

紫色土坡耕地壤中产流特征及分析

徐佩¹, 王玉宽¹, 傅斌^{1,2}, 王道杰¹, 王先拓^{1,2}, 王勇强^{1,2}

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 壤中流是紫色土坡面流的重要组成部分和表现形式, 它受雨强、坡度、土层厚度、耕作方式等多种因素的综合影响。利用人工模拟降雨研究了紫色土坡耕地壤中流产流规律。结果表明, (1) 耕作能有效改善土壤结构, 增加降雨入渗量, 并增大壤中流发生机率; (2) 紫色坡耕地土层较浅是导致壤中流增大的主导因素, 缓坡有利于壤中流的产生; (3) 雨强对壤中流的流量过程线有显著影响, 但对于壤中流的起始产流时间影响不明显; 随雨强增大, 壤中流峰值流量显著增加; (4) 壤中流的产生滞后于地表流, 产流过程表现出缓慢变化的单峰过程。

关键词: 壤中流; 紫色土; 坡耕地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)06-0014-05

中图分类号: S152.7+2

Interflow Occurrence Characters and Their Analysis on Slope Cropland with Purple Soil

XU Pei¹, WANG Yu-kuan¹, FU Bin^{1,2}, WANG Dao-jie¹, WANG Xian-tuo^{1,2}, WANG Yong-qiang^{1,2}

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Graduate College of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Interflow is an important component of the flow on slopes with purple soil, and is determined comprehensively by rainfall, slope feature, soil depth and cultivation regime. Simulated rainfall was used to study the mechanism of interflow on slope cropland of purple soil. Results show that cultivation can improve soil physical structure and induce a higher probability for interflow occurrence. Shallow soil depth on slope cropland dominates interflow occurrence, and flat slope generates interflow more easily than steep slope. Rainfall intensity has a significant effect on the process of interflow except for the case on ponding time, and the interflow peak increases with rainfall intensity. Interflow lags with overland flow and the hydrological process display as a curve with only one peak.

Keywords: interflow; purple soil; slope cropland

降水到达坡地后, 一部分形成地表径流, 另一部分渗入土壤, 成为壤中流。通常根据流态将壤中流分为母质流(matrix flow)和优先流(preferential flow)。Kirkby(1978)对壤中流的现场观测、产生机理、模拟作了系统总结。近 30 a, 在壤中流的观测方法^[1-3]、预测^[4-8]以及壤中流与地表流关系^[9-10]上取得了新的进展。

国内学者主要研究了优先流, 对基质流研究较少。秦耀东^[11]、裴铁^[12]对优先流的研究进展进行了总结。张建丰^[13]分析了黄土的大孔隙发育特征和类型。张洪江^[14-15]、何凡^[16]、程金花^[17]对三峡库区优先流进行了系统研究。李金中^[18]利用人工模拟降

雨研究了长白山林地壤中流的产流过程, 提出具物理意义的壤中流模型, 并与贮水泄洪模型进行了比较。刘刚才^[19]运用径流小区观测资料, 分析了紫色土丘陵区壤中流过程, 认为对于长历时、大强度的降雨, 紫色土耕作层会产生优先流。刘廷奎^[20]在饱和与非饱和入渗理论的基础上分析了壤中流形成机制, 提出了壤中流形成的 6 个条件。

研究壤中流的产流规律对于深入认识坡耕地水文过程, 指导水土保持建设和农业面源污染控制均有重要意义。本研究利用人工模拟降雨方法对紫色土坡耕地的壤中流产流特征进行初步研究, 以查明紫色土坡耕地壤中流产流规律。研究区位于中国科学院

收稿日期: 2006-06-20

修稿日期: 2006-10-20

资助项目: 国家 973 计划项目(2003CB415202)

作者简介: 徐佩(1970—), 女(汉族), 四川成都人, 在职博士, 主要从事土壤学、环境生态方面的研究。E-mail: xupeim@imde.ac.cn

通讯作者: 王玉宽(1963—), 男(汉族), 陕西省府谷县人, 研究员, 从事土壤侵蚀与水土保持研究。电话(028) 85230627, E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn

盐亭紫色土农业生态试验站,年均温 17.3℃,极端最高气温 40℃,极端最低气温 -5.1℃;多年平均降水量 825 mm。土壤为水稻土和石灰性紫色土。自然植被为柏木、黄荆、马桑组成的天然次生林,农田作物主要为玉米、小麦、甘薯等。

1 材料与方 法

径流小区设于自然坡面上,底部为紫色基岩。共分 5 种坡度 5°,10°,15°,20°,25°,5 种土层厚度 20,30,40,50,60 cm。小区长度均为 4.4 m,宽度 1.5 m。小区四周用水泥砌成边框。边框高出小区地表 10 cm,并 向外倾斜,防止边框上雨滴溅入小区。根据当地的耕作习惯,设计了平直裸地、平直农地(中耕)、平直农地(无中耕)及顺坡垄作 4 种耕作方式。试验首先在平直裸地上进行。每次实验前都对表土 5 cm 进行翻耕,使地表平整,保持各次试验地表状况一致。裸地试验完成后,在小区上种植花生。当覆盖度达到 80%进行平直农地试验,试验分两步进行,先进行免耕试验,后进行中耕试验。免耕处理是在每次试验完成后,不进行任何处理;而中耕处理是在每次试验前,对地表进行中耕除草。在农地试验完成后,按顺坡开垄,间距为 30 cm,种植油菜,当覆盖度达到 80%时进行顺坡试验。小区基本情况见表 1。

试验前进行率定雨强,确定试验所用雨强(表 2)。降雨时间控制在产流以后 30 min,每次降雨间隔 24~28 h。在第一次实验前,用 19 mm/h 雨强降雨进行地表湿润,保证每次降雨都在相同的前期含水量条件下进行。每次试验前进行土壤水分采样和土壤容重取样。土壤容重用环刀法分坡上、坡中、坡脚 3 个部位分别取样,土壤水分采用土钻法同样分坡上、坡中、坡脚 3 个部位分别取样,每个部位按 0—15,15—30,30—40 cm 分层取样,雨后只进行土壤水分采样。用烘干法测定土壤水分含量和土壤干容重。

表 1 实验小区基本情况

小区	坡度/(°)	坡长/m	土层厚度/cm
D—1	10	5	20
D—2	10	5	30
D—3	10	5	40
D—4	10	5	50
D—5	10	5	60
S—1	5	5	40
S—2	10	5	40
S—3	16	5	40
S—4	20	5	40
S—5	26	5	40

表 2 模拟降雨雨强分配

小区	雨强/(mm·h ⁻¹)		
	平直裸地	平直农地(中耕/免耕)	顺坡垄作
D—1	19.62/37.42	19.62/53.95/111.69	19.62/53.95/111.69
D—2	19.62/37.42	19.62/53.95/111.69	19.62/53.95/111.69
D—3	19.62/37.42	19.62/53.95/111.69	19.62/53.95/111.69
D—4	19.62/37.42	19.62/53.95/111.69	19.62/53.95/111.69
D—5	19.62/37.42	19.62/53.95/111.69	19.62/53.95/111.69
S—1	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69	19.62/53.95/111.69	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69
S—2	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69	19.62/53.95/111.69	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69
S—3	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69	19.62/53.95/111.69	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69
S—4	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69	19.62/53.95/111.69	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69
S—5	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69	19.62/53.95/111.69	19.62/37.42/53.95/74.02/111.69

在降雨过程中收集径流,考虑到径流流量随降雨时间呈增加趋势,采用不同时段不同采样频率,采样间隔从产流初期的 0.5 min 逐步增加至产流后期的 2 min。产沙量采用烘干法测定。

2 结果与分析

影响土壤入渗的因素主要包括雨强、坡度、地表处理等,这些因素也同时影响壤中流的产生。另外,

壤中流是在相对不透水层上发生的,因此土层厚度也是其影响因素之一。

2.1 耕作方式对壤中流的影响

从表 3 可以看出,平直裸地发生壤中流的机率最小,仅为 14%,相当于平直农地和顺坡垄作的 1/3 和 1/4。这是因为平直裸地土壤的结构比较差,降雨难以下渗,大部分降雨以地表流的形式排出坡面,入渗量无法使土壤水分达到饱和,所以观测到壤中流次数

较少。农地和顺坡垄作的壤中流产生机率远高于平直裸地。坡地种植以后,土壤结构得到改善,有利于水分入渗,同时作物提高地表植被覆盖度,延长了降水在地表的停留时间,增大入渗量,结果使壤中流发生机率增大^[21]。

表 3 耕作方式对壤中流的影响

地表处理	平直裸地	平直农地	顺坡垄作
壤中流发生机率/ %	14	42	54

2.2 土层厚度对壤中流的影响

从表 4 可以看出,土层厚度对壤中流影响显著。裸地条件下,壤中流仅发生在 20 cm 小区,并且 20 cm 小区发生壤中流的机率高达 67%。而在农地和顺坡垄作条件下,所有的小区都产生了壤中流,但是 20 cm 和 30 cm 厚度小区发生的壤中流次数更高。说明土层厚度是影响壤中流产生的重要原因。由于紫色土土层浅薄,因此壤中流是主要的一种产流形式。

表 4 土层厚度对壤中流的影响

地表处理	平直裸地	平直农地	顺坡垄作
20 cm 小区壤中流出现机率/ %	67	33	67
30 cm 小区壤中流出现机率/ %	0	100	100
40 cm 小区壤中流出现机率/ %	0	50	17
50 cm 小区壤中流出现机率/ %	0	17	17
60 cm 小区壤中流出现机率/ %	0	17	17

注:只统计不同土层厚度小区

2.3 坡度对壤中流的影响

壤中流虽然是垂直入渗导致水分在相对不透水层上累积所致,但是坡度也是壤中流产生的重要条件,因为只有有一定的坡度下,壤中流才能在顺坡方向上流动(通过基质势产生的驱动力可以忽略)。

表 6 不同雨强下壤中流产生的机率

雨强/(mm·h ⁻¹)	19.61	37.32	53.95	74.02	111.69
壤中流发生机率/ %	8	20	31	41	57

以顺坡垄作 15°小区的 4 场壤中流产流过程为例,对雨强的影响做进一步分析。从图 1 中可以看出,雨强对壤中流的峰值流量有明显影响。首先,随雨强增大,峰值流量显著增加。在 19.61 mm/h 降雨下峰值流量仅为 0.29 ml/s,当雨强增大到 111.69 mm/h 后,峰值流量增加到 2.78 ml/s,增幅接近 10 倍。其次,雨强对壤中流的流量过程也存在显著影响。在小雨条件下,壤中流的产流过程表现出平缓上

升又平缓下降的过程。当雨强增大后,产流过程线逐渐变得陡峭。第三,对于壤中流的起始产流时间,雨强的影响并不明显,试验表明小雨可能更早出现壤中流,也可能最晚出现壤中流;而大雨条件下壤中流出现的时间居中。图 1 实验数据来自顺坡垄作,小区厚度 40 cm,坡度 15°;图 2 为便于作图,图中的壤中流流量扩大了 10 倍。实验数据来自顺坡垄作,小区厚度 40 为 cm,坡度 15°,雨强为 111.69 mm/h;图 3 实

表 5 坡度对壤中流的影响

地表处理	平直裸地	平直农地	顺坡垄作
5°小区壤中流出现机率/ %	60	83	67
10°小区壤中流出现机率/ %	0	33	17
15°小区壤中流出现机率/ %	0	33	67
20°小区壤中流出现机率/ %	0	33	67
25°小区壤中流出现机率/ %	0	17	50

注:只统计不同坡度小区

2.4 雨强对壤中流的影响

雨强是影响地表流的关键因素,有人认为壤中流和雨强的关系不明确^[25]。本试验结果表明雨强和壤中流有较好的相关性,随雨强增大,壤中流的发生机率也变大。在小雨条件下,产生壤中流的机率很小,不到 10%,而在高强度降雨下,发生壤中流的机率增大到 57%(表 6)。说明雨强是影响壤中流的重要因素,相同条件下强降雨有利于壤中流的出现。

升又平缓下降的过程。当雨强增大后,产流过程线逐渐变得陡峭。第三,对于壤中流的起始产流时间,雨强的影响并不明显,试验表明小雨可能更早出现壤中流,也可能最晚出现壤中流;而大雨条件下壤中流出现的时间居中。图 1 实验数据来自顺坡垄作,小区厚度 40 cm,坡度 15°;图 2 为便于作图,图中的壤中流流量扩大了 10 倍。实验数据来自顺坡垄作,小区厚度 40 为 cm,坡度 15°,雨强为 111.69 mm/h;图 3 实

验数据来自顺坡垄作,小区厚度为 40 cm,坡度 5°,雨强为 19.61 mm/h。

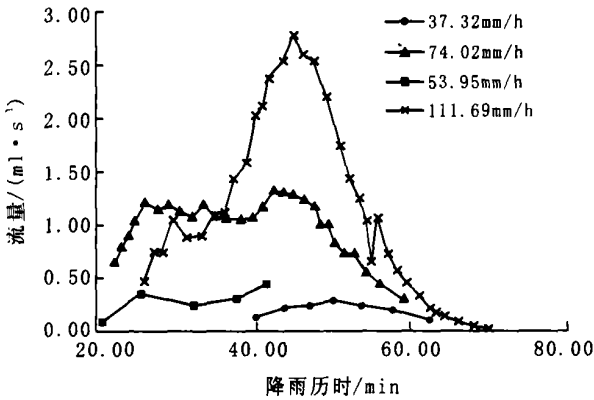


图 1 雨强对壤中流产流过程的影响

2.5 壤中流产流特征分析

从图 2—3 可以看出,壤中流的产流特征主要表现为如下 4 个方面。

(1) 产流滞后。由于雨强超过了土壤的下渗能力,地表流很快产生,此时没有观测到壤中流。随降雨的进行,地表流不断增加,当地表流达到相对稳定的时刻,壤中流开始出现,随降雨过程的进行,流量逐渐增加,并且在降雨停止后经过一段时间,才达到峰值,然后逐渐下降。这反映了壤中流受土壤水分变化的影响。只有当土壤水分含量达到饱和,壤中流才可能发生,所以在地表产流后,还需经过一段时间,才有壤中流产生。

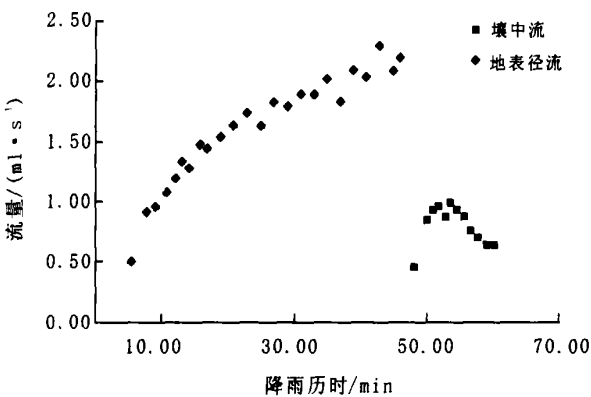


图 2 暴雨条件下壤中流与地表流的对比

(2) 壤中流流量比较小。在暴雨和小雨 2 种条件下,壤中流流量都小于地表流流量,在暴雨条件下壤中流峰值流量只为地表流稳定流量的 1%左右,在小雨条件下,壤中流流量仍然比较小,峰值流量仅 1 ml/s,但是已经相当于地表流的 40%。如果降雨时间延长,壤中流还将增加,直到降雨在地表产流、土壤蓄水、壤中流的分配上建立平衡关系。由于水分在土壤

中运动的阻力远大于水分在地表运动的阻力,所以在多数降雨情况下,壤中流流量都小于地表流流量。

(3) 壤中流流量变化比较缓慢,产流过程历时较长,从图 1 中可以看出,壤中流的流量过程线较地表流更为平缓。

(4) 壤中流的产流过程存在明显的对称性。

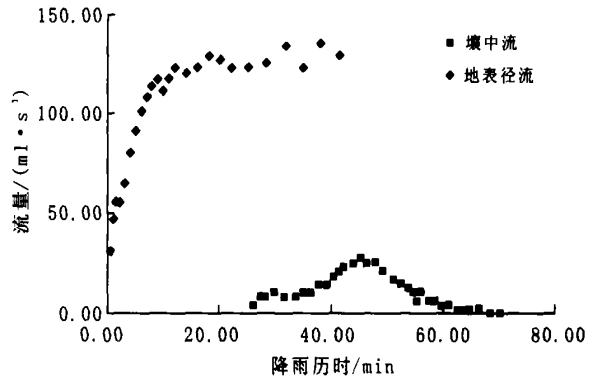


图 3 小雨条件下壤中流与地表流的对比

3 结 论

通过对模拟降雨试验结果的分析,可以得出以下结论。(1) 耕作能改善土壤结构,有利于土壤水分入渗,增大壤中流发生机率;(2) 紫色坡耕地土层较浅是导致壤中流增大的主导因素,缓坡有利于壤中流的产生;(3) 雨强对壤中流的流量过程线有显著影响,但对于壤中流的起始产流时间影响不明显;随雨强增大,壤中流峰值流量显著增加;(4) 壤中流的产生滞后于地表流,产流过程表现出缓慢变化的单峰过程。本研究对紫色土坡耕地壤中流的产流规律和特征进行了初步分析。但就壤中流的产流机制,定量模拟尚需进一步实验研究。

[参 考 文 献]

[1] Stichler Willi, Herrmann Andreas. Surface and Subsurface runoff Modeling Using Environmental Isotope [C]. Proceedings of the International Symposium on Rainfall - Runoff Modeling. 1982. 245—260.

[2] Everts C J, Kanwar R S. Estimating preferential flow to a subsurface drain with tracers [J]. Transactions of the ASAE 1990, 33(2): 451—457.

[3] Talamba Daniela, Joerin Christophe, Musy Andre; Balin Ioan. Study of subsurface flow using environmental and artificial tracers: the Haute - Mentue case [M]. Switzerland IAHS Publication, 2000, 262: 559—564.

[4] Germann Peter F, Pierce Robert S, Beven, Keith. Kinematic Wave Approximation to The Initiation of Subsurface Storm Flow in a Sloping Forest Soil [J]. Advances in Water Resources, 1986, 9(2): 70—76.

- [5] Chen Su-Chin, Wu Chung-Ming. Kinematic wave model of subsurface flow under hillslope proceedings of the national science council, Republic of China, Part A[J]. Physical Science and Engineering, 1997, 21(5): 437—444.
- [6] Schmidt J S, Govindaraju Rao S. Predicting Flow in Subsurface Agricultural Drains Using the Green-Ampt Model [C] World Water Environ. Resour. Congr, 2003. 2505—2514.
- [7] Lee Kwan Tun, Chang Chir-Hsin. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling [J]. Journal of Hydrology, 2005, 311: 1—4.
- [8] Stillman S Jennifer, Haws W Nathan, R S Govindaraju, P Suresh C Rao. A semi-analytical model for transient flow to a subsurface tile drain[J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(2): 49—62.
- [9] Natho-Jina S, Prasher S O, Madramootoo C A, Broughton R S. Measurements and analysis of runoff from subsurface drained framlands[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1987, 29(2): 123—130.
- [10] Kazumasa Itoh, Hiroyuki Tosaka, Kitao Nakajima, Nakagawa, Masahiro Application of surface-subsurface flow coupled with numerical simulator to runoff analysis in an actual field [J]. Hydrological Processes, 2000, 14(3): 417—430.
- [11] 秦耀东, 任理. 土壤中大孔隙流研究进展与现状[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 203—207.
- [12] 裴铁, 李金中. 壤中流模型研究的现状及存在问题 [J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 543—548.
- [13] 张建丰, 林性粹, 王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 168—171.
- [14] 张洪江, 程云, 等. 长江三峡花岗岩坡面管流产流特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 5—8.
- [15] 张洪江. 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.
- [16] 何凡, 张洪江. 长江三峡花岗岩坡面林地优先流与地表径流关系[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 9—12.
- [17] 程金花. 长江三峡花岗岩区林地坡面优先流模型研究 [D]. 博士论文, 2005.
- [18] 李金中, 裴铁. 森林流域坡地壤中流模型与模拟研究 [J]. 林业科学, 1999, 35(4): 2—8.
- [19] 刘刚才. 紫色土坡耕地的降雨产流机制及产流后土壤水分的变化特征[D]. 博士论文, 2001.
- [20] 刘廷玺. 壤中流形成的机理数学研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1994, 15(3): 83—90.
- [21] 尹忠东, 左长清, 等. 江西红壤缓坡地壤中流影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 1—6.
- [22] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式 [M]. 中国水利水电出版社, 1997.
- [23] Singer M J, Blackard J. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 50% [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6): 1270—1273.
- [24] Mah M G C, Douglas L A, Ringrose-Voase A J. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall [J]. Soil Science, 1992, 154: 37—43.
- [25] 文康. 地表径流过程的数学模拟 [M]. 北京: 水力水电出版社, 1990.

2006 年《水土保持通报》审稿专家名单

安韶山	雷加强	牛文全	于振江	张光辉	白岗栓	雷廷武	山 仑	张 芑	卜崇德
李 锐	张殿发	曹明明	李 勇	邵明安	张江辉	常庆瑞	李璧成	石 辉	张平仓
程积民	李定强	史学正	张岁歧	崔 鹏	李日生	汤国安	张信宝	崔中兴	李同升
田均良	张兴昌	党廷辉	李玉山	王百群	章明奎	董治宝	李占斌	王海宁	赵景波
冯明权	李智广	王继军	赵克钰	高建恩	李忠魁	王继增	赵世伟	郝明德	梁宗锁
王礼先	赵兴实	何兴照	林昌虎	王丽槐	郑粉莉	侯庆春	刘宝元	王彦成	周佩华
黄明斌	刘国彬	吴发启	项元和	蒋定生	卢宗凡	吴积善	梁银利	焦菊英	马为民
吴钦孝	杨才敏	景 可	马志尊	谢永生	程国栋	康顺祥	穆兴民	杨勤科	李代琼
上官周平									

《水土保持通报》编辑部