

长白山地丘陵区解冻期农耕地土壤侵蚀特征量化分析

贾燕锋^{1,2}, 吴 锰^{1,2}, 刘明波³, 周丽丽^{1,2}, 范昊明^{1,2}

(1.沈阳农业大学水利学院,沈阳 110866;2.辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室,
沈阳 110866;3.吉林省梅河口市水土保持工作站,吉林 梅河口 135000)

摘要: 为防治解冻期土壤侵蚀,以东北长白山地丘陵区典型小流域为研究对象,选取典型农耕地进行实测观测,分析不同坡位、局部坡度、坡向解冻期土壤侵蚀特征,量化土壤水分、温度、剪切力、反射辐射及局部坡度对土壤侵蚀的影响,构建解冻期农耕地土壤侵蚀预测模型。结果表明:解冻期土壤侵蚀从坡上、坡中到坡下依次增大,随局部坡度的增大而增大,但增长趋势减缓,南坡最大而北坡最小,不同坡位、局部坡度和坡向土壤侵蚀均存在显著差异($P < 0.05$);影响土壤侵蚀的因素从大到小依次为局部坡度、土壤含水率、土壤剪切力、土壤温度和土壤反射辐射;通过逐步回归,构建了基于局部坡度、土壤含水率、土壤剪切力3个因子的解冻期农耕地土壤侵蚀预测模型($R^2 = 0.903$)。研究结果可为解冻期土壤侵蚀防治提供科学依据。

关键词: 解冻期; 农耕地; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)05-0015-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.003

Quantitative Analysis of the Soil Erosion Characteristics in Cultivated Land in Thawing Period in Hilly Area of Changbai Mountain

JIA Yanfeng^{1,2}, WU Meng^{1,2}, LIU Mingbo³, ZHOU Lili^{1,2}, FAN Haoming^{1,2}

(1.College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866;

2.Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration in Liaoning Province, Shenyang 110866;

3.Soil and Water Conservation Workstation of Meihekou Jilin Province, Meihekou, Jilin 135000)

Abstract: In order to prevent and control soil erosion during the thawing period, two typical small watersheds were taken as the research objects in the Hilly Area of Changbai Mountain in the Northeast Black Soil Region. Soil erosion, soil moisture (ω), soil temperature (T), soil shear stress (τ), soil reflected radiation (J) and local slope gradient (S) were observed during spring thawing period, and their corresponding effects on soil erosion were quantified, then the soil erosion prediction equation was developed. The results showed that soil erosion increased from the upslope, middle slope to the bottom slope; with the increase of the local slope gradients, soil erosion increased, but the increasing trend slowed down gradually; among the different aspects, southern slope had the largest soil erosion, and the northern had the smallest; and the differences were all significant ($P < 0.05$). The factors affecting soil erosion were S , ω , τ , T and J , from large to small, during the thawing period. The prediction equation of soil erosion based on local slope gradient, soil moisture content and soil shear stress was developed ($R^2 = 0.903$). This study would provide a scientific basis for soil erosion control during the thawing period.

Keywords: thawing period; cultivated land; soil erosion

全球很多地区土壤侵蚀存在季节性变化,在中高纬度地区更是如此,春季解冻期水土流失集中,在北欧国家,冬季和早春的土壤侵蚀率可超过一年中的其他季节^[1]。我国东北漫岗黑土区春季解冻期融雪及

降雨造成的浅沟侵蚀比夏季严重^[2]。

春季解冻期土壤侵蚀通常是由冻融、水力等外营力共同作用的一种特殊侵蚀形式,融雪径流和冻融作用是春季解冻期土壤侵蚀发生的主要原因;冻融作用

通过昼融夜冻,使土壤特性发生变化,土体结构遭到破坏,土壤抗蚀能力降低,土壤更易遭受侵蚀,土壤侵蚀量增加^[3]。同时,冻融过程改变土壤水热空间分布,使土壤剖面出现水分聚集现象^[4],由于冻土入渗性能差,土壤中形成“不透水层”,融水不能及时入渗,形成地表径流导致土壤侵蚀^[5]。我国东北地区冬季寒冷,普遍存在深厚的季节性冻层,受未完全解冻层影响,春季表层土壤含水率高,水土流失加剧,对东北地区的粮食生产造成极大影响^[6]。在不同土地利用类型中,耕地冻融作用最为强烈,土壤侵蚀现象最为显著^[7-8]。而在我国东北黑土区,针对不同下垫面土壤冻融交替变化规律的研究甚少^[9-11],冻融作用与水蚀过程耦合机制方面的研究^[12]也鲜有报道,更无法实现对解冻期土壤侵蚀的量化评价。WEPP 等模型虽然对融雪物理过程考虑相对完备,但仍存在明显不足,不能直接应用于东北黑土区解冻期土壤侵蚀的预报,无法满足保护东北黑土地的迫切需求。

根据东北地区坡耕地分布特征^[13],本文以长白山地丘陵区典型农耕地为研究对象,在分析不同坡位、坡度、坡向解冻期土壤侵蚀特征的基础上,量化土壤水分、温度、剪切力、反射辐射及局部坡度对土壤侵蚀的影响,并构建解冻期农耕地土壤侵蚀预测模型,弥补我国春季解冻期农耕地土壤侵蚀研究的不足,为解冻期土壤侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择泉河和吉兴 2 个典型小流域作为研究对象。泉河小流域位于辽宁省铁岭市西丰县安民镇,中心坐标为 $124^{\circ}56'13.62''\text{E}$, $42^{\circ}42'38.7''\text{N}$,面积为 15.03 km^2 ;吉兴小流域位于吉林省梅河口市吉乐乡,中心坐标为 $125^{\circ}30'05''\text{E}$, $42^{\circ}12'29''\text{N}$,面积为 15.02 km^2 。2 个小流域均为大陆性季风气候,多年平均降水量 $709\sim 738\text{ mm}$,70%集中在 6—9 月,降雪量占 20%以上,融雪期一般为 3—4 月,升温较快。植被属于东北长白植物区系,地带性植被主要有蒙古栎(*Quercus mongolica*)、榛(*Corylus heterophylla* Fisch.)等,现存植被多为天然次生林。土壤类型以棕壤、白浆化暗棕壤为主。主要土地利用类型均为耕地、林地,坡耕地主要种植玉米。吉兴小流域 2000—2012 年降雪量 $2\sim 59\text{ mm}$ ^[14],2016—2017 冬季降雪量 31 mm 。

1.2 试验方法

考虑不同坡向太阳辐射差异并避免坡长、种植方式的影响,2016 年 11 月,在泉河、吉兴 2 个小流域中

分别选取东西南北 4 个坡向长度 100 m 左右等高垄作的玉米耕地作为研究对象,坡面坡度 $9^{\circ}\sim 18^{\circ}$,将每块样地均分为坡上、坡中、坡下 3 段,设置样方并做标记,同时观测记录地表状态。2017 年 4 月解冻期间,选择晴好天气,进行土壤侵蚀量、局部坡度、土壤含水率、温度、剪切力、瞬时反射辐射测定。土壤侵蚀量每天测量 1 次,在标记样方附近随机选择 3 个 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 样方,用卷尺和自制测针板测量土壤侵蚀量;因解冻期冻融作用下土壤容重发生变化,本研究采用土壤侵蚀体积计量土壤侵蚀量。在样方附近 1 m 范围内,用坡度仪随机选取 3 点进行局部坡度测量,并统计其出现的频次。每天 8:00—17:00 每隔 1 h 用反射辐射仪测定各样方的瞬时反射辐射,用土壤墒情测量仪(OK-S1+)测定垄台、垄坡和垄沟 10 cm 深处土壤体积含水率和土壤温度,每次测量随机选取 3 个点,将测得的数据取平均。每天 9:00,13:00,17:00 用微型十字板剪切仪(WXSZB)进行土壤剪切力测量,该仪器备有 3 个旋头,本研究采用大号旋头,每次测量随机选取 3 个点。

1.3 数据分析

采用 SPSS 21 软件进行相关分析和线性回归,对各个侵蚀因子与土壤侵蚀量间的相关关系进行定量描述。采用 Excel 2010 软件进行灰色关联分析,计算各因子的关联度排序,确定各因子对土壤侵蚀的影响程度;在此基础上,采用逐步回归法进行因子的筛选和拟合,得到解冻期农耕地土壤侵蚀的预测方程。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀特征

2.1.1 不同坡位土壤侵蚀特征 分析不同坡位土壤侵蚀量(图 1)发现,在泉河、吉兴从坡上到坡下均呈逐渐增加趋势。其中,泉河小流域,坡上、坡中和坡下土壤侵蚀体积分别 $56.50, 63.97, 65.80\text{ cm}^3$,吉兴小流域,坡上、坡中和坡下土壤侵蚀体积分别 $63.27, 67.25, 72.13\text{ cm}^3$,方差分析显示,不同坡位土壤侵蚀量间存在极显著性差异($P=0.006<0.01$)。与坡上相比,坡下在侵蚀对象和侵蚀营力方面均更利于侵蚀的发生。一方面,冬季积雪厚度由坡上向坡下呈递增趋势,不同坡位积雪厚度不同,仅考虑积雪就地融化,坡上融雪水较少,土壤含水率也较低,坡下则相反;于此同时,融雪过程中存在汇流过程,上方融雪径流汇流进一步增加坡下土壤含水率,导致不同坡位土壤含水率存在差异^[15];解冻期土壤含水率的增加,会直接导致土壤抗侵蚀能力的下降,同时还促使土壤经历更多冻融循环,从而导致土壤抗侵蚀能力进一步降低,土壤侵蚀增加。另一方面,径流由坡上向

坡下汇流过程中,由于坡上径流向坡中汇集,坡中径流量较坡上大,其侵蚀能力较坡上强,而坡下由于坡上和坡中的融雪影响,融雪径流向坡下汇集,其径流量最大,侵蚀能力更强,相对而言土壤剪切力变弱,土壤侵蚀增加。

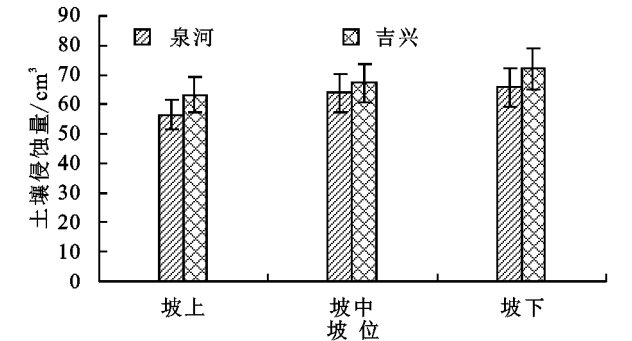


图 1 不同坡位土壤侵蚀量

土壤含水率与侵蚀量之间的 Pearson 相关系数为 0.747,与土壤侵蚀呈极显著正相关,即土壤侵蚀随土壤含水率的增加而增加。为进一步分析土壤含水率与侵蚀量的关系,将土壤含水率与土壤侵蚀量进行单因子回归分析,得到土壤含水率与土壤侵蚀量拟合方程(表 1),可以看出土壤侵蚀量与土壤含水率呈显著线性关系,仅土壤含水率可解释因变量土壤侵蚀量的64.0%~64.5%。

土壤剪切力不仅因融雪径流的增强而变得相对较弱,还受土壤含水率影响^[16]。土壤剪切力与土壤侵蚀量呈显著负相关,相关系数为-0.700。对土壤含水率、土壤剪切力与土壤侵蚀量进行回归分析(表 1),拟合方程加入土壤剪切力后,自变量解释因变量土壤侵蚀量的比例提高超过 10%。

表 1 土壤侵蚀量与各影响因子拟合结果

环境要素	影响因子	流域	回归方程	R^2	P
坡位	土壤含水率	泉河	$V=-113.333+6.208\omega$	0.645	<0.05
		吉兴	$V=-111.781+5.397\omega$	0.640	<0.05
	土壤剪切力	泉河	$V=-37.732+5.031\omega-132.236\tau$	0.766	<0.05
		吉兴	$V=37.071+3.166\omega-230.216\tau$	0.790	<0.05
坡度	局部坡度	泉河	$V=-22.257+2.888S$	0.854	<0.05
		吉兴	$V=-27.219+3.714S$	0.824	<0.05
坡向	土壤温度	泉河	$V=-52.869+6.809T+0.606J$	0.415	<0.05
	土壤反射辐射	吉兴	$V=-60.12+5.972T+1.464J$	0.407	<0.05

注: V 为土壤侵蚀体积(cm^3); ω 为土壤含水率(%); τ 为土壤剪切力(kg/m^2); S 为局部坡度($^\circ$); T 为土壤温度($^\circ\text{C}$); J 为土壤反射辐射(W/m^2)。

2.1.2 不同局部坡度土壤侵蚀特征 由图 2 可知,土壤侵蚀量在随局部坡度变化方面均表现为随着局部坡度的增大而增大,且不同局部坡度土壤侵蚀量间存在极显著性差异($P=0.002<0.01$)。假设初始状态下,重量为 G 的土壤颗粒在坡面上处于临界平衡状态,所在坡面局部坡度为 α ,受力分析可知,促使其向下滑动的是重力沿坡面向下的分力 $G\sin\alpha$,而阻止其滑动的摩擦力 $=\mu G\cos\alpha$ 。式中: μ 为动摩擦因数。临界平衡状态下存在 $\mu G\cos\alpha=G\sin\alpha$ 。通常情况下坡面坡度 $\theta<45^\circ$,而在 $[0,45^\circ]$, $\sin\theta$ 为增函数, $\cos\theta$ 为减函数;也就是说,当局部坡度 α 增大时,方程左侧 $\mu G\cos\alpha$ 减小,而方程右侧 $G\sin\alpha$ 增大,随着局部坡度的增大,土壤颗粒更易沿坡面向下滑动(在不考虑土壤颗粒状态变化的情况下)。春季解冻期反复冻融作用的存在,会导致表层土壤含水率的增加和土体的破坏。土壤颗粒的破碎和含水率的增加,直接导致 μ 减小,将进一步加剧这一过程。因此,在春季解冻期随着局部坡度的增大,土壤侵蚀存在加剧趋势。另外,在坡度影响融雪径流方面,随着坡度的增加,融雪径流水流功率增大,其对土壤表面的冲刷能力增强,使得土壤侵蚀量更大。但是当坡度逐渐增大,在坡面上的积雪会逐渐减少,导致产生的径流量较少,所以随着坡度的增加,土壤侵蚀量的增量逐渐减少,如坡度从 15° 增至 18° 时,单位面积土壤侵蚀量增加 121.13 cm^3 ,坡度从 27° 增至 30° 时,单位面积土壤侵蚀量增加 79.13 cm^3 。

土壤侵蚀量与局部坡度间呈极显著正相关($R^2=0.847$),对土壤侵蚀量与局部坡度进行回归分析(表 1)可以看出,土壤侵蚀量与局部坡度呈显著的线性关系, R^2 均在 0.8 以上,说明局部坡度可解释超过 80% 的土壤侵蚀量。

2.1.3 不同坡向土壤侵蚀特征 由不同坡向土壤侵蚀量(图 3)可以看出,解冻期北坡土壤侵蚀量最小,南坡土壤侵蚀量最大,东坡和西坡土壤侵蚀量介于二者之间,不同坡向土壤侵蚀量之间存在显著差异($P=0.012<0.05$)。坡向差异会直接导致其接受的

太阳辐射能量存在差异,而太阳辐射是积雪融化过程的主要驱动力^[17]。坡向不同,接收太阳辐射强度不同,地表的温度不同,南坡的太阳辐射较强,地表温度较高,积雪融化速率和解冻速率较快,在同一时间段内形成的融雪径流量较大^[18]。而融雪径流是融雪侵蚀的先决条件,较大的融雪径流,可导致较大的融雪侵蚀。

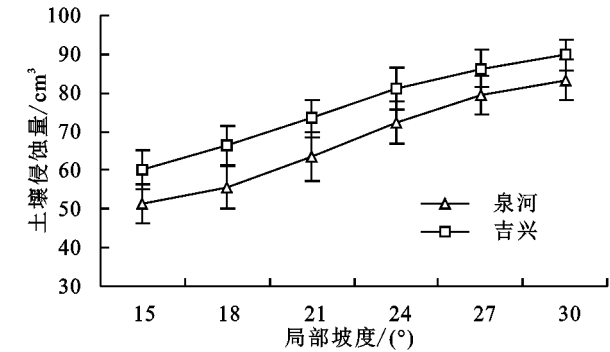


图 2 不同局部坡度土壤侵蚀量

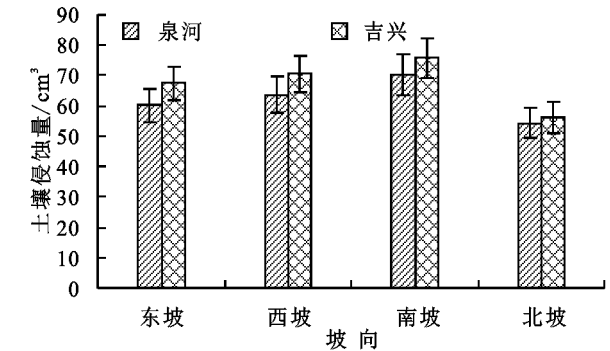


图 3 不同坡向土壤侵蚀量

土壤是土壤侵蚀的对象,坡向直接影响着太阳辐射和土壤温度,土壤接受热量的差异将导致土壤冻融作用强度的差异,因此将土壤侵蚀量与土壤温度、反射辐射进行统计分析,从表 1 可以看出,土壤侵蚀量与土壤温度、反射辐射也存在一定的线性关系,但 R^2 均较小,仅能解释变量的 40.7%~41.5%。

2.2 各因子影响程度分析

通过上述分析可知,土壤含水率(ω)、土壤剪切力(τ)、土壤温度(T)、土壤反射辐射(J)及局部坡度(S)分别与解冻期土壤侵蚀具有较好的相关关系,而现实条件下在坡位、坡度、坡向影响下各个因子共同作用于土壤。因此,以土壤侵蚀量为参考数列 V ,以 ω 、 T 、 τ 、 J 和 S 作为比较数列 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 ,进行灰色关联分析,确定各因子对土壤侵蚀的影响程度。土壤侵蚀影响因子灰色关联度计算结果(表 2)显示,局部坡度与土壤侵蚀量的灰色关联度最高,为 0.662,说明局部坡度与土壤侵蚀量的发展趋势最为接近,也就是对土壤侵蚀量的影响最大;土壤含水率与土壤侵

蚀量的灰色关联度为 0.632,居第 2 位,说明土壤含水率对土壤侵蚀量的影响小于坡度;土壤剪切力与土壤侵蚀量的灰色关联度为 0.627,居第 3 位;而土壤温度与土壤侵蚀量的灰色关联度为 0.590,土壤反射辐射与土壤侵蚀量的灰色关联度为 0.581,二者的灰色关联度相对而言均较小,也就是土壤温度和土壤反射辐射对土壤侵蚀量的影响较小。换言之,影响春季解冻期土壤侵蚀的因素从大到小依次为局部坡度>土壤含水率>土壤剪切力>土壤温度>土壤反射辐射。孙宝洋等人试验研究发现,冻融条件下坡度是影响土壤分离能力主效应因素,而与土壤冻融相关的含水量为次要效应因素^[19],与本研究各因子排序相似。

2.3 逐步回归分析

逐步回归法通过对进入方程的因子进行显著性检验,进行因子的筛选和拟合,对进入方程的侵蚀因子依次进行显著性检验,显著相关的予以保留,不显著相关的剔除,直到方程内的侵蚀因子都显著相关,不显著相关的侵蚀因子均剔除为止,最终得到的回归方程为最优方程。

选取土壤含水率(ω)、土壤温度(T)、土壤剪切力(τ)、土壤反射辐射(J)和局部坡度(S)5 个侵蚀因子与土壤侵蚀量(V)进行逐步回归分析。从土壤侵蚀量与侵蚀因子逐步回归分析结果(表 3)可以看出,首先进入模型的是局部坡度(S), $t_s=13.326>t_{0.01}=2.648$,说明局部坡度对土壤侵蚀量影响显著($P<0.01$),模型 1 的 $F=177.589>F_{0.01}(1,70)=7.011$,说明模型 1 是显著相关的。在模型 2 引入土壤含水率(ω)后, $F=230.040>F_{0.01}(2,69)=4.927$,模型 2 中 2 个变量的 t 检验值分别为 $t_s=12.853>t_{0.01}=2.649$, $t_\omega=8.977>t_{0.01}=2.649$,说明模型 2 中局部坡度和土壤含水率与土壤侵蚀量极显著相关。土壤剪切力(τ)第 3 个进入模型,模型 3 的 $F=210.708>F_{0.01}(3,68)=4.083$,且 $t_s=8.988>t_{0.01}=2.650$, $t_\omega=10.171>t_{0.01}=2.650$, $t_\tau=4.828>t_{0.01}=2.650$,说明模型 3 中局部坡度、土壤含水率和土壤剪切力与土壤侵蚀量极显著相关,土壤剪切力是模型 3 中对土壤侵蚀量影响最小的。在模型 3 引入土壤剪切力后, R^2 和 $R^2_{\text{修正}}$ 均增加,说明土壤剪切力这个变量能够显著提高土壤侵蚀量预测精度,而且标准误差都较小,因此模型 3 是预测解冻期土壤侵蚀量的最优方程。其具体形式为:

$$V=-16.388+1.959S+2.038\omega-101.903\tau$$

$(R^2=0.903)$ (1)

表 2 土壤侵蚀量影响因子灰色关联度

序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	0.503	0.394	0.426	0.400	0.528	37	0.565	0.690	0.727	0.625	0.933
2	0.545	0.435	0.557	0.423	0.589	38	0.512	0.716	0.653	0.521	0.778
3	0.569	0.443	0.504	0.443	0.565	39	0.501	0.847	0.795	0.611	0.839
4	0.563	0.425	0.576	0.445	0.509	40	0.700	0.635	0.916	0.834	0.875
5	1.000	0.640	0.749	0.766	1.000	41	0.472	0.962	0.522	0.548	0.569
6	0.873	0.563	0.618	0.701	0.656	42	0.905	0.558	0.999	0.765	0.688
7	0.710	0.587	0.639	0.754	0.614	43	0.922	0.562	0.831	0.626	0.618
8	0.899	0.718	0.998	0.905	0.908	44	0.484	0.371	0.438	0.366	0.343
9	0.817	0.710	0.955	1.000	0.774	45	0.471	0.384	0.468	0.380	0.390
10	0.691	0.865	0.702	0.694	0.877	46	0.555	0.438	0.468	0.406	0.478
11	0.624	0.870	0.664	0.717	0.855	47	0.658	0.483	0.546	0.456	0.649
12	0.503	0.825	0.503	0.488	0.795	48	0.410	0.324	0.366	0.317	0.410
13	0.485	0.387	0.437	0.381	0.520	49	0.748	1.000	0.618	0.619	0.720
14	0.637	0.432	0.668	0.490	0.748	50	0.646	0.839	0.645	0.640	0.948
15	0.623	0.455	0.590	0.493	0.619	51	0.698	0.740	0.711	0.704	0.872
16	0.905	0.526	0.735	0.607	0.773	52	0.643	0.784	0.589	0.657	0.937
17	0.731	0.477	0.606	0.539	0.610	53	0.808	0.721	0.824	0.846	0.814
18	0.663	0.491	0.651	0.577	0.571	54	0.650	0.673	0.686	0.749	0.757
19	0.832	0.519	0.702	0.647	0.631	55	0.480	0.367	0.427	0.373	0.346
20	0.735	0.684	0.755	0.817	0.940	56	0.588	0.396	0.486	0.423	0.419
21	0.906	0.588	0.795	0.786	0.598	57	0.473	0.370	0.478	0.373	0.382
22	0.770	0.689	1.000	0.853	0.721	58	0.601	0.417	0.479	0.426	0.543
23	0.624	0.885	0.663	0.621	0.999	59	0.518	0.378	0.436	0.407	0.560
24	0.453	0.801	0.499	0.457	0.764	60	0.354	0.301	0.334	0.280	0.354
25	0.567	0.407	0.513	0.447	0.613	61	0.552	0.835	0.514	0.498	0.856
26	0.527	0.384	0.422	0.392	0.487	62	0.508	0.899	0.654	0.553	0.998
27	0.568	0.407	0.594	0.432	0.519	63	0.700	0.754	0.668	0.697	0.854
28	0.575	0.413	0.595	0.450	0.489	64	0.649	0.922	0.657	0.614	0.872
29	0.581	0.427	0.486	0.470	0.447	65	0.450	0.726	0.458	0.451	0.467
30	0.648	0.412	0.522	0.475	0.421	66	0.527	0.898	0.599	0.563	0.555
31	0.884	0.605	0.959	0.908	0.876	67	0.729	0.599	0.703	0.727	0.660
32	0.581	0.733	0.752	0.744	0.991	68	0.502	0.426	0.492	0.460	0.454
33	0.789	0.647	0.845	0.879	0.749	69	0.454	0.384	0.462	0.413	0.469
34	0.639	0.697	0.829	0.741	0.695	70	0.680	0.488	0.587	0.537	0.750
35	0.786	0.654	0.835	0.836	0.535	71	0.488	0.405	0.454	0.388	0.487
36	0.694	0.661	0.738	0.841	0.546	72	0.387	0.365	0.405	0.345	0.493
灰色关联度							0.632	0.590	0.627	0.581	0.662

表 3 土壤侵蚀量与侵蚀因子逐步回归分析结果

模型	变量	回归 系数	标准 误差	R^2	$R^2_{\text{修}}$	F	t	$t_{0.01}$
1	常数	−27.811	5.794	0.717	0.713	177.589	−4.800	2.648
	S	3.446	0.259				13.326	
2	常数	−66.555	5.860	0.870	0.866	230.040	−11.358	2.649
	S	2.586	0.201				12.853	
	ω	2.068	0.230				8.977	
3	常数	−16.388	11.573	0.903	0.899	210.708	−1.416	2.650
	S	1.959	0.218				8.988	
	ω	2.038	0.200				10.171	
	τ	−101.903	21.108				−4.828	

注： $F_{0.01}(1,70)=7.011$ ， $F_{0.01}(2,69)=4.927$ ， $F_{0.01}(3,68)=4.083$ 。

3 结 论

解冻期农耕地土壤侵蚀从坡上到坡下呈逐渐增加趋势,随局部坡度的增大而增多,不同坡向中北坡土壤侵蚀量最小,南坡土壤侵蚀量最大,东坡和西坡土壤侵蚀量介于二者之间。影响因素中,局部坡度对解冻期土壤侵蚀量影响最大,其次依次为土壤含水率、土壤剪切力、土壤温度、土壤反射辐射。建立了基于局部坡度(S)、土壤含水率(ω)、土壤剪切力(τ)的土壤侵蚀预测模型($R^2=0.903$)。

以上结论基于 1 年观测资料获得,但根据中国气象数据网,对比气象监测数据,观测期间气温和降雪量均接近多年平均值,具有一定代表性。模型为基于有限观测资料的统计模型,虽未揭示解冻期土壤侵蚀机理,但无论是各因子对土壤侵蚀的影响程度,还是数量关系,均显示局部坡度对解冻期土壤侵蚀影响最甚,土壤含水率次之。可见,结论在一定程度上反映了客观现状,对解冻期土壤侵蚀防治具有指导意义,也为深入研究其机理奠定了基础。但还应继续开展定量观测研究,以全面揭示解冻期土壤侵蚀机理。

参考文献:

[1] Starkloff T, Hessel R, Stolte J, et al. Catchment hydrology during winter and spring and the link to soil erosion: A case study in Norway [J]. *Hydrology*,2017,4(1):15-31.

[2] 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.

[3] Ferrick M G, Gatto L W. Quantifying the effect of a freeze-thaw cycle on soil erosion: Laboratory experiments [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2005,30(10):1305-1326.

[4] 付强,侯仁杰,李天霄,等.冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J].*农业机械学报*,2016,47(12):99-110.

[5] 付强,蒋睿奇.冻融土壤入渗特性及其影响因素研究进

展[J].*水利科学与寒区工程*,2018,1(6):35-41.

[6] 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.

[7] Yi J, Zhao Y, Shao M A, et al. Soil freezing and thawing processes affected by the different landscapes in the middle reaches of Heihe River Basin, Gansu, China [J]. *Journal of Hydrology*,2014,519(B):1328-1338.

[8] Ouyang W, Liu B, Huang H B. Watershed water circle dynamics during long term farmland conversion in freeze-thawing area [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523:555-562.

[9] 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.

[10] 朱阳春,赵学勇,陈敏,等.冻融作用下土地利用方式对土壤含水率垂直变异性影响[J].*灌溉排水学报*,2015, 34(5):51-54.

[11] 胡伟,张兴义,严月.不同土地利用方式下冻融期黑土水热过程观测研究[J].*土壤与作物*,2018,7(3):312-323.

[12] 张科利,刘宏远.东北黑土区冻融侵蚀研究进展与展望[J].*中国水土保持科学*,2018,16(1):17-24.

[13] 张天宇,郝燕芳.东北地区坡耕地空间分布及其对水土保持的启示[J].*水土保持研究*,2018,25(2):190-194,389.

[14] 马世伟.东北低山丘陵区季节性积雪特性研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.

[15] 吴锰.春季解冻期不同土地利用类型土壤侵蚀特征研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.

[16] 张惠忍,李法虎,吕威.冻融状态和初始含水率对土壤力学性能的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(3):128-133.

[17] 曹志,范昊明.我国东北低山区不同坡位积雪特性研究[J].*冰川冻土*,2017,39(5):989-996.

[18] 王元,刘志辉,陈冲.天山北坡融雪期雪层含水率、密度和雪层温度研究[J].*干旱区研究*,2014,31(5):803-811.

[19] 孙宝洋,肖俊波,刘晨光,等.季节性冻融区解冻期土壤分离能力影响因素研究[J].*泥沙研究*,2018,43(1):51-57.