

黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响

李强¹, 刘国彬^{1,2*}, 许明祥^{1,2}, 孙会³, 张正², 高丽倩¹

(1. 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, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院安塞水土保持综合试验站, 安塞 717400)

摘要: 在股状水流侵蚀比较发育的黄土丘陵区, 土壤可蚀性主要依赖于土壤抗冲能力。为了揭示季节性冻融对土壤抗冲性的影响, 该文借助模拟冲刷试验, 设置了裸地对照(CK)、黑麦草传统密度(LD)和加倍密度(HD)3种处理, 测定并分析了冻融前后土壤物理性质及其抗冲性。结果表明, 与冻融前相比, 表层土壤容重、团聚体含量和根系密度在3个处理中均未发生显著变化($P < 0.05$), 土壤黏聚力略有下降, 而崩解速率在处理CK、LD和HD中分别增加了20.6%、18.8%和7.3%。冻融作用延后了3个处理的主要产沙时间, 降低了土壤抗冲能力, 增加了冲刷中途泥沙流失速率。与未冻融相比, 冻融作用增加了处理CK和LD泥沙流失量为19.41%和6.70%, 但对处理HD影响较小($P < 0.05$)。冻融和根系共同作用在LD和HD处理上分别减少土壤流失量为3.72%和49.39%。该研究期望对完善土壤侵蚀机理提供一定的参考价值。

关键词: 土壤, 侵蚀, 物理性质, 冻融作用, 土壤抗冲性, 根系, 黄土丘陵区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.17.014

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-17-0105-08

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.

Li Qiang, Liu Guobin, Xu Mingxiang, et al. Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 105-112. (in Chinese with English abstract)

0 引言

冻融是指土层由于温度降到0以下和升至0以上而产生冻结和融化的一种物理地质作用和现象^[1]。这种由于温度的变化造成的冻融交替所引起的土壤、岩石性质发生变化, 进而造成的侵蚀作用, 定义为冻融侵蚀^[2]。季节性冻融一般为冬季冻结, 夏季消融。一冻一融对土壤的理化和生物学性质均产生直接或间接影响^[3-4]。

黄土丘陵区地处温带内陆, 年0以下天数约105~125 d, 大致是年总天数的1/3。多年平均年降雨量集中在450~550 mm, 具备季节性冻融作用发生的气候条件^[5]。通常情况下, 该区土壤冻融前即为本年土壤水力侵蚀的结束, 而冻融后是来年土壤水力侵蚀的开始^[6]。有研究表明, 在可蚀条件下, 季节性冻融影响土壤容重、渗透性、

含水量、养分有效性及土壤结构稳定性等, 从而增大土壤侵蚀发生的几率^[7-8]。Kirkby等^[9]研究认为温带地区年土壤流失量的50%以上都发生在冻土层解冻时期。因此, 探讨冻融前后不同处理下土壤性质如何变化一直是土壤、植物和侵蚀等相关学者关注的热点之一。

土壤抗冲性是指土壤抵抗外营力机械破坏作用的能力, 是土壤抗侵蚀性能的重要方面^[10]。在股状水流侵蚀比较发育的黄土丘陵区, 土壤抗侵蚀性能主要依赖于土壤抗冲能力。早在60年代初, 朱显谟院士依据黄土高原土壤侵蚀的特征, 认为土壤抗冲性的研究是揭示黄土高原土壤侵蚀规律的关键^[11]。尽管前人对黄土丘陵区夏、秋季节土壤侵蚀过程作了大量的研究, 但是关于季节性冻融与土壤抗侵蚀之间的关系研究较少^[12]。

基于以上原因, 为了揭示季节性冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响, 本文借助模拟冲刷试验, 选取裸地对照(CK)、黑麦草传统密度(LD)和加倍密度(HD)3种处理, 测定并分析了冻融前后土壤抗冲性及相关物理性质变化。以期对完善土壤侵蚀机理提供一定的参考价值。

收稿日期: 2013-05-06 修订日期: 2013-07-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300)。

作者简介: 李强(1986-), 男, 陕西子洲人, 博士生。主要研究方向: 土壤侵蚀。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

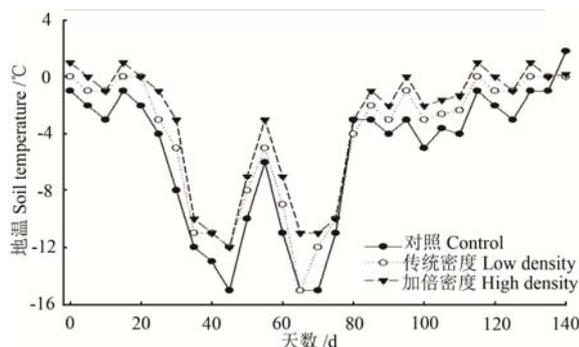
Email: liqiang1011@gmail.com

*通信作者: 刘国彬(1958-), 男, 博士, 陕西榆林人, 研究员, 主要从事流域生态系统管理研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: gblu@ms.iswc.ac.cn

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本试验是在中国科学院安塞水土保持实验站(109°19'23"E, 36°51'30"N)进行,属于典型的黄土丘陵区。年平均降雨量为505.3 mm,年平均气温为8.8℃,一月份平均气温为-7℃。试验期间不同处理表层土壤(5 cm)温度见图1。土壤温度测定是自冻融前冲刷试验当天开始,每隔5 d测定1次,测定时间为当天下午18:00。每种处理均设置2个重复地温计测定地温(HY-1型号,南京海洋仪表厂)。



注: 试验期间为2012年10月26日至2013年3月23日。
Note: Experiment measurement was from 26th Oct., 2012 to 23rd Mar., 2013

图1 试验期间各处理表层土壤(5 cm)温度变化
Fig.1 Changes in topsoil temperature during experiment span

供试土壤为当地坡耕地表层土壤(<25 cm)。土壤基本性质:土壤类型为黄绵土,粉砂壤土,砂粒(0.05~2.00 mm)质量分数占23.0%,粉粒(0.02~0.05 mm)质量分数占65.2%,黏粒(<0.02 mm)质量分数占11.8%,pH值8.5,有机质质量分数3.77 g/kg。

1.2 试验处理和样品采集

本文设置了裸地对照(CK)、黑麦草传统密度水平LD(low density, 2.1 g/m²)和加倍密度水平HD(high density, 4.2 g/m²)3个处理。每个处理4个重复。试验在小区内进行,坡度为15°,小区规格为1.8 m×0.6 m×0.3 m,共12个小区。供试土壤经自然风干、过5 mm筛后按容重1.28 g/cm³分层装土。待装土全部结束后在室外自然状态下放置一周,土壤适应土槽环境后测定土壤容重、崩解速率等指标作为初始值。在此过程中避免土壤受到外界干扰,如压实、降雨等。然后,在每一个土槽表面铺一层细沙布,充分洒水后静置,待土壤潮湿而不粘结时(2012年5月6日)按试验设计播种黑麦草籽。试验期间各个小区的杂草是通过人工及时拔掉处理,在此过程中尽量减少对土壤的扰动。冻融前黑麦草最大根系分布深度在处理LD和HD分别为15.1和13.9 cm。冻融前后(即表层土壤温度降

到0前和升至0后)土壤样品采集时间分别为2012年10月26日和2013年3月23日。

土壤抗冲性指标的获取采用原状土冲刷法。用20 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高)的特制取样器在土槽内采集原状土样,取样深度为10 cm,每个处理4个重复。即在每个土槽内采集一个待冲刷样品。为了减少采样过程对土壤的扰动,用锋利的剖面刀在取样器外缘沿土壤表面接触处垂直下切,引导取样器切入土壤。然后,铲掉取样器周边土壤,将取样器完整取出,用剖面刀沿取样器底部将土样削平后垫上带小孔铝制底片,再用保鲜膜密封,尽力避免土样流失。另外,在搬运取样器过程中,将带有铝制底片的一端朝下,保持取样器内土样完整。

1.3 模拟冲刷及指标测定

将带回的取样器连同铝制底片置于水盘中,水面高度为5 cm,水是从铝制底片小孔自下而上浸润土壤12 h直至达到饱和。然后,将饱和的土样轻轻置于铁架台上8 h去除土壤重力水后进行抗冲试验。冲刷槽尺寸为2 m×0.1 m(长×宽,见图2)^[13],坡度为15°,用当地标准径流小区(20 m×5 m)产生的最大径流量来计算单位流量为冲刷流量,即4.0 L/min,冲刷时间为15 min。自产流后的前3 min用径流桶每1 min收集一次水流泥沙样,随后每2 min收集1次径流,共9次取样。冲刷结束后称量各个桶内的径流泥沙量,然后将径流桶静置澄清,泥沙沉淀完全后倒掉上层清液,剩余泥水样转移至铁盒内,置于烘箱中105℃烘干称质量,测定冲刷泥沙质量(g)。在本试验过程中部分取样器的土壤因水流冲刷作用发生垂直穿透现象,当土壤被穿透立即停止冲刷,表示本次冲刷失败。抗冲系数计算为每冲刷掉1 g的烘干土所需水量,用AS(anti-scourability)表示, L/g。AS愈大,土壤的抗冲性愈强。

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

式中, f 为冲刷流量, L/min; t 为冲刷时间, min; W 烘干泥沙质量, g

植物根系生物量的获取是将做完抗冲试验的含根土壤样品在筛网上反复冲洗,将土壤中所有的根系洗出,置入80℃烘箱中,烘干至恒定质量(g),再分别称其质量并记录。根系密度,用RD(root density)表示,计算采用公式(2)

$$RD = \frac{M_D}{V} \quad (2)$$

式中, M_D 为根系烘干质量, kg; V 为采样器体积, m³。

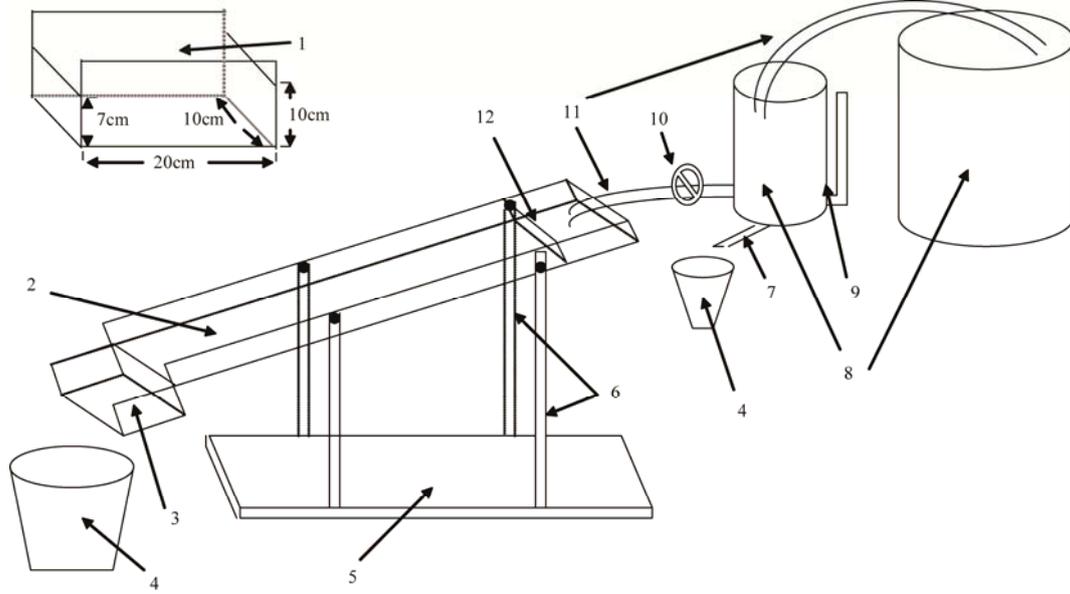
土壤容重采用环刀法测定。土壤水稳性团聚体

采用沙维诺夫湿筛法测定^[14]。土壤抗剪强度采用南京土壤仪器厂有限公司制造的 ZJ-1 型大型直接剪切仪。直剪试验的剪切速率为 0.8 mm/min，分别施加 100、200、300 和 400 kPa 4 种垂直压力，量力环率定系数分别为 1.784、1.703、1.799 和 1.793。土壤黏聚力 C 和内摩擦角 φ 的计算采用库伦定律^[15]。土壤崩解速率 (cm^3/min) 计算采用蒋定生等设计的浮筒法原理^[16]。试验观测时间为 30 min，其

计算采用公式 (3)

$$v = a \frac{l_0 - l_t}{t} \quad (3)$$

式中, v 为单位时间内所崩解的试样体积, cm^3/min ; l_0 为试样浸入水中时浮筒的起始读数; l_t 为试样完全崩解时或第 30 分钟时的浮筒读数; t 为试样完全崩解时的时间或者是土样未崩解完的第 30 分钟时间, min; a 为体积换算系数, 为 1.276。



注: 1. 取样器 2. 冲刷槽 3. 土样室 4. 径流桶 5. 支撑板 6. 可调支架 7. 溢水口 8. 储水桶 9. 玻璃管 10. 阀门 11. 供水管 12. 缓冲水槽。
Note: 1. Sampling box 2. Scouring flume 3. Chamber for soil samples 4. Runoff bucket 5. Pedestal and bracket 6. Support for adjusting gradient 7. Surplus water outlet 8. Storage reservoir 9. Glass pipe 10. Stopcock 11. Water-supply pipe 12. Water buffer chamber.

图 2 土壤抗冲试验装置图

Fig.2 Schematic diagram of soil anti-scourability experimental set-up (not to scale)

1.4 参数确定及方法

在本研究中, 假定季节性冻融前后土壤流失量的变化是由冻融、根系或二者共同作用引起的。为了易于比较, 本文选取冻融前对照小区泥沙流失量 (CS_b) 为参照。于是, 冻融对土壤流失量的影响在对照小区 ($Y_1, \%$) 和含根小区 ($Y_2, \%$) 可以通过公式 (4) 和公式 (5) 计算得到。当 Y_1 (或 Y_2) 为正, 且数值越大意味着冻融作用增加 CK 小区 (或含根小区) 泥沙流失量越大, 反之则越小。同时, 冻融和根系对土壤流失量的共同影响 ($Y_3, \%$) 可以通过公式 (6) 计算得到。

$$Y_1 = \frac{CS_a - CS_b}{CS_b} \times 100\% \quad (4)$$

$$Y_2 = \frac{RS_a - RS_b}{RS_b} \times 100\% \quad (5)$$

$$Y_3 = \frac{RS_a - CS_b}{CS_b} \times 100\% \quad (6)$$

式中, CS_b 和 CS_a 分别代表冻融前后对照小区泥沙

流失量, g; RS_b 和 RS_a 分别代表冻融前后含根小区 (LD 或 HD) 泥沙流失量, g。当 Y_3 数值为负, 且绝对值越大意味着冻融和根系对减少土壤流失量的共同影响越大, 反之则越小。数据分析采用 SPSS15.0 统计软件, 差异显著性检验采用 LSD 法 ($P < 0.05$, 双尾)。

2 结果与分析

2.1 不同处理冻融前后土壤物理性质及根系密度的变化

土壤环境变化能够影响土壤结构性^[17]。从表 1 可以看出, 初始土壤因人工混合过筛扰动, 土壤性质在不同处理小区均无显著差异 ($P < 0.05$)。随着黑麦草的生长, 在根系的作用下, 与 CK 相比, 处理 LD 和 HD 的土壤物理性质发生了变化, 不同处理之间土壤容重 (除冻融后)、 $>1 \text{ mm}$ 团聚体含量、黏聚力、崩解速率和根系密度均达到统计学显著差异。

与初始土壤容重相比, 含根小区土壤容重在冻

融前略有下降,冻融后有所增加。土壤水稳性团聚体是反映土壤抵抗水力分散的能力,是土壤抗侵蚀性的评价指标之一^[18]。良好的土壤结构往往依赖于1~10 mm水稳性团聚体^[19]。与冻融前相比,黑麦草传统密度处理(LD)和加倍密度处理(HD)土壤1~10 mm水稳性团聚体含量略有下降(4.7%和2.4%)。土壤抗剪强度从土壤侵蚀的角度来讲是指在剪应力的作用下,土壤颗粒或土壤团粒因持续剪切而引起的剪切变形及变形破坏的阻力。当降雨冲击力超过土壤抗剪强度时便产生一个剪切面,引发土壤的分解作用,从而导致土壤侵蚀的发生^[20]。土壤黏聚力(C)是土壤抗剪强度的表征参数之一。通常情况下,土壤C值越大,土壤颗粒内部及颗粒间的凝聚力就越大,土壤抗冲性越强^[16]。从表1可

以看出,与冻融前相比,土壤C在处理LD下降了7.5%,而在处理HD却增加了6.8%。但其变化均未达到统计学显著差异水平($P < 0.05$)。

土壤崩解是指土壤在水中发生分散、碎裂、塌落或强度减弱的现象。土壤崩解速率越大,意味着土壤在水中被分散、碎裂、塌落得越快,给径流提供的松散物质就越多,产生土壤侵蚀的几率就越大^[21]。与冻融前相比,土壤崩解速率在处理CK和LD上显著增加,分别增加了20.6%和18.8%,而在处理HD增加了7.3%,没有达到统计学显著差异水平($P < 0.05$)。这一结果表明季节性冻融能够通过增加土壤崩解速率来提高土壤侵蚀的几率。不同处理中根系密度在冻融前后均无显著变化($P < 0.05$)。

表1 冻融前后不同处理土壤物理性质及根系密度的变化
Table 1 Changes in soil physical properties and root density in fallow and root pans

处理 Treatment	容重 Bulk density/(g kg ⁻¹)			> 1 mm 团聚体质量分数Aggregate /%			黏聚力 Cohesion/kPa		
	初始值IV	冻融前B _{FT}	冻融后A _{FT}	初始值IV	冻融前B _{FT}	冻融后A _{FT}	初始值IV	冻融前B _{FT}	冻融后A _{FT}
对照CK	1.28 ± 0.02 a	1.25 ± 0.03 a	1.26 ± 0.02 a	44.3 ± 2.2 a	43.5 ± 2.9 a	45.2 ± 2.3 a	--	2.1 ± 0.13 a	2.4 ± 0.18 a
传统密度 Low density	1.28 ± 0.02 a	1.17 ± 0.03 b	1.24 ± 0.04 a	45.7 ± 1.9 a	66.8 ± 2.1 b	63.7 ± 3.2 b	--	4.0 ± 0.20 b	3.7 ± 0.23 b
加倍密度 High density	1.28 ± 0.01 a	1.19 ± 0.02 b	1.22 ± 0.03 a	44.6 ± 2.0 a	74.3 ± 1.9 c	72.5 ± 2.4 c	--	4.4 ± 0.19 c	4.7 ± 0.15 c

注: IV-initial value, B_{FT}-before frozen-thaw, A_{FT}-after frozen-thaw; 数据为4个重复的平均值±标准差。同一列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。土壤指标初始值和冻融前后数值的测定时间分别是2012年5月6日、10月27日和2013年3月24日。下同。

Note: Data were means of four replicates ± standard deviations. Different small letters within same column indicate significant at $P < 0.05$. Values of soil indicators were determined on 6th May, 2012, 27th Oct., 2012 and 24th Mar., 2013, respectively. The same as below.

表2 冻融前后不同处理的土壤崩解速率和根系密度的变化
Table 2 Changes of disintegration and root density in fallow and root pans

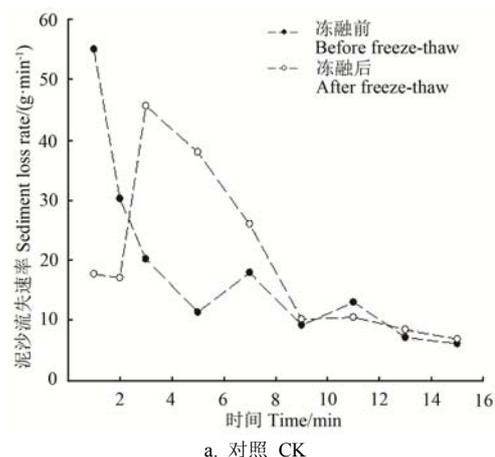
处理Treatment	崩解速率 Disintegration (cm ³ ·min ⁻¹)			根系密度 Root density/(kg·m ⁻³)		
	初始值IV	冻融前B _{FT}	冻融后A _{FT}	初始值IV	冻融前B _{FT}	冻融后A _{FT}
对照CK	1.29 ± 0.14 a	1.03 ± 0.07 b	1.21 ± 0.08 a	--	--	--
传统密度 Low density	1.31 ± 0.11 a	0.69 ± 0.04 b	0.85 ± 0.09 b	--	2.24 ± 0.32 a	2.07 ± 0.25 a
加倍密度 High density	1.24 ± 0.09 a	0.55 ± 0.03 c	0.60 ± 0.04 c	--	3.08 ± 0.24 b	3.00 ± 0.17 b

2.2 不同处理冻融前后土壤流失特征

从图3可以看出,不同处理之间泥沙流失规律因冻融作用发生了变化。冻融前泥沙流失量在冲刷的前3 min约占CK、LD和HD处理总泥沙流失量的44.8%、67.6%和46.5%,而冻融后分别为28.5%、60.5%和45.8%。在CK小区,冻融前随着冲刷时间的变化泥沙流失速率从55.1 g/min快速减小至11.3 g/min,而后趋于稳定下降。

与冻融前相比,冻融后CK小区泥沙流失速率在冲刷2 min后快速增加,约在冲刷的3 min后开始下降,而8 min后趋于稳定。主要产沙时间集中在冲刷的第3~8分钟,占总泥沙流失量的68.9%。与CK相类似,冻融后处理LD和HD泥沙流失速率分别在冲刷的第3~10分钟和第3~5分钟均高

于冻融前的泥沙流失速率。可见,季节性冻融作用延后了3个处理的主要产沙时间,增加了冲刷中途泥沙流失速率。



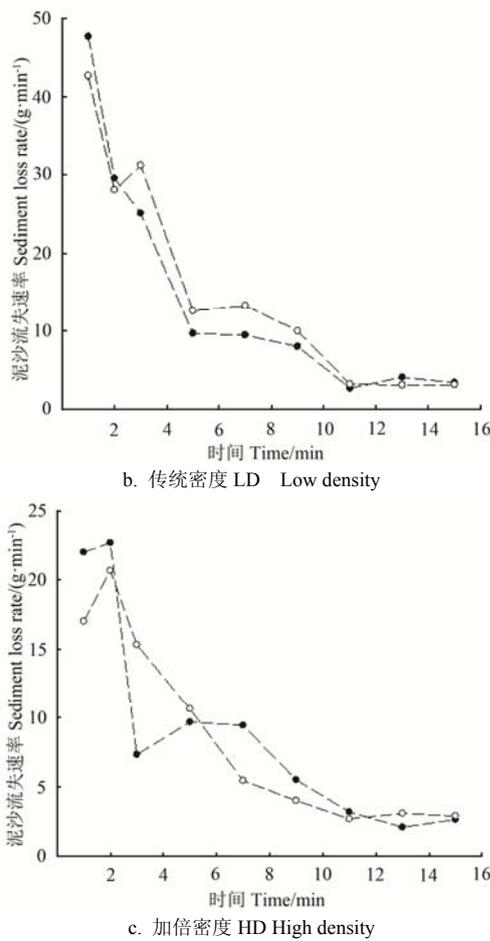


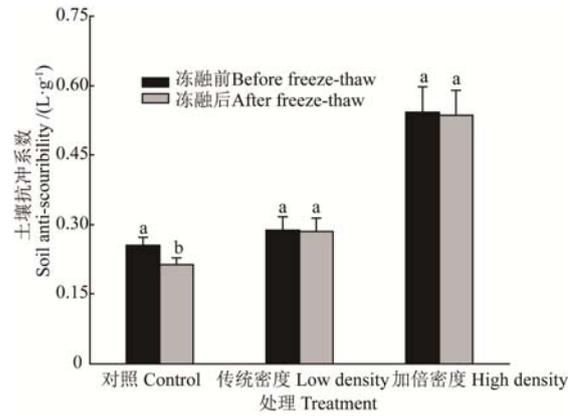
图 3 冻融前后不同处理泥沙流失特征

Fig.3 Dynamics of sediment loss within the scouring time in treatments control, low density, and high density of ryegrass planting before and after a freeze-thaw.

2.3 不同处理冻融前后土壤抗冲性变化

图 4 显示了不同处理冻融前后土壤抗冲系数的变化。由图可以看出，土壤抗冲系数在对照 CK 处理上与冻融前相比发生显著下降，约下降 16.9%，而处理 LD 和 HD 与冻融前相比，冻融后土壤抗冲系数分别下降了 0.9%和 1.2%，均未达到统计学显著差异水平。

植物根系是影响土壤抗冲性能的重要指标^[18]。从表 3 可以看出，与冻融前相比，冻融作用分别增加对照 CK、LD 和 HD 泥沙流失量为 19.41%、6.70%和 1.87%。与对照 CK 相比，冻融和根系共同作用减少了土壤流失量，在 LD 和 HD 处理上分别减少 3.72%和 49.39%。这一结果说明不同根系密度在冻融过程中对土壤温度和水的响应不同^[2]。可见，季节性冻融能够降低土壤抗冲能力，增加模拟冲刷的总泥沙流失量。根系在季节性冻融过程中减沙效应明显，但这种效应受冻融作用影响较大。



注：同一处理不同字母表示差异显著。

Note: Different letters within same treatment indicate significant at $P < 0.05$.

图 4 不同处理冻融前后抗冲性变化

Fig.4 Soil anti-scourability in different treatments before and after a frozen-thaw process

表 3 不同处理冻融和根系对泥沙流失量的影响

Table 3 Roots and freeze-thaw effect on sediment reduction in different treatments

参数 Parameters	对照 Control	传统密度 Low density	加倍密度 High density
$Y_1/\%$	+ 19.41	--	--
$Y_2/\%$	--	+ 6.70	+ 1.87
$Y_3/\%$	--	- 3.72	- 49.39

注： Y_1 和 Y_2 分别代表对照小区和含根小区冻融对泥沙流失量的影响； Y_3 代表冻融和根系对土壤流失量的共同影响；“+”和“-”分别代表泥沙增加和减少。

Note: Y_1 and Y_2 present freeze-thaw effect on sediment loss in fallow and root pans; Y_3 presents combined effect of root and freeze-thaw on sediment reduction within winter; ‘+’ and ‘-’ denote increase and decrease of sediment.

3 讨论

在可蚀条件下，冻层土壤解冻时，受季节的影响，土壤的侵蚀速率会发生变化^[3]。据 Kirby 和 Mehuy 研究发现，在温带地区年土壤流失量的 50%以上都发生在冻土层解冻时期^[9]。中国东北黑土区季节性冻融促进了土壤有机碳的矿化，降低了土壤抗剪强度，增大了土壤沟蚀发生的几率^[22]。本研究表明，季节性冻融延后了 3 个处理的主要产沙时间，降低了土壤抗冲能力，增加了冲刷中途泥沙流失速率和总泥沙流失量。原因可能为冻结过程中随着土中孔隙水和外界水源补给水结晶而形成多种形式的冰侵入体，引起土体体积增大，导致冻胀发生。到了春季，冻结后的土体从表层开始融化，而冻土层的下层尚未融解，水分无法下渗，使土体处于饱和及过饱和状态，促进了地表物理结皮的产生^[23-24]。在模拟冲刷过程中，当物理结皮被冲刷后，土壤流失量呈现突然增大的趋势。这可能是冲刷中途泥沙流失速率增加的主要原因。然而，自然降雨过程中，首先是雨滴击溅地表，造成地面糙度的变化，这种变

化能够为径流冲刷提供松散物质。但本文缺少对雨滴击打过程的模拟研究,这在一定程度上可能会低估土壤流失量^[25]。

冻融交替是作用于土壤的非生物应力,对土壤的理化和生物学性质均产生直接或间接影响^[7]。目前,冻融作用对土壤结构稳定性的影响说法不一。有人认为冻融会降低土壤结构稳定性,原因是土壤冻结时含水量是影响土壤团聚体稳定性的重要因素,当含水量大于 20% 时,团聚体稳定性降低^[26]。而另一些学者则认为 1 次冻融交替的发生不会影响团聚体的稳定性,而多次冻融交替作用能降低压实土壤团聚体的稳定性,却增加野外表层团聚体的稳定性^[2]。还有研究认为季节性冻融对土壤结构稳定性影响较小,原因是土壤的不同形态以及不同土壤含水量(15%和 25%)之间不存在黏聚力的差异^[3]。本研究发现季节性冻融前后表层土壤容重、水稳性团聚体含量在 3 个处理中均未发生显著变化($P < 0.05$),土壤黏聚力略有下降,而崩解速率较大增加。造成以上研究结果的不同可能是由于土壤类型^[27]、试验处理^[2]、冻结速率^[8]和土壤水分含量^[28]等差异引起的。

另外,土壤是由固相、液相和气相组合的三相物质。而季节性冻融是由于温度和水分的频繁变化造成的冻融交替,这种交替作用势必会引起土壤、岩石性质发生变化^[1]。黄绵土是在干燥气候条件下形成的一种疏松多孔,具有柱状节理的黄色粉性土。母质为黄土性物质,矿物成分有碎屑矿物、粘土矿物和自生矿物 3 类。化学成分以 SiO_2 , CaO 占优势。土壤颗粒中细沙粒,粉粒质量分数可以达到 70% 左右,总孔隙度为 50% 及以上。这种独特的矿物组成与化学成分导致黄绵土具有比热小,土温变化大等特性^[29]。因此,当土壤发生冻结时,土粒间孔隙水形成多种形式的冰侵入体,引起土体体积增加。随着地温的回升,膨胀的土体开始融化并形成较大孔隙,造成土壤的抗剪强度和抗蚀能力降低^[30-31]。因此,关于季节性冻融过程中土壤微结构和表层糙度的动态变化研究将有利于进一步揭示冻融土壤的抗侵蚀机理。

4 结 论

1) 季节性冻融能够改变土壤物理性质,降低土壤结构稳定性。冻融前后表层土壤容重、团聚体含量和根系密度在 3 个处理中均未达到统计学显著差异($P < 0.05$),土壤黏聚力略有下降,而崩解速率与冻融前相比,在 3 个处理中分别增加了 20.6%、18.8% 和 7.3%。

2) 冻融延后了 3 个处理的主要产沙时间,降

低了土壤抗冲能力,增加了冲刷中途泥沙流失速率。冻融前泥沙流失量主要发生在冲刷的前 3 min,而冻融后主要泥沙流失量均有所延后。与冻融前相比,冻融后对照 CK 的土壤抗冲系数发生显著下降,而黑麦草传统密度处理 LD 和加倍密度处理 HD 分别下降了 0.9% 和 1.2%。

3) 根系在冻融过程中减沙效应明显,但此效应受冻融影响较大。与冻融前相比,冻融分别增加处理 CK 和 LD 的泥沙流失量为 19.41% 和 6.70%,但对处理 HD 影响较小。冻融和根系共同作用在 LD 和 HD 处理上分别减少土壤流失量为 3.72% 和 49.39%。

[参 考 文 献]

- [1] 景国臣. 冻融侵蚀的类型及其特征研究[J]. 中国水土保持, 2003, 10(4): 17-19.
Jing Guocheng. Study on types of freeze-thaw erosion and its characteristics[J]. Soil and Water Conservation, China, 2003, 10(4): 17-19. (in Chinese with English abstract)
- [2] 范昊明, 蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 4(1): 50-55.
Fan Haoming, Cai Qiangguo. Review of research progress in freeze-thaw erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 4(1): 50-55. (in Chinese with English abstract)
- [3] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(5): 977-986.
- [4] 王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2361-2366.
Wang Lianfeng, Cai Yanjiang, Xie Hongtu. Relationship of soil physical and microbial properties with nitrous oxide emission under effects of freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10): 2361-2366. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 1-5.
Wang Suiji. Characteristics of freeze and thaw weathering and its contribution to sediment yield in middle yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报, 1998, 12(1): 93-96.
Liu Guobin. Study on soil anti-scourability and its mechanism[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 12(1): 93-96. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王娇月, 宋长春, 王宏伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 442-452.
Wang Jiaoyue, Song Changchun, Wang Xianwei, et al. Progress in the study of effect of freeze-thaw progresses

- on organic carbon pool and microorganisms in soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 442—452. (in Chinese with English abstract)
- [8] Zheng Xiuqing, Van Liew M W, Flerchinger G N. Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze-thaw period[J]. *Soil Science*, 2001, 166(1): 3—10.
- [9] Kirkby M J. Modeling water erosion processes. In: Kirkby, M J, Morgan, R P C (Eds.), *Soil Erosion*[M]. Wiley, Chichester. Great Britain, 1980, pp: 183—196.
- [10] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2007, 32(9): 1323—1345.
- [11] 朱显谟. 黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J]. *土壤学报*, 1960, 8(2): 110—120.
Zhu Xianmo. Effect of vegetation factor on soil and water loss in the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1960, 8(2): 110—120.
- [12] 鄂竟平. 中国水土流失与生态安全综合科学考察总结报告[J]. *中国水土保持*, 2008, 12(2): 3—6.
E Jingping. A summary report on soil and water loss, and ecological safety[J]. *Soil and Water Conservation, China*, 2008, 12(2): 3—6. (in Chinese with English abstract)
- [13] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3271—3275.
Zhou Zhengchao, Shanguan Zhouping. Soil anti-scourability during vegetation succession of Ziwuling secondary forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3271—3275.
- [14] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of soil erosion losses[J]. *Society Agronomy. American*, 1936, 28: 337—351.
- [15] Schuppener. Laboratory method for direct shear tests. Recommendation of the ISSMGE for geotechnical testing[M]. Beuth Verlag GmbH. Germany. 1999: 87—92.
- [16] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 黄土高原土壤崩解速率变化规律及影响因素研究[J]. *水土保持通报*, 1995, 15(3): 20—27.
Jiang Dingsheng, Li Xinhua, Fan Xingke, et al. Research on the law of soil disintegration rate change and its effect factors on the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, 15(3): 20—27.
- [17] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. *Catena*, 2011, 84(1/2): 70—78.
- [18] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 153—159.
Li Qiang, Liu Guobin, Xu Mingxiang, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(10): 153—159. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨玉梅, 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 64—68.
Yang Yumei, Zheng Zicheng, Li Tingxuan. Soil anti-scourability dynamic variation characteristics and its influencing factors under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [20] 湛芸, 祝亚军, 何丙辉. 三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 42—45.
Chen Yun, Zhu Yajun, He Binghui. Effect of root system of Bermuda Grass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) on slope reinforcement and soil erosion resistance in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈安强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 108—113.
Chen Anqiang, Zhang Dan, Xiong Donghong, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(5): 108—113. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张永光, 伍永秋, 刘宝元. 东北漫岗黑土区春季冻融期浅沟侵蚀[J]. *山地学报*, 2006, 24(3): 306—311.
Zhang Yongguang, Liu Baoyuan. Ephemeral gully erosion during the spring freeze-thawing period in black soil rolling-hill regions of northeast China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(3): 306—311. (in Chinese with English abstract)
- [23] 汪恩良, 介玉新, 常俊德, 等. 冻融循环后筋土复合体加载破坏试验研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(4): 914—921.
Wang Enliang, Jie Yuxin, Chang Junde, et al. Loading test of reinforcement-soil complex suffered freeze-thaw cycling[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(4): 914—921. (in Chinese with English abstract)
- [24] Ran Qihua, Shi Zhinan, Fu Xudong, et al. Impact of rainfall movement on soil crust development[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27: 439—450.
- [25] 吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 40—45.
Wu Pute, Zhou Peihua. Research on the sheet flow Erosion of loess surface[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil Conservation*, 1996, 2(1): 40—45.
- [26] Formanek G E, McCool D K, Papendiek R I. Freeze-thaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(6): 1749—1752.
- [27] Sirgrun H K, Lillian O. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. *Catena*, 2006, 67(3): 175—182.
- [28] Chen Siyang, Ouyang Wei, Hao Fanghua, et al. Combined impacts of freeze-thaw processes on paddy

- land and dry land in Northeast China[J]. *Science of Total Environment*, 2013, 457(1): 24–33.
- [29] 朱显谟, 祝一志. 试论中国黄土高原土壤与环境[M]. 科学出版社, 1991: 273–279.
- Zhu Xianmo, Zhu Yizhi. An introduction to soil and environment in Chinese Loess Plateau[M]. Science Press, 1991: 273–279.
- [30] 范昊明, 张瑞芳, 周丽丽, 等. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J]. *干旱区资源* 与环境, 2009, 23(6): 48–53.
- Fan Haoming, Zhang Rui Fang, Zhou Lili, et al. Impact of climate change on freeze-thaw function and freeze-thaw erosion in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(6): 48–53. (in Chinese with English abstract)
- [31] Lawrence W G. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill potential impacts on soil erosion[J]. *Geomorphology*, 2000, 32(1/2): 147–160.

Effect of seasonal freeze-thaw on soil anti-scourability and its related physical property in hilly Loess Plateau

Li Qiang¹, Liu Guobin^{1,2*}, Xu Mingxiang^{1,2}, Sun Hui³, Zhang Zheng², Gao Liqian¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Ansai Field Experiment Station of the Chinese Academy of Sciences, Ansai 717400, China)

Abstract: Seasonal freeze-thaw plays a significant role in soil properties as well as the management of soil and water resources in northern latitudes. Soil erodibility primarily relies on soil anti-scourability (AS) in the concentrated flow erosion zones of the Loess Plateau. An understanding of the characteristics of freeze-thaw soil is essential for erosion essence in the seasonal freeze-thaw area. The primary goal of this study was to evaluate the differences in soil AS and its related freeze-thaw-induced soil physical properties, as well as root density before and after a cycle of freeze-thaw.

For this purpose, a simulated scouring experiment was conducted on a loam soil with sand content 23.0%, silt content 65.2% and clay content 11.8%. Three treatments considered were: 1) fallow (CK), 2) low density (LD) and 3) high density (HD) of ryegrass. Each treatment had four replicates. Rectangular, undisturbed soil samples (20 cm × 10 cm × 10 cm) were installed in the fallow and root pans and were fitted with a hydrological flume (2 m × 0.10 m). The flume contained an opening at its lower base equal to the size of metal sampling box, so that the soil surface of soil sample was at the same level as the flume surface. The space between the sample box and the flume edge was sealed with painter's mastic to prevent edge effect. The slope of the flume bottom could be varied. Clear tap water flow was applied at 4.0 L/min rate discharge on a washing flume slope of 15° for 15 min. During the 15 minutes of each experiment, samples of runoff and detached soil were collected every 1 min in the first 3 min and every 2 min subsequently using 10 L buckets for determining sedimentation. Soil physical properties determined were soil bulk density (g/cm³), water-stable aggregate content (%), cohesion C, and disintegration rate (cm³/min). Root biomass was obtained by the harvest method and dried in an oven. The first samples were taken on October 26, 2012, and last ones were taken on March 23, 2013. The results indicated that no significant changes were found in soil bulk density, water-stable aggregate content, and root density after a cycle of freeze-thaw compared with those before freeze-thaw. Comparatively, soil cohesion decreased slightly, whereas soil disintegration rate increased by 20.6%, 18.8%, and 7.3% in treatments CK, LD, and HD respectively as compared with those before freeze-thaw. In addition, freeze-thaw delayed the occurrence of main sediment production, reducing soil AS, as well as increasing both the rate of sediment loss in the middle scouring time and the total sediment yield. Among the treatments, compared with those before freeze-thaw, the freeze-thaw increased sediment by 19.41% and 6.70% in treatments CK and LD, but there was little effect in HD. The combined effect of root biomass and freeze-thaw in sediment reduction was 3.72% and 49.39% in the LD and HD treatments, respectively. The findings may provide a supplement for understanding the erosion mechanisms and provide guidance for management strategies dealing with seasonal freeze-thaw areas.

Key words: soils, erosion, physical properties, seasonal freeze-thaw, root, soil anti-scourability, hilly Loess Plateau

(责任编辑: 刘丽英)