

东北黑土区不同季节侵蚀沟形态发育比较分析

宋爽, 范昊明, 牛天一

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 侵蚀沟形态特征是了解沟蚀发生、发育的关键性因素,探究不同季节侵蚀沟形态参数变化特征对深入理解侵蚀沟的侵蚀过程和侵蚀沟的治理工作具有重要意义。选取黑龙江省海伦市光荣小流域内的 3 条侵蚀沟为研究对象,探究季节变化下侵蚀沟长度、面积、体积等形态参数值的差异。结果表明:(1)不同季节侵蚀沟横断面形态由沟头到沟尾均呈现出由“V”形向“U”形转变;(2)侵蚀沟在降雨期由沟头前进和沟尾后退所引起的长度增加量大于融雪期由沟头前进所引起的长度增加量;(3)侵蚀沟面积在降雨期的增加量大于融雪期,但不同时期侵蚀沟面积变化位置不同,降雨期侵蚀沟面积增加主要是由长度变化和沟头周围发生大规模崩塌引起的,而融雪期则是由长度变化和沟岸扩张引起侵蚀沟面积增加;(4)侵蚀沟体积在降雨期变化量大于融雪期,这与侵蚀沟长度、面积和径流的剪切能力有关,降雨径流的下切侵蚀能力大于融雪径流。研究结果可为侵蚀沟防治提供理论依据。

关键词: 侵蚀沟; 形态变化; 降雨; 融雪; 黑土区

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0018-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.003

Comparative Analysis of the Development the Geometric Forms of Gully in Different Seasons in Black Soil Area of Northeast China

SONG Shuang, FAN Haoming, NIU Tianyi

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: The morphological characteristics of gully erosion are the key factors to understand the occurrence and development of gully erosion, which are regarded having the great significance to explore the variation characteristics of gully morphology parameters in different seasons for in-depth understanding of the erosion process of gully erosion and its governance. In this study, three erosion gullies in Guangrong small watershed of Hailun City, Heilongjiang Province were selected as the research objects to explore the differences in the length, area, volume and other morphological parameters of erosion gully under seasonal changes. The results showed that: (1) The cross-sectional morphology of erosion gullies changed from “V” shape to “U” shape from the head to the tail in different seasons; (2) The length increase of erosion gullies caused by the gully advance and the gully tail retreat during the rainfall period was greater than that caused by the gully advance during the snow melt period; (3) The increase of erosion gully area in the precipitation period was greater than that in the snow melt period, but the changes of erosion gully area in different periods were different. The increase of erosion gully area in the precipitation period was mainly caused by the change of gully length and the large-scale collapse around the gully head, while the increase of erosion gully area was caused by the change of gully length and the expansion of gully bank in the snow melt period; (4) The variation of gully volume in the precipitation period was greater than that in the snow melt period, which was related to the variation of gully length, area and the shearing capacity of runoff. The undercut gully erosion capacity of runoff generated by rainfall in the precipitation period was greater than that generated by snow melt runoff in the snow melt period. The results can provide theoretical bases for the prevention and control of gully erosion.

Keywords: gully; morphological change; rainfall; snow melt; black soil region

东北黑土区属于北温带半湿润大陆季风性气候,由季节变化造成的土壤侵蚀较为严重^[1]。部分地区冻融作用同融雪径流等外营力所造成的土壤侵蚀已不亚于暴雨造成的土壤侵蚀强度,侵蚀沟为其主要土壤侵蚀形式之一,是泥沙输送的主要来源。侵蚀沟的发育不断蚕食黑土资源,严重影响当地人民的生产、生活和地区经济发展^[2]。因此,探究不同季节侵蚀沟发生、发展原因,确定侵蚀沟的发育机理,对深入理解侵蚀沟的侵蚀进程具有重要意义。

降水是影响侵蚀沟发育的一个重要因素。降雨是土壤侵蚀形成的动力来源,而由于土壤入渗及其他因素的作用,并非所有的降雨都会产生地表径流,地表水汇聚成为径流后以冲刷的形式促使侵蚀沟发育,同时也会引发重力侵蚀,通过综合作用来影响侵蚀过程。降雨一方面通过雨滴击溅作用打击地表,破坏土壤结构,使土壤颗粒随径流分散、迁移、堆积,产生侵蚀现象;另一方面,随着径流冲刷,细小土壤颗粒堵塞土壤孔隙,抑制水分下渗,增加地表径流,随着雨强的增加,这种现象越明显^[3]。降雪是降水的一种形式,融雪期侵蚀沟发育主要是由融雪侵蚀引起的,融雪侵蚀即融雪径流作用下发生的侵蚀过程,属于复合侵蚀的一种^[4]。融雪侵蚀作为水力侵蚀的一种形式,主要受到土壤冻融作用和融雪径流 2 个方面影响。焦剑等^[5]研究发现,东北地区年降雪量占年降水总量的比例在 7%~25%,由此形成的融雪期径流深占全年年径流深比例达 13.3%~24.9%,融雪期输沙模数占全年输沙模数比例达 5.8%~27.7%。冻融作用破坏土壤物理性质,影响土壤渗透性、土壤稳定性、土壤密度^[6-9],进而导致土壤可蚀性改变为融雪侵蚀的发生提供侵蚀基础,融雪径流则提供了侵蚀驱动力^[10]。单次冻融循环后,融冻土壤比未冻土壤表现出更高的可蚀性^[11],Ollesch 等^[12]认为,造成融雪期土壤侵蚀速率等于甚至大于降雨期的主要原因是冻融作用导致冻土层出现,形成不透水层,限制径流入渗,进而增大土壤侵蚀量。王玉玺等^[13]研究表明,冻融作用可使土壤侵蚀量增加 24%~90%。刘绪军等^[14]将沟壑冻融侵蚀划分为沟岸冻裂、沟岸融滑、沟壁融塌、沟坡融泻 4 种形式,其指出冻融作用导致克拜黑土区耕地中沟壑每年扩张 50~100 cm。

侵蚀沟形态特征是了解沟蚀发育程度的关键因素,侵蚀沟形态特征的研究多用形态参数来定量描述,侵蚀沟形态参数主要包括数量、长度、宽度、面积、宽深比、密度、主沟长度、分维值、形态指数和形态因

子等。侵蚀沟形态特征的研究主要集中在侵蚀沟平面形态^[15]、空间格局^[16]和沟头形态^[17]等方面。侵蚀沟形态特征反映其侵蚀发生发展的环境条件,李镇等^[18]研究发现,不同地区因地理环境不同,侵蚀沟形态参数间存在显著差异。赵春红等^[19]研究给出了不同发育阶段侵蚀沟的水力几何形态和断面特征判定标准;沈海鸥等^[20]认为,倾斜度、密度和割裂度等是表征侵蚀沟形态的最优指标;胡刚等^[21]通过 DEM 的叠加分析,探讨了不同季节沟内蚀积变化特征。现如今对侵蚀沟形态的定量研究主要分为野外监测和室内模拟 2 个方面,其中野外测量多集中于长度及相邻间隔的描述^[22],室内模拟方面主要集中于对浅沟的宽度和深度的定点测量^[23]。然而对于侵蚀沟进行长时间的形态特征观测的研究较少。此外,对不同季节侵蚀沟形态特征对比研究鲜有报道。因此,分析不同季节侵蚀沟形态变化特征,确定侵蚀沟发生、发展原因,对于侵蚀沟的防治具有重要意义。

鉴于此,本研究以东北黑土区典型小流域(光荣小流域)为研究对象,利用载波相位差分技术(RTK, real time kinematic)对侵蚀沟进行长期监测,利用 ArcGIS 软件对数据进行处理。通过对不同季节侵蚀沟形态发育比较分析,探究侵蚀沟在不同季节发育机理,为黑土区侵蚀沟的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省海伦市光荣村,东经 126°50′43.47″,北纬 47°39′45.49″,位于东北典型黑土带的中心。该地区处于温带大陆性季风条件的北温区,冬季寒冷干旱,平均气温 -20℃,多年平均降雪量 44.3 mm;夏季高温多雨,平均气温 19.6℃,降雨多集中在 6—8 月,多年平均降水量 511.10 mm。年均气温 2.6℃,年有效积温大于 2 300℃,年日照时间 2 600~2 800 h,无霜期 125 天左右。土壤为典型的黑土,具有粉质黏壤土质地、高黏土含量、高有机质含量、高持水能力、高收缩膨胀和排水差等特点。种植作物以大豆、玉米为主。

1.2 侵蚀沟的选取

通过遥感影像对典型小流域内所有侵蚀沟进行解译,参考前人^[24]的研究,借鉴其对于侵蚀沟发育阶段的划分标准,选择可长期进行水土保持监测与防治的侵蚀沟作为研究对象。根据侵蚀沟横剖面呈“V”形或“U”形、沟头以崩塌的方式溯源前进、沟底土跌水、沟壁陡峻或直立的特点,记录影像上侵蚀沟的位

置并进行实地调查复合,挑选出小流域内最具代表性的侵蚀沟作为研究对象。最终在海伦光荣流域选取 3 条侵蚀沟,编号 G1、G2、G3,3 条侵蚀沟沟头均位于耕地中,沟中部和尾部两侧或单侧有林带,坡度为 $6.4^{\circ}\sim7.5^{\circ}$,坡长为 $332.36\sim406.42\text{ m}$ 。

1.3 侵蚀沟的监测

侵蚀沟测量所使用的仪器是 RTK,其动态测量精度 $(1\pm1)\times10^{-6}\text{ cm}$,垂直精度 $(2\pm1)\times10^{-6}\text{ cm}$ 。该方法的工作原理是以载波相位观测为依据的实时差分 GPS 测量,它能够实时提供监测点在制定坐标系中厘米级精度的三维定位结果,实现地面高程信息的采集。测量前在基准站附近找 3 个固定点,记录 3 点的直角坐标,每次测量前应用已知的 3 点坐标对移动站进行校正。校正后,运用移动站对侵蚀沟测量,测量人员持移动站接收机对侵蚀沟的地形特征进行采点,总体采点间距为 0.5 m ,有地形变化的位置加密测量。其中每次测量时校正点位置不变,测量时采用相对坐标。野外测量时间为 5 月和 10 月,并认为每年的 5—10 月为该年的降雨期,将对应参数变化作为该年降雨期参数变化量;10 月至翌年的 5 月为该年的融雪期,将对应参数变化作为该年融雪期参数变化量。G1、G2 侵蚀沟自 2013 年 5 月开始进行监测,G3 侵蚀沟自 2018 年 10 月开始进行监测。

1.4 数据处理

将所采集的数据应用 Excel 2010 软件进行预处理,通过 ArcGIS 10.2 软件将测量的沟底和沟沿高程点处理成光滑的线和面得到侵蚀沟的长度、面积。对于侵蚀沟体积求算时考虑到,胡刚等^[25]研究发现,用 Tin 模型提取 DEM 数据,在复杂地形中如果不考虑重要特征线而直接将原始采样数据生成 DEM 将会产生许多问题。因此,本文在生成 DEM 数据时选择了适用性更强,精度更高的克里金插值法,为了提高

计算体积的精确度,还运用了微分原理将 DEM 分段处理,然后求和计算总体积。

2 结果与分析

2.1 侵蚀沟形态沿程变化特征

通过野外监测发现,侵蚀沟形态沿程发育具有分异性,根据侵蚀沟横断面形态以及各段发育规律将侵蚀沟分为沟头、沟中和沟尾 3 部分,侵蚀沟横断面在沟头呈“V”形,在沟中部呈宽“U”形,在沟尾处呈窄“U”形。沟头部分侵蚀沟沟头跌水、沟底下切、沟岸扩张均很活跃;沟中部分侵蚀沟沟底几乎不下切、沟底形成稳定的径流路径,侵蚀沟在这一区域发育主要是沟岸崩塌引起侵蚀沟面积增加;沟尾处侵蚀沟深度 $0.5\sim1.0\text{ m}$,因径流在此处汇集较少,径流势能较弱,侵蚀沟沟岸崩塌和沟底下切相对平缓。

将侵蚀沟数据应用 ArcGIS 10.2 软件处理得到分段侵蚀沟面积及分断侵蚀沟面积变化量(图 1)。降雨期侵蚀沟面积发育主要发生在沟头处,侵蚀沟沟头横断面呈“V”形,侵蚀沟沟头崩塌、沟底下切、沟岸扩张均处于最活跃阶段,加上降雨产生的径流多在此处汇集冲刷沟头,致使沟头发生大规模崩塌引起面积大量增加;沟中部横断面呈宽“U”形,此时侵蚀沟发育速度减缓,发育形式也主要以沟岸崩塌为主,但是降雨期地表植被覆盖度高,植被可以很好地保护沟岸,降低降雨径流对沟岸的侵蚀作用,故面积增加较少;沟尾处侵蚀沟横断面呈窄“U”形,此时降雨径流到达时势能较小,所以面积变化较少。融雪期侵蚀沟面积发育主要发生在沟头和沟中处,在融雪径流、冻融作用和重力作用下侵蚀沟沟头发生小规模崩塌,沟头面积增加,融雪期地表植被覆盖率几乎为零,在冻融作用和重力作用下,侵蚀沟中部沟岸发生沟岸冻裂、沟岸融滑、沟壁融塌、沟坡融泻一系列现象,引起侵蚀沟面积增加。

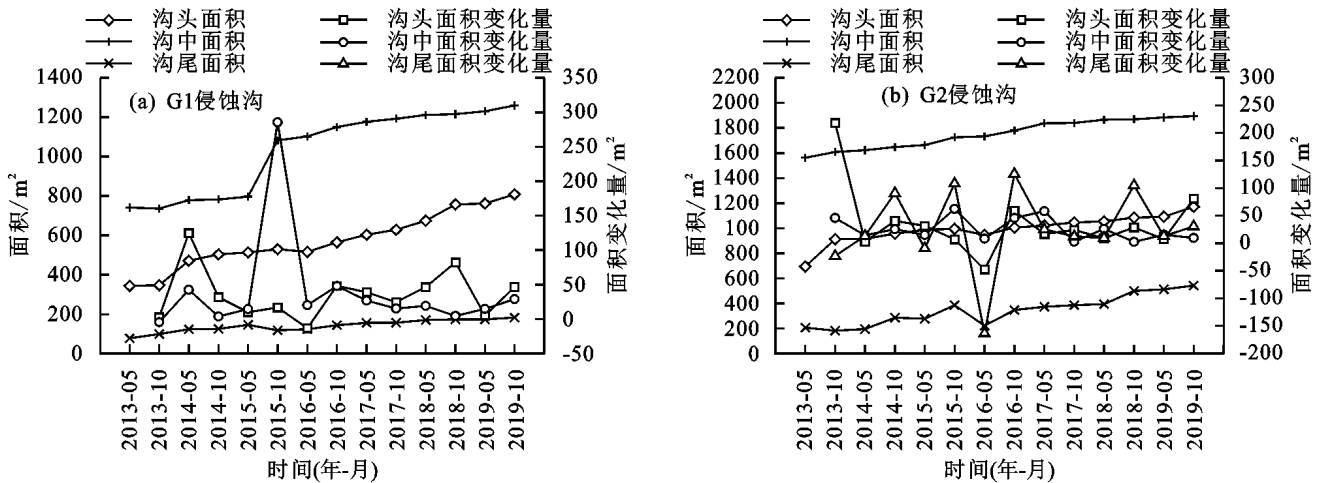


图 1 分段侵蚀沟面积及面积变化

2.2 侵蚀沟长度变化特征

通过野外观测和数据分析得到侵蚀沟 G1、G2 在 2013—2019 年的降雨期和融雪期长度变化情况。由图 2 可知,侵蚀沟在不同时期均处于发育阶段,总体上侵蚀沟长度在降雨期增长量大于融雪期,G3 侵蚀沟在 2018 年 10 月至 2019 年 10 月监测结果与之相同,侵蚀沟长度在不同年份变化量不同(表 1),可能是由于年降水量的差异引起的。降雨期侵蚀沟长度的发育主要是侵蚀沟沟头以崩塌方式溯源前进和沟尾受到径流冲刷后退引起的。东北黑土区降雨模式主要是短历时的集中降雨,降雨径流在侵蚀沟沟头位置汇集,从而冲刷沟头裂缝,致使沟头发生大规模崩塌;雨水通过侵蚀沟沟头和沟沿流入沟内,沿着沟底

向沟尾流去,当径流到达沟尾时其势能还未完全消散就会冲刷沟尾,导致沟尾后退,从而使侵蚀沟长度增加。融雪期主要是冻融作用和重力作用致使侵蚀沟发育,“冻”主要体现在冬季不同温度下,土壤的冻结速度不同,土壤就会产生裂缝,从而破坏土壤物理性质,影响土壤的渗透性和稳定性,进而导致土壤的可蚀性发生改变;“融”主要表现在春季积雪融化和土壤解冻 2 个方面,随着气温的升高,表层土壤开始解冻,而下部土层仍处于冻结状态,土体中形成渗透性极弱的隔水层,此时融化的雪水更容易集流并具有冲刷能力,沟头在水流的冲刷和重力作用下发生小规模崩塌,进而引起侵蚀沟长度增加。

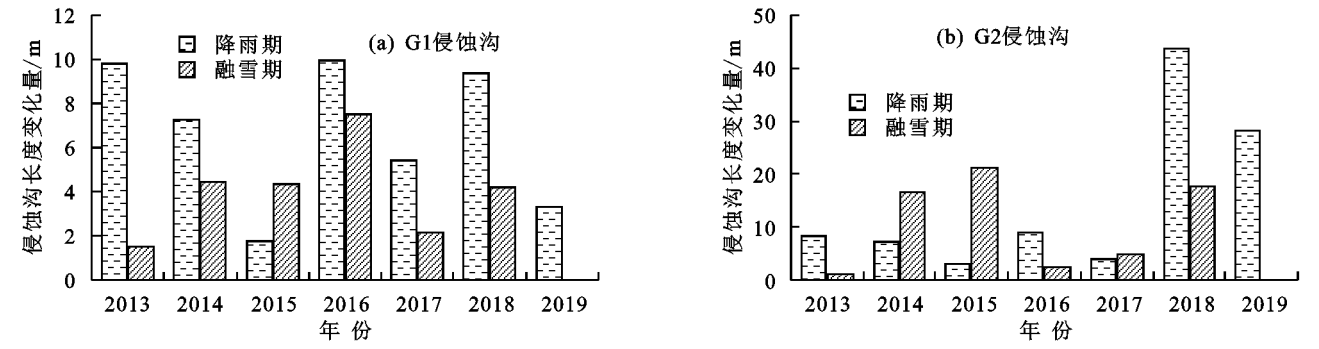


图 2 不同时期侵蚀沟长度变化

表 1 G3 侵蚀沟参数变化

监测时间(年-月)	L/m	$\Delta L/\text{m}$	A/m^2	$\Delta A/\text{m}^2$	V/m^3	$\Delta V/\text{m}^3$
2018-10	277.25		4639.25		10133.92	
2019-05	280.13	2.88	4870.44	231.19	10607.49	473.57
2019-10	290.69	10.56	5124.41	253.97	11790.00	1182.51

注: L 为侵蚀沟长度; ΔL 为长度变化量; A 为侵蚀沟面积; ΔA 为面积变化量; V 为侵蚀沟体积; ΔV 为体积变化量。

2.3 侵蚀沟面积变化特征

由图 3 和表 1 可知,总体上侵蚀沟面积在降雨期的变化量大于融雪期。侵蚀沟所处位置具有地势起伏较小、坡长、坡缓等特点,造成了由降雨所形成的径流量较大,特别在降雨较集中的 6—8 月,降雨大多形成径流冲刷地表,沟头大量的来水,致使侵蚀沟沟头溯源侵蚀。同时,该地区每年在春季和秋季对耕地进行 2 次翻耕,造成土壤固有结构被破坏,抗蚀性降低,而且该地区垄沟深度较大,垄沟内汇集的径流量较大,一旦径流冲破垄沟,对下方侵蚀沟沟头及沟头四周土壤冲刷作用强烈,造成侵蚀沟沟头附近崩塌严重。径流涌入沟内,其产生的势能不能完全在沟内消耗殆尽,会对沟尾进行侵蚀,从而引起侵蚀沟向后延伸,面积增加。秋季土壤深翻造成土壤结构松散,孔隙增加,冷空气和降雪易进入土壤内部,由于侵蚀沟具有一定的深

度,会加大冬季冷空气与侵蚀沟的接触面积,冬季土壤冻结时,在反复冻融作用和重力作用下侵蚀沟沟头溯源前进和沟岸崩塌。春季土壤解冻期温度在正负之间不断变化,土壤冻土层中的水和冰会不断地发生位移和相变,这使裂缝中的冻土层产生冻胀,侵蚀沟沟岸在冻融作用和重力作用下发生沟岸融滑、沟壁融塌和沟坡融泻,进而引起侵蚀沟面积增加。

2.4 不同季节侵蚀沟体积变化特征

由图 4 和表 1 可知,总体上侵蚀沟体积在降雨期增长量大于其在融雪期增长量,G2 侵蚀沟体积在 2017 年 5、10 月出现减少情况,通过野外观测发现,这是由人为填埋造成。侵蚀沟体积在降雨期的增长幅度大于融雪期,这与侵蚀沟长度、面积和径流剪切力有关。同时,某一年中侵蚀沟在降雨期面积小于融雪期,但其体积表现与之相反,这主要是由沟底下切

侵蚀引起的。降雨期雨滴击溅和径流冲刷是侵蚀沟发育的主要驱动力。侵蚀沟处于 2 个坡面的集水处,坡面上的耕地为横垄耕作,当有降雨时,雨水会沿垄沟在沟头上游汇集,一旦垄沟中的径流冲破沟壁,径流将会由沟头流入侵蚀沟内。此时侵蚀沟沟底土壤在降雨作用下,其含水率逐渐增大,抗蚀性降低,径流会侵蚀沟底,并将侵蚀物质运移出沟道,导致侵蚀

沟体积增加。融雪期聚集在沟头的径流所产生的能量小于降雨期。融雪产生的径流运输能力是有限的,距离沟头位置越远,径流剪切力越弱,无法将沉积物运移出沟道,这导致泥沙在沟道内堆积,同时冻融作用造成的沟岸融滑、沟壁融塌、沟坡融泻产生大量堆积物,堆积物在沟坡处形成稳定坡脚,抑制侵蚀沟进一步发育,从而降低侵蚀沟体积增加量。

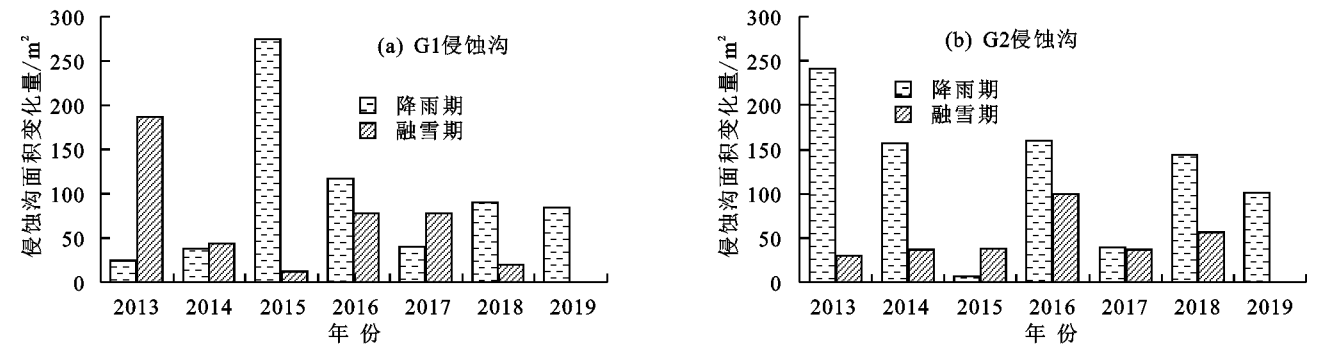


图 3 不同时期侵蚀沟面积变化

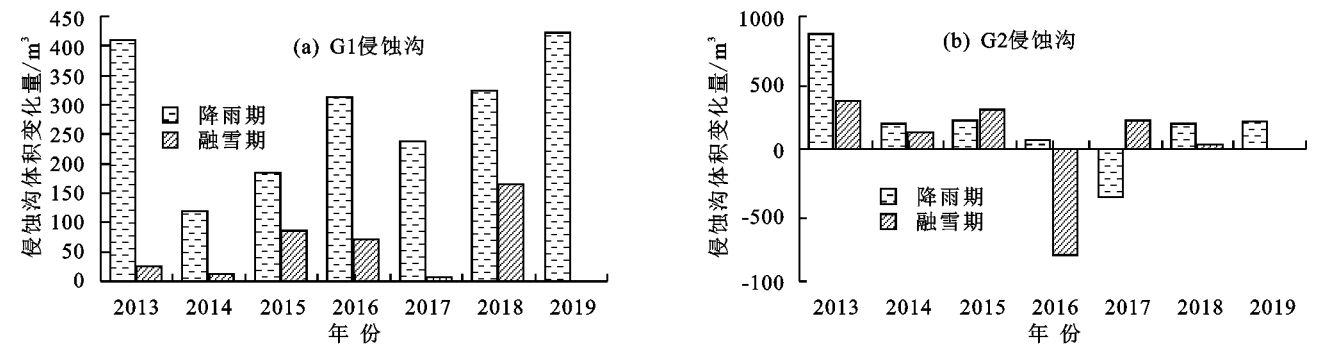


图 4 不同时期侵蚀沟体积变化

3 结论

(1)侵蚀沟沿程形态变化具有分异性,侵蚀沟横断面在“沟头—沟中—沟尾”呈现出“V”形—宽“U”形—窄“U”形相互转变。侵蚀沟不同形态在不同时期面积变化存在差异性,降雨期侵蚀沟面积增加主要发生在沟头跌水、沟岸崩塌、沟底下切较为活跃的沟头处;融雪期侵蚀沟面积增加除发生在沟头处外,在沟中部发育也较为强烈。

(2)侵蚀沟长度在降雨期的增长量大于融雪期。由于降雨期径流汇集在沟头,致使沟头发生大规模崩塌,径流所产生的能量不能完全在侵蚀沟内消耗殆尽,会继续冲击沟尾,导致沟尾后退;融雪期由降雪和融雪产生的径流量是有限的,在冻融作用、重力作用和融雪径流作用下,侵蚀沟沟头发生小规模崩塌,有限的径流量所携带势能不足以造成侵蚀沟沟尾后退。

(3)侵蚀沟面积变化量总体上为降雨期大于融雪期。由于降雨期由侵蚀沟沟头前进和沟尾后退引起侵蚀沟面积增加量大于融雪期由沟岸融滑、沟壁融

塌、沟坡融泻等过程引起侵蚀沟面积的增长量。

(4)侵蚀沟体积在降雨期的变化量大于融雪期。降雨期雨滴击溅和径流冲刷是侵蚀沟发育的主要驱动力,降雨产生的径流势能大,运输能力强,会将侵蚀物质运移出沟道,还会产生下切侵蚀,使侵蚀沟深度加深,体积增加;而融雪期侵蚀沟内的径流运输能力有限,不能将侵蚀物质运出沟外,融雪期侵蚀沟沟岸融滑、沟壁融塌以及沟坡融泻所产生的侵蚀物质在侵蚀沟坡脚处沉积,形成稳定的坡脚,从而抑制侵蚀沟的发育。

参考文献:

[1] 范昊明,蔡强国,王闪红.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
[2] 王平,李浩,陈强,等.典型黑土区不同尺度观测场地融雪径流[J].水土保持通报,2014,34(5):244-247,253.
[3] 姜芑,严力蛟,董有浦,等.人工降雨条件下南方坡耕地水土流失特征[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2013,41(4):96-99,104.

- [4] 华文杏.辉发河流域坡面与流域尺度融雪侵蚀研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [5] 焦剑,谢云,林燕,等.东北地区融雪期径流及产沙特征分析[J].地理研究,2009,28(2):333-344.
- [6] Kurylyk B L, Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably saturated, non-deformable soils [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 60: 160-177.
- [7] Oztas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability [J]. *Catena*, 2003, 52: 1-8.
- [8] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area [J]. *Catena*, 2017, 148: 195-203.
- [9] Ferrick M G, Gatto L W. Quantifying the effect of a freeze-thaw cycle on soil erosion: Laboratory experiments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 30(10): 1305-1326.
- [10] 陈飞,蔡强国,孙莉英.青藏高原纳木错流域冰雪融水径流量估算[J].中国水土保持科学,2016,14(2):127-136.
- [11] Badeli S, Carter A, Dore G. Effect of laboratory compaction on the viscoelastic characteristics of an asphalt mix before and after rapid freeze-thaw cycles [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 146(2): 98-109.
- [12] Ollesch G, Sukhanovski Y, Kistner I, et al. Characterization and modelling of the spatial heterogeneity of snowmelt erosion [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 30(2): 197-211.
- [13] 王玉玺,解运杰,王萍.东北黑土区水土流失成因分析[J].水土保持科技情报,2002(3):27-29.
- [14] 刘绪军,景国臣,齐恒玉.克拜黑土区沟壑冻融侵蚀主要形态特征初探[J].水土保持科技情报,1999(1):3-5.
- [15] Zhang S W, Li F, Li T Q, et al. Remote sensing monitoring of gullies on a regional scale: A case study of Kebai region in Heilongjiang Province, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(5): 602-611.
- [16] Liu Y, Fu B J, Lü Y H, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2012, 138(1): 404-414.
- [17] Wu Y Q, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system [J]. *Catena*, 2005, 63: 154-166.
- [18] 李镇,秦伟,齐志国,等.东北漫川漫岗和山地丘陵黑土区侵蚀沟形态特征遥感分析[J].农业工程学报,2019, 35(14):133-140.
- [19] 赵春红,高建恩.坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何形态[J].水科学进展,2016,27(1):22-30.
- [20] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7): 162-170.
- [21] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J].地理科学,2009,29(4):545-549.
- [22] Cheng H, Zou X Y, Wu Y Q, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(1): 4-14.
- [23] 郭明明,王文龙,李建明,等.黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J].农业工程学报,2015,31(15):114-123.
- [24] 秦伟,左长清,范建荣,等.东北黑土区侵蚀沟治理对策[J].中国水利,2014(20):37-41.
- [25] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J].水土保持学报,2004,18(4):16-19,41.