

自然冻融条件下黄土丘陵区不同土地利用方式原状土的抗冲性

柏兰峰, 李占斌, 马波, 肖列

(中国科学院 水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究冻融对 3 种土地利用方式(坡耕地、草地和灌木地)土壤抗冲性的影响,旨在为黄土高原季节性冻融区植被恢复建设提供理论依据。[方法] 基于一系列野外自然冻融、野外监测和原状土冲刷试验,以确定冻融对 3 种土地利用方式土壤抗冲性的影响。[结果] ①相较于坡耕地,草地与灌木地的冻结程度更低,其中,灌木地冻结程度最低,抗冻性最好。②冻融作用不同程度地加剧了土壤流失,降低土体抗冲性,其中草地与灌木的抗冲系数 AS(anti-scourability)明显高于坡耕地,说明在冻融条件下植被覆盖能够有效提升土体抗冻性及土壤抗冲能力。③在草地和灌木地中,冻融前后草地和灌木地的泥沙总流失量增加了 31% 和 16.5%,抗冲系数分别下降了 23% 和 14%,草地在冻融过程中泥沙流失的增加量更高,抗冲系数下降幅度最大。[结论] 在季节性冻融过程中,草地冻结程度更剧烈,抗冲性更差,草地在季节性冻融过程中可能存在更高水土流失风险。

关键词: 土壤侵蚀; 野外自然冻融; 原状土冲刷; 土壤抗冲性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0049-07

中图分类号: S157.1, TU111.2⁺5

文献参数: 柏兰峰, 李占斌, 马波, 等.自然冻融条件下黄土丘陵区不同土地利用方式原状土的抗冲性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 49-55. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.007; Bo Lanfeng, Li Zhanbin, Ma Bo, et al. Scourability of undisturbed soils of different land use types in loess hilly region under natural freezing and thawing conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 49-55.

Scourability of Undisturbed Soils of Different Land Use Types in Loess Hilly Region Under Natural Freezing and Thawing Conditions

Bo Lanfeng, Li Zhanbin, Ma Bo, Xiao Lie

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of freezing and thawing on soil erosion resistance of three land use types (sloping farmland, grassland, and shrub land) were studied in order to provide a theoretical basis for vegetation restoration and construction in the seasonal freezing and thawing area of the Loess Plateau. [Methods] Based on a series of natural freezing and thawing cycles, field monitoring, and undisturbed soil scouring tests, the effects of freezing and thawing on soil erosion resistance of the three aforementioned land use types were determined. [Results] ① Compared with sloping farmland, the degree of freezing for grassland and shrub land was lower, and with shrub land having the lowest freezing degree and the best frost resistance. ② Freezing and thawing aggravates soil loss in varying degrees and reduces soil erosion resistance. The anti-scourability coefficient of grassland and shrub land was significantly higher than that of sloping farmland, indicating that vegetation coverage can effectively improve frost resistance and anti-scourability of soil under freeze-thaw conditions. ③ The total sediment loss before and after freezing and thawing for grassland and shrub land increased by 31% and 16.5%, respectively, and the anti-scourability coefficient decreased by 23%

收稿日期: 2021-07-31

修回日期: 2021-10-17

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土高原冻融对水蚀过程作用机理研究”(41771311), “尼罗河上游丘陵区水土保持与高产高效农业研究”(41561144011); 中国科学院西部之光人才计划(XAB2016B08); 西北农林科技大学大学生创新训练项目“冻融交替对土壤抗蚀性影响研究”(S202010712569)资助

第一作者: 柏兰峰(1991—), 男(布依族), 贵州省都匀市人, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: 609616243@qq.com。

通信作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 教授, 主要从事黄土高原水蚀动力过程及调控研究。Email: zbli@ms.iswc.ac.cn。

and 14%. The increase of sediment loss in grassland during freezing and thawing was higher, and the anti-scourability coefficient decreased the most. [Conclusion] Due to seasonal freezing and thawing of grassland and shrub land, the degree of grassland freezing is more severe, and the erosion resistance of grassland soil is worse than that of shrub land soil. Grassland may have a higher risk of soil erosion due to the seasonal freezing and thawing process.

Keywords: soil erosion; seasonal freezing and thawing; undisturbed soil erosion; soil erosion resistance

季节性冻融循环(FTCs)是指随着季节和昼夜热量的变化,地表温度先降低至 0 °C 以下,再上升到 0 °C 以上的地质现象^[1]。这是全球中高纬度寒冷地区和山区普遍存在的一种自然现象。近年来,国内外许多学者对加拿大、美国、俄罗斯和中国等不同地区的冻融及影响机制进行了研究,受季节性冻融循环影响的区域大约占全球陆地面积的 50%^[2]。在春季融雪期,由于表层土壤反复冻融,土壤黏结力降低,分散力增大,土壤抗侵蚀力降低。

人们在水土流失问题不断认识和研究过程中,林草植被对坡面上方土壤侵蚀泥沙的拦蓄与控制作用一直受到广泛关注^[3-4]。已有不少研究表明,黄土高原退耕还林(草)工程是该区生态系统恢复行之有效的措施之一^[5-6],长期植被恢复在改善土壤质量、减少径流泥沙以及提高生态系统稳定性和适宜性等方面起到积极作用。然而,上述研究大都重点关注于植被与土壤侵蚀之间的关系,对于季节性冻融条件下不同植被类型土壤侵蚀特征及影响的相关研究则较为稀少。黄土丘陵区地处温带内陆,全年约三分之一的时间为 0 °C 以下。多年平均降雨量为 450~500 mm,汛期降雨占全年降雨量的 70%,具备季节性冻融气候的发生条件^[7]。通常情况下,该区土壤冻结前为本年土壤水力侵蚀的结束,而土壤融化后是来年土壤水力侵蚀的开始。在春季解冻期,气温上升,由于土壤表层不完全解冻,形成一个隔水层,降低土壤入渗能力,产生更多的地表径流。此外,由于土壤经历反复冻融循环过程,土壤理化性质以及结构和质地发生了变化,这些因素都影响了土壤可蚀性和抗冲性,导致土壤流失。

不少研究发现,冻融作用通过改变土壤理化性质影响土壤可蚀性^[8]。国内外已有不少关于冻融对土壤理化性质、土壤结构及可蚀性的影响的机理研究^[9],但至今仍有诸多问题尚无定论,究其原因,主要是因为野外自然冻融试验开展难度大,试验所需的仪器设备的布设以及原状土壤的采集都较为困难。因此,大部分研究者至今仍主要依赖室内冻融模拟试验来开展冻融研究^[10]。由于不同学者的试验条件差异较大,导致至今也很难对冻融的影响进行定量化。土壤质地、前期含水量、冻结温度、冻融循环次数以及冻

融循环方式等因素是影响冻融作用的主要因素,这是当下国内外学者的研究共识^[11]。而其中冻融循环次数和前期含水量被认为是影响冻融作用最大的因素^[12-13]。在不同学者的研究中,由于设置的冻融条件(冻融循环次数与前期含水量)不同,导致其影响效果相差甚大,甚至是相反的结论^[14]。比如关于冻融作用对土壤结构、团聚体稳定性以及理化性质的影响,一些学者认为冻融提高了土壤团聚体稳定性,改善土壤结构^[15]。而一些学者则持相反意见^[16]。

因此,为了弥补野外自然冻融条件下不同土地利用条件下原状土侵蚀研究方面研究成果的空白,有必要开展季节性冻融条件下黄土丘陵区不同土地利用方式土壤流失特征的研究。本研究以黄土丘陵区 3 种土地利用方式(坡耕地、草地和灌木地)为研究对象,通过野外土壤温度监测和原状土冲刷试验,研究 3 种土地利用方式的土壤流失特征,并分析冻融对土壤抗冲性的影响,以期为土壤资源优化管理和优化植被恢复配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地选择和土壤采集

本试验研究区位于中国陕西省榆林市绥德县水土保持科学试验研究示范基地——辛店沟科技示范园(110°16'—110°20'E, 37°28'—37°31'N)。该区年平均气温 9.7 °C,最低温度和最高温度分别为 -27 °C 和 39 °C,存在明显冻融循环过程。植被类型属于温带森林草原,人工植被主要有杨树(*Populus simonii* var. *przewalskii*)、白榆(*Ulmus pumila*)、旱柳(*Salix matsudana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,灌丛主要有黄蔷薇(*Rosa hugonis*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和酸枣(*Ziziphus jujube*, var. *spinosa*)等。由于研究区辛店沟内部乔木林树龄普遍较小,且分布较为稀疏。本次试验仅选择了两种黄土丘陵区常见植被类型:灌木地(柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii*)和草地(苜蓿 *Medicago sativa*),以耕地作为对照(CK)。

黄绵土是该区的主要土壤类型,发育于黄土或次生黄土母质,质地均一,其颗粒组成以粉粒占优势

(表 1),疏松多孔。在草地、灌木和坡耕地中每个样地采集 5 个原状土,混合均匀后带入实验室,使用马尔可夫激光粒度分析仪测量土壤质地。土壤粒度分布以黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05)和砂粒(>0.05)的百分比含量来描述(表 1)。

如表 2 所示,样地面积为 20 m×10 m。为减小试验误差,3 个样地的选择尽量保持坡向与陡度一致。分别在 3 个样地中间布设土壤温度监测仪(ET-100, Symorui Environmental Technology Co., Ltd, XiAn, China)。将探针分别放置于 10, 20, 30,

40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 cm 深度的土层中。监测土壤温度(ST)低于 0 °C 时认为土壤开始冻结,ST 高于 0 °C 时土壤开始融解^[12]。

表 1 黄土丘陵区不同植被类型土壤粒径分布

植被类型	不同质地土壤含量/%		
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(>0.05 mm)
坡耕地	15.513	54.568	29.919
草地	9.554	52.169	38.277
灌木	13.509	57.481	29.009

表 2 样地基本信息

样地类型	植被年限/a	主要植被种类	坡度/(°)	坡向	盖度/%	株行距
草地	20	苜蓿、铁杆蒿、冰草	24	半阳坡	62	—
灌木地	25	锦鸡儿、白羊草、冰草	25	半阳坡	70	130 cm×120 cm
坡耕地	—	—	10	阳坡	—	—

土壤抗冲指标的获取采用原状土冲刷法。用 20 cm×10 cm×10 cm 的自制长方形取样器进行原状土采集,取样深度为 10 cm。每个样地内按 S 型采样法选取植被之间(灌木样地距离植株约 50 cm 左右),长势相对均匀并具有代表性的采样点进行采集。在清除地表枯落物和结皮后,利用取样器锋利面从土壤表面垂直下切,直到取样器完全切入土壤中。铲掉取样器周围土壤,将取样器完整取出,用剖面刀沿取样器底部削平后垫上特制带孔铝制底片,再用保鲜膜密封。在样品搬运过程中,将带有铝制底片端朝下,最大限度降低土壤扰动以及土壤水分流失。根据该区气象资料统计^[17],发现该区土壤冻结时间大致为 12 月中旬至 3 月初,因此本次试验一共分 2 次(冻融前后)对进行原状土采集,每个样地选取 5 个点,每个处理重复 2 次,共采集原状土冲刷样品 60 个。具体采样时间为:2019 年 11 月 1 日和 2020 年 3 月 29 日。根据灌木、草地和坡耕地野外实测土壤温度数据动态变化,将冻融过程分为冻结初期、完全冻结期和融化期^[12]。

1.2 原状土冲刷以及指标测定

在进行冲刷试验前,先将取回来的原状土以及取样器放置于水中浸泡,保持带孔铝片端朝下。水面低于取样器上端口 5 cm。水从铝制底片小孔自下而上浸润土壤 12 h,确保所有待测土壤达到饱和。然后,将饱和土壤样品取出置于干燥处 8 h 去除土壤重力水后进行原状土冲刷试验。

本研究使用的冲刷槽尺寸为 2 m×0.1 m。设置坡度为 25°,用当地标准径流小区产生的最大径流量换算成单位径流冲刷流量(4.0 L/min)。每个原状土

样冲刷时间为 15 min。开始冲刷的前 3 min,用径流桶每分钟收集 1 次水流泥沙样,随后改为每 2 min 收集 1 次。每个原状土样冲刷 15 min 共收集 9 个径流泥沙样。

抗冲系数^[1]表示每冲掉 1 g 烘干土所需水量。用 AS(anti-scourability)表示(L/g)。AS 越大,土壤的抗冲性越强。

$$AS = \frac{f \times t}{W} \quad (1)$$

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

1.3 数据分析

本研究使用 Windows 软件包 spss17.0 进行统计分析,使用方差分析来确定测量变量的处理效果。使用配对 T 检验来比较冻融前后处理之间的统计差异。在试验中,认为 $p < 0.05$ 的概率水平具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型条件下土壤温度垂直分布的时间变化

C_V 用来描述 ST 变化程度。3 地类监测期间土壤温度(ST)的 C_V 值差异不明显。在整个冻融过程中,ST 从表层至深层逐渐增加,相应的 C_V 值从表层至深层逐渐减小。说明表层 ST 值波动大,深层 ST 值波动小。坡耕地初始冻结日为 11 月 17 日,分别比草地和灌木地提前了 4 d 和 5 d,灌木地的整体冻结时间最晚(表 3)。而灌木的解冻日期比草地提前 6 d,坡耕地的解冻日期最晚。在完全冻结期,坡耕地土壤

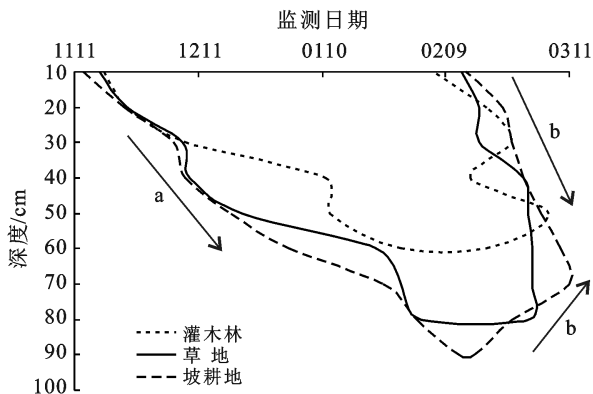
各个土层的冻结天数均最多,草地次之,灌木地的冻结天数最少。3 个地类不同土层深度总体上是坡耕地冻结温度最低,灌木地的温度最高。最低冻结温度均发生在土壤表层 10 cm 处,草地最低冻结温度为 $-15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,灌木地为 $-13.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,坡耕地为 $-13.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。经历最大冻融循环次数依次为:灌木地 20 次循环,草地 30 次循环,坡耕地 33 次循环。在融化期,灌木地

和坡耕地土壤都在 2 月 26 日同时完成解冻,但是灌木地表层 10 cm 土壤完全解冻的日期比 20 cm 和 30 cm 土层提前了 20 d。在表层 10 cm 处,灌木地、草地和坡耕地完成解冻的日期分别为 2 月 6 日,2 月 23 日和 2 月 26 日。灌木地完成土壤解冻的日期比草地完成解冻日期提前了 17 d,比坡耕地完成解冻日期提前了 20 d。

表 3 黄土丘陵区不同冻结时期土壤冻融特征

土地类型	深度/cm	冻结初期				完全冻结期				融化期				FTC	最低冻结温度/ $^{\circ}\text{C}$	总天数/d
		起止日期	天数/d	平均 ST(K)	C_V	起止日期	天数/d	平均 ST(K)	C_V	起止日期	天数/d	平均 ST(K)	C_V			
灌木	10	1118—1205	18	272.77 \pm 1.88	0.006 9	1216—0205	52	269.10 \pm 2.60	0.01	0206—0206	1	272.17 \pm 3.80	0.014 0	19	-13.05	71
	20	1124—1205	12	273.82 \pm 1.02	0.003 7	1206—0218	74	270.51 \pm 1.70	0.006 3	0219—0226	8	273.46 \pm 0.96	0.003 5	20	-9.813	94
	30	1208—1210	3	273.09 \pm 0.27	0.001	1210—0224	66	271.66 \pm 1.18	0.004 3	0225—0226	2	273.13 \pm 0.10	0.000 3	5	-6.125	71
草地	10	1117—1205	19	271.82 \pm 2.14	0.007 9	1206—0212	69	268.11 \pm 3.04	0.011	0213—0223	11	272.95 \pm 3.19	0.012 0	30	-15.5	99
	20	1124—1204	11	273.68 \pm 0.73	0.002 7	1205—0216	74	270.16 \pm 1.99	0.007 4	0217—0222	6	273.47 \pm 0.59	0.002 1	17	-10.625	91
	30	1207—1216	10	272.65 \pm 0.59	0.002 2	1217—0217	63	271.06 \pm 1.44	0.005 3	0217—0218	2	272.91 \pm 0.31	0.001 1	12	-7.25	75
坡耕地	10	1113—1201	20	273.35 \pm 0.58	0.002 2	1201—0213	74	268.81 \pm 2.56	0.01	0214—0226	13	273.10 \pm 2.50	0.009 1	33	-13.375	107
	20	1123—1201	9	273.09 \pm 0.27	0.000 9	1201—0223	84	270.11 \pm 1.99	0.007 3	0223—0226	4	273.72 \pm 1.05	0.003 8	13	-10.56	97
	30	1205—1206	2	272.82 \pm 0.44	0.001 9	1206—0225	82	271.07 \pm 1.40	0.005 2	0225—0225	2	273.14 \pm 0.06	0.000 2	4	-7.33	86

为了更加直观的了解 3 个地类受冻融影响的剧烈程度,本研究利用各个土层深度的冻结日期与融化日期的时间节点构建冻融深度土壤剖面图(图 1)。由图 1 可知,草地、灌木与坡耕地土壤的冻结方向一致,均是从上至下的单向冻结,而融化过程也很相似,在融化期,3 个地类土壤的融解均呈现最表层与最深层的土壤最先融解,中间土层最后融解的双向融解现象(表 3,图 1)。坡耕地、草地和灌木的最大冻结深度分别为 90,80,60 cm。在该剖面图中,可以将代表每个地类的冻融曲线与 X 轴所形成的封闭面积作为这个地类的土壤受季节性冻融气候的影响剧烈程度。可以发现,坡耕地的冻结程度最为剧烈,其次是草地,灌木地的冻结程度最低。



注:图中 a 为冻结过程; b 为融化过程。

图 1 黄土丘陵区不同土地利用方式原状土的冻融过程特征

2.2 冻融前后泥沙流失特征和土壤抗冲性的变化特征

冻融作用不同程度的增大了两个植被类型和坡耕地的泥沙流失总量。坡耕地的泥沙流失速率显著大于草地和灌木地(图 2)。对 3 种土地利用方式冻融前后泥沙流失量进行配对 t 检验,发现冻融后泥沙流失量整体显著大于冻融前泥沙流失量,在灌木地中,冻后泥沙流失量在冲刷的第 3—5 min 和第 11—15 min 显著大于冻前,而草地和坡耕地冻前和冻后泥沙流失量主要在前 3 min 显著大于冻前(表 4)。由表 5 可知,坡耕地冻融前后泥沙流失量分别为 157.75 g 和 172.61 g,增加了 14.87 g。草地冻融前后泥沙流失量分别为 41.74 g 和 54.76 g,增加了 13.02 g。灌木冻融前后泥沙流失量分别为 36.28 g 和 42.32 g,增加了 6.04 g。在土壤冻结前期,前 3 min 泥沙流失量分别占坡耕地、草地和灌木地总泥沙流失量 58.9%,58.4%和 63.9%,而冻融后分别为 69.7%,64.4%和 63.3%(表 5)。坡耕地和草地经历冻融后的前 3 min 泥沙流失量分别增加了 10.76%和 5.92%,灌木地下降了 0.67%。从图 2 可以看出,坡耕地经历冻融后的泥沙流失量在前 3 min 从 64.71 g/min 急剧下降到 18.6 g/min,在此之后,冻融后泥沙流失量持续低于冻结前。坡耕地冻融后的泥沙流失量主要集中在冲刷过程的前 3 min,草地冻融后的泥沙流失量主要集中在冲刷过程的前 4 min,而灌木地冻融后的泥沙流失量在冲刷过程的第 2—4 min 与第 7—15 min 均大于冻结前的泥沙流失量。

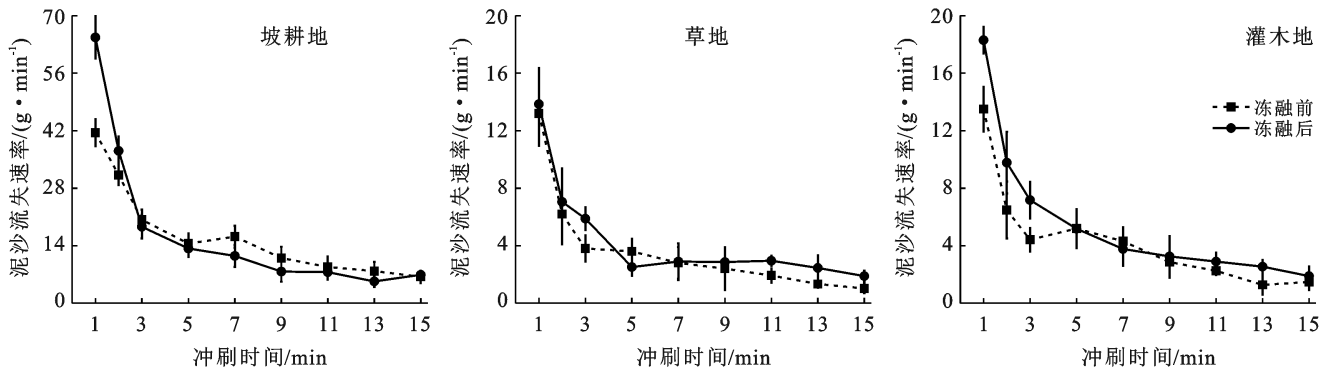


图 2 黄土丘陵区冻融前后不同地类泥沙流失率动态

表 4 黄土丘陵区不同土地利用方式冻融前后泥沙流失量 t 检验

地类	因素	不同冲刷时间泥沙流失量/g																	
		1 min		2 min		3 min		5 min		7 min		9 min		11 min		13 min		15 min	
		冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后
灌木	平均值	13.23	13.86	6.24	7.05	3.82	5.87	3.64	2.54	2.84	2.89	2.45	2.86	1.92	2.95	1.33	2.45	1.02	1.88
	标准差	2.37	2.60	2.22	2.45	0.97	0.83	0.93	0.65	1.15	1.35	1.57	0.62	0.53	0.36	0.27	0.93	0.35	0.39
	sig.(双尾)	0.624 0		0.310 0		0.000 0		0.017 0		0.913 0		0.438 0		0.000 0		0.004 0		0.000 0	
草地	平均值	13.53	18.33	6.48	9.78	4.41	7.17	5.19	5.18	4.31	3.77	2.86	3.25	2.25	2.89	1.27	2.54	1.47	1.88
	标准差	1.65	0.98	2.09	2.27	0.87	1.34	1.43	0.65	1.02	1.24	1.22	1.53	0.31	0.66	0.74	0.50	0.59	0.70
	sig.(双尾)	0.000 0		0.002 0		0.000 0		0.980 0		0.416 0		0.537 0		0.034 0		0.001 0		0.168 0	
坡耕地	平均值	41.50	64.69	31.21	37.09	20.33	18.61	14.55	13.30	16.20	11.49	10.98	7.68	8.80	7.55	7.80	5.29	6.41	6.85
	标准差	4.91	5.43	2.60	3.70	2.59	3.03	2.71	2.12	2.82	2.83	2.91	2.62	2.71	1.95	2.39	1.43	1.58	0.97
	sig.(双尾)	0.000 0		0.006 0		0.248 0		0.205 0		0.004 0		0.021 0		0.298 0		0.022 0		0.544 0	

注:当 Sig<0.05 时,表示冻融前后泥沙流失量有显著差异。

表 5 黄土丘陵区不同土地利用方式冻融前后泥沙流失特征

项目	灌木		草地		坡耕地	
	冻前	冻后	冻前	冻后	冻前	冻后
总泥沙流失量/g	36.28	42.32	41.74	54.76	157.75	172.62
前 3 min 流失量/g	23.20	26.78	24.39	35.25	93.06	120.40
比例/%	64.00	63.30	58.40	64.40	59.00	69.70

图 3 为两个植被类型和坡耕地冻融前后土壤抗冲系数的变化。

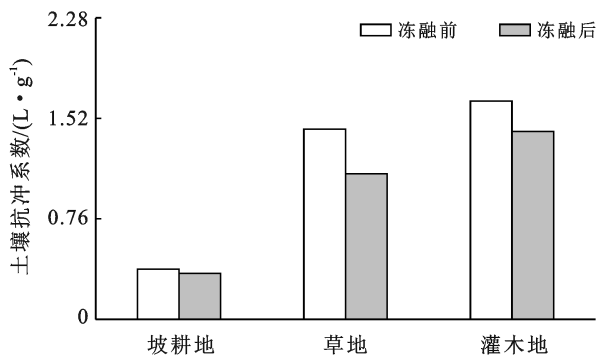


图 3 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤抗冲系数特征

由图 3 可以看出,坡耕地的抗冲系数明显低于草地和灌木地,说明植被能够有效的增加土壤的抗冲

性。在两个植被类型中,草地冻融前后的抗冲系数分别为 1.43,1.1,下降了 23%;而灌木地冻融前后的抗冲系数分别为 1.65,1.42,下降了 14%。草地的抗冲系数下降幅度更大,灌木地土壤具备更好的抗冲性。坡耕地冻融前后的抗冲系数分别为 0.38,0.34,下降了 8.7%。

3 讨论

3.1 季节性冻融对不同植被类型冻结程度的影响

在可蚀条件下,受季节的影响,土壤解冻时,土壤侵蚀速率会发生变化^[17]。有研究发现,在温带地区约占年土壤流失量的 51% 以上都发生在冻土层解冻时期^[18]。与此同时,有学者在室内不同土壤含水量的冻融处理条件下,设置不同的径流量进行模拟降雨冲刷试验,发现土壤含水量为 30% 时土壤可蚀性因

子 K 值最大,含水量为 15% 时 K 值最小^[14]。在本研究中,根据冻融过程中的冻结深度、冻结时长等各项冻融特征显示,坡耕地土壤冻结程度明显比两个植被类型更加严重,说明植被覆盖能够很大程度的增加土体的抗冻性,植被覆盖能够对冬季土壤起到一定的缓冲作用。这个结论与一些学者的研究结论一致,有学者的研究表明,相比于无任何覆盖的土体,增加积雪覆盖或植被覆盖均能对土体产生不同程度的保温作用^[19-20]。而在两个植被类型中,草地的冻结深度为 80 cm,灌木冻结深度为 60 cm,最低土壤冻结温度、冻结时长等冻融特征也显示草地的冻结程度比灌木地严重。主要原因是不同植被类型的土壤经历季节性冻融的水热运移过程差异较大^[12]。有研究表明,植被对冻土热状态的影响有多种表现形式。首先,通过遮荫,植被冠层反射和吸收大部分向下的太阳辐射,减少其对土壤表面的影响^[21-22]。其次,冠层结构及其生理功能改变了植被的气象条件,进而影响了大气与土壤之间的热湿交换。最后,植被冠层还可以通过截留降雪以及降低风速来影响土壤温度状况^[23]。在其他因素不变的情况下,草地比灌木的冠层更加低矮,这导致了草地与灌木地冻融过程截然不同。

有研究表明,植被的高低和盖度对气温的影响较大,草地植被盖度虽然较大,但因高度太小,对地面温度的影响效果相对较小^[20]。此外,有学者在黄土区的研究发现,灌木地(以白羊草为主)的根质量密度为 7.41 kg/m^3 ,而草地(以铁杆蒿为主)的根质量密度仅为 0.72 kg/m^3 ,相较于草地,灌木地具更好根系条件^[24],高双等^[25]在东北黑土区不同土地利用类型土壤抗冲的研究中发现,植被根系能够有效减弱冻融作用,所以灌木地土壤冻结程度低于草地。

在整冻结期,草地的土壤温度(ST)都低于灌木地,此外,草地在 10, 20, 30 cm 土层的最低冻结温度均明显低于灌木地。在冻结时长方面,草地开始冻结的日期早于灌木地,而完成土壤解冻的日期比灌木地推迟了 17 d,草地土壤经历的冻结时长、最大冻融循环次数均大于灌木地土壤。同时,草地土体的冻土面积远大于灌木地。因此草地的土壤冻结程度明显比灌木地更剧烈。这个研究结果与一些学者的研究结论相似,比如有学者在中国西北地区祁连山开展类似研究,利用 2015—2017 年乔木、灌木和草地土壤水热监测数据进行分析,发现随土层深度增加,土壤温湿度变化振幅均减小,同时,草地土壤的冻结速率、融化速率等均大于灌木地^[26]。

3.2 冻结程度对产沙和土壤抗冲性的影响

本研究使用的冲刷槽尺寸为 $2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$,这个

小水槽确实会引起试验缩放的效应问题。例如当水流第一次接触土壤时,流速可能不稳定,当冲刷水槽边界过窄时,水流对土体的均匀冲刷会受水流边界的影响。在冲刷过程中,由于流速不稳定和水槽边界对水流的影响,毫无疑问,试验结果可能与现场实际情况有所不同,规模的影响不可忽视。在土壤冲刷的研究中,尤其是冻融后土壤的抗冲性研究还没有形成规范和尺寸标准^[9]。虽然水槽的尺寸较小,但通过控制适当比例,可以显著减少泥沙淤积,准确判断土壤剥离过程,提高试验结果的可靠性^[27]。本研究发现冻结程度与土壤流失量之间存在一定的联系(尽管是间接的),即根系降低冻结程度,同时增加冲刷的阻力。在本次研究中,坡耕地的冻结程度最为剧烈,其次是草地,灌木地的冻结程度最低。季节性冻融增大了两个植被类型和坡耕地的总泥沙流失量,坡耕地的在冲刷中的泥沙流失速率和泥沙流失量远大于两个植被类型。草地和灌木地冻融前后的泥沙增加的总流失量分别为 13.8 g 和 6.04 g 。

值得注意的是,坡耕地和草地经历冻融后的前 3 min 泥沙流失量分别增加了 10.76% 和 5.92%,而灌木地下降了 0.67%。造成这一现象的主要有两个原因:①草地的冻结程度大于灌木地。在冻结过程中,由于黄土在低水分条件下具有疏松多孔的内部结构,土壤冻结引起的土壤水势变化,驱使土壤水分从未冻结的区域向冻结锋面移动^[9,12]。而土壤温度是土壤水分运移的主要驱动力,导致水从土壤深层向上运移。使得土中孔隙水和外界水源补给水结晶形成多种形式的冰侵入体,冰会膨胀土壤孔隙,打破土壤之间的键。草地具备更强的水分运移驱动力,引起更多土体体积变大,导致更大程度的冻胀和团聚体破碎,从而增大土壤流失风险;②从泥沙流失动态图可以发现,灌木地在冲刷的 2—4 min 与 7—15 min 出现冻融后的泥沙流失量大于冻融前的泥沙流失量。而坡耕地与草地的泥沙流失量的增加均主要集中在冲刷前 3—4 min,草地与坡耕地冻融后泥沙集中流失的现象很可能会增大来年雨季土壤流失的风险。

坡耕地的抗冲系数(AS)明显低于草地和灌木地,而草地的抗冲系数下降幅度灌木地更大,说明:①植被能够有效的增加土壤的抗冲性。②相较于草地,灌木地土壤具备更好的抗冲性。此外还发现坡耕地冻融前后的抗冲系数分别为 0.38, 0.34, 下降了 8.7%,下降幅度低于两种植被类型冻融前后土壤抗冲系数的下降幅度,冻融作用对坡耕地土壤的抗冲性变化的影响比两种植被类型更小。分析其主要原因可能是坡耕地的土壤流失量显著大于草地和灌木地,

单位时间内土壤流失量大,导致径流的含沙率趋于饱和而降低径流侵蚀能量。有研究表明,相对于有植被根系的土壤,无根系土壤的流失量更大,根系能够显著增大土壤抗冲阻力^[1]。

值得注意的是,草地表层土壤温度(ST)和最低冻结温度比坡耕地低,主要原因可能是,部分积雪被草冠层拦截,导致草地表层积雪厚度低于坡耕地表层积雪厚度。很多研究表明,积雪覆盖能够降低表层土壤土壤冻结程度,提高土壤温度^[28-29],在土壤冻结过程中起到一定保温和缓冲作用。因此,草地表层土壤的冻结比坡耕地和灌木地更严重,进而可能导致草地表层土体团聚体稳定性破坏的加剧从而加大解冻期水土流失风险。这一发现应该在黄土高原季节性冻融区进行植被恢复建设工程中得到重视。

4 结论

(1) 季节性冻融作用对不同植被类型土壤的冻结程度产生不同影响。从土壤最大冻结深度、冻结时长、表层土壤经历最大冻融次数以及最低冻结温度等冻融特征指标可以判断,坡耕地冻结程度最剧烈,其次是草地和灌木地。

(2) 冻结程度一定程度上加剧了土壤流失。草地和灌木地土壤冻融前后的泥沙总流失量增加了 31% 和 16.5%,草地和灌木地冻融前后的抗冲系数分别下降了 23% 和 14%。草地的土壤流失量大于灌木,而坡耕地的泥沙流失速率和泥沙流失总量远大于两个植被类型。表明植被能够有效增加土体的抗冲性,并且灌木地比草地土壤具备更好的抗冻性和抗冲性。

综上所述,草地在季节性冻融过程中可能存在加剧水土流失风险。这项研究也为黄土高原季节性冻融区植被恢复建设提供了重要的新信息。

[参 考 文 献]

[1] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):105-112.

[2] Wu Xing, Brüggemann N, Gasche R, et al. Environmental controls over soil-atmosphere exchange of N₂O, NO, and CO₂ in a temperate Norway spruce forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010,24(2):21-32.

[3] 马建业,李占斌,马波,等.黄土区小流域植被类型对沟坡地土壤水分循环的影响[J].生态学报,2020,40(8):2698-2706.

[4] Liu Chenguang, Li Zhanbin, Fu Suhua, et al. Influence of soil aggregate characteristics on the sediment trans-

port capacity of overland flow [J]. *Geoderma*, 2020, 369:1-8.

- [5] 王贵霞,夏江宝,孙宁宁,等.黄河三角洲引黄灌区不同植被类型的蓄水保土功能研究[J].水土保持学报,2015,29(2):111-116.
- [6] 陈浩.黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [7] 姚珂涵,肖列,李鹏,等.冻融循环次数和土壤含水率对油松林土壤团聚体及有效态微量元素的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):259-266.
- [8] Sharratt B S, Lindstrom M J, Benoit G R, et al. Runoff and soil erosion during spring thaw in the Northern U. S. Corn Belt [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001,55(4):487-494.
- [9] Sun, B Y, Xiao J B, Li Z B, et al. An analysis of soil detachment capacity under freeze-thaw conditions using the Taguchi method [J]. *Catena*, 2018,162:100-107.
- [10] 肖俊波,孙宝洋,马建业,等.季节性冻融对东柳沟流域风沙土分离能力的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(6):1-8.
- [11] Xiao Lie, Zhang Yang, Li Peng, et al. Effects of freeze-thaw cycles on aggregate-associated organic carbon and glomalin-related soil protein in natural-succession grassland and chinese pine forest on the Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2019,334:1-8.
- [12] Wang Tian, Li Peng, Li Zhanbin, et al. The effects of freeze-thaw process on soil water migration in dam and slope farmland on the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,666:721-730.
- [13] Bo Lanfeng, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Soil freeze-traw and water transport characteristics under different vegetation types in seasonal freeze-traw areas of Loess Plateau [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021,565.
- [14] Cheng Yuting, Li Peng, Xu Guoce, et al. The effect of soil water content and erodibility on losses of available nitrogen and phosphorus in simulated freeze-thaw conditions [J]. *Catena*, 2018,166:21-33.
- [15] Perfect E, van Loon W K P, Kay B, et al. Influence of ice segregation and solutes on soil structural stability [J]. *Soil Science*, 1990,70:571-581.
- [16] 肖俊波,孙宝洋,李占斌,等.冻融循环对风沙土物理性质及抗冲性的影响试验[J].水土保持学报,2017,31(2):67-71.
- [17] 刘雨佳,许秀泉,范昊明,等.东北黑土区横垄坡面融雪期细沟侵蚀特征研究[J].土壤通报,2017,48(3):701-706.
- [18] 胡波,王玉杰,王彬,等.自然降雨条件下结皮层团聚体稳定性变化特征研究[J].农业机械学报,2017,48(6):225-231.

- [24] Suleiman A A, Ritchie J T. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil porosity [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(2):235-239.
- [25] 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(5):892-898.
- [26] Fredlund D G, Xing Anqing. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):521-532.
- [27] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1):65-71.
- [28] Guo Shengli, Dang Tinghui, Hao mingde. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization [J]. Pedosphere, 2008, 18(2):248-256.
- [29] 柳影, 彭畅, 张会民, 等. 长期不同施肥条件下黑土的有机质含量变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5):7-11.
- [30] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期定位施肥对土壤效应的研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(2):188-196.
- [31] 侯会静, 韩正砥, 杨雅琴, 等. 生物有机肥的应用及其农田环境效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(14):82-88.
- [32] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4781-4789.
- [33] 潘金华, 庄舜尧, 史学正, 等. 土壤结构改良剂对皖南旱地红壤水分特征的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5):40-45.
- [34] 史银光, 李花, 李平儒, 等. 长期施用化肥或不同有机物对塿土土壤物理性质的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9):124-130.
- [35] Shi Yinguang, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. The effects of long-term fertiliser applications on soil organic carbon and hydraulic properties of a loess soil in China [J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(1):60-67.
- [36] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):443-449.
- [37] Eastman C M. Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqulf amended with biochar [D]. Ohio State, USA: Ms Thesis of the Ohio State University, 2011.
- [38] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):107-112.

(上接第 55 页)

- [19] Guo Weichao, Liu Hongyan, Anenkhonov O A, et al. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252:10-17.
- [20] 赵亚茹. 牡丹岭地区不同土地利用类型下土壤冻融变化特征分析[D]. 吉林 长春: 东北师范大学, 2014.
- [21] Shur Y L, Jorgenson M T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 18(1):7-19.
- [22] Chasmer L, Quinton W, Hopkinson C, et al. Vegetation canopy and radiation controls on permafrost plateau evolution within the discontinuous permafrost zone, northwest territories, Canada [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2011, 22(3):199-213.
- [23] Lu Jie, Wang Tiehuang, Cheng Wenchieh, et al. Permeability anisotropy of loess under the influence of dry density and freeze-thaw cycles [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(9):4-19.
- [24] Li Zhenwei, Zhang Guanghui, Geng Ren, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2015, 124:9-17.
- [25] 高双, 贾燕锋, 范昊明, 等. 冻融作用下东北黑土区不同土地利用类型土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):70-75.
- [26] 白云. 祁连山不同植被类型覆盖下冻土水热特征变化研究[D]. 甘肃 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- [27] Zhang G H, Liu Baoyuan, Nearing M A, et al. Soil Detachment by Shallow Flow [J]. Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45:351-357.
- [28] Wu Daoyong, Zhou Xiangyang, Jiang Xingyuan. Water and salt migration with phase change in saline soil during freezing and thawing processes [J]. Groundwater, 2018, 56(5):742-752.
- [29] Mohammed G A, Hayashi M, Farrow C R, et al. Improved characterization of frozen soil processes in the versatile soil moisture budget model [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(4):511-531.