

文章编号: 1008-2786-(2010)4-415-07

黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度

陈晓安^{1,2}, 蔡强国^{2*}, 张利超¹, 蔡俊谕², 郑明国², 聂斌斌³

(1. 江西省水土保持科学研究所, 江西 南昌 330029 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;

3. 华中农业大学 园艺林学学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 坡度是重要的地貌因子。采用岔巴沟径流场和王家沟径流场资料, 首先研究坡度与最大 30 min 雨强 (I_{30}) 对土壤侵蚀影响, 然后确定了主导侵蚀为溅蚀片蚀与主导侵蚀为细沟侵蚀之间的临界雨强, 最后探讨了不同侵蚀类型下的临界坡度。结果表明: 1. 坡度与降雨强度存在明显的交互作用, 随着坡度的增大, 雨强对土壤侵蚀的影响增大; 2. 团山沟的溅蚀片蚀与细沟之间的临界 I_{30} 为 0.31 mm/min 同时, 该临界雨强不是一定值, 受下垫面因素等影响而具有一定的波动范围; 3. 以溅蚀片蚀为主时, 土壤侵蚀存在一个 $< 31^\circ$ 的临界坡度, 侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流模数随坡度变化的趋势相同, 从 $9^\circ \sim 31^\circ$ 土壤侵蚀模数随坡度增加是先增加后减小; 以细沟侵蚀为主时, 在 $9^\circ \sim 31^\circ$ 间土壤侵蚀不存在临界坡度, 土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流含沙量随坡度变化的趋势相同, 从 $9^\circ \sim 31^\circ$ 土壤侵蚀模数随坡度增加先逐渐增加后缓慢增加, 临界坡度 $> 31^\circ$ 。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 坡度; 临界雨强; 临界坡度

中图分类号: S157

文献标识码: A

坡度是地貌形态特征的主要要素, 对坡面土壤侵蚀具有重要影响。关于坡度因子对坡面土壤侵蚀的影响, 国内外已做了大量的研究。Zingg 第一个通过试验建立了坡度与侵蚀量的经验关系, 认为土壤侵蚀量与坡度的 1.4 次方成正比^[1]。McCool 等发现土壤侵蚀量随坡度的变化在相对较陡坡上比在较缓坡上明显, 并且存在一个转折坡度^[2]。Yair 发现在坡面上当坡度超过一定限度时泥沙输移量与坡度出现反比关系^[3]。Renner 在分析爱达荷洲博伊斯科河流域的野外资料时得到, 坡地受侵蚀的面积百分数随坡度变化而变化, 当坡度超过 40.5° 时侵蚀量反而随坡度增大而减小^[4]。Horton 第一个从坡面流理论上探讨了坡面土壤侵蚀临界坡度, 得出临界坡

度为 57° ^[5]。国内学者对坡度与土壤侵蚀的关系也做了大量研究。刘善建通过分析天水水土保持实验站径流小区资料发现, 坡度与冲刷量成指数相关^[6]。陈永宗根据绥德、离石两地径流小区资料, 得出坡地上侵蚀量随坡度增大而增加, 当坡度超过 25° 或 28° 时, 其侵蚀量反而减小^[7]。曹文洪通过理论分析, 指出坡面土壤侵蚀临界坡度 $> 40^\circ$ ^[8]。刘青泉从水流切应力和土壤抗冲蚀能力随坡度的变化关系的角度理论, 推导出土壤侵蚀的临界坡度在 $41.5^\circ \sim 50^\circ$ 范围内^[9]。靳长兴从能量角度出发, 从理论上分析得出坡面土壤侵蚀临界坡度为 $24^\circ \sim 29^\circ$ ^[10]。由于影响土壤侵蚀的因素众多, 不同学者通过不同区域的试验得出不同的结论, 即使同一区

收稿日期 (Received date): 2009-11-26 改回日期 (Accepted): 2010-03-20

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金重点项目 (40635027), 黄河水利委员会治黄专项 (黄水保 200651-02), 国家自然科学基金面上项目 (40971165), 国家自然科学基金项目 (40871138)。[Supported by the Key Program of National Science Foundation of China (40635027), Special project management of the Yellow River in Yellow River Conservancy Commission (Water Conversation of the Yellow River 200651-02), the National Science Foundation of China (40971165 and 40871138).]

作者简介 (Biography): 陈晓安 (1983-), 男, 安徽省南陵县人, 硕士, 研究方向: 土壤侵蚀模型。[Chen Xiaon (1983-) Male Nanling Anhui Province Master Major in soil erosion model] E-mail: onlyxa@163.com

*通讯作者 (Corresponding author): 蔡强国 (1946-), 男, 湖北省武汉市人, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事土壤侵蚀、水土保持、流域侵蚀产沙模拟研究。[Cai Qiangguo (1946-) Male Wuhan Hubei Province Professor Doctor Ph.D. supervisor Major in soil erosion water and soil conservation Simulation of soil erosion and sediment yield] E-mail: caiqg@igsnrr.ac.cn

域不同径流场因下垫面条件等差异,可能也会导致出现不同的研究结果;理论推理中,不同学者的立脚点不一样得出的结论也有所不同。上述学者通过试验分析坡度因子时将不同的侵蚀类型混合在一起,由于不同的侵蚀类型其侵蚀力有很大差异,如溅蚀片蚀其侵蚀力主要是降雨侵蚀力,而细沟侵蚀的侵蚀力为径流冲刷力,因而以不同侵蚀力为主导的侵蚀,其临界坡度势必有所差异;理论推导中由于只考虑径流冲刷而忽略了雨滴打击的影响,其结论与实际情况还是存在很大偏离的。

鉴于前人研究的上述不足,本研究分析了最大30 min雨强(I_0)与坡度对土壤侵蚀影响的交互作用,确定产生溅蚀片蚀与细沟侵蚀之间的临界雨强,分别分析了以溅蚀片蚀为主和以细沟侵蚀为主的坡面土壤侵蚀的临界坡度,最终得到了坡面侵蚀与坡度因子之间的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区介绍

岔巴沟流域位于黄土丘陵沟壑第一副区的陕西省子洲县,面积205 km²。流域地貌形态主要为黄土丘陵沟谷和河谷阶地,沟谷坡面陡峭,坡度一般>60°,梁顶顶部坡度约5°~10°,梁顶两侧坡度变化范围15°~30°。气候属于干燥少雨的大陆性气候,年降水量约为450 mm,年际变化较大,年内分配不均,70%以上降雨集中在6~9月,且多为强度较大而历时短暂的暴雨,最大记录降雨强度为3.5 mm/min,年蒸发量达1 228 mm,年平均气温为8℃。土壤为黄土母质发育的黄绵土为主,土壤颗粒中>0.05 mm的含量约为25.8%,在0.01~0.05 mm之间的约为57.7%,<0.01 mm的含量约为16.5%,以粉粒为主,有机质含量低,土质极容易造成侵蚀。

王家沟流域位于黄土丘陵沟壑第一副区,面积为9.1 km²,流域地形地貌、土壤、气候条件与岔巴沟流域类似。土壤为黄土母质发育的黄绵土为主,土壤颗粒中以粉粒为主,<0.01 mm的颗粒含量占10%~20%,干容重1.2~1.3 t/m³,孔隙度45%~60%,渗透速度7~7.5 mm/min。流域地貌形态主要为黄土丘陵沟谷和河谷阶地;沟谷坡面陡峭,坡度一般>60°,梁顶顶部坡度约5°~10°,梁顶两侧坡度变化范围在15°~30°间。气候属于干燥少雨的大陆性气候,年降雨量约为506.5 mm,降水主要集中在

在6~9月,且降雨多为强度较大而历时短暂的暴雨。

1.2 数据来源

本文研究不同坡度下雨强对土壤侵蚀的影响、不同坡度下 I_0 与土壤侵蚀模数散点关系、不同 I_0 范围细沟侵蚀情况、不同侵蚀类型下土壤侵蚀模数与坡度关系、平均含沙量、径流模数的影响时,选取岔巴沟流域团山沟1号、4号、5号径流场1963~1967年的资料。从1963~1967年3个坡度同期降雨都产流且都有记录的降雨为13场,因此,采用这13场降雨作为样本资料。

表 1 团山沟径流场的基本特征					
Table 1 Characteristics of runoff plots in Tuanshangu Gully					
径流场	位置	坡型	坡度(°)	水平投影坡长(m)	坡宽(m)
1	坡顶	直行坡	9	20	7.5
4	阶坡上部	直行坡	22	20	15
5	阶坡上部	直行坡	31	20	15

在研究不同 I_0 下各坡度土壤侵蚀模数大小规律时,选取布设坡度较多的王家沟流域羊道沟1964年径流场资料,1964年不同坡度同期降雨产流的降雨为4场。

表 2 羊道沟径流场的基本特征				
Table 2 Characteristics of runoff plots in Yangdaogou Gully				
坡度(°)	坡型	水平投影坡长(m)	坡宽(m)	土地利用
5	直行坡	20	3	谷子
10	直行坡	20	10	谷子
15	直行坡	20	3	谷子
20	直行坡	20	3	谷子
25	直行坡	20	3	谷子
30	直行坡	20	3	谷子

1.3 分析方法

黄土高原10~30 min最大雨强与土壤侵蚀模数的相关性很好^[1],作者的前期研究亦表明黄土高原10~30 min最大雨强与土壤侵蚀模数的相关性很好,没有显著性差异。本研究以最大30 min雨强(I_0)进行不同 I_0 下坡度与土壤侵蚀模数的关系分析。

首先对不同坡度下 I_0 与土壤侵蚀模数进行线性回归,通过分析直线的斜率及方程决定系数的变

化, 探讨坡度对土壤侵蚀模数的影响; 再绘不同坡度与土壤侵蚀模数的散点图, 找出土壤侵蚀模数与坡度关系发生变化的临界雨强, 随后用王家沟流域的不同 I_0 下土壤侵蚀模数在不同坡度坡面的变化来佐证临界雨强的存在, 用团山沟径流场的细沟侵蚀发生情况分析该临界雨强是否是溅蚀片蚀与细沟侵蚀间的临界雨强; 最后分析不同侵蚀类型下临界坡度与土壤侵蚀模数的变化规律, 并从不同侵蚀类型下坡度与平均含沙量、径流模数关系变化的角度揭示原因。

2 结果与分析

2.1 雨强和坡度对土壤侵蚀的影响

从图 1 中可以看出, 低坡度下回归直线的斜率较小, 随着坡度增加直线的斜率在增大, 说明 I_0 与土壤侵蚀模数关系很大程度上受坡度的影响。因此, 坡度和雨强对土壤侵蚀的影响存在交互作用。同时, 从 $9^\circ \sim 22^\circ$ 直线斜率的增加较大, 而从 $22^\circ \sim 31^\circ$ 直线斜率增加较小; 随着坡度增加回归方程的决定系数也增大。

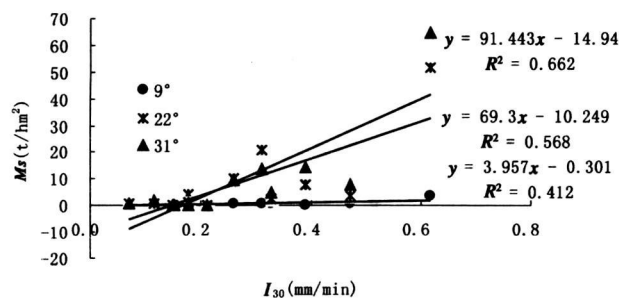


图 1 最大 30 min 雨强 (I_0) 与土壤侵蚀的关系
Fig 1 Relations between maximum 30-minute rainfall intensity (I_0) and soil erosion

一方面, 随着坡度的增加, 坡面上土体的下滑力增加, 最大静摩擦力减小, 相对较小的径流能量就能搬运土壤, 同时, 随着坡度的增加, 坡面上水流移动相同的坡长时下降的高度增加, 这样水流的动能也增加, 侵蚀潜能也就增加; 另一方面, 随着坡度的增加, 单位水平面积对应的斜坡面积增大, 入渗量增加, 径流量减小, 径流潜在侵蚀能量和搬运能量减少。在低坡度时, 随着坡度的增大, 因坡度变化而增加的斜面面积较小即增加的入渗较小, 而坡面上土体下滑力、水流能量增加较快, 随着坡度继续增加,

增加的斜面面积逐渐增大导致入渗量逐渐增大, 土壤侵蚀随坡度增大就趋于缓慢。因此, 出现低坡度时, 土壤侵蚀模数随坡度增加较大, 在较大坡度时, 土壤侵蚀模数随坡度增加较小。

由于土壤侵蚀复杂, 受地表微地形等因素影响, 当坡度较小时, 土壤侵蚀模数小, 总土壤侵蚀中由地表微地形等因素影响的比例较大, 而当坡度较大时, 土壤侵蚀模数较大, 总土壤侵蚀中由地表微地形等因素影响的比例较小, 所以, 随着坡度增大, 回归方程的决定系数逐渐减小。

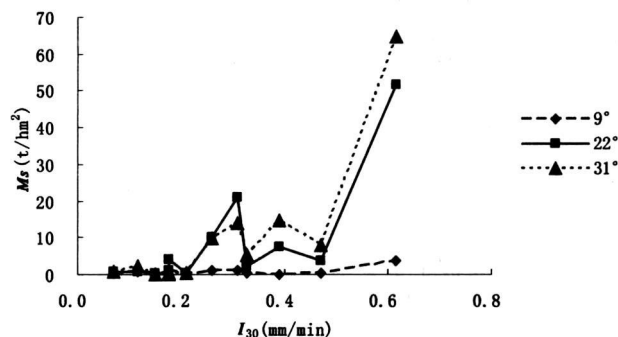


图 2 不同坡度下最大 30 min 雨强 (I_0) 与侵蚀模数散点关系图

Fig 2 Scatter diagram of maximum 30 minute rainfall intensity (I_0) and erosion modulus

2.2 不同主导侵蚀类型之间的临界雨强

从图 2 可知, 当 $I_0 \leq 0.31 \text{ mm/min}$ 时, 22° 坡面的侵蚀模数 $> 31^\circ$ 坡面的侵蚀模数, 31° 坡面侵蚀模数大于 9° 坡面侵蚀模数, 即坡度从 $9^\circ \sim 31^\circ$ 土壤侵蚀模数先增大后减小; 当 $I_0 > 0.31 \text{ mm/min}$ 时, 31° 坡面侵蚀模数 $> 22^\circ$ 坡面侵蚀模数, 22° 坡面侵蚀模数 $> 9^\circ$ 坡面侵蚀模数, 即坡度从 $9^\circ \sim 31^\circ$ 土壤侵蚀模数逐渐增大。江忠善在黄土丘陵沟壑第一副区的安塞研究坡面侵蚀规律时发现: 当 $I_0 \leq 0.25 \text{ mm/min}$ 时, 坡面土壤侵蚀模数从 $5^\circ \sim 28^\circ$ 先增大后减小; 当 $I_0 > 0.25 \text{ mm/min}$ 时, 坡面土壤侵蚀模数从 $5^\circ \sim 28^\circ$ 随坡度的增加而增加^[12]。那么无论黄土丘陵沟壑区的安塞还是黄土丘陵沟壑区的子洲县的岔巴沟流域资料分析都表明在不同范围的降雨强度下坡度与土壤侵蚀的关系是有差异的。

从表 3 可知, 当 $I_0 < 0.31 \text{ mm/min}$ 时, 王家沟流域坡面土壤侵蚀模数总体上从 $5^\circ \sim 30^\circ$ 是先增大后减小的; 当 $I_0 \geq 0.31 \text{ mm/min}$ 时, 王家沟流域坡面土壤侵蚀模数总体上随坡度从 $5^\circ \sim 30^\circ$ 是逐渐增大的

表 3 不同 I_0 下各坡度土壤侵蚀模数的统计

Table 3 The statistic of soil erosion modulus in different slopes under different I_0

I_0 (mm/min)	项目	不同 坡度 (°)					
		5	10	15	20	25	30
0.21	Ms(t/km ²)	31.7	83.4	201.8	无记录	155	33.6
0.22	Ms(t/km ²)	55	13.3	38	100	无记录	68.4
0.31	Ms(t/km ²)	45.2	43	100	无记录	208.3	875
0.53	Ms(t/km ²)	51.2	147.5	1 525	2 028	1 080	2 783.3

从上述分析可知, I_0 在 0.31mm/min 上与下土壤侵蚀与坡度之间的规律还是有很大差异的。因此, 对团山沟不同坡度的坡面在 $I_0 \leq 0.31\text{mm/min}$ 与 $> 0.31\text{mm/min}$ 情况下的侵蚀类型进行统计分析来探讨临界雨强。

从 1963~1967 团山沟径流场统计资料发现, $I_0 \leq 0.31\text{mm/min}$ 的降雨有 9 场, 所有降雨中各径流场总体上没有出现细沟, 其中有 1 场降雨中只有一号径流场出现局部不明显的细沟 (细沟长 $< 50\text{cm}$), 另一场降雨中只有五号仅下部出现局部不明显的细沟。因此, 当 $I_0 \leq 0.31\text{mm/min}$ 时, 从 9° 到 31° 不同坡度坡面土壤侵蚀几乎没有细沟侵蚀, 溅蚀片蚀为主导侵蚀。 $I_0 > 0.31\text{mm/min}$ 的降雨有 4 场, 有 2 场降雨各径流场都出现明显的细沟, 不同坡度径流场出现细沟的两场降雨侵蚀量占总侵蚀量都达 80% 左右。因此, 当 $I_0 > 0.31\text{mm/min}$ 时, 从 9° 到 31° 不同坡度坡面土壤侵蚀以细沟侵蚀为主。当然 I_0 等于 0.31 mm/min 并非是细沟侵蚀的临界雨强, 而是当 $I_0 > 0.31\text{mm/min}$ 时, 坡面土壤的主导侵蚀为细沟侵蚀, $I_0 < 0.31\text{mm/min}$ 时, 主导侵蚀为溅蚀片蚀。同时, 由于土壤侵蚀复杂, 该值也非定值, 应该是有一定的波动范围。当 I_0 小于该范围时, 坡面的主导侵蚀为溅蚀片蚀, 侵蚀能量主要是雨滴击溅; 当 I_0 大于该范围值时, 坡面的主导侵蚀为细沟侵蚀, 侵蚀能量主要是径流冲刷。

2.3 不同侵蚀类型下的临界坡度和侵蚀规律

2.3.1 以溅蚀片蚀为主导侵蚀类型下坡度与侵蚀的关系

当 $I_0 < 0.31\text{mm/min}$ 时, 坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀。计算了其降雨条件下 3 个径流场的平均侵蚀模数及其标准误, 见图 3 可知, 坡度从 $9^\circ \sim 31^\circ$ 土壤侵蚀模数的均值是先增大后减小的趋势, 同时, 标准误也是先增大后减小的, 这样从样本数据上能够反映总体的土壤侵蚀模数的均值随坡度变化是先

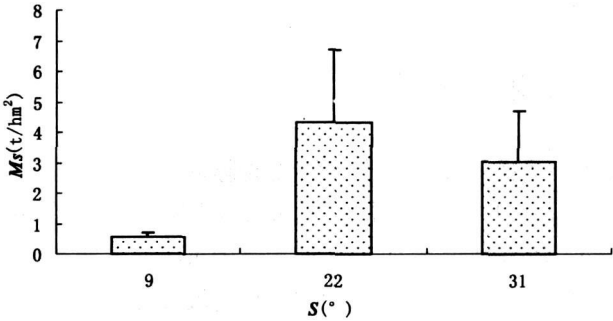


图 3 平均土壤侵蚀模数随坡度的变化

Fig. 3 The average soil erosion modulus change with the slope

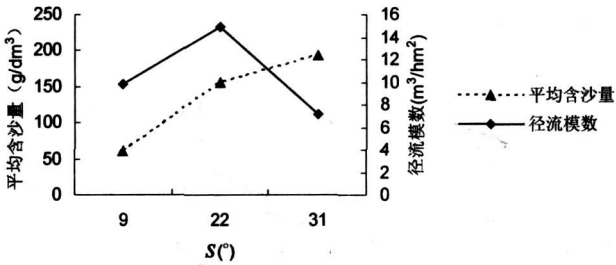


图 4 平均含沙量的均值、径流模数的均值随坡度的变化

Fig. 4 The mean average sediment concentration, the mean runoff modulus change with the slope

增大后减小的。因此, 坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀时, 土壤侵蚀模数随坡度变化存在临界坡度且临界坡度 $< 31^\circ$ 。

从图 4 可知, 随着坡度的增大, 平均含沙量的均值是逐渐增大的, 径流模数的均值先增大后减小; 同时, 坡度从 $22^\circ \sim 31^\circ$ 径流模数均值减小的比例大于平均含沙量均值增大的比例。由于上述平均含沙量的均值和径流模数的均值随坡度变化的规律导致土壤侵蚀模数的均值随坡度出现先增大后减小的现象。从图 3 图 4 可以看出, 坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀时, 表现出土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流模数随坡度的变化趋势相同。

2.3.2 以细沟侵蚀为主导侵蚀类型下坡度与侵蚀

的关系

从图 5 可知, 总体上, 从 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 随着坡度的增大平均土壤侵蚀模数逐渐增大, 同时, 标准误也是先逐渐增大的, 那么从样本数据上能够反映总体的土壤侵蚀模数的均值随坡度变化是逐渐增大的。那么, 坡面以细沟侵蚀为主导侵蚀时, 在 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 之间不存在临界坡度。

从图 6 可知, 从 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 随坡度增大平均含沙量的均值逐渐增大, 径流模数随坡度先急剧增大后基本不变。由于上述平均含沙量的均值和径流模数的均值随坡度变化的规律导致土壤侵蚀模数的均值随坡度出现先急剧增大后增加平缓。从图 5 图 6 可以看出, 坡面以细沟侵蚀为主导侵蚀时, 表现出土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与平均含沙量随坡度的变化趋势相同。

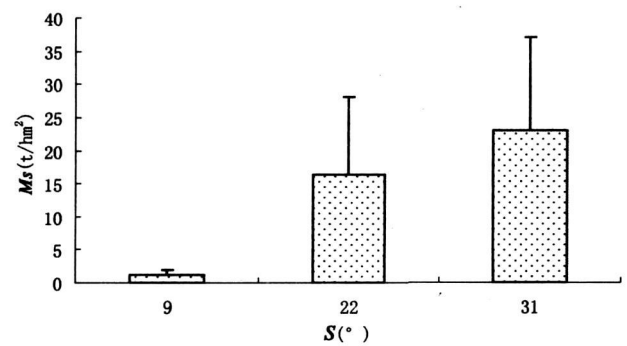


图 5 平均土壤侵蚀模数随坡度的变化

Fig. 5 The average soil erosion modulus change with the slope

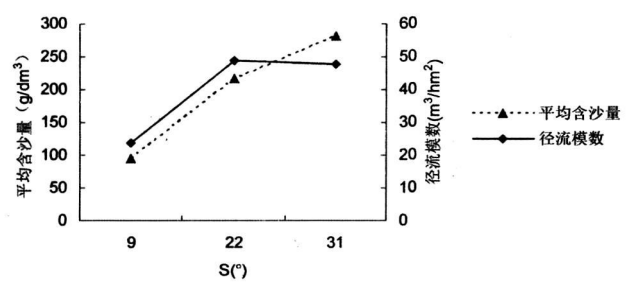


图 6 平均含沙量的均值、径流模数的均值随坡度的变化

Fig. 6 The mean average sediment concentration, the mean runoff modulus change with the slope

3 讨论

3.1 坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀

溅蚀片蚀过程中雨滴的击溅侵蚀远大于薄层水流的冲刷带来的侵蚀, 雨滴的击溅作用为薄层水流

搬运提供充足的物质来源, 薄层水流主要起搬运作用^[13]。此时, 土壤流失量的大小, 主要取决于薄层水流的搬运能力而不受供沙量限制。很多学者认为降雨扰动作用下的薄层水流为“伪层流”或扰动层流^[14-16], 该水流由于雨滴打击, 水流被充分扰动, 局部水流湍动强烈, 但整体水流处于层流状态。因此, 薄层水流的搬运能力由薄层水流的自身能量和雨滴打击能量决定。由于上述不同坡度其水平坡长相同则单位面积雨滴打击能量相同, 所以, 不同坡度侵蚀模数的差异主要由薄层水流的自身能量差异导致的。而薄层水流的自身能量由薄层水流的径流模数和流速决定。一方面, 当雨强较小时, 坡面水层较浅, 此时水流阻力相对较大, 随着坡度的增大, 水流的速度增加较缓; 而此时径流模数较小, 坡度变化导致的入渗量占总径流量的比例相对较大。另一方面, 通过径流冲刷实验研究, 流量较小时, 与坡度增加造成径流流速增大而带来的土壤侵蚀相比, 径流量对土壤侵蚀的作用影响更显著^[17]。当坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀时, 坡面径流能量较小, 单位体积的径流侵蚀和搬运土壤的能力有限, 侵蚀产沙量的多少主要取决于径流量的大小。所以, 在以溅蚀片蚀为主导侵蚀中, 径流模数对侵蚀产沙起主导作用, 土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流模数随坡度变化的趋势相同, 即从 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 是土壤侵蚀模数随坡度先增大后减小的。吴普特通过人工降雨试验得出溅蚀片蚀时临界坡度大致在 $22^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ^[18]。靳长兴从能量的角度推导临界坡度在 $24^{\circ} \sim 29^{\circ}$ 间^[10], 其考虑的是雨滴击溅动能转化为薄层水流的能量, 那么其推导无意中考虑的只是溅蚀片蚀。因此, $I_0 < 0.31 mm/min$ 坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀时, 坡面土壤侵蚀存在一个 $< 31^{\circ}$ 的临界坡度。

3.2 坡面以细沟侵蚀为主导侵蚀

当以坡面细沟侵蚀为主导侵蚀时, 一方面, 当雨强较大时, 坡面水层较深, 此时水流阻力相对较小, 随着坡度的增大, 水流的速度增加较快; 而此时径流模数较大, 坡度变化导致的入渗量占总径流量的比例相对较小。另一方面, 细沟侵蚀过程中, 坡度对挟沙能力的影响要比流量的影响大^[19]。以细沟侵蚀为主时, 土壤侵蚀主要由径流冲刷产生的, 此时, 径流能量较大, 径流侵蚀能力较大, 即使较小体积的径流也能侵蚀和输移较多的土壤。随着坡度增大时, 径流能量增加显著, 径流含沙量增加显著。所以, 在以细沟侵蚀为主导的侵蚀中, 径流含沙量的变化对

侵蚀产沙起主导作用,土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流含沙量随坡度变化的趋势相同,从 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 是土壤侵蚀模数随坡度先急剧增加后增加平缓,坡面侵蚀的临界坡度 $> 31^{\circ}$ 。Horton从径流冲刷力的角度理论推导认为坡面侵蚀的临界坡度为 $57^{\circ[5]}$ 。曹文洪从水流拖拽力的角度理论推导坡面侵蚀的临界坡度 $> 40^{\circ[8]}$ 。刘青泉从水流切应力和土壤抗冲蚀能力随坡度的变化关系的角度理论推导出土壤侵蚀的临界坡度在 $41.5^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 范围内^[9]。上述学者都未考虑雨滴的击溅的影响,只考虑了水流冲刷侵蚀,而当坡面以溅蚀片蚀为主导侵蚀时,雨滴的击溅作用在侵蚀中占主导地位,上述学者的推理就完全不符合溅蚀片蚀的情况;而坡面以细沟侵蚀为主导侵蚀时,坡面的主导侵蚀力为径流冲刷,该情况下理论上可以用上述学者理论推导,上述学者的推导表明坡面的临界坡度都在 31° 以上,这从侧面佐证了数据分析的结果。所以,坡面以细沟侵蚀为主导侵蚀时,坡面侵蚀的临界坡度 $> 31^{\circ}$ 。

4 结论

坡度与降雨强度存在明显的交互作用,随着坡度的增大,雨强对土壤侵蚀的影响增大。

当 $I_0 \leq 0.31 \text{ mm/min}$ 时,降雨强度较小,坡面土壤以溅蚀片蚀为主,土壤侵蚀存在临界坡度,临界坡度小于 31° ;此时,径流能量较小,径流搬运土壤的能力有限,侵蚀产沙量的多少主要取决于径流流量的多少,土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流模数随坡度变化的趋势相同,从 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 土壤侵蚀模数随坡度增加是先增加后减小。

当 $I_0 > 0.31 \text{ mm/min}$ 时,降雨强度较大,坡面土壤以细沟侵蚀为主,坡面侵蚀的临界坡度 $> 31^{\circ}$;此时,径流能量较大,较小的径流也能冲刷和输移较多的土壤,侵蚀产沙量的多少主要取决于径流能量的多少,土壤侵蚀模数随坡度的变化趋势与径流平均含沙量随坡度变化的趋势相同,从 $9^{\circ} \sim 31^{\circ}$ 土壤侵蚀模数随坡度增加是先急剧增加后缓慢增加。

参考文献 (References)

- [1] Hu Gang, Wu Yongqiu. Progress in the Study of Geomorphic Threshold Theory in Channel Erosion [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(5): 565 ~ 570 [胡刚, 伍永秋. 发生沟蚀的地貌临界研究综述 [J]. 山地学报, 2005, 23(5): 565 ~ 570]
- [2] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in

- runoff [J]. Agricultural Engineering, 1940, 21(2): 59 ~ 64
- [3] McCool D K, Brown L G, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30: 1387 ~ 1396
- [4] Yair A, Klein M. The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid area [J]. Catena, 1973, 1(1): 1 ~ 8
- [5] Renner F G. Conditions influencing erosion of the boise river watershed [Z]. V S Dept Agric Tech Bull, 1936, 528
- [6] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Geol Soc Amer Bull, 1945, 56(3): 275 ~ 370
- [7] Liu Shanjian. Testing and analysis of soil erosion [J]. Chinese Science Bulletin, 1953, 12 [刘善建. 天水水土流失测验与分析 [J]. 科学通报, 1953, 12]
- [8] Chen Yongzong. Development of slope erosion in Yellow River hilly region [A]. In: Bulletin of Chinese Academy of Sciences Institute of Geography, 1976 [陈永宗. 黄河中游黄土丘陵区坡地的侵蚀发育 [A]. 见: 中国科学院地理研究所地理集刊 (10) [C]. 北京: 科学出版社, 1976]
- [9] Cao Wenhon. Slope Thresholds of Soil Erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1983, 13(4): 1 ~ 5 [曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究 [J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 1 ~ 5]
- [10] Liu Qingquan, Chen Li, Li Jiashun. Influences of Slope Gradient on Soil Erosion [J]. Applied Mathematics And Mechanics, 2001, 22(5): 449 ~ 457 [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]
- [11] Jing Changxing. A Theoretical Study on Critical Erosion Slope Gradient [J]. Journal Geographica Sinica, 1995, 50(30): 234 ~ 239 [靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度 [J]. 地理学报, 1995, 50(3): 234 ~ 239]
- [12] Wang Wanzhong. Study on the Relations between Rainfall Characteristics and Loss of Soil in Loess Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1983, 4: 7 ~ 14 [王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 [J]. 水土保持通报, 1983, 4: 7 ~ 14]
- [13] Jiang Zhongshan, Liu Zhi, Jia Zhiwei. Research for Relationships between Topographic Factors and Loss of Soil and Water on Sloping Land [A]. In: Memoir of the Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources [C]. 1990, 12: 1 ~ 8 [江忠善, 刘志, 贾志伟. 地形因素与坡地水土流失关系的研究 [A]. 见: 西北水土保持研究所集刊 [C]. 1990, 12: 1 ~ 8]
- [14] Wu Pute, Zhou Peihua. The Action of Raindrop Splash on Sheet Flow Erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 19 ~ 26 [吴普特, 周佩华. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用 [J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 19 ~ 26]
- [15] Emmett W W. Overland flow [A]. In: Kirkby M J, ed. Hillslope Hydrology. New York: John Wiley and Sons, 1978
- [16] Yao Wenyi. Experiment study on hydraulic resistance laws of overland sheet flow [J]. Journal of Sediment Research, 1996, 1(1): 74 ~ 81 [姚文艺. 坡面流阻规律试验研究 [J]. 泥沙研究, 1996, 1(1): 74 ~ 81]

- (1): 74~81]
- [17] Wu Pute, Zhou Peihua. Research on the Sheet Flow Erosion of Loess Surface[J]. Journal of soil erosion and soil and water conservation, 1996, 2(1): 40~45 [吴普特, 周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 40~45]
- [18] Liu Yumei, Zhang Guanghui, Han Yanfeng. Study on the Coupling Relationship between Soil Detachment Rate and Sediment Transport Rate of Overland Flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(3): 24~28 [柳玉梅, 张光辉, 韩艳峰. 坡面流土壤分离速率与输沙率耦合关系研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 24~28]
- [19] Wu Pute, Zhou Peihua. Study on the Relationship between Land Slope and Sheet Flow Erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993, 13(3): 1~5 [吴普特, 周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究 [J]. 水土保持通报, 1993, 13(3): 1~5]
- [20] Lei Tingwu, Zhang Qingwen. Laboratory Study on Sediment Transport Capacity in the Dynamic Process of Rill Erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 476~482 [雷廷武, 张晴雯. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究 [J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476~482]

Research on Critical Slope of Soil Erosion in a Hilly Loess Region on the Loess Plateau

CHEN Xiaon^{1, 2}, CAI Qianguo², ZHANG Lichao¹, QI Junyu², ZHENG Mingguo², NIE Binbin³

(1. Jiangxi Provincial Research Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Slope is an important geomorphological factor. This paper firstly studied the impacts of slopes and maximum 30-minute rainfall intensity (I_0) on soil erosion, and then determined the critical rainfall intensity between splash-sheet erosion and rill erosion, and finally studied the critical slopes and the slope gradient impact on soil erosion under different soil erosion types, using data of runoff plots in Chabagou and Wangjiagou Gully. The results showed that: first, the interaction between slopes and rainfall intensity impacts on soil erosion is obvious; influence of rainfall intensity on soil erosion increases with increase of slope; second, the critical I_0 between splash-sheet erosion and rill erosion in Tuanshangou Gully is not a fixed value, but fluctuates around 0.31 mm/min on different underlying conditions; Third, while dominated by splash-sheet erosion, there is a critical gradient less than 31° with a same tendency of soil erosion modulus and runoff modulus changes according to gradient that soil erosion modulus increases first and then decreases with the slope changes from 9° to 31° ; while dominated by rill erosion, there is not a critical gradient with a same tendency of soil erosion modulus change and runoff sediment change according to changing gradient that soil erosion modulus increase with the increase of slope from 9° to 31° , a critical gradient more than 31° .

Key words: hilly loess region on the Loess Plateau; slope; critical rainfall intensity; critical slope