

# 紫色土坡地径流退水过程与地表糙率试验研究

傅斌<sup>1,2</sup>, 王玉宽<sup>1,2</sup>, 徐佩<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;  
2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:** 径流退水过程是降雨产流过程的重要组成部分。通过人工模拟降雨试验, 分析了紫色土坡地的退水过程。(1) 坡度和雨强对退水流量有显著影响, 退水流量随雨强的增加而增加, 随坡度的增大而减小。坡度和雨强对退水历时无明显影响。(2) 不同地表处理下, 退水流量和历时差异显著。顺坡垄作退水过程最短, 退水流量最小; 裸地退水历时较长, 退水流量较大; 平作退水历时最长, 但是退水流量小于裸地。(3) 利用退水曲线法计算了紫色土坡耕地曼宁系数。不同地表处理下曼宁系数的大小为: 裸地(0.028) < 顺坡垄作(0.065) < 平作(0.071)。

**关键词:** 退水过程; 人工模拟降雨; 曼宁系数; 紫色土; 坡耕地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)01-0036-04

中图分类号: P334+.2

## Runoff Recession and Surface Roughness on Cropland of Purple Soil

FU Bin<sup>1,2</sup>, WANG Yutkuan<sup>1,2</sup>, XU Pei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;  
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Discharge recession process is an important component of rainfall-runoff process. Analysis of recession process of overland flow under simulated rainfall on cropland of purple soil has been carried out. Results show that slope gradient and rainfall intensity have notable effects on recession flux and inverse recession duration. Recession flux increased as rain intensities increased, and reduced as slope became steeper. Recession flux and time varied significantly under different surface treatments. Under downslope cultivation, recession duration is the shortest and recession flux is the least. Recession process holds longer time and greater flux is produced on bare land. For contour cultivation, recession process lasts the longest but recession flux is less than that on the bare land. The Manning's roughness coefficient for the cropland of purple soil is then calculated by using Retention Curve method. In terms of the coefficient, the order of the three treatments are bare land (0.028) < downslope cultivation (0.065) < contour cultivation (0.071).

**Keywords:** discharge recession; rain simulation; Manning's roughness coefficient; purple soil; sloping cropland

退水过程是指在降雨很少或无降雨条件时期内连续的排水和消退过程, 是产流过程的重要组成部分。对退水过程的认识也是研究流域水量平衡和流域水文响应的重要内容之一<sup>[1]</sup>。Zecharias 等人<sup>[2]</sup>分析了山区流域地下水出流和基流退水特征与地貌、土壤参数的关系。Sugiyama<sup>[3]</sup>提出了描述枯水基流退水过程的指数函数, 并对退水常数进行了分析。Singh<sup>[4]</sup>研究了流域退水过程与融雪的关系。Mishra<sup>[5]</sup>采用 3 种不同的贮水—泄流算法模拟了河流的退水过程。张亚丽<sup>[6]</sup>通过室内模拟降雨试验, 分析了黄土坡面退水情况及降

雨因素、地形地貌和农业管理措施对退水的影响。李发东<sup>[1]</sup>对华北山区径流场的退水过程进行了分析。Tallksen, Smakhtin<sup>[7-8]</sup>, 先后对退水过程有关研究进行了比较全面的总结。

由此可见, 径流退水过程的研究一直以来都受到关注, 目前的研究主要在流域尺度上开展, 对坡面尺度, 尤其是坡耕地的退水过程研究还比较缺乏。本研究通过田间人工模拟降雨, 分析坡耕地的退水过程以及影响因素, 在此基础上计算了坡耕地不同地表处理下的曼宁系数。

收稿日期: 2008-08-27

修回日期: 2008-09-28

资助项目: 国家自然科学基金(40771123); 国家 973 计划项目(2007CB407206)

作者简介: 傅斌(1974—), 男(汉族), 四川省江油市人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与环境修复方面的研究。E-mail: fubin@imde.ac.cn。

通信作者: 王玉宽(1963—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀、坡面水文方面的研究。E-mail: wanyukuan@imde.ac.cn。

## 1 试验设计与研究方法

试验在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站进行。该站地理中心坐标为  $105^{\circ}27'E, 31^{\circ}16'N$ 。地形为中深丘,海拔 400~600 m。气候属四川盆地典型亚热带湿润季风气候。年均温度  $17.3^{\circ}C$ , 极端最高气温  $40^{\circ}C$ , 极端最低气温  $-5.1^{\circ}C$ , 多年平均降雨量 825 mm。水稻土和石灰性紫色土是当地主要土壤类型。土地利用以农地为主, 主要农作物有水稻、玉米、小麦、甘薯、油菜等。

径流小区坡长为 5 m, 宽度为 1.5 m, 土层厚度为 40 cm, 土壤为石灰性紫色土。径流小区坡度分别为  $5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}$  和  $25^{\circ}$ 。每个试验小区采用 3 种耕作处理: 裸地、平坡耕作和顺坡垄作; 裸地处理在试验前翻耕地表 5 cm, 并保持地表平整。平坡耕作同样保持地表平整, 按间插方式种植花生, 当覆盖度达到 80% 开始实验。顺坡垄作沿顺坡方向开垄, 垄宽 20 cm, 高 10 cm, 垄间距为 15 cm, 在垄上种植油菜, 当覆盖度达到 80% 开始实验。试验采用 3 个雨强 (19.62, 53.95, 111.69 mm/h), 土壤水分控制在田间含水量水平, 降雨时间控制在产流后 30 min。

试验采用 Norton 降雨机。降雨强度可调范围为 0~200 mm/h。为了提高降雨的均匀性, 将两台降雨机并排使用, 两台降雨机中间的降雨为有效降雨。降雨机的率定实验表明, 在降雨高度为 3 m 条件下, 均匀度达到 85%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 坡度及雨强对退水过程的影响

退水过程比较重要的参数是退水流量和退水历时。退水历时表示降雨停止到地表径流完全消退的用时; 退水流量是退水过程中地表径流的总量。在裸地条件下分析坡度的影响可以排除植被因素的影响。表 1 列出不同裸地试验中地表径流退水流量。可以看出, 随雨强增大, 退水流量表现出增长的趋势。例如在  $15^{\circ}$  下, 当雨强为 19.62 mm/h 时, 退水流量为 1 188 ml, 当雨强增大到 53.95 mm/h, 退水流量相应增加到 2 636 ml, 雨强继续增加为 111.69 mm/h 后, 退水流量达到最大为 4 855 ml。坡度对退水流量的影响比较复杂。总体上, 退水流量大致随坡度增大而减小。在个别情况下有例外, 例如在 19.62 mm/h 雨强下,  $5^{\circ}, 10^{\circ}$  和  $15^{\circ}$  下的退水流量分别为 1 440, 940, 1 188 ml, 表现出先减小后增大, 再减小的复杂过程。表 2 列出了不同坡度和雨强下的退水历时, 退水历时差异不显著, 表明雨强和坡度对退水历时没有显著影

响。黄土坡面的研究结果表明, 随着雨强的增加, 退水历时和退水强度均呈对数增加趋势。在没有雨水补给的情况下, 基本都是坡度越大, 积水在土壤表面停留时间越短, 即越快结束地表产流, 退水量越小<sup>[6]</sup>。坡度和雨强对退水流量的影响与本试验结果一致, 但是在退水历时上结论不同。本研究结果表明, 坡度和雨强对退水历时没有明显影响; 而黄土坡面的研究结果表明, 二者存在显著的相关性。原因可能与试验条件有关, 室内试验与田间试验, 在土壤结构, 地表状况, 植被等方面都有显著差异。

表 1 不同坡度及雨强条件下的退水流量 ml

| 坡度           | 雨强/(mm·h <sup>-1</sup> ) |       |        |
|--------------|--------------------------|-------|--------|
|              | 19.62                    | 53.95 | 111.69 |
| $5^{\circ}$  | 1 440                    | 3 560 | 4 660  |
| $10^{\circ}$ | 940                      | 3 066 | 6 335  |
| $15^{\circ}$ | 1 188                    | 2 636 | 4 855  |
| $20^{\circ}$ | 898                      | 2 130 | 3 920  |
| $25^{\circ}$ | 855                      | 2 310 | 3 800  |

表 2 不同坡度及雨强条件下的退水历时 min

| 坡度           | 雨强/(mm·h <sup>-1</sup> ) |       |        |
|--------------|--------------------------|-------|--------|
|              | 19.62                    | 53.95 | 111.69 |
| $5^{\circ}$  | 3.10                     | 4.00  | 3.90   |
| $10^{\circ}$ | 2.32                     | 2.93  | 3.27   |
| $15^{\circ}$ | 2.65                     | 2.10  | 3.03   |
| $20^{\circ}$ | 2.28                     | 2.13  | 3.15   |
| $25^{\circ}$ | 2.15                     | 2.20  | 1.63   |

### 2.2 地表处理对退水的影响

图 1—2 分别列出了平作农地和顺坡垄作以及裸地条件下的退水历时和退水流量。可以看出, 顺坡垄作退水过程历时最短, 退水流量最小, 裸地退水历时较长, 退水流量较大, 平作退水历时最长, 但是退水流量小于裸地。说明不同地表处理方式对退水过程有明显影响。顺坡垄作由于改变了地表的微地貌条件, 形成了有利于地表积水快速运动的沟道, 所以退水时间短, 加上这种地形条件不利于地表积水, 所以退水流量小。裸地条件下入渗率低, 又不存在有利排水的微地形条件, 地表积水较多。平作虽然退水历时长, 但是地表积水较少, 所以退水流量小于裸地。

### 2.3 曼宁系数计算

曼宁系数表示了垫面对径流的阻力, 是土壤侵蚀动力学中的重要参数。Mohamoud<sup>[9]</sup> 首次提出可以用退水曲线法推求坡耕地曼宁系数。利用退水曲线法计算曼宁系数的原理是在充分降雨后, 地表处于

相对饱和状态,退水过程中累积入渗量与累积径流量之比,等于降雨停止时刻入渗速率与径流速率之比,即

$$(D - Q_r) / Q_r = f_c / q_c \quad (1)$$

式中:  $D$ ——降雨停止时的径流深(m);  $Q_r$ ——退水过程中累积径流深(m);  $f_c$ ——降雨停止时入渗率( $m/s$ );  $q_c$ ——降雨停止时单宽流量( $m^2/s$ )。

公式(1)可以变换为:

$$D = Q_r(1 + f_c + q_c) \quad (2)$$

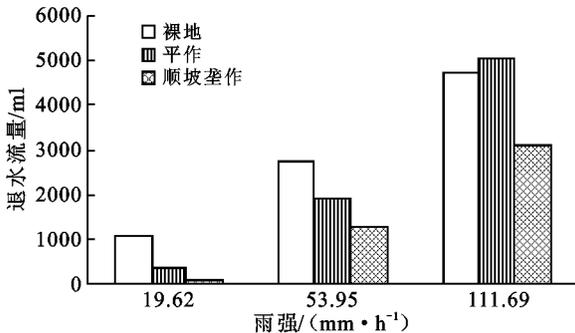


图 1 不同耕作方式下的退水流量

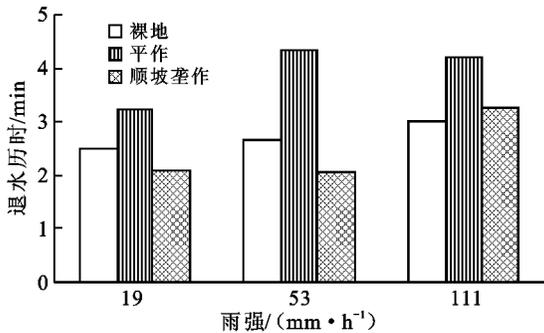


图 2 不同耕作方式下的退水历时

表 3 退水曲线法计算的曼宁系数

| 地表处理 | 退水径流深<br>$Q_r / 10^{-4} m$ | 单宽流量 $q_c /$<br>( $10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$ ) | 入渗率 $f_c /$<br>( $10^{-4} m \cdot s^{-1}$ ) | 曼宁系数 $n$                |
|------|----------------------------|--|---|-------------------------|
| 裸地   | 0.58~ 9.6<br>(3.96)        | 0.06~ 1.3<br>(0.56)                            | 0.04~ 0.25<br>(0.12)                        | 0.017~ 0.043<br>(0.028) |
| 平作   | 0.3~ 10.11<br>(3.52)       | 0.01~ 0.97<br>(0.32)                           | 0.05~ 0.27<br>(0.14)                        | 0.090~ 0.150<br>(0.071) |
| 顺坡垄作 | 0.05~ 5.47<br>(1.83)       | 0~ 0.95<br>(0.27)                              | 0.05~ 0.28<br>(0.13)                        | 0.021~ 0.260<br>(0.065) |

注: 括号内数值为平均值。

### 3 结论

(1) 坡度和雨强对退水流量有显著影响,退水流量随雨强增加而增加,随坡度增大而减小。坡度和雨强对退水历时无明显影响。

(2) 不同地表处理下,退水流量和历时差异显

著。顺坡垄作退水过程最短,退水流量最小,裸地退水历时较长,退水流量较大,平作退水历时最长,但是退水流量小于裸地。

将(2)式带入曼宁公式,可以求出曼宁系数,如公式(3)。

$$n = \frac{S^{1/2} D^{5/3}}{q_c} = \frac{S^{1/2}}{q_c} [f_c / q_c + 1]^{5/3} Q_r^{5/3} \quad (3)$$

式中:  $S$ ——坡度;  $n$ ——曼宁系数。

表 3 列出了退水曲线法计算的曼宁系数。退水径流深  $Q_r$  和单宽流量  $q_c$  可在试验中测量得到,入渗率根据水量平衡计算得到。从表中看出,不同地表处理下,紫色土坡耕地的曼宁系数在 0.090~ 0.260 间变化。明渠的曼宁系数在 0.015~ 0.045 之间<sup>[10]</sup>,天然河槽的曼宁系数在 0.025~ 0.2 之间<sup>[11]</sup>。可见,坡耕地的曼宁系数与人工明渠和天然河槽均存在显著区别。原因不仅与径流流经的下垫面有关,同时也与径流水动力特征有关。坡耕地上降雨形成坡面流具有水浅,流速慢等特征,这与明渠水流完全不同。张科利<sup>[12]</sup>通过试验得出黄土坡面细沟中的满宁糙率系数变化于 0.035~ 0.071 之间,平均值为 0.054,笔者认为曼宁系数大小与细沟中的径流量的多少及坡度的陡缓密切相关。在坡耕地上,地表处理对曼宁系数影响显著。裸地条件下曼宁系数较小在 0.017~ 0.043 之间,平均值为 0.028,顺坡垄作条件下曼宁系数大于裸地,在 0.021~ 0.260 之间,平均为 0.065,平作条件下曼宁系数略高于顺坡垄作,在 0.090~ 0.150 之间,平均为 0.071。可见,植被是影响坡耕地水力糙度的重要因素。张光辉<sup>[13]</sup>采用退水曲线法计算了沙壤土坡面的曼宁系数为 0.01~ 0.02,与本试验结果相比其计算值偏小,原因是其试验坡面为人工填埋场,地表比较平滑。Mohammad 的计算出耕地在地表覆盖度较小情况下的曼宁系数在 0.03~ 0.06 之间,平均 0.045,与本试验计算结果较为接近<sup>[11]</sup>。

著。顺坡垄作退水过程最短,退水流量最小,裸地退水历时较长,退水流量较大,平作退水历时最长,但是退水流量小于裸地。

(3) 利用退水曲线法计算了紫色土坡耕地曼宁系数为 0.090~ 0.260,不同地表处理下曼宁系数的大小为裸地(0.028) < 顺坡垄作(0.065) < 平作(0.071)。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 李发东, 宋献方. 华北典型山区坡地径流的退水过程研究[ J ]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 79-84.
- [ 2 ] Zecharias Y B, Brutsaert W. Recession characteristic of groundwater outflow and base flow from mountainous watersheds[ J ]. Water Resources Research, 1988, 24(10): 1651-1658.
- [ 3 ] Sugiyama, Hironobu. Analysis and extraction of low flow recession characteristics[ J ]. Water Resources Bulletin, 1996, 32(3): 491-497.
- [ 4 ] Singh P, Huebl H, Weinmeister H W. Use of the recession characteristics of snowmelt hydrographs in the assessment of snow water storage in a basin[ J ]. Hydrological Processes, 2000, 14(1): 91-101.
- [ 5 ] Mishra A, Hata T, Abdelhadi A W. Models for recession flows in the upper Blue Nile River[ J ]. Hydrological Processes, 2004, 18(15): 2773-2786.
- [ 6 ] 张亚丽, 李怀恩. 黄土坡面退水及其氮污染试验研究[ J ]. 西安建筑科技大学学报, 2007, 39(1): 71-77.
- [ 7 ] Tallaksen L M. A review of baseflow recession analysis[ J ]. Journal of Hydrology, 1995, 165(22): 349-370.
- [ 8 ] Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review[ J ]. Journal of hydrology, 2001, 240(3): 147-186.
- [ 9 ] Mohanmond Y. Evaluating Manning's roughness coefficients for tilled soils[ J ]. Journal of Hydrol., 1992, 135: 143-156.
- [ 10 ] 中山大学, 北京大学. 自然地理学(上册)[ M ]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- [ 11 ] 华东水利学院. 水力学(上册)[ M ] 2 版. 北京: 科学出版社, 1983.
- [ 12 ] 张科利, 张竹梅. 坡面侵蚀过程中细沟水流动力学参数估算探讨[ J ]. 地理科学, 2000, 20(4): 326-330.
- [ 13 ] 张光辉, 蒋定生, 邵明安, 用非饱和土壤物理参数模拟坡面产流过程研究[ J ]. 山地学报, 2001, 19(1): 14-18.

(上接第 35 页)

(4) 土壤环境质量的评价过程中还揭示出该地区果园存在着潜在污染可能, 今后洛川县苹果生产中应将土壤环境中的 As 与 Ni 作为严控的土壤污染物, 重点加强对农药、化肥使用的管理, 以确保洛川县苹果基地果业生产的可持续发展。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 聂继云, 董雅凤. 果园重金属污染的危害与防治[ J ]. 中国果树, 2002(1): 44-47.
- [ 2 ] 张建光, 刘玉芳, 郭素萍. 我国无公害干果产地土壤重(类)金属限量标准研究[ J ]. 土壤学报, 2005, 42(1): 153-155.
- [ 3 ] 冯明祥, 王佩圣. 青岛郊区果园土壤重金属和农药污染研究[ J ]. 中国果树, 2002(1): 24-26.
- [ 4 ] Martin A C. Contamination by heavy metals in soils in the neighborhood of a scrap yard of discarded vehicles[ J ]. Sci. Total Environ, 1998, 212(2/3): 145-152.
- [ 5 ] 郑国璋, 岳乐平. 洛川苹果园地土壤重金属污染调查与评价[ J ]. 土壤通报, 2008, 39(2): 402-405.
- [ 6 ] 庞奖励, 黄春长, 张旭, 等. 白鹿原人工果树林地土壤和农耕地土壤微形态对比研究[ J ]. 土壤学报, 2007, 44(5): 792-800.
- [ 7 ] 国家质量监督检验检疫总局. NY 5013-2001 无公害食品苹果产地环境条件[ S ]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1-4.
- [ 8 ] 赵政阳, 梁俊. 陕西澄城县苹果园环境质量评价[ J ]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(5): 222-225.
- [ 9 ] 田均良, 黄义端, 李雅琦. 黄土高原土壤剖面发生学特征和元素背景值的垂直分异现象[ J ]. 中国环境监测, 1992, 8(3): 56-62.
- [ 10 ] 单正军, 王连生, 蔡道基, 等. 果园土壤铜污染状况及其对作物生长的影响[ J ]. 农业环境保护 2002, 21(2): 119-121.
- [ 11 ] 李丽霞, 郝明德, 薛晓辉, 等. 黄土高原沟壑区苹果园土壤重金属含量特征研究[ J ]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 65-69.