

不同尺度下冻融作用对东北黑土区产流产沙的影响

刘笑妍¹, 张卓栋¹, 张科利¹, 刘刚²

(1. 北京师范大学地理科学学部地理学院, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 通过对东北黑土区坡面 8 年和小流域 7 年的降雨产流产沙过程观测, 对比每年受冻融作用影响的降雨和其余不受冻融作用影响的降雨产流产沙的特征, 研究冻融作用在坡面和小流域尺度上对东北黑土区产流产沙的影响, 为东北黑土区在冻融作用下多尺度土壤侵蚀定量评价及其转换模型的建立提供科学依据。结果表明: 冻融作用减小了坡面和小流域的产流, 径流系数分别减小 0.07 和 0.03, 坡面产流延迟 71.7%, 而小流域无明显延迟。坡面和小流域土壤流失量、土壤可蚀性 K 值及含沙量均显著增加, 更易在较小降雨侵蚀力下产生较大流失量; 与不受冻融的降雨事件相比, 受冻融影响的降雨事件因径流减弱, 在相同降雨量下的侵蚀量低, 而在相同径流深下的侵蚀量高。冻融作用在径流较小时对坡面细沟的发育及产沙影响明显, 在径流较大时对小流域切沟中松散堆积物的搬运及产沙影响明显。

关键词: 冻融; 径流小区; 小流域; 产流产沙; 黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0045-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.008

Effects of Freezing and Thawing on Runoff and Sediment Yield in the Black Soil Region of Northeast China at Different Scales

LIU Xiaoyan¹, ZHANG Zhuodong¹, ZHANG Keli¹, LIU Gang²

(1. School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Based on runoff and sediment yield at plot and small watershed scales by field monitoring of 8 years and 7 years respectively in the black soil region of Northeast China, the characteristics of runoff and sediment yield of the first two rainfall events and those of the rest events were compared, which represented the runoff and sediment yield that was influenced and not influenced by freezing and thawing respectively. Results showed that with the effects of freezing and thawing, the runoff coefficient reduced by 0.07 and 0.03 at plot and small watershed scale respectively. Initial abstraction duration increased by 71.7% at slope scale; while, there was no obvious increase at small watershed scale. Soil loss, soil erodibility and sediment concentration increased significantly at both scales under freezing and thawing, and soil erosion was more likely to occurred. When the runoff was small, the sediment amount of the rainfall events with freezing and thawing was smaller than that of the rainfall events without it. Compared to those rainfall events without freezing and thawing, the rainfall events with freezing and thawing led to the runoff reduction. As a result, sediment amount of the rainfall events with freezing and thawing was lower at the same rainfall, while it was higher at the same runoff. Freezing and thawing had a more evident effect on rill development and sediment amount at plot scale when runoff was small, as well as capacity of the loose deposits transportation and sediment amount at small watershed scale when runoff was large. The results provide a scientific basis for the quantitative evaluation and transformation model of soil erosion with freezing and thawing in the black soil region of Northeast China.

Keywords: freezing and thawing; field plot; small watershed; runoff and sediment yield; black soil region

冻融作用是由于季节或昼夜热量变化在表土及以下一定深度形成的反复冻结、解冻的土壤过程。冻融作用会改变土壤的物理性质如含水量^[1]、孔隙度^[2]、抗冲性^[3]等;冻层的存在会阻碍入渗,进而影响产流、产沙等过程^[4]。经过冻融作用的土壤表面极易受到侵蚀,在雨强或融雪径流量较小时会产生大量的泥沙^[5]。

在不同的空间尺度上,冻融作用对产流产沙有不同的影响,目前主要在坡面、小流域等尺度开展了深入的研究。坡面尺度上,利用野外径流小区降雨及产流产沙资料研究细沟可蚀性,结果表明冻融导致细沟可蚀性增加,坡面更容易发育细沟^[6];通过模拟冻融交替试验和人工降雨试验发现初始解冻深度和含水量的增加会加剧冻融造成的坡面侵蚀^[4],降雨强度和冻融循环周期的影响则呈现非线性规律^[7];在小流域尺度上,冻融不但会导致细沟极易发育成浅沟和切沟^[8-9],还会使沟头后退速率增加^[10];因冻融导致切沟崩塌形成的堆积物,在夏季降雨的冲刷下产生较大侵蚀^[11-12]。作为一个独立完整的产沙系统,小流域不但要考虑坡面侵蚀,还有沟道中由冻融导致的松散堆积物及泥沙输移情况^[13]。已有的坡面尺度研究多利用模拟冻融交替试验和人工降雨试验,小流域尺度上集中于沟蚀,缺乏基于野外原位观测的不同尺度的对比研究。空间尺度效应使得坡面上观测到的大量数据无法在流域尺度上得到有效的利用,一直是土壤侵蚀定量评价需要解决的重要问题之一^[14]。东北黑土区作为我国最主要的商品粮生产基地,近年来已成为严重的土壤侵蚀区之一。除夏季暴雨外,冻融作用也是土壤侵蚀的主要原因之一^[15]。本文的目标是剥离冻融作用在坡面和小流域尺度上对产流产沙的影响,为东北黑土区在冻融作用下多尺度土壤侵蚀定量评价及其转换模型的建立提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黑龙江省嫩江县鹤北小流域(125°16′—125°21′ E, 48°59′—49°03′ N),地处小兴安岭西南麓、向松嫩平原过渡的漫川漫岗地带,海拔 310~390 m,平均坡度为 3°~6°,平均坡长为 800 m,最大可达 4 000 m。属寒温带大陆季风气候,年均气温 0.4℃,多年平均年降水量 534 mm,主要集中在 6—8 月。4 月产生融雪径流,5 月降水极少,风速较大。每年的前 2 场降雨多集中于 6 月,雨量较小,但在冻融作用下可能造成较大侵蚀;其余降雨集中在 7—8 月,雨量较大。主要土壤为黑土,其次是棕色森林土和草甸土。目前鹤北小流域大部分已被开垦为农地。

1.2 坡面与小流域监测

坡面位于鹤北小流域的中部,为坡面观测场中的

标准径流小区,长 20 m,宽 5 m,坡度为 5°,裸地。小区两侧设有宽约 1 m 的保护带,周围有高 40 cm、厚 1 mm 的铁皮;出口设翻斗式雨量计观测雨强、 I_{30} 、降雨量。用分流桶和集流桶测径流深,采样后用烘干法测含沙量。观测时间为 2003—2010 年,8 年共 70 次降雨,因 2005 年观测仪器故障,故小区前 2 次降雨组共 14 次降雨。

小流域面积为 3.6 km²。以农地为主,占流域总面积的 91.2%,林地和天然草地面积占 6.9%,水土保持措施较少。出水口有径流堰和翻斗式数字雨量计,起始 1 h 每 15 min 监测 1 次,1 h 后每 30 min 监测 1 次,水流稳定后每 1 h 监测 1 次,记录水位高度和产流起始时间,采样后用烘干法测含沙量,并计算流量、土壤流失量。小流域观测时间为 2004—2010 年,7 年共 49 次,2006—2007 年降雨部分缺测,故小流域前 2 次降雨共 12 次。

1.3 数据分析

黑土受交替冻融的影响,土壤抗剪强度明显减小。随着气温的上升及人为耕作,土壤的抗剪强度在融化期过后的 2 个月内迅速回升,之后缓慢增加^[6]。研究区 4 月冻融频繁,土壤抗剪强度陡降。5 月降水极少,风速较大,表土层干燥,土壤抗剪强度虽然有所回升,但冻融仍对其有影响。因此 6 月降雨的产沙量可代表冻融影响下的产沙量。将径流小区和小流域多年的降雨事件分为每年前 2 场降雨组(6 月)与其余降雨组(7—8 月),分别代表受冻融作用较强和基本不受冻融作用下的降雨事件,利用 SPSS 19.0 对小区和小流域的前 2 次降雨和其余降雨的降雨量、径流深、年均土壤流失量和土壤可蚀性等进行均值统计及单因素方差分析。

考虑到前 2 次降雨量较小,而其余降雨组中雨量较大的降雨事件会对其余降雨的产流平均值产生影响,故在其余降雨组中选出与前 2 次降雨径流深无显著差异的相似径流组,即径流深的平均值、最小值与最大值均与前 2 次降雨组最相似。对前 2 次降雨与其余降雨的降雨量、径流深、土壤流失量、含沙量间的关系做线性回归分析,比较二者在相同径流深范围内的土壤流失量关系。

2 结果与分析

2.1 冻融作用对黑土产流的影响

坡面尺度上,前 2 次降雨和其余降雨的雨强、 I_{30} 和雨量无显著差异($p>0.05$)(表 1);但前 2 次降雨的初损雨量、初损历时显著高于其余降雨,分别增加了 4.48 mm 和 13.71 min,初损历时增加了 77.7%,同时径流系数和径流深比其余降雨分别减小了 0.16,3.78 mm,减小比例为 64%,62.4%,产流显著减少($p<0.05$)。根据前

2 次降雨径流深的均值 2.28 mm、最大值 14.8 mm、最小值 0.1 mm,得到其余降雨相似径流组均值为 2.37 mm、最大值 15.2 mm、最小值 0.1 mm,与前 2 次降雨的产流无显著差异($p>0.05$)。结果表明,前 2 次降雨的初损

雨量、初损历时和径流系数与其余降雨的相似径流组相比,差异极显著($p<0.01$)。在坡面尺度上,冻融作用导致初损雨量增加了 4.07 mm,径流系数减小 0.07,并延迟了 12.01 min。

表 1 坡面产流特征

降雨 次序	雨强/ (mm·min ⁻¹)	<i>I</i> ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	雨量/ mm	年均降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	初损 雨量/mm	初损 历时/min	径流 系数	径流深/ mm
前 2 次降雨	4.08±0.26a	19.28±3.32a	24.21±4.87a	199.87±20.52	23.05±2.79a	28.77±3.14a	0.09±0.02a	2.28±0.34a
其余降雨总和	6.13±0.17a	17.75±3.16a	22.20±2.64a	795.20±45.66	18.57±2.46b	15.06±1.31b	0.25±0.03b	6.06±0.96b
其余降雨相似径流	5.31±0.37a	14.53±2.64b	19.49±2.93b	358.74±34.46	18.98±3.11b	16.76±2.57b	0.16±0.03b	2.37±0.19a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

小流域尺度上,前 2 次降雨和其余降雨的雨强、*I*₃₀、雨量和初损雨量无显著差异($p>0.05$)(表 2);但前 2 次降雨的径流系数和径流深比其余降雨分别减小了 0.13、2.71 mm,减小比例为 86.7%、88%,产流显著减少($p<0.05$)。前 2 次降雨径流深的均值 0.37 mm、最大值 0.6 mm、最小值 0.01 mm;相似径流组均值为 0.37 mm、最大值 0.84 mm、最小值 0.01 mm,两组无显著差异($p>0.05$)。结果表明,前 2 次降雨的雨强、*I*₃₀和雨量与相似径流组相比,均无显著差异($p>0.05$),初损雨量显著增加。前 2 次降雨的径流系数显著减小 60%($p<0.05$),但与坡面尺度相比,未达到极显著差异。表明在小流域尺度上,冻融作用也会使产流减弱,但对小流域尺度的影响程度小于坡面尺度,这与 Wang 等^[17]在青藏高原的研究结果一致。

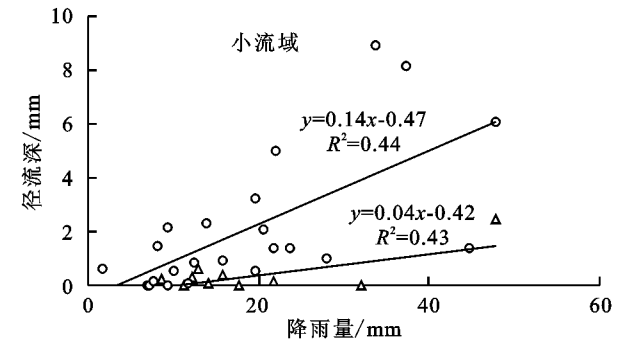
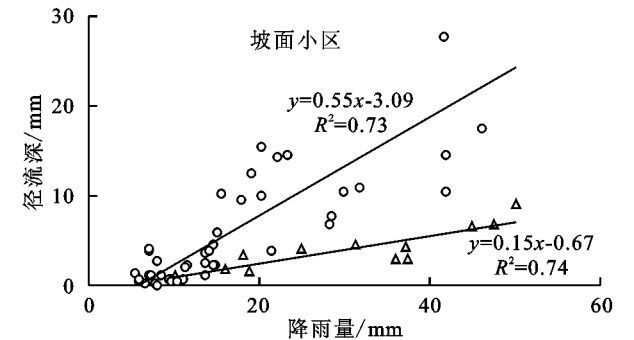
表 2 小流域产流特征

降雨次序	雨强/ (mm·min ⁻¹)	<i>I</i> ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	雨量/ mm	年均降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	初损 雨量/mm	径流 系数	径流深/ mm
前 2 次降雨	1.71±0.58a	12.51±1.93a	19.06±3.23a	94.30±28.16	18.68±3.08a	0.02±0.01a	0.37±0.19a
其余降雨总和	4.08±0.89a	17.35±2.44a	22.08±2.47a	583.5±34.38	19.00±2.22a	0.15±0.03b	3.08±0.69b
其余降雨相似径流	2.42±0.83a	11.32±2.17a	16.32±2.70a	99.18±25.74	15.94±2.68b	0.05±0.01c	0.37±0.09a

降雨量相同时,前 2 次降雨的径流深在坡面和小流域(图 1)尺度都要低于其余降雨,并且随着降雨量的增加,这种差异越来越明显。小区产流有明显延迟,但小流域尺度上不明显。

综合来看,两种尺度上,前 2 次降雨下的产流均

减弱。冻融作用下,土壤孔隙度增加,表层土壤入渗能力随之增强^[18];前两次降雨通常发生在 6 月,而研究区 5 月降水较少,风速较大,蒸发较强,导致表土层含水量较低^[2],因此前 2 次降雨的入渗增强,产流减弱。



注:空心三角形为前 2 次降雨;空心圆圈为其余降雨。

图 1 径流深与降雨量的关系

2.2 冻融作用对土壤流失量的影响

小区前 2 次降雨的年均土壤流失量和土壤可蚀性 *K* 值均显著低于其余降雨($p<0.05$)(表 3)。前 2 次降雨与相似径流组相比,年均降雨侵蚀力较小,径流深无显著差异,而年均土壤流失量增幅较大,土壤可蚀性 *K* 值是相似径流组的 3.67 倍。即坡面尺度上受冻融影响的黑土更易在较小降雨侵蚀力下产生更大土壤流失量。李占斌等^[19]对西安郊区黄土的冻

融冲刷试验表明,冻融坡面的泥沙流失量比未冻融坡面增加了 4.7%,与本研究观测天然降雨事件得到的 80.8%差距极大。由于春夏季干湿交替对坡面侵蚀的发育影响极大^[9],人工模拟降雨试验未考虑到干湿交替的作用,可能导致本研究与李占斌等的研究差异较大。

对小流域的前 2 次降雨和其余降雨产流产沙数据进行统计分析,与其余降雨相比,小流域的前 2 次

降雨年均土壤流失量和土壤可蚀性 K 值^[20]均显著减小($p<0.05$)(表 4)。与相似径流组相比,前 2 次降雨在较小的年均降雨侵蚀力下,年均土壤流失量和土壤可蚀性 K 值都增加了 50%;与小区相比,小流域

年均土壤流失量与土壤可蚀性 K 值的增加比例略小。说明在小流域尺度上,冻融作用增加了土壤流失量,但搬运和沉积可能受沟道中松散堆积物及水流挟沙力等因素的影响,进而影响泥沙输移比^[21]。

表 3 坡面产沙特征

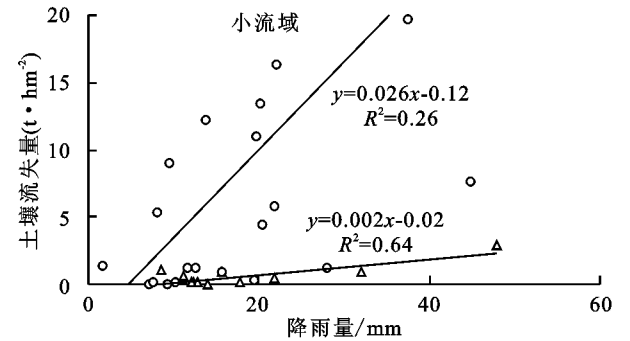
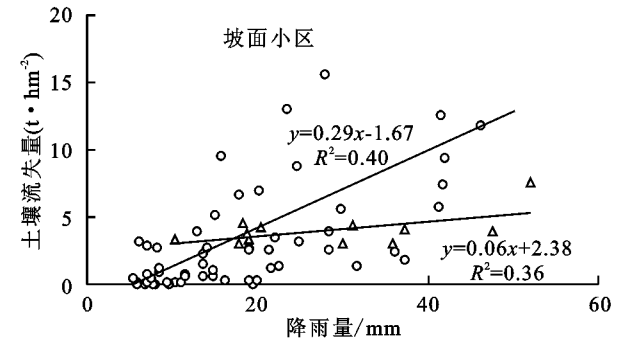
降雨 次序	年均降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	径流深/ mm	含沙量/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	年均土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤可蚀性 K 值/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)
前 2 次降雨	199.87±20.52	2.28±0.34a	32.76±7.04a	2.26±0.22a	0.011±0.001a
其余降雨总和	795.20±45.66	6.06±0.96b	66.30±9.66b	33.33±3.56b	0.039±0.007b
其余降雨相似径流	358.74±34.46	2.37±0.19a	28.00±4.89c	1.25±0.34c	0.003±0.0007c

表 4 小流域产沙特征

降雨次序	年均降雨侵蚀力/ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	径流深/ mm	含沙量/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	年均土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤可蚀性 K 值/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)
前 2 次降雨	94.30±28.16	0.37±0.19a	18.70±12.96a	0.03±0.01a	0.0003±0.0001a
其余降雨总和	583.5±34.38	3.08±0.69b	10.39±1.60b	0.48±0.18b	0.0008±0.0002b
其余降雨相似径流	99.18±25.74	0.39±0.09a	7.33±2.85c	0.02±0.01c	0.0002±0.0001c

对土壤流失量和降雨量进行回归分析发现,坡面尺度上,降雨量小于 17.61 mm 时,前 2 次降雨的土壤流失量略大于其余降雨,但因只有一次降雨事件,所以二者差异不大;降雨量超过 17.61 mm 时,前 2 次降雨土壤流失量较小(图 2)。流域尺度上,降雨量小于 50 mm 时,前 2 次降雨的土壤流失量小于其余

降雨(图 2)。因此,坡面和小流域尺度上前两次降雨的土壤流失量均小于其余降雨。由于径流是引起土壤侵蚀的重要因素,而在冻融作用的影响下,前 2 次降雨产流减弱,相同降雨量下的土壤流失量较小,且随着降雨量的增加,二者的入渗差异越来越大(图 1),土壤流失量差异也随之增大。



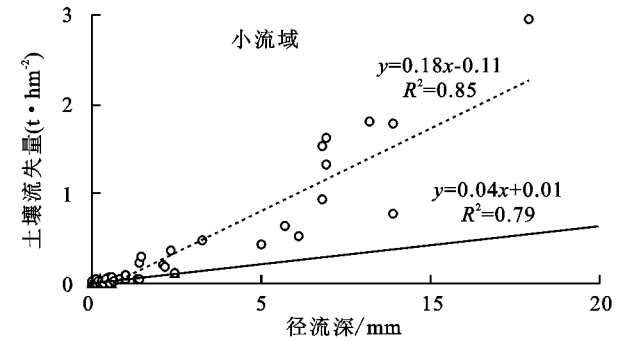
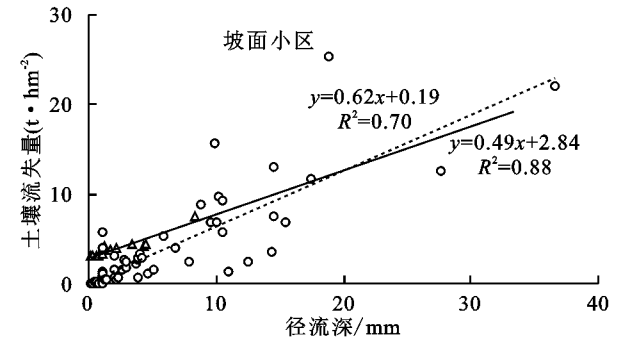
注:空心三角形为前 2 次降雨;空心圆圈为其余降雨。

图 2 土壤流失量与降雨量的关系

对土壤流失量与径流深的回归分析表明,径流深小于 20.38 mm 时,小区前 2 次降雨的土壤流失量大于其余降雨,当径流深超过 20.38 mm 时,其余降雨的土壤流失量较高(图 3)。

部分径流深超过 10 mm 的大数据会对拟合造成较大影响;小流域其余降雨的土壤流失量比前 2 次降雨大,拟合度极高,但由于小流域前两次降雨的土壤流失量和其余降雨相比,数量级较小(图 3),前 2 次降雨的产沙规律不明显。

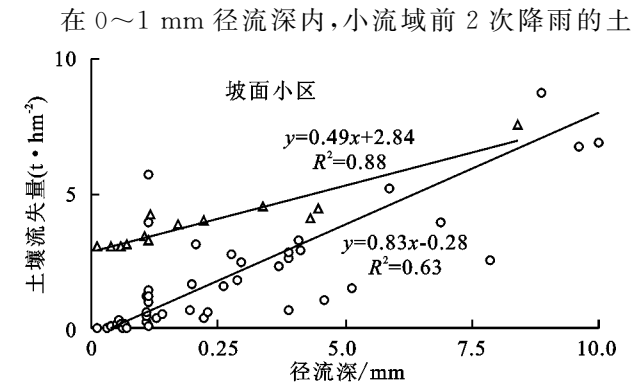
但小区的径流深均小于 10 mm,而其余降雨中



注:空心三角形、实线为前 2 次降雨;空心圆圈、虚线为其余降雨。

图 3 土壤流失量与径流深的关系

为了更清楚地研究前 2 次降雨的产沙规律,在相同的径流深下比较的土壤流失量的差异。当径流深为 0~9.18 mm 时,小区前 2 次降雨的土壤流失量略大于其余降雨(图 4),随着径流深的增加,二者的差异逐渐减小。已解冻的土壤与夏季土壤相比,水流剪切力和土壤可蚀性都较低,更易发育细沟,但从总的侵蚀来看,二者可能没有明显差异^[8]。根据图 4 的拟合趋势,随着径流深的增加,其余降雨的土壤流失量逐渐超过前 2 次降雨。当细沟加深或含水量增加时,细沟可蚀性增加;细沟的横截面几何形状影响了水流速度和深度,进而决定了水流挟沙力。冻融作用增加了土壤含水量和细沟可蚀性,引起沟岸崩塌,使细沟横截面几何形状由长方形变为三角形,减小了细沟的水力半径,根据曼宁公式,细沟中流速减小,因而细沟侵蚀量是由减小的流速和增加的崩塌量综合决定的^[6]。因此,当坡面上的降雨量和径流深增加至一定程度时,雨滴溅蚀和径流剥蚀增强,同时细沟可蚀性和水流挟沙力也增强,其影响超过了冻融作用,故前 2 次降雨的产沙逐渐低于其余降雨。



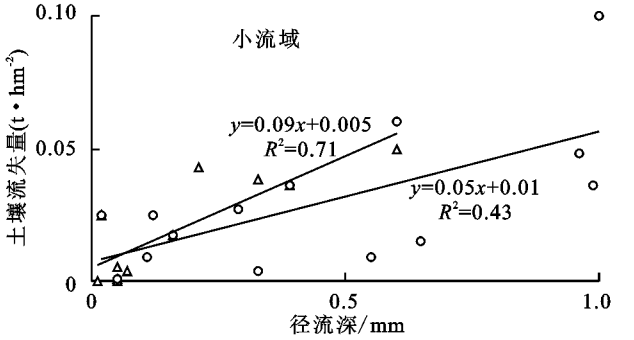
注:空心三角形为前 2 次降雨;空心圆圈为其余降雨。

2.3 冻融作用对含沙量的影响

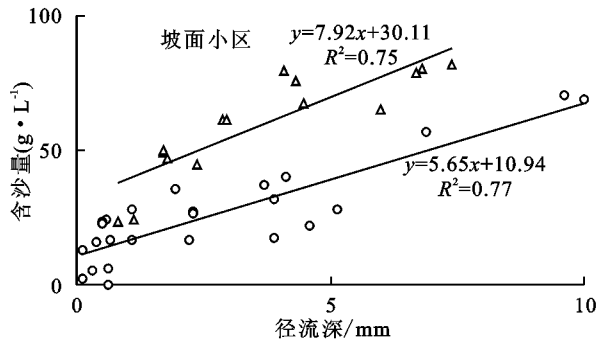
为进一步剥离两种尺度上冻融作用的影响,对小区和小流域含沙量与径流深的关系的分析表明,坡面尺度上,前 2 次降雨的含沙量比相似径流组增加 17%(表 3),流域尺度则增加 155.1%(表 4)。虽然小流域由于堆积导致土壤侵蚀量增加比例小于小区,但径流对沟道中松散堆积物的冲刷极大地增加了含沙量。Ban 等^[22]利用水槽冲刷试验对已解冻土壤和未受冻土壤侵蚀过程的对比研究表明土壤受到冻融作用后径流的含沙量更高,坡度为 5°时含沙量增加比例为 10.39%~12.75%,与本文较为相近。

在坡面和小流域尺度(图 5)上,在相同的径流深条件下,前 2 次降雨的含沙量都要高于其余降雨,并且随着降雨量的增加而增加。同一场降雨下,小区和

壤流失量略高于其余降雨,根据拟合效果,前 2 次降雨的土壤流失量会随着径流深的增加而极大地超过其余降雨(图 4);在较大径流深范围内,当径流增加时,前 2 次降雨的土壤流失量小于其余降雨(图 3),与拟合效果相反。这主要是因为每年前 2 场降雨雨量不大,同时冻融作用导致产流减弱,但能较好地表明坡面与小流域尺度的差异。两种尺度的产沙区别在于,坡面上,前 2 次降雨与其余降雨的土壤流失量差异随着径流深的增加先减小后增大,小流域的差异则是随着径流深越来越大。坡面以细沟和细沟间侵蚀为主,小流域的沟蚀是其泥沙的主要来源之一。在冻融作用下,坡面容易发育细沟,在较小径流深下前 2 次降雨产生的土壤流失量较大,但随着径流深的增加,二者细沟的发育差距越来越小,其余降雨的土壤流失量反而逐渐超过前 2 次降雨。冬春季冻融产生沟内堆积、雨季径流产生侵蚀的过程是东北切沟发育的一种重要模式^[11],特别是暴雨事件对冻融后切沟沟头后退的影响极大^[10]。因此,小流域前 2 次降雨的径流越深,水流挟沙力越强,对堆积物的冲刷就越强,前 2 次降雨与其余降雨的土壤流失量差异也越大。



小流域的含沙量关系方程为:前 2 次降雨, $Y_{\text{小流域含沙量}} = 1.91Y_{\text{小区含沙量}} - 33.49$;其余降雨, $Y_{\text{小流域含沙量}} = 0.72Y_{\text{小区含沙量}} - 6.38$ 。前 2 次降雨的方程系数 >1 ,说明此时小流域的含沙量高于小区;且 $Y_{\text{小区含沙量}}$ 越大,两种研究尺度的含沙量差异越明显。即当前 2 次降雨下的径流较大时,挟沙力较大,小流域沟道中的松散堆积物会对侵蚀量造成较大影响,使得其含沙量高于坡面尺度;反之,小径流对松散堆积物的冲刷较弱时,坡面和小流域的含沙量差异不甚明显。Li 等^[23]在东北黑土区依安站日水沙观测中发现,6 月流量、土壤流失量、含沙量分别是 7—8 月平均值的 34.3%,60.6%,196%,说明小流域前 2 次降雨总径流深和总土壤流失量虽然较低,但含沙量和单位径流深的土壤流失量较高,因此对于小流域,径流越大,冻融作用导致的产沙越大。



注:空心三角形为前 2 次降雨;空心圆圈为其余降雨。

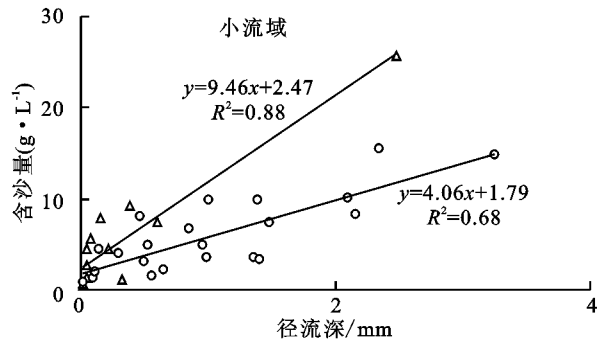


图 5 含沙量与径流深的关系

3 结论

(1)冻融作用减小了坡面和小流域的产流,径流系数分别减小 0.07 和 0.03,坡面尺度上产流有延迟,而小流域无明显延迟。

(2)冻融作用导致坡面和小流域年均土壤流失量分别增加了 80.8% 和 50%,土壤可蚀性 K 值分别增加了 267% 和 150%,含沙量分别增加了 17% 和 155.1%,更易在较小降雨侵蚀力下产生更大流失量;但受径流减弱的影响,前 2 次降雨在相同降雨量下的侵蚀量低,而在相同径流深下的侵蚀量高。

(3)冻融作用在径流较小时对坡面细沟的发育及产沙影响明显,在径流较大时对小流域切沟中松散堆积物的搬运及产沙影响明显。

致谢:本文观测数据由北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室九三野外试验站提供,本文作者对观测数据进行了整理与分析,在此向九三野外试验站及老师们提供的帮助表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 赵显波,刘铁军,许士国,等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 233-240.
- [2] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟. 典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1744-1750.
- [3] 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): 69-73.
- [4] 周丽丽,王铁良,范昊明,等. 未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 1-4, 37.
- [5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]. Agriculture Handbook No. 537. Washington: United States Department of Agriculture, 1978: 5-8.
- [6] Gatto L W. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: Potential impacts on soil erosion[J]. Geomorphology, 2000, 32(1): 147-160.
- [7] 魏霞,李勋贵, Huang C. 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.
- [8] McCool D K, Dun S, Wu J Q, et al. Seasonal change of WEPP erodibility parameters for two fallow plots on a

palouse silt loam[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(2): 711-718.

- [9] Nadal-Romero E, Latron J, Marti-Bono C, et al. Temporal distribution of suspended sediment transport in a humid Mediterranean badland area: The araguas catchment, central pyrenees[J]. Geomorphology, 2008, 97(3): 601-616.
- [10] Øygarden L. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway[J]. Catena, 2003, 50(2/4): 217-242.
- [11] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1165-1173.
- [12] 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.
- [13] 刘前进,蔡强国,刘纪根. 不同空间尺度上侵蚀产沙模型研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 69-72.
- [14] 倪九派,魏朝富,谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2061-2067.
- [15] 魏霞,丁永建,李勋贵. 冻融侵蚀研究的回顾与展望[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 271-275.
- [16] 张永光,伍永秋,汪言在,等. 典型黑土区小流域浅沟侵蚀季节差异分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 145-154.
- [17] Wang G, Liu G, Liu L. Spatial scale effect in seasonal streamflows in permafrost catchments on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(7): 973-984.
- [18] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 186-189.
- [19] 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.
- [20] 史志华,宋长青. 土壤水蚀过程研究回顾[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 1-10.
- [21] 刘瑛娜,刘宝元,张科利,等. 微型小区在土壤可蚀性估算中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 103-108.
- [22] Ban Y, Lei T, Liu Z, et al. Comparative study of erosion processes of thawed and non-frozen soil by concentrated meltwater flow[J]. Catena, 2016, 148(2): 153-159.
- [23] Li R, Zhu A, Song X, et al. Seasonal dynamics of runoff-sediment relationship and its controlling factors in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(4): 345-352.