

黑土坡面细沟形态及剖面特征试验研究

车晓翠, 赵文婷, 沈海鸥, 牟廷森

(吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

摘要: [目的] 对比分析不同坡度条件下黑土坡面细沟宽度、深度、宽深比、细沟剖面形态及沟壁坡度特征, 为东北黑土区坡耕地细沟侵蚀防治提供科学参考。[方法] 在野外径流小区不同坡度(5°和10°)下开展汇流冲刷试验[1 L/(min·m²), 历时60 min]。[结果] ①试验条件下, 黑土坡面细沟剖面形态主要为“U”型, 细沟平均宽深比介于2.3~4.9之间; ②随着坡度的增大, 细沟下切侵蚀作用增强幅度明显超过细沟沟壁崩塌侵蚀作用, 导致细沟宽深比减小, 细沟剖面形态由“宽浅型”向“窄深型”转化; ③对于坡面不同位置, 细沟平均宽深比在坡上、坡中、坡下位置分别为2.7、1.6、5.4, 即自坡面上部到下部依次表现为“宽浅型”—“窄深型”—“宽浅型”的细沟剖面变化特征; ④黑土坡面细沟沟壁坡度主要为37.7°~85.2°, 其值随着地面坡度的增加而增大, 且不同坡位之间细沟沟壁坡度表现为坡中位置大于坡上和坡下位置。[结论] 防治东北黑土区陡坡耕地中段位置的细沟发育尤为重要, 对缓解该区水土流失问题有重要作用。

关键词: 细沟剖面; 汇流冲刷; 沟壁坡度; 坡度; 黑土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0055-05

中图分类号: S157.1

文献参数: 车晓翠, 赵文婷, 沈海鸥, 等. 黑土坡面细沟形态及剖面特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 55-59. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.009; Che Xiaocui, Zhao Wenting, Shen Haiou, et al. Experimental study of rill morphology and its profile characteristics at Chinese mollisol hillslope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 55-59.

Experimental Study of Rill Morphology and Its Profile Characteristics at Chinese Mollisol Hillslope

Che Xiaocui, Zhao Wenting, Shen Haiou, Mou Tingsen

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of the widths, depths, width-depth ratios, profiles, and wall gradients of rills on a mollisol hillslope were analyzed to provide a scientific reference for controlling rill erosion on slope croplands in the Chinese mollisol region. [Methods] Inflow scour experiments with a 1 L/(min·m²) inflow rate were conducted over 60 min under different typical slope gradients (5° and 10°) in natural runoff plots. [Results] ① The rill profiles of the mollisol hill slope were mainly “U” shaped and the mean rill width-depth ratios ranged from 2.3 to 4.9. ② As the slope gradient increased, the undercut erosion of the rills exceeded that of the collapse erosion of the side-walls, which induced a decrease in the rill width-depth ratio and a variation in the rill profiles from a “wide and shallow type” to a “deep and narrow type”. ③ The mean rill width-depth ratios of the upper, middle, and lower hillslope positions were 2.7, 1.6, and 5.4, respectively. This reveals that the rill profile characteristics transformed from the “wide and shallow type” to the “deep and narrow type”, and then to the “wide and shallow type” from the upper hillslope to the lower hillslope. ④ The rill wall gradients of the mollisol hillslope mainly ranged from 37.7° to 85.2°, and increased with an increase in the slope gradient. The rill wall gradients of the middle hillslope were greater than those of the upper and lower hillslopes. [Conclusion] It is much more important to control rill development in the middle parts of relatively steep hillslopes than other parts; this is beneficial for alleviating rill erosion in the

收稿日期: 2020-06-02

修回日期: 2020-06-24

资助项目: 国家重点研发计划项目“黑土侵蚀防治机理与调控技术”(2016YFE0202900); 国家自然科学基金项目“黑土区坡耕地侵蚀沟发育及其形态特征研究”(41601281)

第一作者: 车晓翠(1979—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持效益评价研究。Email: xiaocui@jlau.edu.cn.

通讯作者: 沈海鸥(1986—), 女(汉族), 吉林省大安市人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。Email: shensusan@163.com.

mollisol region of China.

Keywords: rill profile; inflow scour; rill wall gradient; slope gradient; mollisol

细沟在坡耕地上分布广泛,其在坡面上的分叉、合并及连通能够促进细沟侵蚀的发展;细沟侵蚀可造成耕地面积减少,土地退化以及粮食产量降低等危害^[1]。由细沟发育形成的侵蚀形态具有明显的时空演变特征,并且反过来影响细沟侵蚀过程^[2]。侵蚀性降雨或融雪产生的地表径流对坡面细沟的产生有重要影响,径流侵蚀力是细沟发育的直接动力^[3]。细沟产生后,径流搬运能力进一步增强,坡面侵蚀量也随之显著增加,从而塑造出不同的细沟形态^[4]。坡度也是影响坡面细沟侵蚀及其形态特征的重要因子,土壤抗蚀能力一般会随着坡度的增大而减小^[5],从而导致坡度越大,细沟侵蚀越严重,细沟形态越复杂^[6-7]。在黄土坡面,通过描述细沟平均宽度、深度以及细沟剖面变化等分析细沟形态特征^[8];在细沟流量一定的条件下,伴随着细沟发育,细沟剖面形态呈现由“宽浅型”向“窄深型”的变化特征^[9]。在红壤坡面,通过选用细沟宽深比作为指标,研究细沟剖面形态变化特征^[10]。可见,目前关于细沟形态及其剖面特征的研究主要集中在黄土和红壤土区域,且研究方法主要是基于试验土槽开展的室内模拟试验。但是,由于空间区域不同导致土壤侵蚀特性不同^[10-11],使得黑土与其他土壤在坡耕地上的细沟形态特征之间可能存在一定差异。

东北黑土区独特的自然环境条件和人类生产活动方式,导致该区土壤侵蚀危害严重^[12]。坡耕地是黑土区土壤侵蚀的主要策源地,其中,细沟侵蚀在坡面土壤侵蚀中占据重要比重,因此,关于黑土区坡耕地细沟侵蚀的相关研究逐渐受到更多学者的关注^[13]。但是,目前关于黑土区坡耕地细沟形态及其剖面特征的研究较少,且缺少对细沟沟壁坡度的分析。鉴于此,本研究基于野外径流小区,采用汇流冲刷试验方法,对比分析不同坡度条件下黑土坡面细沟宽度、深度、宽深比及细沟剖面形态和沟壁坡度的特征,旨在为东北黑土区坡耕地细沟侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2017 年 8 月在吉林农业大学青沟坡面径流观测场(125°21'E, 43°52'N)进行。该观测场所在地区四季分明,雨热同季,春季干燥多风,夏季高温多雨,冬季寒冷漫长,属于温带大陆性季风气候,年日照

时数为 2 688 h,年平均气温 4.8 °C^[13]。该地区属于典型黑土区,成土母质由黏土和亚黏土组成,其颗粒组成为砂粒(>50 μm)质量分数 10.2%,粉粒(2~50 μm)质量分数 80.2%,黏粒(<2 μm)质量分数 9.6%,有机质含量为 25.6 g/kg。

1.2 试验设计及方法

径流小区长度 20 m(水平投影),宽度 5 m,坡面为翻耕裸露处理,翻耕深度 20 cm,土壤容重为 1.20 g/cm³,试验前期末对径流小区内土壤进行饱和处理,实测土壤含水量为 26.7%~27.7%。依据东北黑土区坡耕地典型坡度特点^[14-15],将坡度设计为 5°和 10°。汇流冲刷对细沟侵蚀的发生和发展有重要影响,故采用汇流冲刷试验方法。由于长春地区 20 a 一遇的最大降雨强度接近 60 mm/h^[16],经换算后采用 1 L/(min·m²)的汇流流量进行冲刷,冲刷历时为 60 min。试验处理重复 2 次。冲刷试验结束后,采用测尺从坡上部开始每隔 20~50 cm 测定坡面细沟宽度及深度;此外,自坡顶以 5 m 为间隔选取 3 个典型细沟剖面,分别代表坡上、坡中、坡下位置,并采用直尺详细量取其所在位置断面的细沟顶部宽度和底部宽度,并以一侧沟沿为起点,每隔 1 cm 纵向测量其断面深度,从而获取详细的细沟剖面形态数据。

1.3 参数描述

(1) 细沟沟壁坡度是指细沟沟壁上所有的相邻两个测点连线与水平线之间的夹角进行加权求和,权重是按相邻测点之间的长度占总细沟沟壁长度的百分比进行计算。具体又可划分为细沟左侧沟壁坡度和细沟右侧沟壁坡度。公式表达形式为:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \quad (1)$$

式中: α 为细沟沟壁坡度(°); α_i 为第 i 点与第 $i+1$ 点之间的线段与水平面之间的夹角(°); X_i 为第 i 点与第 $i+1$ 点之间的线段长度(cm)。

(2) 细沟宽深比是指细沟宽度与对应深度的比值,为一无量纲参数^[17-18]。公式表达形式为:

$$R_{WD} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (2)$$

式中: R_{WD} 为细沟宽深比; W_i 为第 i 个测点处的细沟宽度(cm); D_i 为第 i 个测点处的细沟深度(cm); n 为坡面上的测点总数。

1.4 数据处理

使用 Excel 2016 对试验数据进行收集整理及制

作图表,使用 Photoshop CS 6 软件测量细沟沟壁坡度,使用 SPSS 19.1 中方差分析和多重比较(LSD)进行显著性水平检验($p < 0.05$)。由于坡耕地上产生的细沟宽度一般小于 30 cm,最大为 50 cm^[19],为了方便比较不同位置的断面特征,假设其中轴线为 25 cm,以 X 轴最右侧数值与最左侧数值的差值为细沟宽度,Y 轴方向为细沟深度建立坐标系,绘制该位置的细沟剖面图。

2 结果与分析

2.1 细沟基本形态特征分析

通过对比 5°和 10°坡面细沟宽度的变化,发现试验条件下,细沟宽度的最大值均超过 40.0 cm,最小值为 6.0~9.0 cm,平均值均小于 20.0 cm(见表 1)。随着坡度的增加,细沟宽度的最大值无显著变化,而最小值和平均值分别减少 33.3%和 27.0%。可见,本研究中细沟宽度随着坡度的增加总体表现为减小的趋势。分析原因是,地面坡度越大,其径流汇集时间越短,导致形成的细沟股流的冲刷能力增强^[18];此外,由于 2 个坡度下汇流冲刷流量相同,细沟股流集中冲刷细沟底部的能力增强,就会造成其对细沟沟壁崩塌侵蚀的影响减弱,因此,细沟宽度的变化随着坡度的增加而减小。

表 1 5°和 10°坡面细沟形态特征指标对比

坡度	数值	宽度/cm	深度/cm	宽深比
5°	最大值	42.0 ^A	12.0 ^B	11.5 ^A
	最小值	9.0 ^A	2.0 ^A	1.2 ^A
	平均值	18.5 ^A	4.2 ^B	4.9 ^A
10°	最大值	41.0 ^A	18.0 ^A	10.0 ^A
	最小值	6.0 ^B	2.0 ^A	0.6 ^A
	平均值	13.5 ^B	7.0 ^A	2.3 ^B

注:相同细沟形态指标及相同数值条件下数据后不同大写字母表示 5°和 10°坡面处理间差异显著($p < 0.05$);5°和 10°坡面处理细沟宽度深度测定的样本数分别为 152 和 140。

5°和 10°坡面细沟深度的最大值均小于 20.0 cm,最小值均为 2.0 cm,平均值均小于 10.0 cm(见表 1)。当坡度由 5°增加为 10°,细沟深度最小值无显著变化,而最大值和平均值分别增加 50.0%和 66.7%。可见,试验条件下,细沟深度随着坡度的增加而明显增大。这是由于坡面处理为翻耕裸露处理,翻耕深度为 20 cm,且已有研究表明,细沟深度一般不超过 20 cm^[19],这就保证了细沟下切侵蚀的发育;此外,坡度越大,径流冲刷侵蚀能力越强,其径流能量主要用于细沟下切侵

蚀^[9]。因此,细沟深度的变化随着坡度的增加而增加。

进一步分析细沟宽深比的变化,发现最大值可达到或超过 10.0,最小值均为 1.0 左右,平均值变化于 2.3~4.9,均小于 5.0(见表 1)。随着坡度由 5°增加为 10°,细沟宽深比最大值和最小值均无显著变化,而平均值明显减小 53.1%。可见,试验条件下,细沟宽深比随着坡度的增加总体表现为减小的趋势。这也与细沟宽度和深度随坡度的变化趋势有关。

综上所述,细沟平均宽度,深度,宽深比分别变化于 13.5~18.5 cm,4.2~7.0 cm,2.3~4.9;随着坡度的增加,细沟下切侵蚀作用增强幅度明显超过细沟沟壁崩塌侵蚀作用,造成细沟宽度减小、细沟深度增加,进而导致细沟宽深比减小。

2.2 细沟剖面形态特征分析

为了进一步分析细沟基本形态特征,分别绘制了 5°和 10°坡面不同坡位典型细沟剖面图(见图 1)。由图 1 可知,黑土坡面细沟剖面形态主要表现为“U”型。而在黄土^[9]、黑垆土^[8]以及红壤土^[10]地区,“V”型剖面属于典型细沟剖面之一,在黑土坡面上,该“V”型剖面形态则较少。造成这种结果的原因主要与黑土的抗冲蚀能力相关,由于黑土腐殖质层的有机质含量较高,土壤表层结构疏松,造成黑土的抗蚀能力较差^[20];其土壤本身性质能够影响细沟侵蚀形态特征^[10,15]。且已有相关研究^[21]表明,黑土的抗冲蚀能力在一定条件下甚至弱于黄土、红壤土以及紫色土。此外,黑土层较薄,汇流冲刷极易到达犁底层,犁底层的土壤为黏黄土,其土壤质地黏重,水分下渗能力弱^[14],导致径流汇集,向细沟两侧蔓延,在不断下切侵蚀过程中,修饰细沟沟壁,形成“U”型细沟剖面形态。

通过对比 5°和 10°坡面不同坡位典型细沟剖面,发现随着坡度的增加,黑土坡面更趋向于形成“窄深型”细沟(见图 1)。分析原因是,随着坡度的增大,汇流沿坡面向下的分力增大,径流流速也随之增大^[9,22],径流的冲刷能力沿流动方向逐渐增强,对坡面的冲刷更为剧烈,土壤的抗冲蚀能力一般也随坡度的增大而减小^[5],导致细沟沟底下切侵蚀增强。因此,10°坡面较 5°坡面更易产生“窄深型”的“U”型细沟。坡度越大,细沟剖面形态由“宽浅型”向“窄深型”发展的现象不止出现在黑土坡面上,同样存在于黄土坡面^[9]。可见,坡度对坡面细沟剖面形态的发育有重要影响。

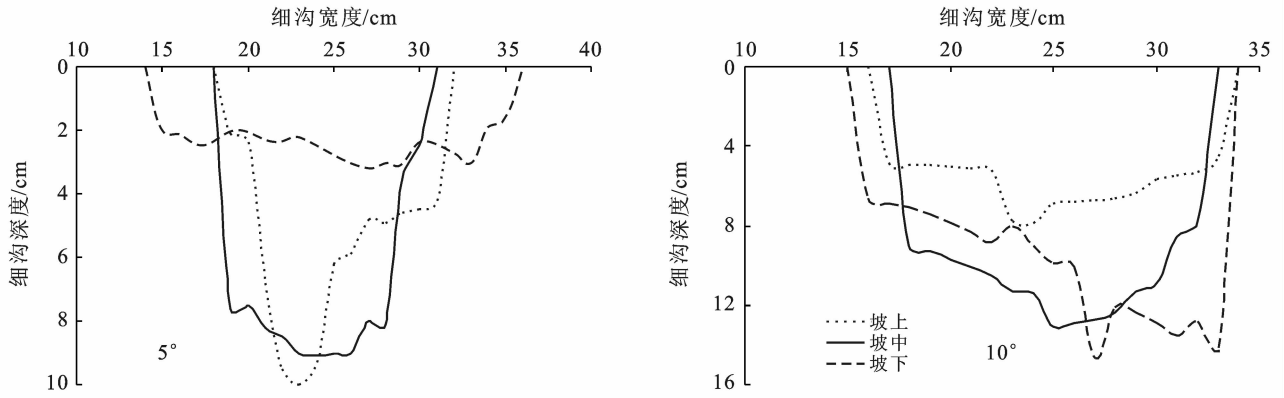


图 1 5°和 10°坡面不同坡位典型细沟剖面

黑土坡面上、中、下 3 个坡位之间的细沟剖面形态也存在一定差异(见图 1)。5°坡面坡上,坡中,坡下位置的细沟宽深比分别为 2.4, 1.7, 8.9, 10°坡面坡上,坡中,坡下位置的细沟宽深比分别为 3.1, 1.5, 1.9 (见图 2)。结果表明,黑土坡面从上到下的细沟剖面形态呈现为由“宽浅型”到“窄深型”再到“宽浅型”的变化趋势。其原因主要包括 2 个方面: ①与土壤团聚度有关,有研究指出,坡上和坡下位置的土壤团聚度较坡中位置的土壤团聚度高,造成坡中位置土壤抗蚀性较其他部位差^[22]; ②当汇流到达坡中位置,在沿坡面向下继续运动的过程中,其重力势能主要转化为水流的动能,径流流速逐渐增加,侵蚀能力加强,其下切侵蚀作用大于沟壁崩塌侵蚀,而径流流经坡上部位和坡中部位后,挟带大量泥沙至坡下部位并发生沉积,使坡下部位的细沟深度变浅,而径流流路变宽,造成细沟随之加宽。因此,相对于坡上和坡下位置而言,坡中位置更易形成“窄深型”细沟。

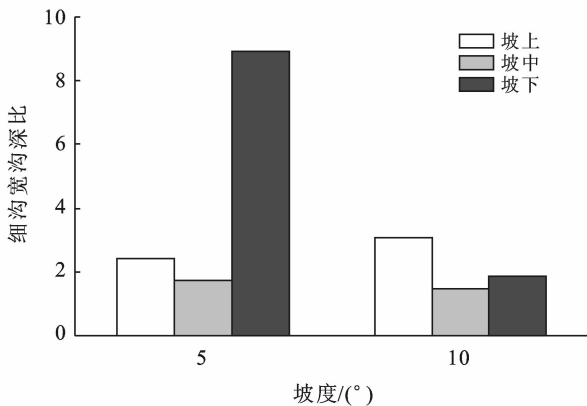


图 2 5°和 10°坡面不同坡位细沟宽深比

2.3 细沟沟壁坡度的变化特征

由图 1 可知,黑土坡面细沟沟壁较陡。应用 Photoshop CS6 软件进行测量,得出黑土坡面细沟沟壁坡度主要分布于 37.7°~85.2°之间;其中,细沟左

侧沟壁坡度和右侧沟壁坡度的平均值分别为 75.2°和 70.6°(见表 2)。对比不同坡度条件细沟沟壁坡度可知,5°和 10°坡面细沟左侧沟壁坡度平均值分别为 70.0°和 80.5°,细沟右侧沟壁坡度平均值分别为 60.2°和 81.1°。可见,细沟沟壁坡度随着地面坡度的增加而增大,即细沟沟壁边坡逐渐变陡。分析原因是,坡度作为影响坡面土壤侵蚀的主要因子,坡面径流的位能、冲刷能力和挟沙能力均随坡度的增加而明显增强^[23],入渗量则随之减小^[5],细沟侵蚀量增大,从而造成细沟沟壁被侵蚀得更加陡峭。由此可见,东北黑土区陡坡耕地,特别是在无植被生长或处于植被生长幼苗期的裸露休闲地上发育的细沟沟壁坡度较大,对应的细沟侵蚀防治也更加困难。

表 2 5°和 10°坡面各坡位细沟沟壁坡度

坡度	坡位	沟壁坡度/(°)	
		左侧	右侧
5°	坡上	71.0 ^{Bb}	69.8 ^{Ba}
	坡中	82.0 ^{Aa}	73.0 ^{Ba}
	坡下	57.0 ^{Bc}	37.7 ^{Bb}
10°	坡上	78.0 ^{Aa}	77.9 ^{Aa}
	坡中	84.0 ^{Aa}	80.1 ^{Aa}
	坡下	79.4 ^{Aa}	85.2 ^{Aa}

注:相同坡位及相同沟壁坡度条件下数据后不同大写字母表示 5°和 10°坡面处理间差异显著,相同坡度及相同沟壁坡度条件下数据后不同小写字母表示不同坡位间差异显著($p < 0.05$);5°坡面坡上、坡中、坡下细沟沟壁坡度测量样本数分别为 14, 13, 22;10°坡面坡上、坡中、坡下细沟沟壁坡度测量样本数分别为 18, 16, 19。

对比黑土坡面上、中、下 3 个坡位细沟沟壁坡度,可知 5°坡面坡上,坡中,坡下位置的细沟沟壁坡度分别为 70.4°, 77.5°, 47.4°;10°坡面坡上,坡中,坡下位置的细沟沟壁坡度分别为 78.0°, 82.1°, 82.3°(见表 2)。结果表明,细沟沟壁坡度与其所处坡段位置存在一定关系,即坡中位置细沟沟壁坡度一般大于坡上和坡下位置,尤其在坡度较为平缓的条件下;但是,随着

坡度的增加,坡中位置细沟沟壁坡度的变化趋势明显减弱。分析原因是,径流在坡面上部形成之后,便逐渐汇集,导致径流流速增大,其对应的径流冲刷能力也随坡面位置的变化而增强,使得细沟沟壁呈现逐渐变陡的变化趋势;但是,在径流冲刷能力增强到一定程度后,由于径流挟带的泥沙逐渐增多,导致泥沙在坡面下部发生临时性沉积,使得细沟沟壁坡度变缓;此外,已有相关研究指出东北黑土区坡耕地坡中位置的土壤侵蚀强度较其他坡位更大^[22]。因此,黑土坡面坡中位置的细沟沟壁边坡更为陡峭,应作为黑土坡面细沟侵蚀防治的重点部位。

3 结论

(1) 试验条件下,细沟平均宽度,深度,宽深比分别变化于 13.5~18.5 cm, 4.2~7.0 cm, 2.3~4.9; 黑土坡面更易形成“U”型细沟剖面形态。随着坡度的增加,细沟下切侵蚀作用增强幅度明显超过细沟沟壁崩塌侵蚀作用,造成细沟剖面形态由“宽浅型”向着“窄深型”发育。黑土坡面从上到下的细沟剖面形态呈现为由“宽浅型”到“窄深型”再到“宽浅型”的变化。因此,相对于坡上和坡下位置而言,坡中位置更易形成“窄深型”细沟。

(2) 黑土坡面细沟沟壁坡度主要介于 37.7°~85.2°,其值随着地面坡度的增加而增大;此外,细沟沟壁坡度与其所处坡段位置存在一定关系,即坡中位置的细沟沟壁坡度普遍大于坡上和坡下位置。综上所述,东北黑土区陡坡耕地,特别是无植被生长或处于植被生长幼苗期的裸露休闲地坡中位置发育的细沟沟壁边坡更为陡峭,对应的细沟侵蚀防治尤为关键。

[参 考 文 献]

- [1] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J]. 土壤学报,1989,26(2):109-116.
- [2] Brunton D A, Bryan R B. Rill network development and sediment budgets [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000,25(7):783-800.
- [3] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1319-1325.
- [4] 郑粉莉. 黄土高原坡耕地的细沟侵蚀及其防治途径[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(1):19-25.
- [5] 刘青泉,陈力,李家春. 坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J]. 应用数学和力学,2001,22(5):449-457.
- [6] 吕刚,刘雅卓,陈鸿,等. 褐土和棕壤坡耕地细沟侵蚀过程及侵蚀产沙特征[J]. 水土保持学报,2019,33(3):64-69.
- [7] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010,35:1456-1467.
- [8] 赵新凯. 两种典型黄土坡面地形发育及侵蚀规律对比实验研究[D]. 河北 邯郸:河北工程大学,2019.
- [9] 王健,李鹤,孟秦倩,等. 黄土坡面细沟横断面形态及其水流动力学与挟沙特性[J]. 水土保持学报,2015,29(3):32-37.
- [10] 郝好鑫,郭忠录,李朝霞,等. 红壤坡面细沟横断面形态及水动力学特性研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(2):363-370.
- [11] 高杨,吕宁,薛重生,等. 不同区域土地利用与土壤侵蚀空间关系研究[J]. 中国水土保持,2006(11):21-23,58.
- [12] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. 水土保持通报,2019,39(4):314-319.
- [13] Shen Haiou, He Yunfeng, Hu Wei, et al. The temporal evolution of soil erosion for corn and fallow hillslopes in the typical Mollisol region of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019,186:200-205.
- [14] 阎百兴,杨育红,刘兴土,等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持,2008(12):26-30.
- [15] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [16] 刘志生,张莉,杨志东,等. 长春市新一代暴雨强度公式的推求研究[J]. 中国给水排水,2014,30(9):147-150.
- [17] 和继军,吕焯,宫辉力,等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报,2013,44(4):398-405.
- [18] 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.
- [19] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报,1987,1(1):36-48.
- [20] 赵恒策,魏霞,贺燕,等. 冻融对土壤团聚体特征以及可蚀性 K 值的影响[J]. 水土保持研究,2019,26(5):1-6,13.
- [21] 张振国. 土壤抗侵蚀指标的建立及初步应用[D]. 陕西西安:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2010.
- [22] 张加子琦,贾燕峰,王佳楠,等. 东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数特征[J]. 土壤学报,2020,57(3):590-599.
- [23] Zhao Qinghe, Li Dingqiang, Zhuo Muning, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015,29(2):609-621.