

# 黄土丘陵区土壤侵蚀链垂直带水沙流空间分布

王文龙<sup>1,2</sup>, 雷阿林<sup>3</sup>, 李占斌<sup>1,4</sup>, 唐克丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院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, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3. 水利部长江流域水资源保护研究所, 湖北 武汉 430051; 4. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 采用多坡段组合模型、人工模拟降雨实验研究了土壤侵蚀链垂直带水沙流空间分布变化特征。结果表明: 愈向下坡方向的坡段产流量愈大, 单位面积、单位时间的产流量按坡段排列为: 谷坡 > 梁峁坡下部 > 梁峁坡中部 > 梁峁坡上部。雨强为 29.7 mm/h 时, 坡面上没有沟蚀发育; 雨强为 60.5 mm/h 时, 细沟主要分布在梁峁坡下部和谷坡处; 雨强为 90.2 mm/h 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梁峁坡中部和上部之间。由于上坡来水来沙的作用, 梁峁坡的产沙量增大了 20.2% ~ 63.5%, 谷坡的产沙量增大了 42.9% ~ 74.5%。

**关键词:** 土壤侵蚀链; 垂直带; 水沙流; 空间分布; 黄土丘陵区

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2004)01-0024-05

黄土丘陵区梁峁坡面从分水岭到沟缘线土壤侵蚀明显表现为溅蚀片蚀带、细沟侵蚀带和浅沟侵蚀带, 各带侵蚀过程和侵蚀机理不尽相同。早在 20 世纪 50 年代, 朱显谟等<sup>[1]</sup>对土壤侵蚀垂直分布进行了开创性研究, 此后承继成<sup>[2]</sup>、陈永宗<sup>[3]</sup>根据侵蚀类型及形态进行了研究。80 年代, 刘宝元等<sup>[4]</sup>根据野外考察对黄土高原各个地貌类型区的垂直分带进行了系统划分。90 年代, 陈浩等<sup>[5~7]</sup>以山西羊道沟小流域为代表进行了侵蚀分带规律的研究, 郑粉莉<sup>[8]</sup>在富县子午岭林区首次对不同侵蚀带间的侵蚀产沙关系及机理进行了研究。总体来看有关土壤侵蚀的内在机制研究还很薄弱。将黄土丘陵沟壑区的梁峁坡面从分水岭到沟谷坡面的沟底构成的侵蚀统一体称之为土壤侵蚀链, 本文根据多坡段组合模型实验, 从联系的、动态的角度探讨各种侵蚀方式给合作用条件下土壤侵蚀链形成演化及各垂直带水沙流空间分布特征。

## 1 实验与材料

实验采用多坡段组合模型, 以黄土丘陵沟壑区垂向上梁峁坡面与沟谷坡面紧密相连所构成的坡沟系统为原型。由于空间限制, 建模时对各坡段坡长进行了适当缩小。模型宽 2.5 m, 最高处高度 6 m, 底座高度 1.0 m, 水平投影长 14.0 m (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方式如表 1 所示。

表 1 坡沟系统模型的坡段划分

Table 1 Slope segment division of experimented model on slope gully system

坡段序号	空间部位	代表地类	坡度/(°)	坡长/m	主要侵蚀方式
1	沟(谷)缘线以上	梁 上	5	2.00	溅蚀、片蚀
2		峁 中	15	4.00	细沟
3		坡 下	25	4.00	细沟与浅沟
4	沟(谷)缘线以下	沟谷坡面	35	4.00	切沟、重力侵蚀

模型土取自陕西杨凌附近的黄土母质, 过 10 mm 筛孔, 分层装入模型槽内, 底垫土带(距表层 1.0 m 以下)

收稿日期: 2002-10-20; 修订日期: 2002-12-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-10-04); 国家自然科学基金资助项目(49671052)

作者简介: 王文龙(1964-), 男, 陕西大荔人, 西北农林科技大学副研究员, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水资源研究。

E-mail: wllwang @ms. iswc. ac. cn

容重控制为  $1.90 \sim 2.00 \text{ g/cm}^3$ ，近表层带(表层以下  $0.2 \sim 1.0 \text{ m}$ )容重为  $1.25 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ ，表层耕作带( $0 \sim 0.20 \text{ m}$ )每次实验前翻松并整平，容重控制在  $1.20 \text{ g/cm}^3$  左右，土壤含水量控制在  $15\%$  左右。实验分有上坡来水和无上坡来水两组。选定雨强分别为  $29.7、60.5、90.2 \text{ mm/h}$ ，一次降雨量固定为  $60 \text{ mm}$ ，采用组合试验的方法，实验场次为：有上坡来水 12 场，无上坡来水 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、细沟溯源侵蚀速率，浅沟、切沟的宽、深、长，水动力参数值等。降雨开始即计时，产流开始进行观测，各施测项目每隔  $5 \text{ min}$  观测一次，降雨结束后测取雨后产流时间和产流量。

## 2 土壤侵蚀链关联的空间特征

根据实验资料，勾绘了不同雨强条件下坡面各种侵蚀方式发育的平面示意图(图 1)。根据试验场次分别安排在 3 种雨强下的 1 坡段、1+2 组合坡段、1+2+3 组合坡段、1+2+3+4 组合坡段进行 12 场实验，由此可计算出各坡段的产流产沙情况，2 坡段产流产沙量 = (1+2 组合坡段)产流产沙 - 1 坡段产流产沙，3 坡段产流产沙量 = (1+2+3 组合坡段)产流产沙 - (1+2 坡段)产流产沙，其余依次类推如表 2 所示。

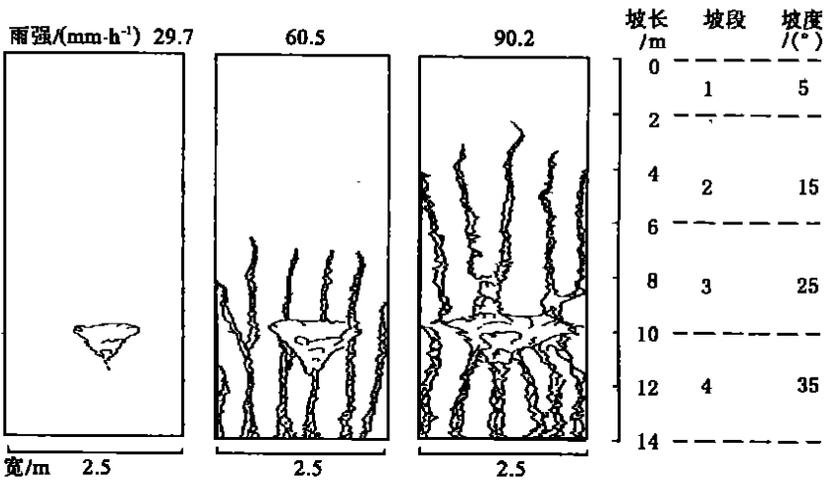


图 1 坡面沟蚀网发育平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gully erosion net on hillslope

由表 2 可见，径流量的变化特点为：相同雨强条件下，随着向下坡方向的坡度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、单位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，同一坡段雨强大的产流量也大，以 1

表 2 多坡段组合模型实验各坡段产流产沙分布

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

雨强 /(mm h <sup>-1</sup> )	雨量 /mm	坡段 序号	坡度 /(°)	径流量			侵蚀量			主要侵蚀方式
				总量 /L	单位面积 时间量 /(L m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	占全坡 /%	总量/kg	单位面积 时间量 /(kg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	占全坡 /%	
29.7	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
60.5	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
90.2	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

坡段为例, 单位面积与单位时间的产流量在 90.2 mm/h 雨强时为 58.85 L/m<sup>2</sup>·h, 60.5 mm/h 雨强时为 32.40 L/m<sup>2</sup>·h, 29.7 mm/h 雨强时为 14.27 L/m<sup>2</sup>·h, 大雨强的产流约为中雨强的 1.8 倍, 为小雨强的 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。

由表 2 和图 1 可见侵蚀量的变化特点为: 相同雨强条件下, 因坡段、坡度及侵蚀方式而有差异。愈向下坡方向随着坡度的增大, 侵蚀量亦在增大, 当同为片蚀方式时, 侵蚀量的差异并不显著。如在 29.7 mm/h 雨强时, 1、2、3 坡段均以面蚀为主, 3 坡段单位面积与单位时间的产沙量为 1.52 kg/m<sup>2</sup>·h, 2 坡段为 1.34 kg/m<sup>2</sup>·h, 1 坡段为 1.14 kg/m<sup>2</sup>·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。不同侵蚀方式时, 侵蚀量差异在各坡段间表现明显。如在 90.2 mm/h 雨强时, 4 个坡段的侵蚀方式和强度有明显差异, 单位面积与单位时间的产沙量, 在 4 坡段为 37.10 kg/m<sup>2</sup>·h, 3 坡段为 34.83 kg/m<sup>2</sup>·h, 2 坡段为 26.79 kg/m<sup>2</sup>·h, 1 坡段为 8.66 kg/m<sup>2</sup>·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。

不同雨强条件下, 同一坡段因雨强大小和侵蚀形态的发育程度而有差异, 表现为同一坡段雨强愈大, 侵蚀量愈大; 同一侵蚀形态发育愈充分, 侵蚀量亦愈大。以 1 坡段为例, 90.2 mm/h 雨强的产沙为 28.85 kg; 60.5 mm/h 雨强为 19.79 kg, 29.7 mm/h 雨强的产沙量则为 11.41 kg, 产沙量差异显著, 大雨强为中雨强的 1.46 倍, 为小雨强的 2.53 倍。当雨强为 90.2 mm/h 和 60.5 mm/h 时, 3 坡段主要侵蚀方式均为细沟, 但前者细沟形态的发育更充分, 因此侵蚀量更大, 同样雨强下, 前者侵蚀为后者的 1.78 倍; 在 29.7 mm/h 雨强下 3 坡段则没有细沟发育, 所以 90.2 mm/h 雨强相应坡段的侵蚀量为小雨强的 7.65 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。

可见, 一定的产流量是与一定的侵蚀产沙及其形态发育相一致的。产流量大产沙量也大; 产流量小则产沙量亦小。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, 这些侵蚀方式和形态才能在坡面上出现, 并非任何雨强和任何流量都能在坡面上塑造出这些沟蚀形态来。在实验中(图 1), 在 29.7 mm/h 的雨强时, 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。在 60.5 mm/h 的雨强时, 没有细沟切穿耕作层或多条细沟汇合形成浅沟的情况。细沟的出现部位低于 90.2 mm/h 雨强的位置, 主要分布在 3、4 坡段, 发育程度不如 90.2 mm/h 雨强的高, 总面积仅 5.73 m<sup>2</sup>。切沟虽有发育, 但长度不足 70 cm, 最大陡坎高仅 39 cm, 其发育程度亦不如 90.2 mm/h 雨强的高。当 90.2 mm/h 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, 总面积达 9.28 m<sup>2</sup>。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、黄土湿陷性等因素有关, 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 坡段代表丘陵沟壑区的谷坡地段, 坡度一般在 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, 就易于形成各种重力侵蚀。

坡面侵蚀强度, 既与各坡段自身的产流量有关, 也与下上坡水流的汇集密不可分。如果忽略上坡来水的作用, 许多现象就很难解释。如在表 2 和图 1 中, 90.2 mm/h 雨强时, 1 坡段的径流模数分别大于 60.5 mm/h 雨强时 3、4 坡段的径流模数, 但前者的侵蚀方式为面蚀; 而后者则主要为细沟和崩塌。浅沟、切沟的出现与发展与上坡来水的多寡关系密切。

分析上坡来水对不同坡段产沙的贡献。某一坡段的产沙量可认为由两部分构成, 一是本区产流量所造成的产沙量; 二是上坡来水所造成的产沙增量。由此可认为, 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。3 种雨强下有上坡来水和无上坡来水的产沙情况统计见表 3 和图 2。

由表 3 和图 2 可见, 有上坡来水各坡段的产沙量呈现明显的差异, 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, 一般是随上坡来水量和坡面部位的不同而不同。同一坡段, 上坡来水量越大的, 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。但在 90.2 mm/h 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 坡段也出现明显崩塌侵蚀有关。

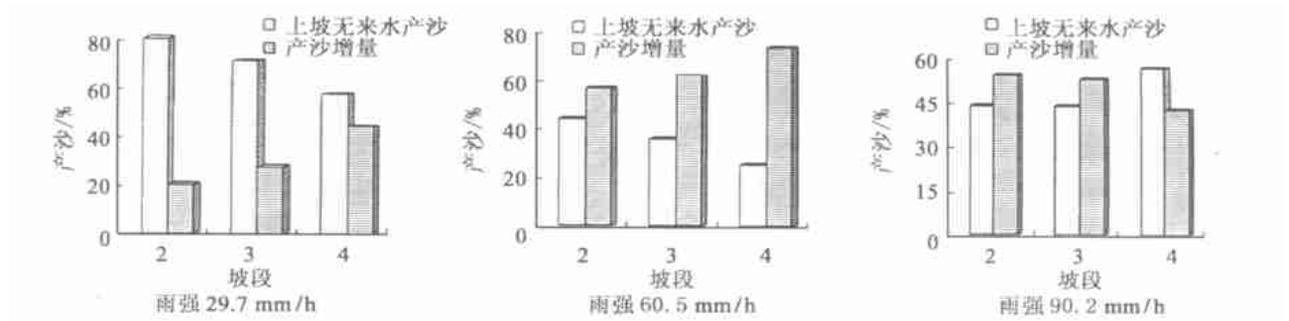


图 2 上坡来水对各坡段产沙的贡献

Fig. 2 Contribution of runoff and sediment on upslope to sediment yield on downslope erosion belts

表 3 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 experimented model with runoff and no runoff from upslope

雨强 (mm h <sup>-1</sup> )	雨量/mm	坡段 序号	坡度 (°)	有上坡来水				无上坡来水			
				上坡来水量	总输出沙量	上坡来沙量	产沙增量	占总输出	占坡段产	产流量	产沙量
				/L	/kg	/kg	/kg	沙量/%	沙量/%	/L	/kg
29.7	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
60.5	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
90.2	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

产沙增量占坡段总输出沙量的比例在不同雨强、不同坡段差异较大，一般与水流挟沙力和含沙量的对比关系，以及有无上坡来水时侵蚀方式的差别密切相关。同一雨强下，不同坡段越向下坡方向水流含沙量越大，尽管水流能量增加使水流挟沙力也增加，但挟沙力的增加不如含沙量增加快，这时产沙增量的绝对数值虽仍有增大趋势，但其占总输出沙量的比例却在逐渐减小。如果坡长加大，产沙量随波长的变化不如坡度那样迅速增加，那么到一定程度，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 29.7 mm/h 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却未发生崩塌现象，侵蚀方式的明显差异，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，同一坡段流量大的产沙量也大；不同坡段越向下坡因坡度增大了水流速度，使单位流量的侵蚀能力增加，产沙量明显增大。总之，无上坡来水时，坡面侵蚀能量较小，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)的产沙量增大了 42.9 % ~ 74.5 %。可见，水流能量是制约坡面产沙与侵蚀发育的重要因素，如能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，各种侵蚀形态的发生发展也会受到抑制。

### 3 结 论

(1) 愈向下坡的坡段产流量愈大，单位面积与单位时间的产流量按坡段可排列为谷坡 > 梁峁坡下部 > 梁峁坡中部 > 梁峁坡上部。愈向下坡方向，随着坡度的增大，侵蚀量亦在增大，但当同为片蚀方式时，侵蚀量的差

异并不显著。只有当水流能量达到或超过细沟、浅沟及切沟所需的动力临界, 这些侵蚀方式和侵蚀形态才能出现, 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。在 29.7 mm/h 的雨强时, 没有细沟、浅沟及切沟的发育。在 60.5 mm/h 的雨强时, 细沟主要分布在梁峁坡下部和谷坡处。在 90.2 mm/h 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梁峁坡中部到上部之间。

(2) 坡面侵蚀强度既与各坡段自身的产流有关, 也与上坡水流的汇集密不可分。上坡来水所造成的产沙增量, 一般是随上坡来水量和坡面部位的不同而不同。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发育的重要因素, 有效地控制上坡来水量, 全坡面的侵蚀产沙将会大幅度减小, 各种侵蚀的发生也会得到有效防止。

#### 参考文献:

- [1] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99 - 105.
- [2] 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.
- [3] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵沟壑区坡地的侵蚀发育[J]. 地理集刊, 1976(10): 35 - 51.
- [4] 刘元宝, 朱显谟, 周佩华, 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.
- [5] 陈 浩, 蔡强国. 上坡来水来沙对径流和侵蚀的影响[A]. 黄河流域地表物质迁移规律与地貌塑造过程研究[C]. 北京: 地质出版社, 1992. 82 - 88.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 雷阿林, 唐克丽, 王文龙. 土壤侵蚀链概念的科科学意义及其特征[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 79 - 83.

## Spatial distribution of runoff and sediment in the vertical belts of soil erosion chain in loess region of hilly and gully<sup>\*</sup>

WANG Wen-long<sup>1,2</sup>, LEI A-lin<sup>3</sup>, LI Zhan-bin<sup>1,4</sup>, TANG Ke-li<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 3. Yangtze Valley Water Resources Protection Institute, MWR and SBEP, Wuhan 430051, China; 4. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Spatial distribution of runoff and sediment in the vertical belt sections of soil erosion chain is studied by the simulated rainfall examination on block diagram combined with multi-slope sections. The results show that the runoff increase from the upper slope to lower one. The runoff per unit area and the unit time increases in order of the upper hillslope, the middle hillslope, the lower hillslope and the gully slope. Also, different the erosion patterns develop well on the hillslope with rainfall intensity of 90.2 mm/h and rill erosion extends from bottom of the slope to the middle and the upper hillslopes. Rill erosion, in contrast, only occurs in the lower hillslope and gully slope with rainfall intensity of 60.5 mm/h, and gully erosion do not develop with rainfall intensity of 29.7 mm/h. Due to the effect of runoff from the upper slope, sediment yields of hillslope and gully slope have increased by 20.2%~63.5% and 42.9%~74.5% respectively.

**Key words:** soil erosion chain; vertical belt; sediment-water flow; spatial distribution; loess region of hilly and gully

<sup>\*</sup> The Knowledge Innovation project of (No. KCZX1-10-04) and the project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 49671052).