度斥水组			强烈-极端斥水组			
	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4	ST-5	ST-6	ST-7	ST-8	ST-9	ST-10	ST-11	ST-12	ST-13
温度/(°C)	600	600	600	常温	常温	常温	200	200	400	200	400	200	400
时间/min	120	120	120	\	\	\	5	60	5	30	5	60	5
深度/cm	0~2	2~4	4~6	0~2	2~4	4~6	0~2	2~4	4~6	0~2	2~4	0~2	0~2
斥水性	亲水	亲水	亲水	强烈斥水	轻度斥水	亲水	轻度斥水	轻度斥水	轻度斥水	强烈斥水	强烈斥水	严重斥水	极端斥水
干容重/(g·cm ⁻³)	0.95	1.04	1.16	0.95	1.04	1.16	0.95	1.04	1.16	0.95	1.04	0.95	0.95
初始有机质含量/%	14.0	9.48	6.93	14.0	9.48	6.93	14.0	9.48	6.93	14.0	9.48	14.0	14.0

注:亲水(WDPT≤5 s),轻度斥水(WDPT: 5~60 s),强烈斥水(WDPT: 60~600 s),严重斥水(WDPT: 600~3 600 s),极端斥水(WDPT:>3 600 s)^[23],ST-1~13代表团聚体类型编号。

2.2 SVD 法正交试验设计

为了确定 SVD 法试验各参数,本文借助 SPSS 22 软件通过正交试验设计选择部分最具有代表性的组合进行试验^[24],为了方便区分,后文用测试方案代替试验组合名称。如表 2 所示,本文中 SVD 法试验参数的

影响因素有容器容水量(A)、冲击高度(B)、冲击次数(C)和单次测定所需土壤团聚体颗数(D);每个因素考虑 5 个试验水平。SVD 法测试时,表 1 的 13 种团聚体,分别按表 2 的 25 种测试方案进行试验。

表 2 团聚体稳定性测定正交试验设计表
Table 2 Table for orthogonal test design for determining aggregation stability

测定方法编号	A/%	B/cm	C/次	D/颗	测定方法编号	A/%	B/cm	C/次	D/颗
MT-01	40	80	10	10	MT-14	80	100	1	10
MT-02	100	50	3	10	MT-15	20	100	10	25
MT-03	80	50	5	15	MT-16	20	50	1	5
MT-04	20	80	15	15	MT-17	60	80	5	5
MT-05	60	50	10	20	MT-18	100	200	5	25
MT-06	40	100	5	20	MT-19	20	150	5	10
MT-07	80	80	3	25	MT-20	60	200	15	10
MT-08	100	80	1	20	MT-21	40	200	1	15
MT-09	100	150	10	15	MT-22	80	200	10	5
MT-10	80	150	15	20	MT-23	100	100	15	5
MT-11	60	150	1	25	MT-24	20	200	3	20
MT-12	40	150	3	5	MT-25	60	100	3	15
MT-13	40	50	15	25					

注:影响因素A是容器容水量,B是冲击高度,C是冲击次数,D单次测定所需土壤团聚体颗数,MT-1~25代表SVD法试验方案。

2.3 数据处理

本文通过 SPSS 平台对 SVD 法的测试结果与 CND 法测试结果进行 Kendall 一致性检验^[25],判别 SVD 法测试结果的可信度。通过 Origin 22b 进行两种测试结果的相关性分析,利用质量管理统计软件 Minitab 进行 DOE 田口设计分析,确定 SVD 法最佳的试验方案。一致性检验时,由于质量损失率与团聚体稳定呈负相关,水滴数与团聚体稳定性呈正相关,因此为了保证两种测试方法结果趋势一致性,将水滴数取相反数,进而评价测试方法的正确性和适用性。

3 结果与讨论

3.1 SVD 法与 CND 法测定结果

如图 3 所示,根据式(1)~(3)所计算的冲击振荡能,将 SVD 法的 25 种测试方法分为三个组合,强冲击振荡能组(简称强能组)、中冲击振荡能组(简称中能组)、低冲击振荡能组(简称低能组)。中能组中,见图 3(b),0~2 cm 土壤层质量损失率随着土壤斥水性的增加而明显降低(P<0.05),平均质量损失率由亲水(ST-1)的 84%,降至极端斥水(ST-13)的 32%;2~4 cm 土壤

层从亲水(ST-2)的 71%, 降为强烈斥水(ST-10)的 51%; 4~6 cm 也表现出相同的趋势, 但差异不显著($P>0.05$)。同一斥水性下(如 ST-1~ST-3 所示), 质量损失率由 0~2 cm 土壤层的 83% 降为 4~6 cm 土壤层的 54%, 其他各斥水性下质量损失率也明显随深度的增加而降低($P<0.05$)。而在强能组和低能组中, 见图 3(a)和图 3(c), 各性质变化在统计学上均不显著, 只略微表现出了质量

损失率随土壤层深度和土壤斥水性增加而降低的趋势, 如低能组的高温亲水样(ST-1~ST-3), 质量损失率从 0~2 cm 土壤层的 59% 变为 4~6 cm 土壤层的 38% ($P<0.05$)。此外, SVD 法所有测试结果都表现出, 高温亲水组(ST-1~ST-3)因为高温烧毁了土壤的有机质组分, 破坏了土壤斥水性^[3], 与天然对照组(ST-4~ST-6)相比其团聚体稳定性更低($P<0.05$)。

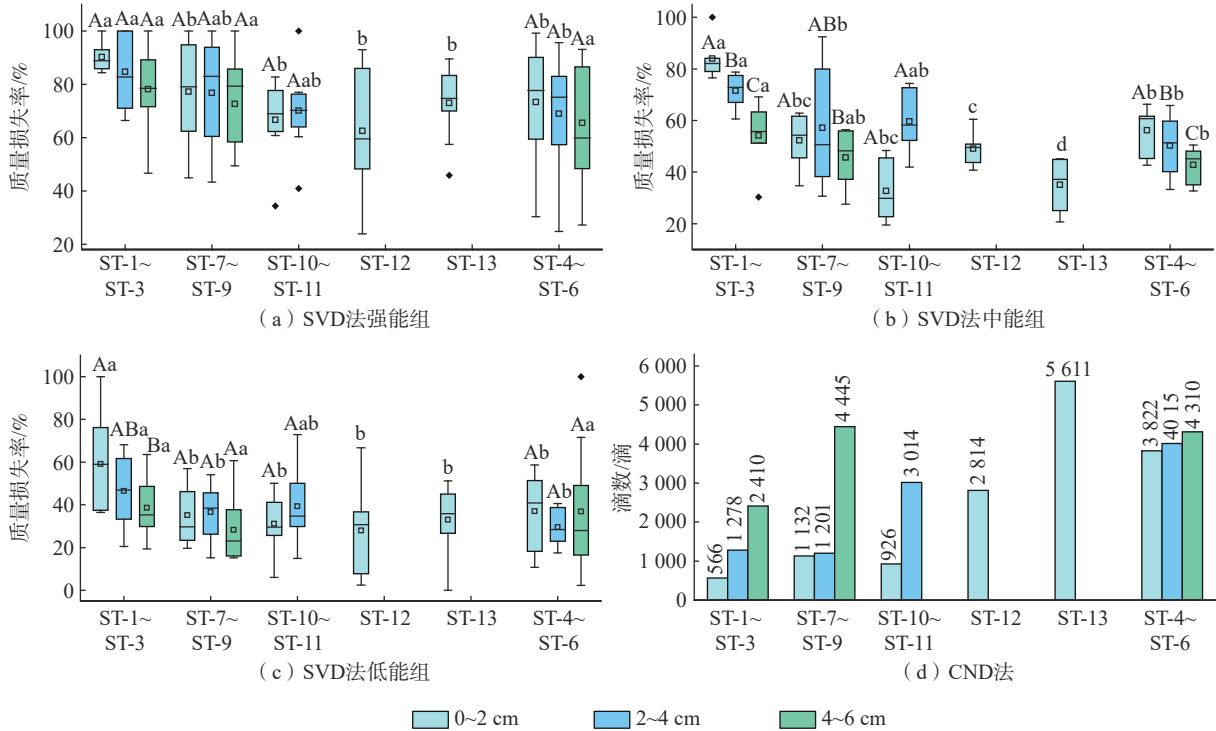


图 3 SVD 法与 CND 法测试结果

Fig. 3 Test results of the SVD method and CND method

注: ①(a)为强能组, 对应方案 MT-4、9、10、15、18、19、20、22、24; (b)为中能组, 对应方案 MT-1、6、12、13、21、23; (c)为低能组, 对应方案 MT-2、3、5、7、8、11、14、16、17、25。②高温亲水: ST-1~ST-3, 轻度斥水: ST-7~ST-9, 强烈斥水: ST-10~ST-11, 严重斥水: ST-12, 极端斥水: ST-13。③同一土壤层不同小写字母代表显著性差异($P<0.05$); 同一斥水性不同大写字母代表显著性差异($P<0.05$), 相同字母表示差异不显著, 误差条表示测量结果平均值的标准误差。

分析低能组和强能组统计规律不显著的原因可能有以下两点: (1)斥水性增强了土壤团聚体的稳定性和固碳能力^[26]。需要足够的冲击振荡能量才能破坏其团聚体稳定性, 而低能组能量不足, 导致结果差异性不显著。而强能组能量太高, 大部分团聚体不能在该能量区间下维持稳定性, 因此导致各类型土壤团聚体差异不显著。(2)正交试验本身相互独立, 并不是每一种试验方案都能合理表现出不同土壤团聚体稳定性的差异, 因此统计各方案的整体测试结果标准误差较大, 导致统计结果不显著。

CND 法的测定结果如图 3(d)所示: 在同一斥水性等级下, 土壤团聚体稳定性会随着土壤层深度的增加而增加。在同一深度土壤层下, 团聚体稳定性随着斥水性

的增加而增加, 且与天然对照组相比, 高温会显著破坏团聚体的稳定性。两种测定方法的结果具有相同的规律, 且与 ZAVALA 等的研究是相符的^[2, 4, 6, 14]。

3.2 SVD 法与 CND 法测定结果一致性检验

由于正交试验设计是选取最优试验组合的工具, 不是每一种方案都适用于火烧迹地土壤团聚体的稳定性测定^[23]。因此需要对两种测定方法的测定结果进行一致性分析, 判断 SVD 法测定方案的可信度。将 SVD 法正交试验结果与 CND 法测定结果进行 Kendall 一致性检验, 结果如表 4 所示。25 组正交试验方案组合中, 方案 6、方案 11 和方案 16 与 CND 法检验结果呈现出显著性(P 值分别为 0.041, 0.045, 0.037, 均 <0.05), 其他方

案不满足一致性要求($P>0.05$), 测试结果不具有可信度。然后将方案 MT-6、MT-11、MT-16 和 CND 法共同进行一致性分析, 如表 4 最后一行数据所示。四者检验结果呈现出显著性($P=0.000<0.05$), Kendall 协调系数值为 0.797, 该值接近 0.8, 意味着一致性水平很强; 说明选择 4 种测定方案之一用于火烧迹地土壤的团聚体稳定性测定, 其测定结果均具有一致性且可信。

3.3 最佳 SVD 法测定方案的确定

通过将三种 SVD 法测定方案与 CND 法的测定结

果进行函数拟合, 其结果用散点图进行展示见图 4(a)~(c)。结果表明, 三种方案都与 CND 法具有良好的函数拟合关系(MT-6、11、16 的决定系数 R^2 分别为 0.634 3、0.583 5 和 0.694 3)。虽然方案 16 与 CND 法测定结果拟合程度最高, 但如图 4(d)所示其质量损失率全部小于 40%, 而 MT-6 的质量损失率主要(61.5%)集中在 40%~60%, 该质量损失区间被认为可以最好地揭示不同地点或处理之间的差异, 即区分度最好^[19]。而方案 11 只有 15.4% 的结果位于该区间。

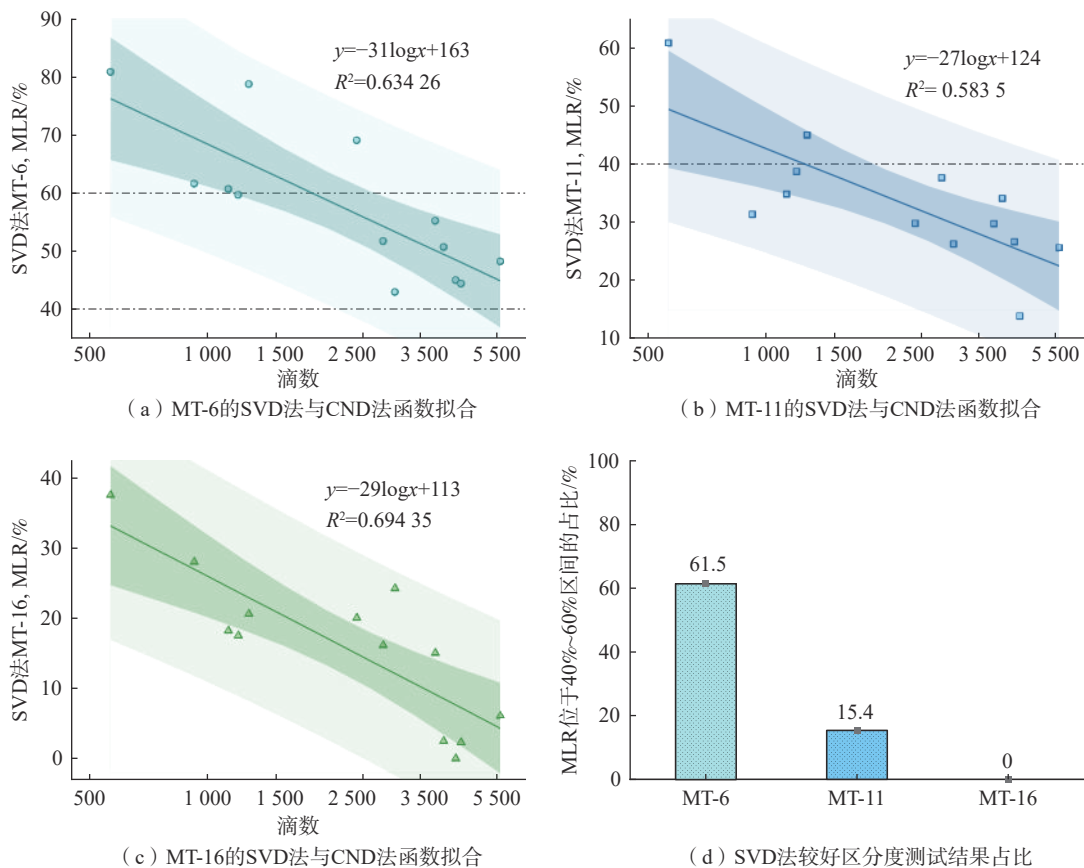


图 4 SVD 法与 CND 法函数拟合关系(b、c、d)及 SVD 法测试结果区分度分析(a)

Fig. 4 Relationship between SVD method and CND method function fitting (b, c, d) and discriminative analysis of discriminative analysis of (a)

注: 函数关系式中, y 代表 SVD 法所测质量损失率, x 代表 CND 法所测水滴数量。

由于本文中判别 SVD 法测试结果质量的评价指标之一是区分度(质量损失率位于 40%~60% 之间的占比), 取土壤类型 4(ST-4) 的所有 SVD 法测试结果与 50% 差值的绝对值, 作为 SVD 法质量损失率的反映值, 它反映的是所测结果与 50% 的距离, 其值越小, 证明区分度越好。将其与正交试验设计表(表 2)导入质量管理统计软件 Minitab, 通过 DOE 田口设计分析得到各试验参数的均值主效应图^[27], 如图 5 所示。从图上看, 容器容水量 40%、冲击高度 0.8 m、冲击 5 次、所需团聚

体 20 颗是最佳的试验参数。所有方案中, MT-6(容器容水量 40%、冲击高度 1 m、冲击 5 次、所需团聚体 20 颗)的试验参数与图 5 所得结果最相近, 而且 MT-6 也位于中能组, 能量输入合适。综上所述, 将 MT-6 作为 SVD 法的最优试验方案。

3.4 应用前景

本文提出的基于冲击振荡破坏效应的团聚体稳定性测定方法(SVD 法)可以很好适应火烧迹地土壤团聚体稳定性测定。不同团聚体类型的测定结果, 具有良好

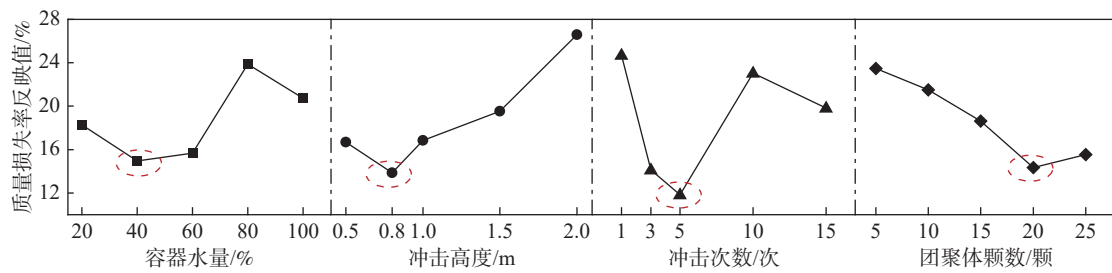


图5 SVD法各试验参数均值主效应图

Fig. 5 Main effects diagram of mean value of each test parameter for SVD method

的区分度,且与火烧迹地土壤团聚体稳定性的CND法测定结果相符。CND法针对火烧迹地团聚体稳定性的测定,所需时间较长(如表3所示,水滴数多上千,测定一组平均需要3h),而且测定时瞄准水滴困难和不确定性较大^[17]。与CND法相比,SVD法耗时短(只需冲击5次,测试一组的5min),且测定结果区分度较高。此外,SVD法试验装置结构简单,进行原位测定时,可通过多种方式(卷尺、皮尺、固定长度的铁杆等)确定冲击高度。利用塑料瓶,就可快速且定量地获取不同火烈度下土壤

团聚体稳定性。将SVD法作为火烧迹地土壤团聚体稳定性的测定方法,不仅可以满足火烧迹地土壤团聚体稳定性的原位测定需要,而且其测定结果区分度较好,可以为火烧迹地山坡土壤侵蚀、火后泥石流和水土流失治理等研究提供重要的参考依据。此外,由于火烧迹地土壤团聚体稳定性水平分布广泛,包含了稳定性极端弱与稳定性极端强的特殊情况,因此该方法适用于大多数地区的不同类型土壤。在接下来的研究中,我们会将本试验方法拓展到更多土壤类型团聚体稳定性的测试中。

表3 SVD法各方案与CND法的一致性检验结果

Table 3 Consistency test results between various schemes of the SVD method and the CND method

方案	Kendall系数	P	方案	Kendall系数	P	方案	Kendall系数	P	方案	Kendall系数	P
MT-1	0.827	0.071	MT-8	0.687	0.170	MT-15	0.791	0.089	MT-22	0.726	0.134
MT-2	0.299	0.845	MT-9	0.709	0.149	MT-16	0.918	0.037	MT-23	0.684	0.173
MT-3	0.495	0.456	MT-10	0.723	0.137	MT-17	0.581	0.304	MT-24	0.679	0.178
MT-4	0.654	0.206	MT-11	0.890	0.045	MT-18	0.874	0.051	MT-25	0.604	0.270
MT-5	0.761	0.108	MT-12	0.874	0.051	MT-19	0.659	0.199	MT-6、		
MT-6	0.904	0.041	MT-13	0.780	0.095	MT-20	0.815	0.076	MT-11、	0.797	0.000
MT-7	0.728	0.133	MT-14	0.659	0.199	MT-21	0.794	0.087	MT-16		

注:表中P为显著性,P值小于0.05,说明具有显著一致性;Kendall系数值代表一致性程度(较差: <0.2,一般: 0.2~0.4,中等: 0.4~0.6,较强: 0.6~0.8,很强: 0.8~1.0)^[25]。

4 结论

(1)本文提出的基于冲击振荡破坏效应的团聚体稳定性测定方法(SVD法)可以通过模拟土壤团聚体受到的冲击、消散和振荡破坏效应,来测定团聚体的质量损失率。相比广泛应用于火烧迹地土壤团聚体稳定性测定的CND法,测试效率更高。

(2)通过室内火烧模拟试验,得出松林下火烧迹地土壤团聚体稳定性有如下规律:与天然对对照相比,高温(>600℃)会显著破坏团聚体稳定性;团聚体稳定性与土壤斥水性及土壤层深度均成正比关系。

(3)研究表明,采用“冲击高度1m、含水量40%、冲击5次、所需测定团聚体20颗”作为SVD法的标准测定方案,其测定结果区分度最佳,可以满足不同火烈度下火烧迹地土壤团聚体稳定性的测定需要。

参考文献(References):

- [1] 胡卸文,金涛,殷万清,等.西昌市经久乡森林火灾火烧区特点及火后泥石流易发性评价[J].工程地质学报,2020,28(4):762-771. [HU Xiewen, JIN Tao, YIN Wanqing, et al. The characteristics of forest fire burned area and susceptibility assessment of post-fire debris flow in jingjiu township, xichang City[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 762-771. (in Chinese with English abstract)]
- [2] BADÍA-VILLAS D, GONZÁLEZ-PÉREZ J A, AZNAR J M, et al. Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire[J]. Geoderma, 2014, 213: 400-407.
- [3] VARELA M E, BENITO E, KEIZER J J. Effects of wildfire and laboratory heating on soil aggregate stability of pine forests in Galicia: The role of lithology, soil organic matter content and water repellency[J]. CATENA, 2010, 83(2/3): 127-134.
- [4] ZAVALA L M, GRANGED A J P, JORDÁN A, et al. Effect of

- burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 366–374.
- [5] JORDÁN A, ZAVALA L M, MATAIX-SOLERA J, et al. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils[J]. *CATENA*, 2011, 84(3): 136–147.
- [6] WIETING C, EBEL B A, SINGHA K. Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the Boulder Creek Critical Zone Observatory[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 13: 43–57.
- [7] JIMÉNEZ-PINILLA P, MATAIX-SOLERA J, ARCENEGUI V, et al. Advances in the knowledge of how heating can affect aggregate stability in Mediterranean soils: a XDR and SEM-EDX approach[J]. *CATENA*, 2016, 147: 315–324.
- [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 Xiewen, WANG Yan, YANG Ying. Research actuality and evolution mechanism of post-fire debris flow[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1562–1573. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郭军玲, 王虹艳, 卢升高. 亚热带土壤团聚体测定方法的比较研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 542–546. [GUO Junling, WANG Hongyan, LU Shenggao. Comparative studies on measurement methods for aggregate stability of subtropical soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 542–546. (in Chinese with English abstract)]
- [10] SCHOMAKERS, J., et al. Measurement of soil aggregate stability using low intensity ultrasonic vibration[J]. *Spanish Journal of Soil Science*, 2011, 1(1): 8–19.
- [11] AKSAKAL E L, ANGIN I, SARI S. A new approach for calculating aggregate stability: mean weight aggregate stability (MWAS) [J]. *CATENA*, 2020, 194: 104708.
- [12] AMÉZKETA E. Soil aggregate stability: a review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, 14(2/3): 83–151.
- [13] 黄悦等. 基于高能水分特性法的土壤团聚体结构稳定性研究进展[J]. *水土保持研究*, 2022: 1–8. [HUANG Yue, et al. Progress in Research on Structural Stability of Soil Aggregates Based on High Energy Moisture Characteristic Method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022: 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [14] THOMAZ E L. Effects of fire on the aggregate stability of clayey soils: A meta-analysis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 221: 103802.
- [15] 成小彬. 水锤振荡器的关键技术研究与其结构设计[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. [CHENG Xiaobin. Research on key technology of water hammer oscillator and its structural design[D]. Beijing: china university of petroleum (bei jing), 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [16] IMESON A C, VIS M. Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion[J]. *Geoderma*, 1984, 34(3/4): 185–200.
- [17] MCCALLA T M. Water-drop method of determining stability of soil structure[J]. *Soil Science*, 1944, 58(2): 117–122.
- [18] ALMAJMAIE A, HARDIE M, ACUNA T, et al. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 39–45.
- [19] RAWLINS B G, TURNER G, WRAGG J, et al. An improved method for measurement of soil aggregate stability using laser granulometry applied at regional scale[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66(3): 604–614.
- [20] 张绍科, 胡卸文, 王严, 等. 四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 79–85. [ZHANG Shaoko, HU Xiewen, WANG Yan, et al. Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 79–85. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 胡彩莉, 马玉贞, 郭超, 等. 烧失量法测定土壤有机质含量的实验条件探究[J]. *地球与环境*, 2016, 44(1): 110–118. [HU Caili, MA Yuzhen, GUO Chao, et al. Optimization of the experiment conditions for estimating organic matter content with loss-on-ignition method[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(1): 110–118. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 孔凡伟. 如何精测土壤容重[J]. *黑龙江农业科学*, 2010, (10): 178. [KONG Fanwei. How to accurately measure soil bulk density[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010, (10): 178. (in Chinese)]
- [23] BISDOM E B A, DEKKER L W, TH SCHOUTE J F. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure[J]. *Geoderma*, 1993, 56(1/2/3/4): 105–118.
- [24] 程佳会, 范成伟, 徐晓兵, 等. 正交试验下黏土导热系数影响分析[J]. *江西建材*, 2022(3): 34–36. [CHENG Jiahui, FAN Chengwei, XU Xiaobing, et al. Influence analysis of thermal conductivity of clay under orthogonal test[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2022(3): 34–36. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 侯勋, 方刚. 基于肯德尔系数的改进 ID3 算法[J]. *科学技术创新*, 2021, (22): 21–22. [HOU Xun, FANG Gang. Improved ID3 algorithm based on Kendall coefficient [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021, (22): 21–22. (in Chinese)]
- [26] LI Qiwen, AHN S, KIM T, et al. Post-fire impacts of vegetation burning on soil properties and water repellency in a pine forest, South Korea a[J]. *Forests*, 2021, 12(6): 708, 2021
- [27] 李萌. 热声制冷机板叠内工质流动与换热规律研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021. [LI Meng. Study on the flow and heat transfer laws of working medium in the stack of thermoacoustic refrigerator[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]