

紫色土坡地壤中流特征

徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法, 史志华

(华中农业大学农业部亚热带农业资源与环境重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 壤中流是紫色土地径流的重要组成部分。通过野外人工模拟降雨试验, 研究了不同降雨条件下紫色土地壤中流特征和地表状况变化对壤中流的影响, 结果表明: 未扰动荒坡地壤中流径流系数是裸露坡耕地的 3~15 倍, 平均流量是坡耕地的 7~33 倍, 荒坡地和坡耕地壤中流特征差异在大雨强条件下表现更为明显; 坡耕地壤中流径流系数随降雨强度的增加而显著减少, 但荒坡地壤中流受雨强的影响不明显; 荒坡地壤中流随地表状况变化而改变, 植被覆盖的减少和降雨对疏松地表的压实导致壤中流明显减少。

关键词: 紫色土; 降雨强度; 壤中流; 地表状况

中图分类号: P334.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)02-0229-06

壤中流是坡地径流的重要组成部分, 对流域径流产生、养分流失等都有重要的影响^[1]。流域范围内的壤中流受地形、土层厚度、土地利用等多种因素的影响, 国内外学者对壤中流的产生机制^[2]、优先路径^[3-4]、临界性和非线性^[5], 以及壤中流的影响因子^[6-7]进行了广泛的研究。由于土壤自身性质的影响, 壤中流在紫色土地地区普遍存在且在总径流量中占有相当的份额。刘刚才等^[8]对常规耕作制度下紫色土坡地壤中流进行了研究, 发现壤中流在大雨、暴雨或土壤饱和后才发生, 雨停后的壤中流历时与降雨强度无关; 贾海燕等^[9]通过人工降雨试验发现在紫色土地地区壤中流是硝态氮流失的主要途径; 丁文峰等^[10]比较了不同坡度和降雨强度下紫色土壤中流, 结果表明壤中流占总径流量的比例受坡度和降雨强度影响明显。当前对紫色土壤中流的研究较少且集中在坡耕地, 对紫色土荒坡地壤中流特征很少涉及。荒坡地植被覆盖度高、人为破坏程度低, 降雨过程中壤中流特征可能更明显。鉴于此, 本研究采用野外人工模拟降雨方法, 比较了不同降雨强度条件下紫色土荒坡地和坡耕地的壤中流特征, 并分析了荒坡地除草和翻耕处理后的壤中流特征, 以期深入了解紫色土坡地降雨产流特征和土地利用变化对产流过程的影响提供科学依据。

1 研究区概况及小区布设

试验区位于三峡库区秭归县王家桥小流域, 流域面积 16.7 km², 海拔在 184~1180 m 之间, 流域气候属亚热带大陆性气候, 年平均降水量为 1192.8 mm, 流域内土壤主要为紫色砂页岩发育的紫色土。在流域范围内选取典型坡耕地和荒坡地作为试验点, 坡耕地试验点主要种植花生(降雨前割除), 而荒坡地则是杂草丛生。试验点土壤基本情况见表 1, 土壤性质采用常规分析法确定^[11]。每个试验点布设 2 个面积为 2 m × 1 m 的平行小区, 小区布置如图 1, 小区四周用厚竹板隔开, 将高 50 cm 的厚竹板打入土中约 30 cm, 并将竹板两侧土壤夯实, 敷以细粘土减少边界效应, 以分隔小区内外径流。在小区坡脚部位垂直开挖一条长为 1 m、

收稿日期: 2009-04-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2007CB407201); 国家自然科学基金资助项目(40501040; 40671114)

作者简介: 徐勤学(1982-), 男, 湖南新宁人, 博士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。

E-mail: xqx@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 李朝霞, E-mail: zxli@mail.hzau.edu.cn

宽为 0.5 m 的渠，渠底到达母质层，从土壤和母质层交界处装入 V 形集水槽，集水槽通过塑料管连接到径流收集桶，以收集壤中流，此集水槽略窄于小区宽度，以保证只收集小区内壤中流，并防止出口边界测漏地表径流的影响；同时在离地表约 5 cm 处装入另一 V 形集水槽，用塑料管将集水槽连接到有刻度的径流收集桶，以收集地表径流。

2 人工模拟降雨试验

人工模拟降雨器采用美国 SPRACO 锥形喷头，喷头距地面垂直高度 4.75 m，通过压力阀和喷头组合控制雨强和雨滴直径分布，雨滴中数直径为 2.40 mm，降雨均匀度为 90%^[12]。试验设计 1.0、1.5、2.0 mm/min 3 种降雨强度，不同雨强的总降雨量都控制为 120 mm。为研究地表状况变化对壤中流的影响，在荒坡地小区进行荒草刈割和翻耕处理，随后进行不同雨强的模拟降雨试验，总共进行 24 场有效降雨。

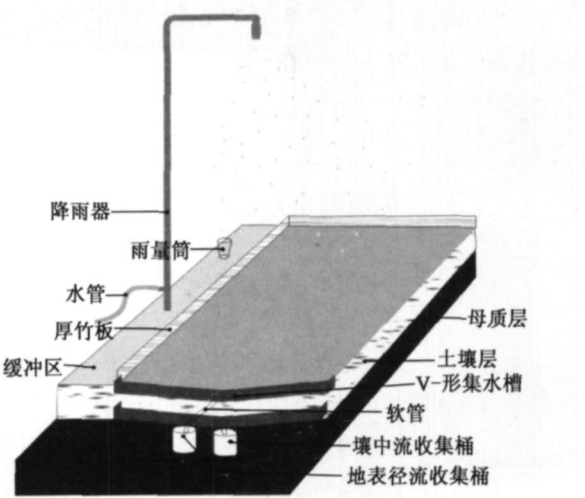


图 1 小区布置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental field

表 1 试验点基本情况

Table 1 Characteristics of the experimental slopes

试验点	坡度 /(°)	植被覆盖度 /%	机械组成 /%			土壤容重 /(g·cm ⁻³)	总孔隙度 /%	毛管孔隙度 /%	有机质含量 /(g·kg ⁻¹)
			砂粒	粉粒	粘粒				
A 点 (坡耕地)	20.0	0	37.3	39.6	22.1	1.47	42.6	31.5	1.17
B 点 (荒坡地)	23.0	65.0	40.2	43.4	16.4	1.44	44.5	32.6	1.23

3 结果与分析

3.1 坡耕地与荒坡地壤中流特征

各试验点壤中流特征见表 2，紫色土坡耕地和荒坡地壤中流特征差异明显。坡耕地只有极少部分的降雨成为壤中流，壤中流径流系数平均为 2.4%，而荒坡地壤中流径流系数平均为 11.2%，相同雨强条件下，荒坡地壤中流平均流量是坡耕地的 7~33 倍。对雨强、前期含水量和壤中流径流系数的偏相关分析发现，坡耕地壤中流径流系数和降雨强度呈极显著的负相关关系 ($r = -0.886$, $p < 0.001$), 而荒坡地壤中流径流系数和降雨强度的关系不明显 ($r = -0.398$, $p = 0.225$), 表现为坡耕地壤中流径流系数随着雨强的增加而减少，而荒坡地壤中流受降雨强度的影响不明显。

表 2 紫色土坡耕地和荒坡地径流特征

Table 2 Characteristics of runoff generated from cultivated land and wasteland

试验点	实际降雨强度 /(mm·min ⁻¹)	前期含水量 /(cm ³ ·cm ⁻³)	地表径流		壤中流			
			产流时间 /min	径流系数 /%	产流时间 /min	径流系数 /%	平均流量 /(mL·min ⁻¹)	占总径流的比例 /%
A (坡耕地)	1.04	0.32	1.2a	43.2b	18.0a	5.0a	46a	10.4a
	1.53	0.26	1.1a	72.1a	20.3a	1.4b	25b	1.9b
	2.06	0.27	0.7b	76.0a	7.1b	0.8c	23b	1.0b
B (荒坡地)	1.01	0.33	2.5a	17.1c	14.0a	11.3a	344c	39.8a
	1.52	0.32	1.5b	24.3b	10.2b	10.7a	460b	29.6b
	2.02	0.33	0.9c	35.7a	5.7c	11.6a	749a	26.1b

注：表中数据为两小区均值；字母表示多重比较结果，不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)；壤中流平均流量计算时间为产流开始至降雨停止。

紫色土坡耕地和荒地壤中流产流过程如图 2，坡耕地壤中流径流强度小，开始产流后逐渐增加，到达峰值后表现出多变的趋势，而荒坡地壤中流径流强度远大于坡耕地，产流开始后壤中流径流强度迅速增大，随

后基本保持稳定。由图 2 可知, 紫色土坡地壤中流径流强度受雨强影响明显, 在坡耕地表现为雨强越大, 壤中流径流强度越小; 而在荒坡地表现为雨强越大, 壤中流径流强度越大。此外, 降雨停止后二者壤中流径流强度都迅速变小, 但在荒坡地壤中流变化更加剧烈。

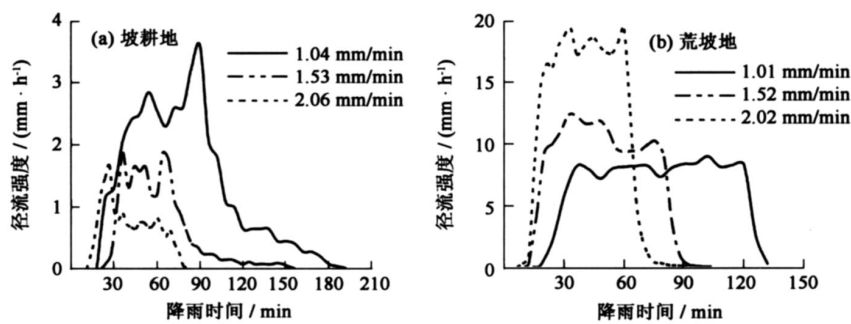


图 2 紫色土坡耕地和荒坡地壤中流产流过程

Fig. 2 Runoff process of interflow generated from cultivated land and wasteland

3.2 荒坡地除草和翻耕后壤中流特征

荒坡地除草后 (B_1) 的壤中流明显减少, 平均只有 3.2% 的降雨转化为壤中流, 壤中流占总径流的平均比例也由除草前的 30.6% 降至 6.4% (表 3); 壤中流径流强度明显减弱, 产流过程表现出单峰或双峰的过程 (图 3), 与除草前表现出明显区别。荒坡地除草后, 不同雨强下坡地壤中流产流时间、径流系数、平均流量差异显著, 表现为雨强越大, 产流时间越早, 但径流系数和平均流量在设计雨强为 1.5 mm/min 时达到最大值。

表 3 荒坡地除草和翻耕后径流特征

Table 3 Characteristics of runoff generated from wasteland after surface vegetation cutting and tillage								
试验点	实际降雨强度 $/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	前期含水量 $/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	地表径流		壤中流			
			产流时间 $/\text{min}$	径流系数 $\%$	产流时间 $/\text{min}$	径流系数 $\%$	平均流量 $/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	占总径流的比例 $\%$
B_1 (除草后)	1.04	0.32	2.1a	28.6c	24.5a	3.1b	89c	9.7a
	1.53	0.26	1.2b	54.2b	10.1b	4.2a	155a	6.9b
	2.06	0.27	1.0b	79.0a	5.6c	2.3c	111b	2.5c
B_2 (翻耕后)	1.01	0.33	8.7a	7.1c	16.4a	15.2a	498a	68.2a
	1.52	0.32	1.6b	58.7b	8.2b	6.3b	239b	10.0b
	2.02	0.33	1.0b	67.6a	5.3c	1.3c	52c	1.5c

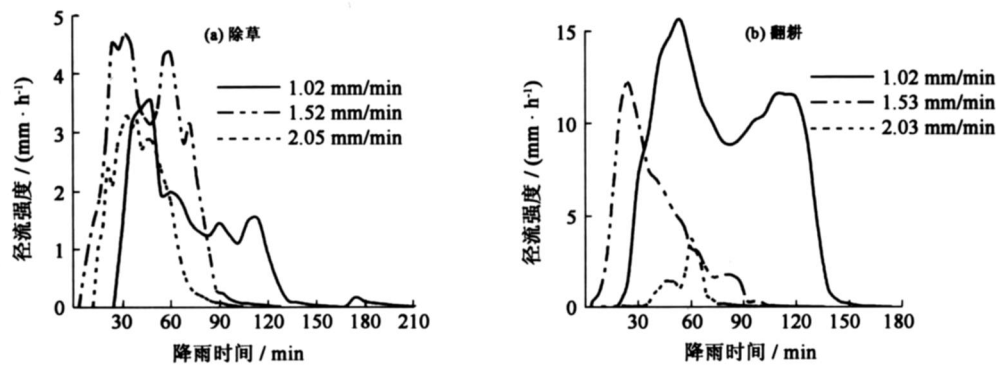


图 3 荒坡地除草和翻耕后壤中流特征

Fig. 3 Runoff process of interflow generated from wasteland after vegetation cutting and tillage

荒坡地翻耕后 (B_2) 的壤中流特征见表 3, 翻耕后的第 1 场降雨的壤中流径流系数由翻耕前相同雨强条件下的 3.1% 增至 15.2%, 壤中流平均流量也由翻耕前相同雨强条件下的 89 mL/min 增加到 498 mL/min; 但随雨强和降雨场次的增加壤中流开始减少, 坡地壤中流径流系数从第 1 场降雨的 15.2% 降至第 3 场雨的 1.3%, 平均径流量也由 498 mL/min 降至 52 mL/min。在翻耕后, 不同雨强条件下壤中流产流时间、径流系数和平均流量差异显著, 表现为雨强越大, 产流越早, 平均流量越小, 径流系数越小。荒坡地翻耕后, 壤中流径流强度随雨强的增加而减小, 产流过程表现出与坡耕地径流过程相似的单峰过程; 在翻耕后第 3 场降雨时壤中流的径流强度和径流系数也都与坡耕地小区相近, 表明地表状况的差异可能是荒坡地和坡耕地壤中流差异的主要原因。

4 讨 论

本文研究结果表明不同土地利用条件下紫色土坡地壤中流特征差异明显, 相同降雨条件下未扰动荒坡地的壤中流径流系数是裸露坡耕地的 3~15 倍, 平均流量是坡耕地的 7~33 倍。造成这一差别的主要原因是坡耕地地表裸露而荒坡地有较高的植被覆盖。首先, 地表植被能截留降雨, 改变地表径流阻力系数、流速等水力特征^[13], 从而延缓了地表径流产生时间, 增加了入渗到土体内水分, 减少了地表径流的量^[14-15]; 在有植被覆盖的荒坡地, 坡度较陡 (23°), 渗入土体内的水分增加使侧向流动的壤中流增多^[16]。其次, 地表植被能有效保护地面免受雨滴的击打, 减少表土结皮, 而表土结皮会破坏土壤孔隙, 并使雨水在坡地表面停留的时间变短, 导致入渗量的减少, 从而引起壤中流的减少^[17]。

对荒坡地除草和翻耕后的壤中流特征的研究表明, 紫色土坡地壤中流特征随地表状况发生改变。在未扰动的荒坡地杂草丛生, 虫蚁活动造成的土壤中大孔隙较多, 由大孔隙引起的优先流是坡地水平侧向壤中流的重要组成部分^[18], 杂草割除后, 地表土壤虽未受到割草的破坏, 但在降雨过程中地表失去植被的保护, 从而失去了植被增加入渗, 减少地表径流的作用, 也更容易发生雨滴击溅侵蚀, 溅蚀过程中土壤中的大孔隙会遭到压实或被溅散细颗粒土壤的封堵而被破坏。这也进一步导致壤中流的减少。紫色土裸地翻耕后壤中流径流系数由翻耕前的 3.2% 增加到 15.3%, 这主要是由于裸地翻耕后, 表土疏松有利于坡地的降雨入渗, 翻耕后土壤容重由 1.44 g/cm^3 降低至 1.28 g/cm^3 , 表明土壤孔隙增加, Moret 等^[19]的研究也表明土壤翻耕明显增加了表土的孔隙度和饱和导水率。随着降雨场次和降雨强度的增加, 翻耕后疏松的表土在雨滴的打击下大团聚体破碎, 土壤颗粒重新排列形成结皮, 降低雨水入渗, 从而导致壤中流的径流系数迅速减少。Poulenard 等^[20]在对翻耕后地表微地形在降雨条件下的变化进行研究发现, 翻耕后的疏松地表形成明显的结构结皮和沉积结皮。在本研究中, 经过翻耕后的 3 场降雨, 土壤容重也由降雨前的 1.28 g/cm^3 增加到 1.43 g/cm^3 , 表明降雨过程中雨滴打击使地表形成结皮, 从而导致入渗减少, 壤中流显著减少。

降雨强度是紫色土坡地壤中流重要影响因素之一, 本文研究结果表明在考虑雨强对壤中流的影响时须考虑地表状况, 不同地表条件下降雨强度对壤中流的影响明显不同。本研究中坡耕地和荒地翻耕后壤中流表现出随雨强的增加而显著减少, 而荒坡地则表现为受雨强的影响不明显。荒坡地和翻耕地表土疏松, 在大雨强下更容易被压实和形成地表结皮, 因此随雨强的增大而显著减小, 这与前人的研究结果相一致, 贾海燕等^[10]在三峡库区紫色土坡耕地的原位模拟降雨实验结果表明小雨强 (0.5 mm/min) 条件下的壤中流量是大雨强 (1.5 mm/min) 的 4.2 倍; 丁文峰等^[11]在室内的降雨试验结果表明在 1.0 mm/min 雨强条件下壤中流径流系数是 1.8 mm/min 条件下的 2~14 倍。然而在荒坡地并没有这种变化规律, 这可能是因为与坡耕地和荒地翻耕后相比, 荒坡地在未扰动时杂草覆盖, 能有效降低雨滴的击溅打击和结皮的发生, 在植被割除后, 地表仍有一些苔类植物附着保护地表, 这使雨强的增加并未产生明显的地表变化; 此外, Kienzler 等^[6]在研究降雨强度对草地壤中流影响时发现在小雨强条件下坡地坡面的降雨入渗就达到了最大值, 因此降雨强度的增加对壤中流量变化并不明显。在本研究中, 荒坡地土壤饱和导水率高 (3.47 mm/h), 荒坡地壤中流受降雨强度较小的原因也可能是在小雨强条件下坡地坡面的降雨入渗就达到了最大值。最后, 本研究的结果是在较大雨强

的人工降雨条件下获得, 为更好地研究紫色土坡地壤中流特征, 还需对天然降雨条件下紫色土坡地壤中流特征作进一步的观测研究。

5 结 论

(1) 不同土地利用条件下紫色土坡地壤中流特征差异明显, 紫色土坡耕地壤中流量少, 壤中流径流系数随降雨强度的增加而减少, 荒坡地壤中流占总径流的比例较大, 壤中流径流系数受降雨强度的影响不明显。

(2) 荒坡地除草和翻耕后, 壤中流变化明显, 杂草割除后壤中流的平均径流系数只有原坡地的一半, 翻耕后初期壤中流有所增加, 但随着降雨场次和降雨强度的增加壤中流径流系数急剧减少。表明植被覆盖的减少和疏松地表的紧实是荒坡地不同地表状况下壤中流变化的主要原因。

参考文献:

- [1] ANDERSON M G, MCDONNELL J J. Encyclopedia of hydrological sciences[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2005. 1719-1732
- [2] HEWLETT J D, HBBERT A R. Forest hydrology[M]. New York: Pergamon, 1965. 275-291
- [3] 张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区花岗岩林地坡面优先流对降雨的响应[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(5): 6-9.
(ZHANG Hong-jiang, CHENG Jin-hua, SHI Yu-hu, et al. Response of preferential flow to rainfall on the forestland slope in the granite area of Three Gorges [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(5): 6-9. (in Chinese))
- [4] UCHIDA T, TROMP-VAN MEERVELD H J, et al. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: An intercomparison of nonlinear hillslope response [J]. Journal of Hydrology. 2005, 311(1/2/3/4): 117-133.
- [5] TROMP-VAN H J, MCDONNELL J J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope [J]. Water Resources Research, 2006, 42(2): 1-11.
- [6] KIENZLER P M, NAEF F. Temporal variability of subsurface stormflow formation [J]. Hydrological Earth System Science, 2008, 12(1): 257-265.
- [7] 王峰, 沈阿林, 陈洪松, 等. 红壤丘陵区坡地降雨壤中流产流过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 15-17.
(WANG Feng, SHEN A-lin, CHEN Hong-song, et al. Experimental study of rainfall-interflow processes on sloping land in red soil hilly region [J]. Journal of soil and water conservation, 2007, 21(5): 5-17. (in Chinese))
- [8] 刘刚才, 林三益, 刘淑珍, 等. 四川丘陵区常规耕作制下紫色土径流发生特征及其表面流数值模拟[J]. 水利学报, 2002, 33(12): 101-107. (LIU Gang-cai, LIN San-yi, LIU Shu-zhen, et al. Characteristics of runoff generation and its numerical simulation of surface flow in hilly area with purple soil under conventional tillage systems [J]. Journal of hydrology engineering, 2002, 33(12): 101-107. (in Chinese))
- [9] 贾海燕, 雷阿林, 雷俊山, 等. 紫色土地区水文特征对硝态氮流失的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1658-1664. (JIA Hai-yan, LEI A-lin, LEI Jun-shan, et al. Nitrate-N loss effected by the runoff process in purple soil-a simulation study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(10): 1658-1664. (in Chinese))
- [10] 丁文峰, 张平仓, 王一峰. 紫色土坡面壤中流形成与坡面侵蚀产沙关系试验研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3): 14-17. (DING Wen-feng, ZHANG Ping-cang, WANG Yi-feng. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on purple soil slope [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(3): 14-17. (in Chinese))
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 466-532. (ISSAS. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 466-532. (in Chinese))
- [12] LUK S, ABRAHAMS A D, PARSONS A J. A simple rainfall simulator and trickle system for hydro-geomorphical experiments [J]. Physical Geography, 1986, 7(1): 344-356.
- [13] 李毅, 邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 1-5. (LI Yi, SHAO Ming-an. Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 1-5. (in Chinese))
- [14] 李元寿, 王根绪, 王一博, 等. 长江黄河源区覆被变化下降水的产流产沙效应研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 616-623. (LI Yuan-shou, WANG Gen-xu, WANG Yi-bo, et al. Impacts of land cover change on runoff and sediment yields in the

- headwater areas of the Yangtze River and the Yellow River, China [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17 (5): 616-623. (in Chinese))
- [15] 蔡崇法, 丁树文, 张光远, 等. 三峡库区紫色土坡地养分状况及养分流失 [J]. *地理研究*, 1996, 15 (3): 77-84. (CAI Chong-fa, Ding Shu-wen, ZHANG Guang-yuan, et al. A preliminary study on the conditions and losses of nutrients of purple soils in the Three Gorge Reservoir Area (TGRA) [J]. *Geographical Research*, 1996, 15 (3): 77-84. (in Chinese))
- [16] 尹忠东, 左长清, 高国雄, 等. 江西红壤缓坡地壤中流特征研究 [J]. *西北林学院学报*, 2006, 21 (4): 47-49. (YN Zhong-dong, ZUO Chang-qing, GAO Guo-xiong, et al. On interflow of gentle hill in Jiangxi province [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21 (4): 47-49. (in Chinese))
- [17] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 土壤结皮的发育特征及其生态功能研究述评 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27 (2): 26-31. (BU Chong-feng, CAI Qiang-guo, ZHANG Xing-chang, et al. Review on developmental characteristics and ecological functions of soil crust [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27 (2): 26-31. (in Chinese))
- [18] 秦耀东, 任理, 王济. 土壤中孔隙流研究进展与现状 [J]. *水科学进展*, 2000, 11 (2): 203-207. (QIN Yao-dong, REN Li, WANG Ji. Review on the study of macropore flow in soil [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11 (2): 203-207. (in Chinese))
- [19] MORET D, ARRUE J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96 (1/2): 103-113.
- [20] POULENARD J, PODWOJEWSKI P, JANEAU J P, et al. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian páramo: Effect of tillage and burning [J]. *Catena*, 2001, 45 (2): 185-207.

Characteristics of interflow in purple soil of hillslope *

XU Qin-xue, WANG Tian-wei, LI Zhao-xia, CAI Chong-fa, SHI Zhi-hua

(Key Laboratory of Subtropical Agriculture and Environment, Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The interflow constitutes an important portion of total runoff in purple soil of a hillslope. A series of artificial field simulation experiments were conducted to explore the characteristic of interflow in the purple soil of hillslope in the different rainfall intensities and land surface conditions. Experimental results show that the observed runoff coefficient and the average interflow for the interflow on undisturbed wastelands are 3 to 15 times and 7 to 33 times that of the observed on bare cultivated lands, respectively. Such characteristic differences in interflow generations on the two lands will become more evident with the increase of rainfall intensities. The observed runoff coefficient for the interflow on bare cultivated lands decreases significantly with the increase of rainfall intensities, while such a characteristic of interflow is not found on undisturbed wastelands. Interflow generations on undisturbed wastelands vary with land surface conditions such as soil compactions and vegetation densities. Surface soil compaction due to heavy rainfall and the decrease in vegetation cover will contribute to a significant reduction of interflow generations on undisturbed wastelands.

Key words: purple soil; rainfall intensity; interflow; soil surface conditions

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2007CB407201) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40501040; No. 40671114).