

黄土区不同地貌部位径流泥沙空间分布试验研究

王文龙^{1,2}, 雷阿林³, 李占斌^{1,4}, 唐克丽^{1,2}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学, 杨凌 712100; 3 水利部国家环保局长江流域水资源保护局, 武汉 430051; 4 西安理工大学水电学院, 西安 710048)

摘要: 黄土丘陵区侵蚀泥沙的来源以及坡沟侵蚀产沙关系等一直是研究的热点难点之一, 也是争论较多的问题。在梁峁坡到谷坡的坡沟系统中, 不同地貌部位有对应的侵蚀形式出现。该文采用多坡段组合模型, 运用人工模拟降雨试验方法, 研究了黄土区坡面各垂直侵蚀带径流泥沙的空间分布特征及上坡来水来沙的加速侵蚀作用。结果表明: 单位面积与时间产流量排列为谷坡> 梁峁坡下部> 梁峁坡中部> 梁峁坡上部。雨强 0.5 mm/m in 时, 没有沟蚀发育; 1.0 mm/m in 时, 细沟主要在梁峁坡下部; 1.5 mm/m in 时, 细沟伸展到梁峁坡上部, 谷坡出现滑塌和崩塌等重力侵蚀现象。坡面径流量、产沙量随坡度、坡长、降雨强度变化成正比增长。上坡来水来沙使梁峁坡和谷坡产沙量大幅度增加。

关键词: 黄土区; 地貌部位; 径流泥沙; 空间分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)04-0040-04

1 引言

黄土高原坡面侵蚀形式及形态具有鲜明的垂直分带性特征, 依次为溅蚀片蚀带、细沟侵蚀带和浅沟侵蚀带等。其中坡沟侵蚀产沙关系以及坡面侵蚀产沙分配等一直是研究的热点难点之一, 也是争论较多的问题, 它涉及到侵蚀泥沙的来源、坡沟治理的方针以及水保措施配置等重大理论与治理决策问题。20 世纪 50 年代以来, 承继成^[1]、刘宝元^[2]等在定性描述和定量分析的基础上认为, 流水侵蚀作用从分水岭向下由小变大, 依次划分为微弱侵蚀带—侵蚀强烈带—冲刷带—堆积带等, 揭示了坡面侵蚀形式和形态空间垂直分异的基本格局。此后, 许多学者就沟间地与沟谷地的产沙比例及谁为主导的问题进行了探讨^[3-10], 阐明了坡沟侵蚀的相互关系。陈浩^[11-13]研究发现, 在梁峁坡面的不同地貌部位, 产沙量与上坡来水量成正相关。郑粉莉^[14,15]对不同侵蚀带之间的侵蚀产沙关系及其机理、上方来水来沙对下坡的影响进行了研究。总体来看有关土壤侵蚀垂直带内在机制的试验研究还较薄弱。因此, 本文采用模拟降雨试验的方法研究黄土坡面土壤侵蚀的分布特征, 为黄土高原生态环境治理提供科学依据。

2 试验与材料

试验在建立的与黄土丘陵区坡地垂向分布特征相似的室内模型上进行。模型按比例缩小, 模型宽 2.5 m, 高度 6 m, 底座高度 0.1 m, 水平投影长 14.0 m (不包括出口汇流段 1.0 m)。其坡段划分、各坡段坡度与坡长以

及代表地类和主要侵蚀形式如表 1 所示。空间形态如图 1 所示。

表 1 坡沟系统模型的坡段划分与代表意义
Table 1 Slope segment division of experimental model on slope-gully system and its meaning

空间部位	坡段序号	代表地形部位	坡度 / (°)	坡长 / m	主要侵蚀形式
沟缘线以上	1	梁 上部	5	2.0	溅蚀、片蚀
	2	峁 中部	15	4.0	细沟
	3	坡 下部	25	4.0	细沟与浅沟
沟缘线以下	4	谷坡	35	4.0	切沟、重力侵蚀

模型土取自杨陵附近的黄土母质, 过 10 mm 筛孔, 分层装入模型内, 底层垫土带 (距表层 1.0 m 以下) 容重控制在 1.3~1.4 g/cm³ 左右, 近表层带 (表层以下 0.2~1.0 m) 在 1.25 g/cm³ 之间, 表层耕作带 (0~0.2 m 之间) 每次试验前翻松并整平, 容重控制在 1.2 g/cm³ 左右, 土壤含水率控制在 15% 左右。试验分有上坡来水和无上坡来水两组。选定雨强为 0.5、1.0 和 1.5 mm/m in, 一次降雨量固定为 60 mm 采用组合试验的方法, 试验场次为: 有上坡来水 3×4=12 场, 无上坡来水 3×3=9 场。施测项目包括径流流速、流量、泥沙、水深、水温、细沟宽、深、长, 浅沟、切沟的宽、深、长, 水动力参数值等。降雨开始即计时, 产流开始每隔 5 min 采集径流泥沙样一次。

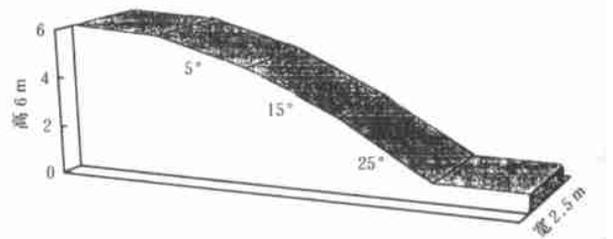


图 1 模型示意图

Fig 1 The schematic diagram of model

收稿日期: 2002-10-20 修订日期: 2003-04-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-10-04); 国家自然科学基金 (49671052) 和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 (10501-78) 联合资助

作者简介: 王文龙 (1965-), 男, 陕西大荔人, 在职博士生, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水资源研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100

3 结果与分析

3.1 各垂直带径流泥沙的空间分布特征

根据试验资料, 勾绘了不同雨强条件下坡面各种侵蚀形式发育的平面示意图(图 2)。并计算了各坡段的产流产沙情况, 如表 2 所示。

由表 2 可见, 径流量的变化特点为, 同雨强条件下, 随着向下坡方向坡度的增大和上部汇流的作用, 位置愈低的坡段产流量愈大, 单位面积与时间的产流量按坡段排列为 $4 > 3 > 2 > 1$ 。不同雨强条件下, 由于入渗的差异, 同一坡段雨强大产流量也大, 依 1 坡段而言, 单位面积与时间的产流量, 1.5 mm/m in 雨强时为 58.85 L/(m²·h); 1.0 mm/m in 雨强时为 32.40 L/(m²·h), 0.5 mm/m in 雨强时为 14.27 L/(m²·h), 大雨强的产流约为中雨强的 1.8 倍, 小雨强的 4.1 倍。其它坡段也有类似的规律, 只是产流量随雨强增大的幅度略有差异。

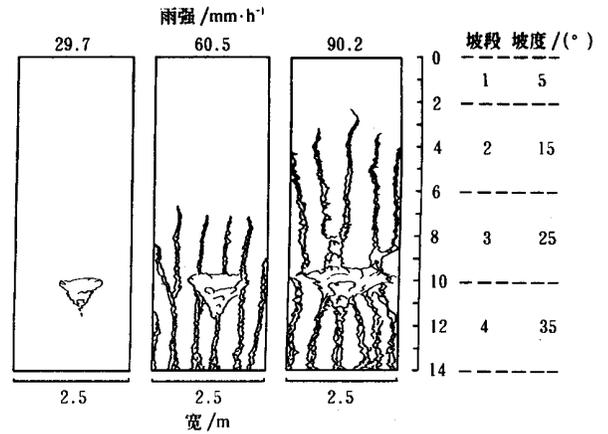


图 2 坡面沟蚀网发育平面示意图

Fig. 2 The schematic diagram of gully erosion net on hill slope

表 2 二维多坡段组合模型试验各坡段产流产沙分布

Table 2 Distribution of runoff and sediment yield on comprehensive experimental model

雨强 /mm·m in ⁻¹	雨量 /mm	坡段 序号	坡度 /(°)	径流量			侵蚀量			主要侵蚀方式
				总量 /kg	单位面积与时间量 /L(m ² ·h) ⁻¹	占全坡 /%	总量 /kg	单位面积与时间量 /L(m ² ·h) ⁻¹	占全坡 /%	
0.5	59.4	1	5	142.70	14.27	12.8	11.41	1.14	10.2	溅蚀、片蚀
		2	15	296.34	14.83	26.6	26.74	1.34	24.0	片蚀
		3	25	317.18	15.86	28.4	30.35	1.52	27.2	片蚀
		4	35	358.88	17.94	32.2	43.09	2.15	38.6	片蚀、斑状侵蚀
		全坡长		1113.30	15.93	100.00	111.59	1.59	100.00	片蚀、斑状侵蚀
1.0	60.5	1	5	162.02	32.40	11.6	19.79	3.96	4.8	溅蚀、片蚀
		2	15	351.41	35.14	25.2	101.04	10.10	24.5	片蚀
		3	25	402.33	40.23	28.8	130.63	13.06	31.7	细沟
		4	35	480.12	48.01	34.4	160.98	16.10	39.0	细沟、崩塌
		全坡长		1395.88	39.88	100.00	412.42	11.78	100.00	片蚀、细沟、崩塌
1.5	60.1	1	5	196.16	58.85	11.7	28.85	8.66	4.2	溅蚀、片蚀
		2	15	428.24	64.24	25.6	178.63	26.79	26.0	细沟
		3	25	486.37	72.96	29.1	232.22	34.83	33.8	细沟、浅沟
		4	35	560.98	84.15	33.6	247.35	37.10	36.0	切沟、崩塌、细沟
		全坡长		1671.75	71.65	100.00	687.05	29.45	100.00	细沟、切沟、崩塌

由表 2 可见, 同雨强条件下, 因部位、坡度的变化侵蚀形式而有差异。愈向下坡方向, 侵蚀量亦增大, 但当同为片蚀方式时, 侵蚀量的差异不显著。如 0.5 mm/m in 雨强时, 1~3 坡段均以面蚀为主, 3 坡段单位面积与时间的产沙量为 1.52 kg/(m²·h), 2 坡段为 1.34 kg/(m²·h), 1 坡段为 1.4 kg/(m²·h); 3 坡段的侵蚀强度为 2 坡段的 1.13 倍, 为 1 坡段的 1.33 倍。不同侵蚀形式时, 侵蚀量在各坡段间差异明显。如 1.5 mm/m in 雨强时, 4 个坡段侵蚀形式和强度有明显分异, 单位面积与时间的产沙量, 4 坡段为 37.1 kg/(m²·h), 3 坡段为 34.83 kg/(m²·h), 2 坡段为 26.79 kg/(m²·h), 1 坡段为 8.66 kg/(m²·h); 4 坡段侵蚀强度为 3 坡段的 1.07 倍; 为 2 坡段的 1.38 倍, 为 1 坡段的 4.28 倍。

不同雨强条件的同一坡段, 侵蚀发育程度有差异, 表现为同一坡段雨强大侵蚀量大; 同一侵蚀形态发育愈

充分, 侵蚀量愈大。如对 1 坡段而言, 雨强 1.5 mm/m in 时产沙为 28.85 kg; 1.0 mm/m in 时为 19.79 kg, 0.5 mm/m in 时则为 11.41 kg, 大雨强为中雨强的 1.46 倍, 为小雨强的 2.53 倍。对 1.5 mm/m in 和 1.0 mm/m in 雨强的 3 坡段而言, 主要侵蚀形式均为细沟, 但前者细沟形态的发育更充分, 因此侵蚀量更大, 同样雨量下, 前者侵蚀为后者的 1.78 倍, 0.5 mm/m in 雨强的 3 坡段则根本没有细沟发育, 1.5 mm/m in 雨强相应坡段的侵蚀量为其它的 8.15 倍。说明在细沟等沟蚀形态发育时, 各坡段侵蚀量的差异比仅为面蚀一种形态的差异显著。

上述可见, 一定的流量是与一定的侵蚀产沙和形态发育相一致的, 产流量大产沙量也大。只有当总的水流能量达到或超过细沟、浅沟及切沟所需的动力临界, 这些侵蚀形式和形态才能在坡面上出现, 并非任何雨强和流量都能塑造出沟蚀形态来。在试验中(图 2 所示), 0.5

mm/m in 的雨强, 没有细沟、浅沟及切沟的发育, 4 坡段顶部虽出现滑塌, 但未形成明显的切沟形态。1.0 mm/m in 的雨强, 没有细沟切穿耕作层形成浅沟的情况。1.0 mm/m in 雨强细沟的出现部位主要在 3、4 坡段, 1.5 mm/m in 雨强时在 2、3、4 坡段。切沟虽有发育, 但长度不足 70 cm, 陡坎高仅 39 cm, 发育程度亦不如 1.5 mm/m in 雨强的高。1.5 mm/m in 雨强时, 各种侵蚀形态在坡面均有较好发育, 细沟的出现部位一直伸展到 2 坡段坡顶附近。3 坡段下部有浅沟雏形出现, 长度约 107 cm, 3、4 坡段转换处有切沟雏形形成, 长度约 124 cm, 最大陡坎高为 60 cm。4 坡段顶端, 在不同雨强下均出现滑塌和崩塌等重力侵蚀现象, 其原因既与雨强、雨量、黄土湿陷性等有关, 更与汇流流量和坡度密切相关, 尤其坡度的影响至关重要。4 坡段代表谷坡地段, 一般在 35° 以上, 已远大于黄土的内摩擦角 (25°), 黄土浸湿

后, 凝聚力降低, 谷坡显然处于重力不稳定状态, 经流水的冲刷、掏蚀, 易于形成各种重力侵蚀。

3.2 上坡来水对径流泥沙的影响

坡面侵蚀强度既与本坡段的产流量有关, 也与上坡水流的汇集密不可分。忽略上坡来水的作用, 许多现象难以解释。在表 2 和图 2 中, 雨强 1.5 mm/m in 时, 1 坡段的径流模数大于 1.0 mm/m in 雨强时 3、4 坡段的径流模数, 但前者侵蚀形式为面蚀, 后者则主要为细沟和崩塌。浅沟、切沟的发生与发展与上坡来水的多少关系密切。某一坡段的产沙量由两部分构成, 一是本区产流作用所造成的产沙量, 二是上坡来水所造成的产沙增量。由此可近似认为, 上坡来水所造成的产沙增量为坡段总输出沙量减去上坡来沙量和无上坡来水时的坡段产沙量。将三种雨强下有上坡来水和无上坡来水的泥沙情况统计列于表 3, 用柱状图表示见图 3。

表 3 二维多坡段组合模型有无上坡来水时各坡段产沙特征

Table 3 Characteristics of sediment yield on every segment of experimental model with runoff and without runoff from upslope

雨强 /mm · m in ⁻¹	雨量 /mm	坡段 序号	坡度 /(°)	有上坡来水					无上坡来水		
				上坡来水 量/L	总输出沙 量/kg	上坡来沙 量/kg	产沙增量 /kg	占总输出 沙量/%	占坡段产 沙量/%	产流量 /L	产沙量 /kg
0.5	59.4	2	15	142.70	38.15	11.41	5.4	14.2	20.2	291.74	21.34
		3	25	439.24	68.50	38.15	8.12	11.9	26.8	296.38	22.23
		4	35	756.42	111.59	68.50	18.64	16.7	43.3	304.53	24.36
1.0	60.5	2	15	162.02	120.83	19.79	56.53	46.8	55.9	338.33	44.51
		3	25	513.43	261.46	120.83	89.28	34.2	63.5	354.17	51.35
		4	35	915.76	412.42	251.46	97.35	23.6	74.5	371.89	63.61
1.5	60.1	2	15	196.16	207.48	28.85	98.05	47.3	54.9	398.93	80.58
		3	25	624.40	439.70	207.48	124.52	28.3	53.6	414.25	107.70
		4	35	1110.77	687.05	439.05	105.99	15.4	42.9	428.37	141.36

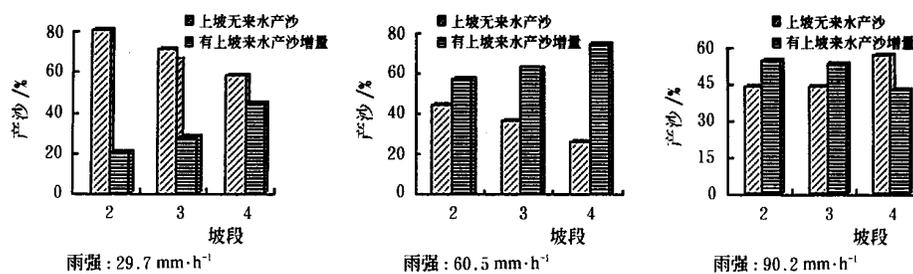


图 3 上坡来水对各坡段产沙量的贡献

Fig 3 Contribution of runoff and sediment on upslope to sediment yield on downslope erosion belts

由表 3 和图 3 可见, 上坡来水对坡段产沙的贡献很大。因上坡来水所造成的产沙增量, 一般是随上坡来水和部位的不同而不同。同一坡段, 上坡来水量大产沙增量越大; 不同坡段, 越向下坡因坡度和上坡来水量的增大, 产沙增量亦越大。但在 1.5 mm/m in 雨强时, 4 坡段产沙增量比 3 坡段却减少了, 这与无上坡来水时, 4 坡段出现明显崩塌有关。

产沙增量占坡段总输出沙量的比例在不同雨强和坡段差异较大, 一般与水流挟沙力及含沙量的对比关系, 以及有无上坡来水关系密切。同一雨强下, 越向下坡方向水流含沙量越大, 尽管水流能量增加使挟沙力也增加, 但挟沙力增加不如含沙量快, 这时产沙增量虽仍有

增大趋势, 但其占总输出沙量的比例在逐渐减小。如果坡长加大到一定程度, 水流含沙量可能趋于饱和, 坡面上甚至会出现沉积现象, 这时上坡来水的作用将不明显。一个例外的现象是, 在 0.5 mm/m in 雨强时, 从 3 坡段至 4 坡段, 产沙增量占总输出沙量的比例却增加了 4.8%。这是因为在 4 坡段, 有上坡来水时崩塌现象发生, 而无上坡来水时因水流能量小未发生崩塌现象。侵蚀形式的明显差异, 使 4 坡段有上坡来水的产沙增量增大较多。无上坡来水时, 产沙只与本坡段的产流量有关。因此, 呈现出同一坡段流量大产沙量也大; 不同坡段越向下坡因水流速度增大, 侵蚀力增加, 产沙量亦明显增大。总的来说, 无上坡来水时侵蚀能量较小, 各种沟蚀形

态基本不发育。由于上坡来水的作用,梁峁坡(2、3坡段)的产沙量增大了20.2%~63.5%,谷坡(4坡段)增大了42.9%~74.5%。可见,水流能量是制约坡面产沙与侵蚀微地貌发育的重要因素,如能有效控制上坡来水和各坡段的产流量,全坡面的侵蚀产沙将会大幅度减小,各种侵蚀形态的发生发展也会受到抑制。

4 结 论

1) 位置愈低的坡段产流量愈大,单位面积与时间的产流量按坡段可排列为 $4 > 3 > 2 > 1$,随着坡度的增大,侵蚀量亦在增大。当水流能量达到或超过细沟、浅沟及切沟所需的动力临界,这些侵蚀形式和形态才能在坡面上出现,并非任何雨强和流量都能在坡面上塑造出这些沟蚀形态来。 0.5 mm/m in 的雨强,没有细沟、浅沟及切沟的发育。 1.0 mm/m in 的雨强,细沟主要分布在3、4坡段。 1.5 mm/m in 雨强时,各种侵蚀形态在坡面均有较好发育,细沟的出现部位一直伸展到第2坡段坡顶附近。

2) 坡面侵蚀强度既与各坡段的产流量有关,也与上坡水流的汇集密切相关。同一坡段,上坡来水量越大,产沙增量越大;不同坡段,越向下坡方向因坡度和上坡来水量的增大,产沙增量亦越大。由于上坡来水作用,梁峁坡(2、3坡段)产沙量增大了20.2%~63.5%;谷坡(4坡段)产沙量增大了42.9%~74.5%。水流能量是制约坡面产沙与侵蚀微地貌发育的重要因素,有效地控制上坡来水量和各坡段的产流量,全坡面的侵蚀产沙将会大幅度减小,各种侵蚀的发生发展也会受到抑制。

[参 考 文 献]

- [1] 承继成 坡地流水作用的分带性[A]. 中国地理学会 1963年学会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1965: 99~ 104
- [2] 刘元宝, 朱显谟, 等. 黄土高原土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 5~ 8
- [3] 蒋德麒, 等. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析[J]. 地理学报, 1966, 32(1): 20~ 35
- [4] 曾庆伯. 晋西黄土丘陵区水土流失规律及治理效率[J]. 人民黄河, 1980, (2): 20~ 25
- [5] 徐雪良. 韭园沟流域沟间地、沟谷地来水来沙量的研究[J]. 中国水土保持, 1987, (8): 23~ 26
- [6] 焦菊英, 等. 小流域沟间地、沟谷地径流泥沙来量的探讨[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 24~ 28
- [7] 郑粉莉, 唐克丽, 等. 林地开垦后坡沟侵蚀产沙关系的研究[J]. 中国水土保持, 1994, (8): 19~ 20
- [8] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991, (4): 39~ 45
- [9] 陈 浩, 等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 134~ 173
- [10] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗, 等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 135~ 147
- [11] 陈 浩, 蔡强国. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 17~ 23
- [12] 陈 浩, 王开章. 黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 363~ 372
- [13] 陈 浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 354~ 363
- [14] 郑粉莉. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀与产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53, (5): 422~ 427
- [15] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000: 95~ 124

Spatial distribution of runoff and sediment on the different topography positions of vertical belts in loess region of hilly

Wang Wenlong^{1,2}, Lei A'lin³, Li Zhanbin^{1,4}, Tang Keli^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 3. Yangtze Valley Water Resources Protection Bureau, Ministry of Water Resources and State Bureau of Environmental Protection, Wuhan 430005, China; 4. College of Hydraulic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract There have been many arguments on and also have been many interests in the source of soil erosion at hilly region of the Loess Plateau and the slope-gully erosion sediment production. Erosion patterns correspond to the different topography position from hill slope to gully slope in soil erosion chain in the slope-gully system of loess region of hilly and gully. Spatial distribution of runoff and sediment in the vertical belts sections of soil erosion chain was studied by simulated rainfall examination on block diagram combined with multi-slope sections, also studied the accelerated erosion of the sediment from the upper slope. Results show that runoff increases from upper slope to lower slope. Runoff per unit area and time increased with the order of the upper hillside, the middle hill slope, the lower hill slope, and the gully slope. Also, all erosion patterns developed well on hill slope with rainfall intensity of 1.5 mm (m in) -land rill erosion extended from bottom of slope to the middle and the upper hill slope, gully slope display the gravity erosion such as slide and collapse. Rill erosion, in contrast, only occurred in the lower hill slope and gully slope with rainfall intensity of 1.0 mm/m in , and gully erosion did not developed with rainfall intensity of 0.5 mm/m in . Slope runoff and sediment production increase with an increase of slope gradient, slope length and rainfall intensity due to the effect of runoff from the upper slope, sediment yields of hill slope and gully slope increased greatly.

Key words: loess region; topography positions; runoff and sediment; spatial distribution