模拟降雨下前期含水量对冻融坡面产流产沙过程的影响

段金晓,李 鹏,李占斌,任宗萍,王 添,汤珊珊,苏远逸,程圣东

(西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,西安 710048)

摘要:为了探究不同前期含水量条件下冻融作用对坡面降雨侵蚀的影响,采用室内冻融和人工模拟降雨方法研究了不同含水量条件下冻融坡面与未冻融坡面的降雨侵蚀特征。结果表明:黄土坡面的产流时间随前期含水量增大呈先增大后减小的规律,冻融作用使黄土坡面产流时间滞后,其中含水量为 20%的坡面经过冻融作用滞后 62.50%,最为明显。在产流过程中,20%含水量的冻融坡面比未冻融坡面产流总量低 9.14%存在极显著性差异($P<0.01$)。在产沙过程中,20%和 25%含水量的冻融坡面比未冻融坡面产沙总量减小 28%,存在极显著性差异($P<0.01$);20%和 25%含水量的冻融坡面与未冻融坡面的可蚀性相差最明显。综上可以得出含水量为 20%时冻融作用对坡面产流时间和产流过程影响最显著;含水量为 20%和 25%时冻融作用对坡面产沙过程和可蚀性 K 值影响最显著。含水量为 20%时产沙量最小,可蚀性最低,可将 20%作为黄土最优含水量。

关键词:前期含水量;冻融;模拟降雨;可蚀性

中图分类号:S157.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-2242(2017)06-0073-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.012

Effect of Pre-period Water Content on Freeze and Thaw of Slope Under Simulated Rainfall

DUAN Jinxiao, LI Peng, LI Zhanbin, REN Zongping,
WANG Tian, TANG Shanshan, SU Yuanyi, CHENG Shengdong

(*State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048)

Abstract: In order to explore the effect of freezing and thawing on the rainfall erosion on the slope, a freezing and thawing experiment was conducted in Xi′an, and the characteristics of rainfall erosion on slopes with different water content were studied in the experiment. The results showed that the emergence flow time increased first and then decreased with the increase of the initial water content, and the emergence flow time was delayed by freezing and thawing, specifically, the lag was up to 62.50% when the water content was 20%. The runoff flow on the completed thawed slope with 20% water content was 9.14% lower than that of unfrozen slope($P<0.01$); the sediment yield on the completed thawed slope with 20% and 25% of the water content decreased by 28% than that of the unfrozen slope($P<0.01$). In summary, it can be concluded that the effect of freezing and thawing on the runoff time and runoff process was the most obvious when the water content was 20%, while the effect of freezing and thawing on the sediment yield and erosive K value was the most obvious when the water content was 20% and 25%. When the water content was 20%, the sediment yield was the smallest and the erosibility was the lowest, hence, 20% can be used as the optimal water content of loess.

Keywords: pre-period water content; freezing-thawing; simulated rainfall; erosion

土壤侵蚀是导致土地退化、水土流失的主要原因之一。冻融侵蚀是土壤在冻融作用下发生的一种土壤侵蚀现象,在我国的西北、西南、东北等地区广泛分布[1]。冻融是指土壤温度降到 0 ℃以下后发生冻结,升至 0 ℃以上开始融化的一种物理地质现象[2],冻融过程对土壤的物理和化学性质均产生重要影响[3]。由于冻融侵蚀发生条件恶劣、过程复杂,目前国内外的相关研究甚少,远滞后于水蚀和风蚀的相关研究[4]。但是随着土壤侵蚀研究的不断深入和治理水土流失相关经验的积累,研究人员对冻融侵蚀有了新的认识,认为冻融作用改变土壤的结构和性质,并以水力侵蚀与重力侵蚀等复合作用表现出来,其复合作用带来的土壤侵

收稿日期:2017-05-03

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41330858);国家自然科学基金面上项目(41471226);国家重点研发计划项目(2016YFC0402404)

第一作者:段金晓(1994—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:duanjinxiao@foxmail.com

通信作者:李鹏(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lipeng74@163.com

蚀问题远超过冻融侵蚀本身的危害[5]。

目前国外学者关于冻融作用的研究主要集中在冻融循环对土壤物理性质的影响[6-10]方面，其中Li等[11]认为初始含水量是影响冻融的第一要素，冻融循环是影响冻融的第二要素。Mostaghimi等[12]研究表明土壤类型不同、含水量不同、冻结速率及黏粒含量等不同，冻融作用对其影响的程度也有所不同。国内已有部分学者研究冻融作用对土壤侵蚀的影响[13-16]，大多也集中在冻融循环对土壤物理性质影响方面的研究。其中刘佳等[17]的研究结果表明在春季解冻期，由于冻融作用，黑土坡面土壤解冻不完全、渗透能力差，降雨的侵蚀能力较强，导致这一时期侵蚀严重。

冻融过程与土壤含水量有密切关系，目前关于前期含水量对冻融坡面侵蚀影响方面的相关研究较少，且主要集中在我国东北地区。然而，在我国水土流失最严重的西北黄土高原地区，冻融侵蚀是影响当地水土流失的重要形式之一[15]，相关的研究主要以解冻期不同解冻程度为主，完全解冻条件下前期含水量对侵蚀的影响研究较少。因此本研究以西安黄土为研究对象，基于室内模拟降雨试验，分析不同前期含水量冻融（完全解冻）坡面和未冻融坡面的产流、产沙过程和可蚀性的差异，以期为冻融作用对坡面侵蚀的作用机理提供一定的参考。

1 材料与设计

1.1 试验材料

试验用土采取的是西安郊区的黄土，模拟降雨器采用针管式降雨器。组成部分包括恒压供水箱、供水管道、雨量控制阀和针管式降雨头，流量控制方法参照控制阀后供水管道上的水表，控制阀是为了保证水流均匀稳定，冻土仪器为澳柯玛DW-40W300超低温冰箱。试验土槽为木槽，长、宽、高分别为90，45，15 cm。为确保试验坡面透水性接近天然坡面，在装入土之前要在木槽底部垫一层纱布，然后再装入厚度2 cm的天然沙，最后将黄土（过1 cm孔筛）分层填入达到10 cm厚度，控制容重在（1.2±0.5）g/cm³。

1.2 试验设计

将已经装土完毕的木槽和用环刀采集的样品放入冰箱，在−18 ℃的低温下冰冻12 h，随后取出置于室内解冻12 h。试验开始产流后持续1 h。试验雨强设计为1.0 mm/min，坡度为15°，坡长为0.9 m，降雨空间分布均匀度控制在80%以上。控制5种初始含水量分别为（10.0±1.0）%，（15.0±1.0）%，（20.0±1.0）%，（25.0±1.0）%，（30.0±1.0）%。用环刀采集2个样品来测定坡面土壤容重。

试验于2015年4月10日至5月8日在西北水资源与环境生态教育部重点实验室雨洪侵蚀大厅进行。试验装置见图1。开始降雨前用坡度仪校正坡面坡度，在率定雨强满足试验要求后开始试验。坡面出水口开始产流后，采集出水口3 min全部出水，不间断每3 min采集1次。每次试验结束后，记录采集样品的体积，将采集的样品放入烘箱内烘干得到每3 min的产沙量，用样品总体积减去泥沙体积求得每3 min的产流量。

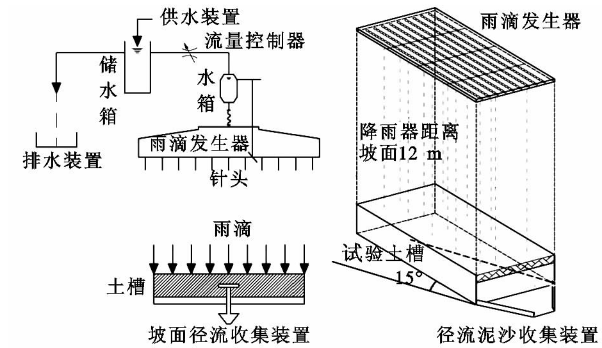

图1 模拟降雨试验装置

1.3 指标计算与数据处理

1.3.1 可蚀性计算 根据通用土壤流失方程（USLE）的经典算法来反求可蚀性 K 值[18]，计算公式为：

$$K=A/(R\cdot LS) \tag{1}$$

式中：A 为土壤流失量（t/km²）；R 为降雨因子（(MJ·mm)/(hm²·h)），采用经典算法计算，$R=EI_{30}$；LS 为地形因子，其中 L 为坡长因子，S 为坡度因子。

1.3.2 增长速率计算 $t_1\sim t_2$ 时段内每分钟产流速率或产沙速率增长的值：

$$v=\frac{q_2-q_1}{t_2-t_1} \tag{2}$$

式中：q_1 为 t_1 时段产流（mL/min）或产沙速率（g/min）；q_2 为 t_2 时段产流（mL/min）或产沙速率（g/min）。

1.3.3 数据处理与分析 采用SPSS 16.0软件进行显著性差异分析，确定前期含水量对坡面冻融的影响，采用Origin 8.5作图软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 前期含水量对冻融坡面产流时间的影响

从表1可以看出，随着含水量的增大，冻融坡面产流时间先增加后减小，未冻融坡面也呈现相同的趋势，但是冻融坡面产流时间明显滞后于未冻融坡面。经过冻融作用，土壤物理状况发生变化[19]，土壤容重减小，孔隙度增大，而土壤容重与初始入渗能力呈幂函数负相关[20]，土壤容重减小，从而增大入渗能力，所以冻融坡面产流时间滞后于未冻融坡面。

通过对5种前期含水量的冻融坡面产流时间进行比较，各含水量间产流时间极差值为3.28 min，含水量在20%～25%范围内，产流时间变化剧烈，相差2.45 min，显然土壤的前期含水量对产流时间影响十分显著。通过对各含水量的冻融坡面与未冻融坡面

产流时间进行比较,发现含水量为 30%时冻融坡面比未冻融坡面滞后 16.23%;25%时只相差 1 s,差异不显著;20%时滞后 62.50%;15%时滞后 23.03%;10%时滞后 15.37%。综上比较,可以看出随着含水量增加,冻融坡面与未冻融坡面产流时间差异先增大后减小,含水量为 20%的冻融坡面产流时间与未冻融坡面差异最明显,可以得出含水量在 20%左右的坡面产流时间受冻融作用影响最显著。

表 1　不同前期含水量坡面产流时间

单位:min

含水量/%	冻融坡面	未冻融坡面
10	5.33	4.62
15	5.93	4.82
20	5.20	3.20
25	2.75	2.77
30	2.65	2.28

2.2　前期含水量对冻融坡面产流的影响

图 2 为 5 种前期含水量冻融坡面的产流过程。从图 2 可以看出,冻融坡面产流量变化特征呈现迅速增长—缓慢增长—渐趋稳定的过程。0～12 min 为迅速增长阶段,10%～30%含水量的冻融坡面产流速率增长速率分别为 11.79,10.41,7.08,8.66,9.69 mL/min。可知 10%和 15%含水量的冻融坡面增长最迅速,25%和 30%含水量的冻融坡面增长相对迅速,20%含水量的冻融坡面增长最缓慢。12～33 min 为缓慢增长阶段,10%和 15%含水量的冻融坡面增长最缓慢,增长速率分别为 4.23,4.75 mL/min。25%和 30%含水量的冻融坡面增长相对缓慢,增长速率分别为 6.03,6.23 mL/min。20%含水量的冻融坡面在此阶段反而呈迅速增长,增长速率为 10.98 mL/min。33 min 后 5 种含水量的冻融坡面产流趋于平稳,增长速率基本不变。经过显著性差异分析,得出前期含水量不同时,冻融坡面产流过程存在极显著性差异($P<0.01$),说明前期含水量对冻融坡面产流过程有较大的影响。

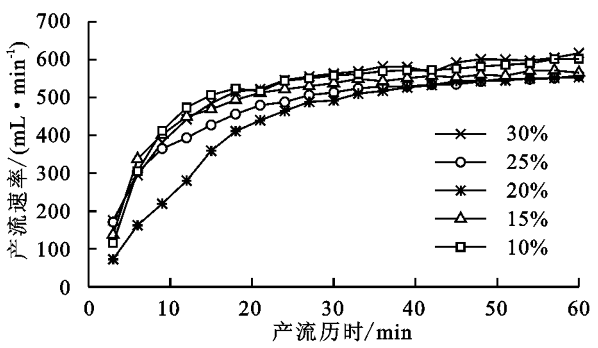

图 2　不同前期含水量冻融坡面产流过程

从图 3 可以看出,15%～25%含水量冻融坡面产流量明显小于未冻融坡面,10%和 30%含水量下冻融坡面比未冻融坡面产流量略高,但差异不明显。以未冻融坡面为对照,含水量为 10%的冻融坡面产流总量高2.17%,含水量为 15%时产流总量低 6.70%,含水量为 20%时低 9.14%,含水量为 25%时低 7.27%,含水量为 30%时高 0.17%,可知 10%和 30%含水量冻融坡面与未冻融坡面产流总量差异较小,含水量为 15%和 25%时差异有所增大,含水量为 20%时产流总量差异最大。说明含水量为 20%的坡面产流总量受冻融作用最显著。

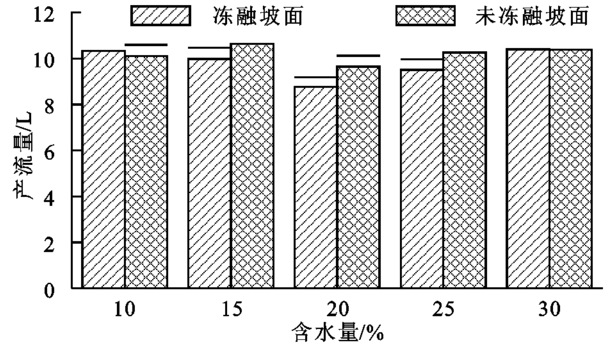

图 3　不同前期含水量产流总量

由图 4 可以看出,冻融坡面产流总量随前期含水量增加呈先减小后增大的趋势,因此采用二次多项式进行拟合。拟合方程为 $y=126.4x^2-51.19x+14.34$,决定系数 $R^2=0.78$,能够较好的反应冻融坡面产流总量与前期含水量的关系。从 5 种前期含水量冻融坡面的产流总量来看,含水量在 10%～20%之间产流总量随含水量增加而降低,含水量在 20%～30%之间产流总量随含水量增加而增加,含水量为 20%冻融坡面的产流总量最小。根据前人研究得到的结论[21],砂黄土从风干土到饱和土之间土壤黏结力并非线性增长,而近似抛物线,在土壤含水量 10%～20%之间存在最大值,土壤冻融能改变土壤物理性质和结构,冻结造成团聚体稳定性的变化影响土壤结构和孔隙连续性,从而影响土壤入渗[22],由前面冻融作用对入渗能力影响的分析可知,20%含水量时冻融效果最明显,所以入渗量增加最多,导致产流总量最低。在 10%含水量时,由于含水量较低,土壤较干,土壤颗粒由于雨滴打击作用,易被雨滴冲击力分散,土壤表面被击实,分散的土壤颗粒会随入渗水的迁移而堵塞表层土壤孔隙,减小了土壤入渗能力,击实作用同样也会削弱土壤的入渗能力[22-24],所以 10%和 15%含水量的冻融坡面大于 20%含水量的冻融坡面产流总量。

从图 5 可以看出,10%和 30%含水量冻融坡面和未冻融坡面的产流过程线近乎重合,15%和 25%含水量略有差异,含水量为 20%时相差最明显。经过 SPSS 显著性差异分析,得出 10%,15%,25%和 30%的含水量下冻融坡面与未冻融坡面产流过程不存在显著性差异,含水量为 20%的冻融坡面与未冻

融坡面存在极显著性差异($P<0.01$),说明含水量为20%的坡面产流过程受冻融作用影响最显著。

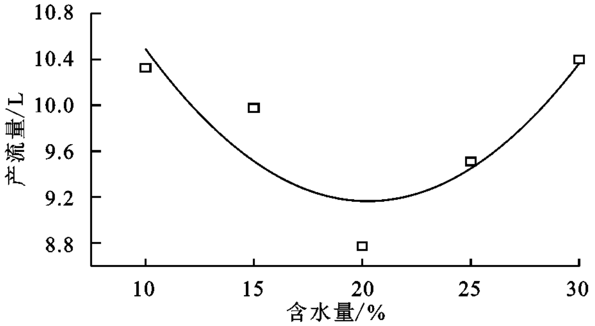

图 4 冻融坡面产流总量拟合线

2.3 前期含水量对冻融坡面产沙过程的影响

由图 6 可知,10%和 15%含水量时冻融坡面产沙呈现先迅速增长后缓慢降低的趋势,0~12 min 迅速增长,增长速率分别为 0.35 和 0.24 g/min,在第 12 min 时达到峰值后缓慢降低。0~12 min 迅速增长是由于 10%和 15%含水量的冻融坡面产流速率较大,而且在低含水量下,土壤质地较为松散,抗蚀性低,表层土壤易被冲走。在第 12 min 时达到峰值后缓慢下降一方面是由于雨滴对土壤表层的夯实作用,土壤不易被冲散;另一方面,由于土壤含水量的增大,抗蚀能力增强[25]。从 10%和 15%含水量的对比来看,可以发现含水量越低,这种现象越明显。

20%,25%和 30% 3 种含水量下冻融坡面产沙过程在 0~40 min 都呈缓慢增长状态,增长速率分别为 0.05,0.04,0.07 g/min,在 40 min 后趋于稳定。对比这 3 条产沙过程线,可以看出随着土壤含水量的增大,产沙量也逐渐增加,这 3 种含水量下冻融坡面产沙过程与 10%和 15%含水量下的冻融坡面有着明显的差异。可以推测前期含水量在 15%~20%范围内存在一个临界含水量。对比 5 种含水量下冻融坡面产沙情况,20%含水量时产沙速率最小。通过 SPSS 软件进行不同含水量下冻融坡面产沙过程的显著性差异分析,得出前期含水量对冻融坡面产沙过程存在极显著性差异($P<0.01$),由此可知前期含水量对冻融坡面产沙过程有较大的影响。

由图 7 可以看出,冻融坡面和未冻融坡面产沙总量从 10%~30%含水量呈"U"形,近似抛物线变化。这是由于黏聚力随含水量增大先升高后降低[26],而黏聚力是影响黄土土壤抗侵蚀能力的内在因素[27],所以产沙总量随着含水量的增大先降低后增大。通过对 5 种含水量冻融坡面产沙总量的比较,可以看出冻融坡面产沙总量与前期含水量类似抛物线变化。因此将冻融坡面产沙总量与前期含水量进行二次多项式拟合,拟合线见图 8。拟合方程为 $y=12031x^2-5210x+686.2$,决定系数为 $R^2=0.99$,能够较好的反应冻融坡面产沙总量与前期含水量的关系。

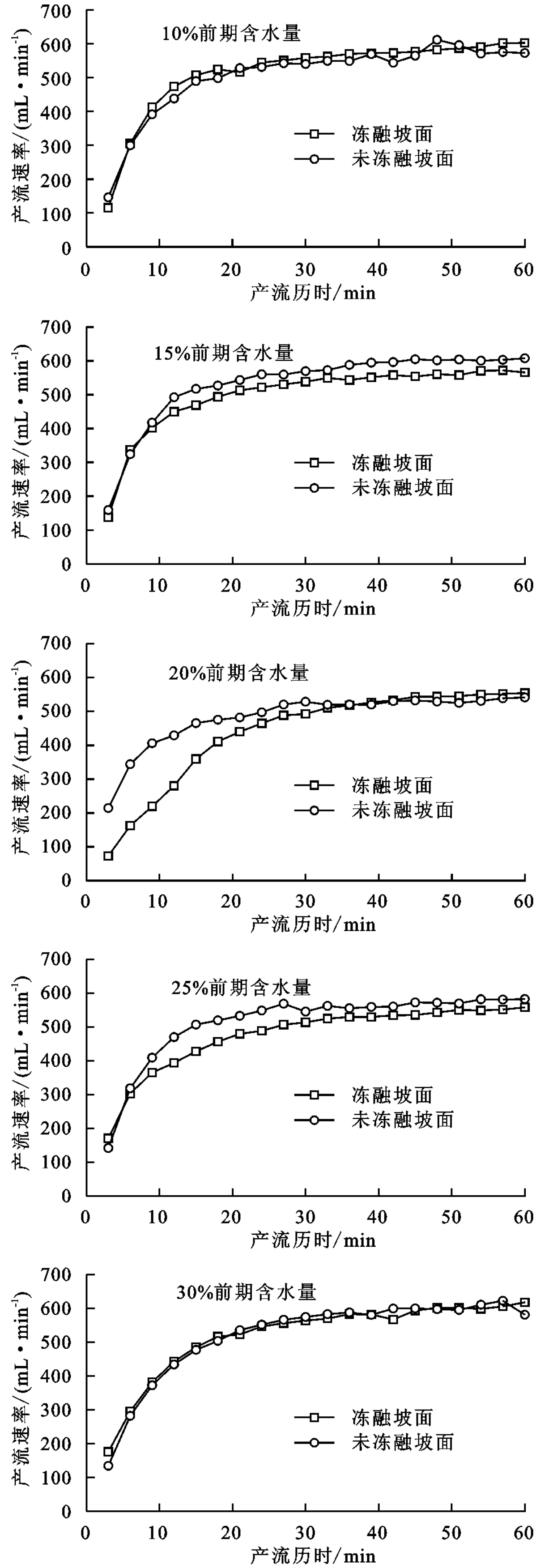

图 5 相同前期含水量冻融坡面与未冻融坡面产流过程线

从图 9 可以看出,10%和 15%含水量下,冻融坡面与未冻融坡面的产沙速率很相似,都呈先迅速增

长,在 11 min 时达到峰值后缓慢下降,40 min 后趋于平稳,但是冻融坡面明显比未冻融坡面产沙速率高,由图 7 可知,含水量为 10%时冻融坡面比未冻融坡面产沙总量高 6.62%,含水量为 15%时高 8.67%。

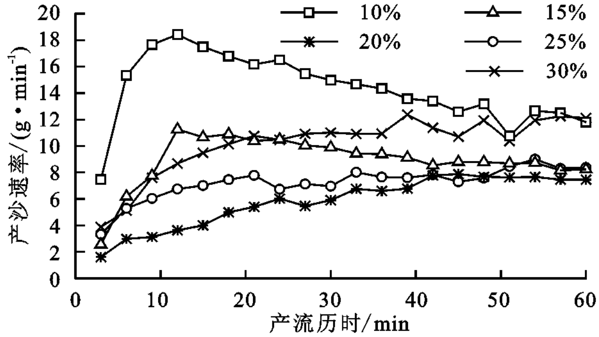

图 6　不同前期含水量冻融坡面产沙过程线

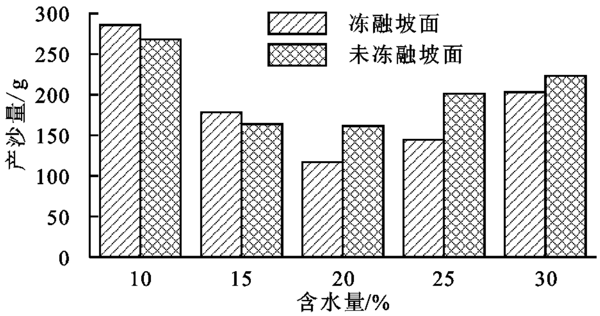

图 7　不同前期含水量坡面产沙总量

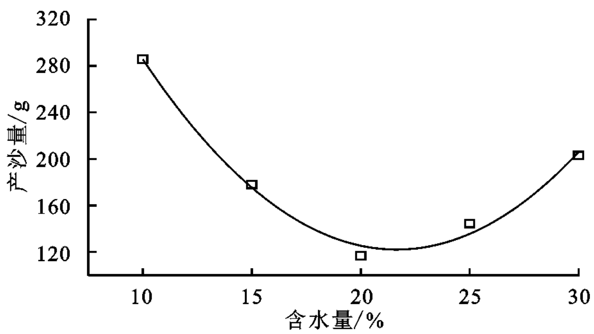

图 8　冻融坡面产沙量拟合线

从 20%和 25%含水量下冻融坡面与未冻融坡面产沙过程,可以发现在这两种含水量情况下,冻融坡面与未冻融坡面产沙过程存在明显的差异,且冻融坡面产沙速率明显小于未冻融坡面,由图 7 可知,含水量为 20%时,冻融坡面比未冻融坡面产沙量低 27.6%,含水量为 25%时低 28.2%。

从 30%含水量下冻融坡面与未冻融坡面产沙过程中,可以发现冻融坡面与未冻融坡面产沙过程十分相似,都呈前期缓慢增长,40 min 后趋于波动平衡,但冻融坡面比未冻融坡面产沙量小,由图 7 可知,含水量为 30%时冻融比未冻融坡面产沙量低 8.96%。

经过 SPSS 显著性差异分析,得出 10%,15%和 30%含水量下冻融坡面与未冻融坡面不存在显著性差异,20%和 25%含水量的冻融坡面与未冻融坡面存在极显著性差异($P<0.01$)。

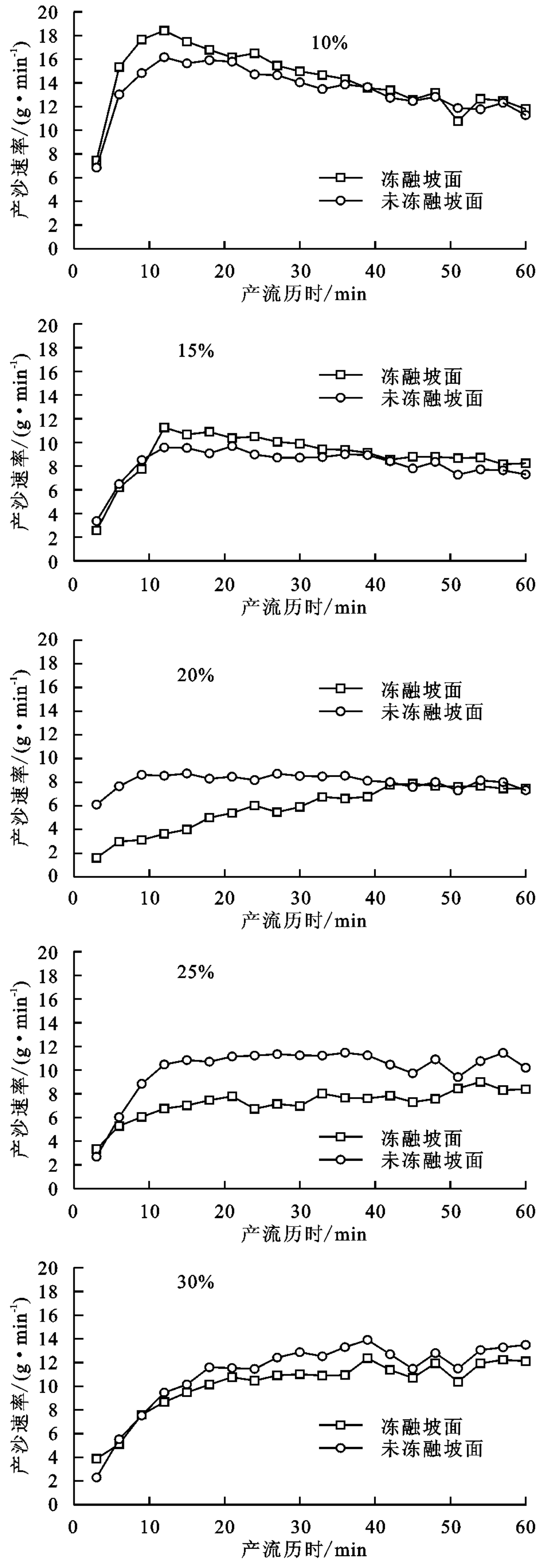

图 9　相同前期含水量下冻融与未冻融坡面产沙过程线

综上可以得出,20%和 25%含水量下冻融坡面与未冻融坡面产沙过程差异较明显,可以推测在含水量为 20%和 25%时坡面产沙过程受冻融作用影响最

显著，且含水量与这两个点差距越大坡面产沙受冻融作用影响越微弱。

2.4 前期含水量对冻融坡面降雨的可蚀性 *K* 值的影响

从表2可以看出，冻融坡面的 K 值 10%～20%呈减小趋势，20%～30%呈增大趋势，未冻融坡面的 K 值也是同样的趋势，随着含水量的增大 K 值先减小后增大。

其中10%含水量的坡面，不管是冻融坡面还是未冻融坡面的可蚀性 K 值都明显高于其他含水量坡面的 K 值，而且低含水量(10%和15%)的坡面经过冻融后的可蚀性要比未冻融坡面略高一些。高含水量(20%，25%，30%)坡面的可蚀性与低含水量坡面不同的是，高含水量的冻融坡面比未冻融坡面的可蚀性低。含水量为20%的坡面可蚀性最低，这也可以得出20%是黄土的最优含水量。25%含水量的坡面冻融与未冻融的可蚀性差异最显著，20%含水量的其次，所以可以推测含水量为20%和25%的土壤可蚀性 K 值受冻融作用影响最大。

表2 不同前期含水量下坡面可蚀性 *K* 值

前期含水量/%	冻融坡面可蚀性 K 值/($t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)	未冻融坡面可蚀性 K 值/($t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$)
10	0.0075	0.0070
15	0.0047	0.0043
20	0.0031	0.0042
25	0.0038	0.0053
30	0.0053	0.0059

3 结论

(1)冻融作用延长了坡面产流时间，冻融坡面和未冻融坡面的产流时间都随含水量的增大先增加后减小。含水量在20%左右的坡面产流时间受冻融作用影响最大，经过冻融作用滞后62.50%。

(2)20%含水量的坡面产流过程受冻融作用影响最显著。从冻融坡面产沙过程可以推测出含水量在20%～25%间存在一个临界点，含水量在此临界点上下的冻融坡面产沙过程有显著差异。通过对冻融坡面和未冻融坡面产沙的比较，可以看出20%和25%含水量的坡面受冻融作用都很明显，冻融坡面比未冻融坡面产沙量低了28%，含水量越靠近这两个点的坡面，坡面产沙受冻融作用影响越显著。

(3)从可蚀性 K 值的对比中，可以发现低含水量(10%，15%)的坡面可蚀性较高，且经过冻融作用呈增大趋势；较高含水量(20%，25%，30%)的坡面经过冻融作用可蚀性呈减小趋势。

(4)从不同前期含水量对坡面产沙和可蚀性影响的角度，可以看出20%含水量的冻融坡面和未冻融坡面的产沙和可蚀性比其他含水量的皆低。

参考文献：

[1] 魏霞，李勋贵，Huang C H. 交替冻融对坡面产流产沙的影响[J]. 农业工程学报，2015，31(13)：157-163.

[2] 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)：21-22.

[3] Hal H. Soil freeze-thaw cycle experiments：Trends，methodological weaknesses and suggested improvements[J]. Soil Biology & Biochemistry，2007，39(5)：977-986.

[4] 范昊明，蔡强国. 冻融侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学，2003，1(4)：50-55.

[5] 王飞，范昊明，郭成久，等. 我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J]. 生态环境，2008，17(1)：173-177.

[6] Chang D，Liu J K. Review of the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of soil[J]. Sciences in Cold and Arid Regions，2013，5(4)：457-460.

[7] 范昊明，李贵圆，周丽丽，等. 冻融作用对草甸土物理力学性质的影响[J]. 沈阳农业大学学报，2011，42(1)：114-117.

[8] Zhao G W，Dai J H. Study on the physics and mechanical properties of freeze-thaw soil and undisturbed soil[J]. Advanced Materials Research，2012，490/495：2752-2754.

[9] 高敏，李艳霞，张雪莲，等. 冻融过程对土壤物理化学及生物学性质的影响研究及展望[J]. 农业环境科学学报，2016，35(12)：2269-2274.

[10] Toshihide S，Takeshi K. Effect of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled bassanite and coal ash[J]. Cold Regions Science and Technology，2014，106/107(10)：36-45.

[11] Li G Y，Fan H M. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of northeast China[J]. Pedosphere，2014，24(2)：285-290.

[12] Mostaghimi S，Young R A，Wilts A R，et al. Effects of frost action on soil aggregate stability[J]. American Society of Agricultural Engineers，1987，31(2)：435-439.

[13] 阴琪翔，周国庆，赵晓东，等. 双向冻结单向融化土冻融循环下的融沉及压缩特性[J]. 中国矿业大学学报，2015，44(3)：437-443.

[14] 王洋，刘景双，王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报，2013，22(7)：1269-1274.

[15] 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.

[16] 李占斌，李社新，任宗萍，等. 冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报，2015，29(5)：56-60.

(下转第175页)