

黄土高原沟头侵蚀柔性防护措施研究

周明月, 王文刚, 朱首军, 王健, 高晗

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:黄土高原沟壑纵横, 塬面水流在入沟过程中, 不断冲刷沟头, 导致沟底下切, 沟壁坍塌, 形成溯源侵蚀。为防止从沟头跌落的水流对沟底冲刷, 减缓沟头侵蚀发展, 保护塬面, 采用柔性防护措施消减水流动能。试验通过覆麦草和土工布模拟柔性防护措施, 研究柔性防护措施的消能机理。试验以裸土为对照, 测定在高水头冲刷下, 不同防护措施的冲刷坑深度、坑径、坑面积及坑容积, 定量分析了柔性防护措施的作用效果。结果表明: 随着覆麦草量的增加, 冲刷坑深度呈线性递减、容积呈指数递减; 而加覆土工布, 能显著提升防护效果; 在 4.93 m 试验水头冲刷 3 min 的条件下, 覆 2 400 g/m² 麦草和 1 层土工布能够完全保护土面不被冲刷。柔性防护措施具有良好的消减水流动能的作用, 对防止沟床下切, 有效保护塬面, 防治沟头侵蚀效果显著。

关键词:柔性防护; 冲刷坑; 沟头防护; 黄土高原

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0007-04

Study on Flexible Protection Measures for Gully Head Erosion in Loess Plateau

ZHOU Mingyue, WANG Wengang, ZHU Shoujun, WANG Jian, GAO Han

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The gully is interlaced on Loess Plateau and the water flow in the gully is continuously scouring the gully head, which can cause the bottom of the gully to cut and the gully wall to collapse, causing headward erosion. The flexible protective measures can be used to reduce water flow energy in order to prevent the water flow falling from the gully head from scouring the gully bottom and slowing the development of the gully erosion, and to protect the surface. The wheat straw and geotextile were used to cover the soil surface and examine the energy dissipation mechanism of these protective measures compared with the bare soil through indoor simulation experiment. The depth, diameter, area and volume of the scouring pit which caused by high water head and under different protective measures were measured, and the effect of flexible protective measures were analyzed quantitatively. The results showed that the depth of the scouring pit decreased linearly and the volume decreased exponentially with the increase of the amount of wheat straw, and the addition of geotextile could significantly improve the protective effect; under 4.93 m water head for 3 minutes washing, covering 2 400 g/m² of wheat straw and a layer of geotextile could completely protect the soil surface from being washed away. The flexible protective measures have a good effect to reduce the water flow energy, and are effective in preventing the undercut of the gully bed, effectively protecting the plateau surface, preventing the erosion of the gully head.

Keywords: flexible protection; scour pit; gully head protection; Loess Plateau

黄土高原(34°—40°N, 103°—114°E)总面积 6.42 × 10⁵ km², 其中水土流失面积 4.3 × 10⁵ km² [1], 地形破碎, 主要由塬梁峁组成, 其中塬面对当地农业与社会发展发挥着重要作用。沟头侵蚀致使塬面不断萎缩, 如董志塬每年的农田损失量为 42 hm² [2], 给人们

带来巨大的经济损失和生态损失。沟谷发育是黄土塬面不断减少的主要原因 [3], 塬面水流下沟, 导致切沟发育, 切沟发展导致塬面沟壑纵横, 朱显谟 [4] 将切沟发育分为 3 个阶段, 黄土塬区沟头和沟谷上游应是保护塬面的重点 [3]。目前防治措施主要是“固沟保

源”,固沟大多通过建淤地坝、挡土墙、沟道排洪工程、谷坊等刚性防护措施^[5],而保源主要是通过沟头防护工程^[5-9]。其中一种沟头防护工程是排水式,由半环式沟埂(拦截坡面径流,防止径流冲刷沟道,加剧侵蚀,同时能够为塬面耕地提供灌溉用水)与排水管(当集水面积大,来水量超过沟埂的拦截水量时,应及时排出)组成;当排水时,要避免水流对沟底进行冲刷,目前主要采用混凝土或浆砌石将沟底进行硬化,但这种刚性防护措施存在工程量大,造价高,施工困难等弊端;在应用中常因地基变形导致破坏。近年来,许多学者对于秸秆覆盖防治水土流失效果进行了许多研究^[10-17],但大多是采用坡面全面覆盖防治坡面侵蚀、秸秆缓冲带防治细沟侵蚀或者是秸秆沟头覆盖防治沟头侵蚀,徐锡蒙等^[12]对玉米秸秆防治浅沟沟头侵蚀的研究是通过玉米秸秆浅沟沟头覆盖与沟道覆盖结合的办法,研究的是地面径流产生的沟蚀作用。而针对沟壁和沟底的采用柔性防护的研究较少。而相关研究表明,陡立沟壁陡坎形成的下跌水流能够导致严重的溯源侵蚀^[18,19],针对下跌水流导致沟头前进的问题尚未发现相关研究。由此本试验提出采用柔性防护措施(在土壤表面铺设麦草、土工布)代替刚性防护措施进行对沟底、沟壁的防护,通过室内模拟下跌水流冲击试验,测定柔性防护措施的防护作用,为黄土高原的沟头防治提供新思路并完善沟头防护措施。

1 试验概述与方法

1.1 试验概述

沟头冲刷变化受土壤抗冲性、前期土壤含水量、冲刷水流流量、水流动能等多种因素影响,为研究柔性防护措施的作用,试验中确定恒定水头和流量、同一土壤质地和密度,仅分析防护变化对冲刷坑的影响。试验在西北农林科技大学降雨大厅实验室进行,用 4.93 m 的高水头来模拟野外下跌水流,将试验槽的土夯实到自然土容重,通过在土表面覆不同厚度的麦草、铺设土工布来模拟柔性防护措施,用模拟水流冲击土面,研究在不同重量麦草及土工布防护作用下,冲刷坑的大小及深度,探寻最佳防护措施。

1.2 试验设计

供试土壤为杨凌土,0~0.002 mm,0.002~0.005 mm,0.005~0.01 mm,0.01~0.02 mm,0.02~0.05 mm,0.05~0.1 mm,0.1~0.2 mm,>0.2 mm 的粒径分别占 25.90%,4.47%,12.92%,28.77%,24.45%,3.36%,0.13%,0%,属重粉质壤土。土样去除大块杂质,风干晾晒,过 5 mm 筛后填入移动式试验钢槽(2 m(长)×1 m(宽)×0.5 m(高)),根据目标容重 1.6 g/cm³,在试验准

备阶段填土处理时,每填土厚度为 10 cm 时,进行洒水夯实,取样测取土壤容重,进行调整;总共填土厚度为 50 cm;在试验处理前,再次取样测定,使土壤容重平均值保证在 1.6~1.7 g/cm³,试验时利用环刀测定土壤容重。试验覆盖材料为杨凌本地自然风干小麦秸秆和规格为 200 g/m² 的土工布。将试验槽坡度调为 3°,排除地面积水,用以消除积水厚度对水流动能消减的影响。在土面上分别覆不同厚度的麦草、不同厚度麦草与土工布的组合,在实验室 4.93 m 的水头下冲土面 3 min,平均用水量 100 600 cm³,每个处理做 3 个重复。通过测针测定冲刷坑断面形状并确定最大坑深;利用直尺测定冲刷坑坑径;利用填土法^[20]测定冲刷坑容积,在冲刷结束后,用滴管吸出留在冲刷坑中的部分残留水,直至冲刷坑入渗水分不再析出,将试验土过 5 mm 筛,装入 1 000 ml 量杯,记录量杯初始读数 V_1 ,向冲刷坑填入过筛土,等冲刷坑基本被填满时,用刮刀抹平过筛土表面,多余土收集至量杯,使冲刷坑基本恢复冲刷前其平面与周围表面相平的状态,此时记录量杯最终读数 V_2 ,冲刷坑容积则为 $(V_1 - V_2)$;垂直坡面拍摄冲刷坑照片,导入电脑,利用 AutoCAD 软件处理冲刷坑照片来计算坑面积;比较不同处理的冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径、坑面积及坑容积较裸地条件下的变化情况。

1.3 试验设计

根据预设试验设计,麦草量比较少(<200 g/m²)时,基本没有任何防护效果,故试验从 200 g/m² 开始,参照预试验及相关研究^[10-11],试验设计 200,300,400,500,600,800,1 200,1 600,2 000,2 400 g/m² 10 个厚度试验,以裸地为对照;另外单设一层土工布和土工布与不同厚度覆草的组合,试验设计见表 1。

表 1 试验设计

试验标号	试验处理	试验标号	试验处理
CK	裸地	9	覆 2000 g/m ² 麦草
1	覆 200 g/m ² 麦草	10	覆 2400 g/m ² 麦草
2	覆 300 g/m ² 麦草	11	覆 1 层土工布
3	覆 400 g/m ² 麦草	12	覆 1 层土工布+400 g/m ² 麦草
4	覆 500 g/m ² 麦草	13	覆 1 层土工布+800 g/m ² 麦草
5	覆 600 g/m ² 麦草	14	覆 1 层土工布+1200 g/m ² 麦草
6	覆 800 g/m ² 麦草	15	覆 1 层土工布+1600 g/m ² 麦草
7	覆 1200 g/m ² 麦草	16	覆 1 层土工布+2000 g/m ² 麦草
8	覆 1600 g/m ² 麦草	17	覆 1 层土工布+2400 g/m ² 麦草

2 结果与分析

2.1 裸露地冲刷坑特点

当土表裸露时,水流冲刷土壤时,土面出现冲刷坑,随着冲刷时间的增加,冲刷坑逐渐增大;冲刷坑的

形状呈喇叭口状(图 1);试验测得冲刷坑特征见表 2。



图 1 裸露地表冲刷坑

表 2 裸露地冲刷坑特点

参数	土干容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	坑深 h_{max}/cm	坑径/ cm	坑面积/ cm^2	坑容积/ cm^3
平均	1.61	7.63	16.92	165.10	395
最大	1.66	8.05	20.80	187.60	410
最小	1.58	7.20	14.50	146.75	380

裸土在水流冲刷下,冲刷坑发育迅速,冲刷坑呈现喇叭口状;多次试验的冲刷坑平均最大坑深 h_{max} 为 7.63 cm,平均坑径 d 为 16.92 cm,平均坑面积 S 为 $165.10 cm^2$,平均坑容积 V 为 $395 cm^3$ 。

2.2 仅覆麦草的防护作用分析

在土面覆麦草可以起到减弱冲刷坑的发育,当覆麦草较少时,其对水流的冲击动能虽能起到一定的削减作用,但其削减效果差,防护作用未完全发挥出来,冲刷坑与裸露地表的冲刷坑差别不大;随着覆麦草量的增大,其对水流冲击动能的削减作用慢慢体现出来,冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 、坑容积 V 均呈递减趋势,图 2 为冲刷坑的最大坑深 h_{max} 和坑容积 V 与覆麦草量的变化关系。

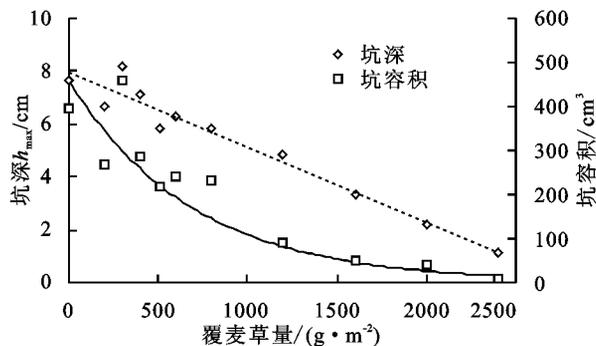


图 2 冲刷坑最大坑深 h_{max} 、坑容积 V 随覆麦草厚度增大的变化情况

随着覆麦草量的增大,冲刷坑的深度总体呈现降低趋势,二者近似于线性关系,对其拟合可通过线性函数 $y = -0.0028x + 7.9298$ 来描述,其决定系数为 0.95;随着覆麦草量的增大,冲刷坑的坑容积总体也

呈现降低趋势,其与单位面积覆麦草量的关系近似于指数关系,对其拟合可通过 $y = 513.78e^{-0.001x}$ 来描述,其决定系数为 0.94。

冲刷结束后,沿着坑的横轴,用测针每隔 1 cm 测定坑的深度^[1],画出冲刷坑的断面图,见图 3。

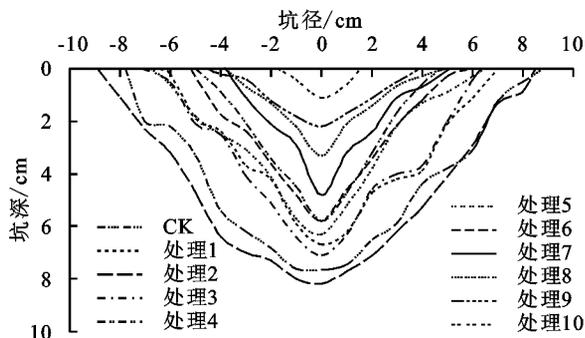


图 3 覆不同厚度麦草量的冲刷坑断面

由图 3 可知,覆不同厚度麦草的冲刷坑的形状相似,接近喇叭口状;随着铺设麦草厚度的增加,冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 总体上呈降低趋势,说明覆麦草能够有效保护土面,削减水流动能,延缓冲刷坑发育。

以裸露地为对照,分析覆不同厚度麦草的冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 、坑容积 V 的变化情况,见表 3。

由表 3 可知,当覆麦草量较少时,其对水流的冲击动能消减作用较小,防治效果不稳定,冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 、坑容积 V 的数据出现上下波动,甚至处理 2 与对照组冲刷坑的指标大致接近;但当覆麦草量增加到 $1200 g/m^2$ 时,防治效果具有显著提升,最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 、坑容积 V 较裸露地分别减少 36.8%,46.2%,81.4%,77.2%;当覆麦草量达到 $1200 g/m^2$ 后,随着覆麦草量的增大,防治效果呈上升趋势。

2.3 增覆土工布的防护作用分析

当覆麦草太薄时,水流易冲散麦草,在麦草上增覆一层土工布,有效增加防护冲刷的效果,增强麦草的防护作用。以裸露地为对照,分析覆 1 层土工布与不同量麦草的共同作用下,对冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 和坑容积 V 的防治效果(表 4)。

由表 4 可知,仅覆 1 层土工布(标号 11)较裸露地的冲刷坑的最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 和坑容积 V 减少程度显著,分别为 43.6%,43.8%,65.2%,82.2%;覆 1 层土工布和不同厚度麦草,随着覆麦草厚度的增加,最大坑深 h_{max} 、坑径 d 、坑面积 S 和坑容积 V 不断减小,随覆草量增加,防护效果越好,但减小幅度相对较小。当覆麦草量 $2400 g/m^2$ 辅以 1 层土工布时,冲刷坑完全消失,此时的防治效果最好。

表3 仅覆麦草与裸露地的冲刷坑对比

试验 标号	最大坑深 h_{\max}		坑径 d		坑面积 S		坑容积 V	
	深度/cm	减少率/%	坑径/cm	减少率/%	坑面积/cm ²	减少率/%	坑容积/cm ³	减少率/%
CK	7.63		16.92		165.10		395	
1	6.70	12.2	13.40	20.8	62.92	61.9	270	31.6
2	8.20	-7.5	17.45	-3.1	121.25	26.6	460	-16.5
3	7.10	6.9	13.35	21.1	104.40	36.8	285	27.8
4	5.80	24.0	9.75	42.4	45.74	72.3	220	44.3
5	6.30	17.4	13.50	20.2	36.77	77.7	240	39.2
6	5.80	24.0	10.85	35.9	40.76	75.3	230	41.8
7	4.82	36.8	9.10	46.2	30.61	81.5	90	77.2
8	3.30	56.7	8.95	47.1	32.57	80.3	50	87.3
9	2.20	71.2	8.90	47.4	33.51	79.7	40	89.9
10	1.10	85.6	3.50	79.3	7.86	95.2	10	97.5

表4 增覆1层土工布与裸露地的冲刷坑对比

试验 标号	坑深		坑径		坑面积		坑容积	
	深度/cm	减少率/%	坑径/cm	减少率/%	坑面积/cm ²	减少率/%	坑容积/cm ³	减少率/%
CK	7.63		16.92		165.10		395	
11	4.30	43.6	9.50	43.9	57.38	65.2	70	82.3
12	3.70	51.5	9.00	46.8	42.62	74.2	63	84.1
13	3.60	52.8	8.15	51.8	23.40	85.8	58	85.3
14	3.50	54.1	8.25	51.2	25.88	84.3	49	87.6
15	3.20	58.1	6.50	61.6	22.72	86.2	32	91.9
16	2.40	68.5	5.30	68.7	25.16	84.8	21	94.7
17	0.00	100.0	0.00	100.0	0.00	100.0	0	100.0

3 结论

本研究表明麦草、土工布等柔性防护措施具有良好的削减下跌水流动能的作用,可作为固沟保塬沟头防治的一种方式。在试验条件下,不采用防护措施模拟水流作用下的冲刷坑的形状呈喇叭口状,冲刷坑最大坑深 h_{\max} 达 7.63 cm,坑容积达 395 cm³;采用麦草覆盖能有效削弱高水头水流对土面的冲刷作用,随着覆麦草量的增加,对土面的防护作用越强,冲刷坑最大坑深随覆麦草量增加而降低,可用线性函数 $y = -0.0028x + 7.9298$ 来描述,冲刷坑的坑容积随覆麦草量增加呈指数关系递减;增覆1层土工布能防止麦草飘散,显著削弱水流动能,增强抵御水流的冲刷作用,能大幅度增强麦草的防护作用;覆麦草量 2 400 g/m² 和 1 层土工布组合能够抵消试验水流的冲刷,地面未形成冲刷坑。

柔性防护可有效保护地面免受水流冲刷,削减水流动能,减缓冲刷坑发育。已有研究表明,秸秆填充覆盖^[1]可降低沟内水流流速,削弱径流动能,抑制了水流的下切侵蚀和侧蚀能力,减缓了沟蚀的发生发展。

本研究是在试验条件下模拟了柔性防护对水流动能的削减作用。受试验条件限制,仅分析了恒定水头和流量作用下,夯实壤土冲刷坑的发展,并提出了

在覆麦草量 2 400 g/m² 和 1 层土工布能够完全抵消该条件水流的冲刷,但不同水流和土壤条件下冲刷坑发展尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 李强,许明祥,赵允格,等.黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量评价[J].自然资源学报,2012,27(6):1001-1012.
- [2] 毕华兴,刘立斌,刘斌.黄土高原沟壑区水土流失综合治理范式[J].中国水土保持科学,2010,8(4):27-33.
- [3] 桑广书,甘枝茂,岳大鹏.元代以来黄土塬区沟谷发育与土壤侵蚀[J].干旱区地理,2003,26(4):355-360.
- [4] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-115.
- [5] 陈绍宇,许建民,王文龙,等.黄土高原沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径[J].水土保持通报,2009,29(4):37-41.
- [6] 张汉雄.两种沟头防护工程的效益[J].水土保持通报,1985,5(4):17-23.
- [7] 张汉雄.悬臂喷嘴式跌水:种新型沟头防护工程[J].中国水土保持,1987(1):24-27,65.
- [8] Guo C, Zhang L, Liang W, et al. The gully head in the loess plateau and the protection of the gully head for oil and gas pipeline engineering[C]// International Conference on Pipelines & Trenchless Technology, 2013.

阈值为300的沟道网络图最适合坊塌小流域。

(2) 随着沟道级别的递增,沟道的泥沙连通性减弱。第一级、第二级和第三级沟道为强泥沙连通性,第四级和第五级沟道为弱泥沙连通性。

(3) 沟道比降随着沟道级别呈递减现象,泥沙连通性随着沟道比降的降低也减弱。

(4) 沟道径流节点数随着沟道级别的增长而减少,沟道径流节点也是表征沟道形态特征的一个量化指标。同时泥沙连通性随着径流节点数的减少而减弱。

(5) 淤地坝及人工沟渠使泥沙连通性减弱,虽然竖井被损毁的淤地坝能促使连通性增强,呈现弱连通性。

参考文献:

- [1] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 9(1):38-41.
- [2] Bracken L J, Turnbull L, Wainwright J, et al. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 40(2):177-188.
- [3] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119:17-34.
- [4] Bracken L J, Jacky C. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(13):1749-1763.

- [5] 叶芝茵,化相国,路炳军,等.北京山区小流域主沟道水文地貌特征调查与分析研究[J].*中国水利*, 2013(21):52-53.
- [6] 吴敬东,段淑怀,叶芝茵.北京市山区小流域主沟道水文地貌调查与分级[J].*中国水土保持科学*, 2013, 11(6):33-38.
- [7] 郝敏,吕宪国,姜明.人工沟渠对流域水文格局的影响研究[J].*湿地科学*, 2005(4):310-314.
- [8] 严建钢,金复鑫,周小程,等. ArcGIS中基于DEM提取沟道特征[J].*海军航空工程学院学报*, 2013(3):311-314.
- [9] 原立峰,周启刚.基于DEM的流域水文特征提取方法研究[J].*人民黄河*, 2006, 28(5):20-21.
- [10] 赵嘉莹,张富,郭嘉,等.南小河流域侵蚀沟道特征研究[J].*人民黄河*, 2016, 38(3):76-79.
- [11] 朱红春,汤国安,吴良超,等.基于地貌结构与汇水特征的沟谷节点提取与分析:以陕北黄土高原为例[J].*水科学进展*, 2012, 23(1):7-13.
- [12] 易红伟,汤国安,刘咏梅,等.河网径流节点及其基于DEM的自动提取[J].*水土保持学报*, 2003, 17(3):108-111.
- [13] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1957, 38(6):913-920.
- [14] 蒋圣,梁明,胡最.黄土地貌区径流节点提取及其特征信息指数的DEM实验分析[J].*地球信息科学学报*, 2015, 17(6):689-697.
- [15] 苟娇娇.基于DEM的黄土高原沟谷节点分形特征研究[J].*水土保持学报*, 2016, 30(3):109-114.

(上接第10页)

- [9] 孙娟,康玲玲,吕锡芝,等.塬面拦蓄水工程建设要点[J].*中国水土保持*, 2018(4):23-25.
- [10] 王晓燕,高焕文,李洪文,等.保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J].*农业工程学报*, 2000, 16(3):66-69.
- [11] 高焕文,李问盈,李洪文.中国特色保护性耕作技术[J].*农业工程学报*, 2003, 19(3):1-4.
- [12] 覃超,郑粉莉,徐锡蒙,等.玉米秸秆缓冲带防治黄土坡面细沟侵蚀的效果[J].*中国水土保持科学*, 2015, 13(1):35-42.
- [13] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等.沟头秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地沟蚀发育影响的试验研究[J].*泥沙研究*, 2014(6):73-80.
- [14] 徐锡蒙,郑粉莉,覃超,等.沟蚀发育的黄土坡面上秸秆覆盖防蚀效果研究[J].*农业机械学报*, 2015, 46(8):130-137.
- [15] McLaughlin D A. Erosion control effectiveness of straw, hydromulch, and polyacrylamide in a rainfall simulator

- [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 68(3):221-227.
- [16] Gholami L, Sadeghi S H, Mehdi H. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(1):268-278.
- [17] 王安,郝明德,臧逸飞,等.秸秆覆盖和留茬的田间水土保持效应[J].*水土保持研究*, 2013, 20(1):47-51.
- [18] Flores-Cervantes J H, Istanbuluoglu E, Bras R L. Development of gullies on the landscape: A model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2006, 111(F1):2156-2202.
- [19] 张宝军,熊东红,杨丹,等.跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探[J].*土壤学报*, 2017, 54(1):48-59.
- [20] 郑粉莉.细沟侵蚀量测算方法的探讨[J].*水土保持通报*, 1989, 9(4):41-45, 49.