

几种坡面径流调控措施的筛选试验研究\*

唐小娟<sup>1</sup>, 郭雪莲<sup>2</sup>

(1. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000; 2. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000)

**摘 要:** 缺水与水土流失并存是制约黄土高原地区经济社会可持续发展的重要限制性因子, 通过坡面径流调控手段消除水土流失动力, 同步实现水土流失防治与雨水资源化是解决上述问题的一个有效途径。本文利用人工降雨的模拟方法, 以不同坡面径流调控措施的筛选与优化配置各种地表径流调控措施为主要研究内容, 在上述研究基础上筛选出集成化、高效、低成本的坡面径流措施。

**关键词:** 坡面径流; 雨水集蓄利用; 产流产沙; 径流调控

中图分类号: TV213; S157      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2008)05-0125-04

Selection Experiment of Different Slope Runoff Adjustment Measures

TANG Xiaojuan<sup>1</sup>, GUO Xuelian<sup>2</sup>

(1. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China; 2. School of Research and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Soil erosion and arid shortage water coexists in the Loess Plateau area is a major limited factor for sustainable economic and social development. It is an effective way to achieve synchronous soil erosion control and rainwater resources by means of slope runoff adjustment measures to eliminate soil erosion. This paper uses the artificial rainfall simulation to study the different runoff control measures and optimize the allocation of the various surface runoff control measures. On the basic of the above research, an integrated, highly efficient, low cost measures slope runoff is selected.

**Key words:** slope runoff; rainwater catchment and utilization; runoff and erosion; runoff adjustment

1 试验布设和观测方法

室外人工降雨试验是在中国科学院水土保持研究所国家节水中心的杨凌国家节水示范园进行的, 采用人工降雨径流小区试验, 研究不同降雨强度下几种下垫面措施的坡面雨水径流调控情况。径流小区长 5 m, 宽 2 m, 坡度分别为 12°, 15°, 20°。在单项坡度上布置不同下垫面措施的目的是观测单项措施在径流小区上的坡面径流调控及其就地拦截的效果, 并以该坡度下的裸地作为对照, 具体坡面布设措施见表 1。

试验区的土样是选择具有代表性的轻黏土, 容重控制在 1.30 g/cm<sup>3</sup> 左右, 试验前用环刀法进行称重, 以严格控制。土壤含水量控制在 16% 左右, 每次都用 FDR(快速便携式测墒计)进行测控, 相对误差 < 2%。降雨的均匀系数控制在 75% 以上。黄土高原造成强烈水土流失的降雨多为短历时高强度的暴雨, 故而本试验选取的降雨量为 50 mm, 并设定了大小两个降雨强度, 分别为 0.533 mm/min 和 2.117 mm/min, 次降雨降雨量可通过降雨时间来控制, 在次降雨过程中, 从坡面产生径流开始, 每 5 min 测一次径流泥沙, 以观测降雨过程中泥沙含量变化情况, 泥沙观测精度为 ±10 g, 相

对误差 < 5%。径流量观测精度为 ±0.2 L, 相对误差 < 5%。

表 1 径流小区(2 m×5 m)措施布设

坡 度	措 施
12°	裸地(对照)
	种草(帕特草)
	打地孔
15°	裸地(对照)
	种草(帕特草)
	灌木(四翅滨藜)
20°	打地孔
	裸地(对照)
	灌木(四翅滨藜)
	打地孔

2 结果分析

在 3 个径流模拟试验小区上(尺寸为 2 m×5 m, 坡度分别为 12°, 15°, 20°), 通过布设打地孔、种草(帕特草)以及种树(四翅滨藜)等不同下垫面措施来进行地表径流调控, 并分析其坡面产流产沙规律以及不同措施坡面雨水集蓄利用效果。

\* 收稿日期: 2008-01-07  
基金项目: 甘肃省科技计划项目(0710RJZA024)  
作者简介: 唐小娟(1977-), 女, 陕西省凤翔县人, 硕士, 从事水资源利用与雨水利用技术研究工作。E-mail: tangxj7748@163.com

2.1 地孔对坡面径流调控的影响

据前期的预灌水试验,确定了本次试验地孔的布设参数为孔径 10 cm,孔深 60 cm,地孔密度 1 个/3 m<sup>2</sup>,共设置 4 种处理水平。通过在裸地上打地孔和地孔与其它的措施组合起来,试图达到坡地径流纵向运移集中地段点就地入参与横向拦截相结合,分散集蓄雨水之效果。本研究在室外径流小区上进行,分别选定了  $I = 2.135\text{ mm/min}$  和  $I = 0.579\text{ mm/min}$  两种雨强,总降雨量控制在 50 mm。

2.1.1 大雨强  $I = 2.135\text{ mm/min}$  时坡度对径流调控的影响

降雨落在裸露地表,首先要满足下垫面入渗,当降雨强度大于入渗能力时便开始积水,积水到一定程度后地表开始出现流动的水流,即开始产流,把从降雨开始到产生径流的这段时间叫做产流时间。在试验中,以试验槽下端出现线状水流为产流开始的标志。产流时间越长说明这种措施增加雨水的入渗能力越强。径流系数(Runoff coefficient)是指同一流域面积、同一时段内径流量与降水量的比值,以小数或百分数表示。在特定时段内通过小流域出口某一观测断面的泥沙总量,称为流域产沙量(sediment yield)<sup>[1]</sup>。

从表 2 可以看出,对于裸地而言,产流时间都是随着坡度的增大而提前的,径流量和侵蚀量也随着坡度的增加而显著的增大。这个结论和前人的试验结果是基本一致的。例如江忠善等人<sup>[2]</sup>研究发现:在各种雨强下,侵蚀量总是随着坡度的增加而增大,只是在不同雨强的降雨条件下,坡度的作用程度是不同的。在低雨强型降雨中坡度的影响很小,而高雨强型降雨时影响则增大。当布设了地孔措施后,可以看出,产流时间也是随着坡度而提前,径流量和侵蚀量随着坡度呈现先减少后增加的趋势。但地孔措施较同坡度的裸地对照时却发现,产流时间较对照提前,例如对于 12° 径流小区,布设地孔措施后产流时间比裸地对照提前了 31.76%, 15° 和 20° 分别提前了 6.8%, 5.0%。对于径流量来说, 12°, 15° 和 20° 地孔措施比裸地分别增加了 139.32%, 81.47%, 107.27%; 对于侵蚀量来说, 3 种坡度依次比对照分别增加了 139.62%, 119.12%, 23.24%。从这些数据可以看出在布设了地孔措施后不但没有起到坡面雨水的径流调控作用,反倒加速了侵蚀。

表 2 地孔措施对坡面径流调控的影响 ( $I = 2.135\text{ mm/min}$ )

坡度	措施	产流 时间/s	侵蚀量/ kg	径流量/ mm	泥沙含量/ (kg·m <sup>-3</sup> )
12°	裸地	488	4.001	15.69	25.813
	地孔	333	10.872	37.55	29.305
15°	裸地	88	4.184	16.24	25.830
	地孔	82	9.168	29.47	22.280
20°	裸地	80	15.739	18.98	29.490
	地孔	76	19.397	39.34	38.950

此原因可以从泥沙含量过程来做进一步解释,从不同坡度地孔与裸地对照的泥沙含量过程可以看出,裸地上的泥沙含量整体是先随着时间的延长逐渐增大,但到 20 min 左右时开始减小。同时,以 20° 坡面地孔措施的径流量和泥沙含量的过程可以看出,当降雨总量为 50 mm,降雨强度为  $I =$

2.135 mm/min 时地孔措施的径流量随着时间的推移逐渐增大,泥沙含量随着时间先增大后减小,可能原因是当降雨到达地面后,先冲走一些土壤结构比较疏松的土壤颗粒,当这些颗粒被冲走之后,坡面就形成了一层很薄的结皮,从而阻止了冲刷,所以就出现泥沙含量相对减少的现象。

2.1.2 小雨强  $I = 0.579\text{ mm/min}$  时坡度对径流调控的影响

从表 3 可以看出,在小雨强  $I = 0.579\text{ mm/min}$  时,裸地上的产流时间也是随着坡度的增加而提前的,径流量和侵蚀量也是随着坡度的增加而增加,这一结果和前人的研究结果也是一致的,因此试验结果具有可比性。

当布设了地孔措施之后,产流时间也基本随着坡度先提前后推迟,径流量和侵蚀量均随着坡度的增加而增加。当地孔措施与同坡度下裸地对照相比时,布设地孔后的产流时间比对照反而提前,径流量和侵蚀量均与同一坡度下的裸地对照相比有所增加。

同样还可以从其泥沙含量的过程来加以说明。在小雨强时,裸地上的泥沙含量整体都有随着坡度先增加后减小的趋势,但当布设了地孔措施之后,其泥沙含量却出现了反常。

表 3 地孔措施对坡面径流调控的影响 ( $I = 0.579\text{ mm/min}$ )

坡度	措施	产流 时间/s	侵蚀量/ kg	径流量/ mm	泥沙含量/ (kg·m <sup>-3</sup> )
12°	裸地	605	0.296	10.43	2.87
	地孔	455	0.573	23.48	2.47
15°	裸地	300	0.456	12.43	3.68
	地孔	72	4.325	25.1	7.47
20°	裸地	289	0.919	15.24	5.78
	地孔	137	1.007	28.67	7.93

综上所述,不同坡度布设地孔措施的试验结果分析,无论是在大雨强还是在小雨强,其拦蓄坡面径流,增加土壤入渗的效果都较差。剖析其产生的原因可能有:首先从水流动力学的角度来讲,地孔措施属于径流的点拦截,而坡面所产生的纵向径流只能横向拦截,即本来未打地孔的坡面产生的是坡面流,但当打地孔后,坡面的局部比降增大,从而使得地孔被冲垮,相对的坡面侵蚀量反而加大。这一点也可从图 1 得以佐证,此图为在陕北某坡面挖坑,但在没来得及栽树时,一场暴雨就将此坑冲垮,且形成严重的坡面沟蚀的现象。而且此结果和本次打地孔的试验结果相似;其二,可能是地孔的设计标准不恰当,比如我们是将地孔中挖出的土在其周围围成了一个土埂,布设是为起到纵向径流点拦截和横向拦截相结合的目的,但在试验中发现土埂相对于整个径流小区来说太小了,微不足道,不足以拦截大雨强下所产生的坡面径流量,所以产生了如上的结果。因此,本研究对坡面上单纯的打地孔措施提出质疑,认为这种措施在有大大暴雨的干旱地区不可行。

2.2 帕特草对坡面径流调控的影响

试验选取草坪草—帕特。帕特对北方和过渡带气候具有广泛的适应性。在 3 个不同的坡度、两个不同的雨强( $I = 2.171\text{ mm/min}$  和  $I = 0.526\text{ mm/min}$ ) 下面就帕特草的坡面径流调控特性做了如下试验。



图 1 次暴雨后的坡面挖坑图

2.2.1 大雨强  $I = 2.171\text{ mm/min}$  时种草对坡面径流的影响

从表 4 可以看出:在裸地条件下,随着坡度的增加,产流时间在提前,径流量和泥沙含量也随着坡度的增加而增大。当布设帕特之后,与同坡度下的裸地对照相比,其产流时间明显推迟,且与裸地对照相比分别推迟了 22.34% 和 240.91%。径流量和侵蚀量也较对照呈明显减小之趋势,径流量较对照分别减少了 54.17% 和 27.16%。侵蚀量较对照减少了 97.65% 和 95.72%。泥沙含量也明显减小。

在大雨强时,从泥沙含量过程可以看出,裸地上的泥沙含量在不同的坡度下变化趋势基本一致,即随着时间的延长,泥沙含量先增大到 20 min 左右时再逐渐降低。但当布设上帕特之后,其泥沙含量明显降低,从 12° 亦可看出在 20 min 时有一个突变点,即从这个时间点之后泥沙含量开始降低,且较对照减沙效果更明显。

表 4 种草对坡面径流调控的影响 ( $I = 2.171\text{ mm/min}$ )

坡度	措施	产流 时间/s	侵蚀量/ kg	径流量/ mm	泥沙含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
12°	裸地	488	4.001	15.69	25.813
	种草	597	0.094	7.19	1.32
15°	裸地	88	4.184	16.24	25.83
	种草	300	0.179	11.83	1.52

2.2.2 小雨强  $I = 0.526\text{ mm/min}$  时种草对坡面径流的影响

从表 5 可以看出,在小雨强时,裸地产流时间随着坡度增加而提前,其径流量和侵蚀量也有随着坡度的增加呈增大的趋势。当布设了帕特之后,与同一坡度的裸地对照相比,产流时间亦有明显延迟的倾向,分别推迟了 41.49% 和 260.67%。径流量和侵蚀量随着坡度的增加较对照呈减少的趋势。径流量分别减少了 48.61% 和 30.65%。侵蚀量分别减少了 77.03% 和 78.73%。从泥沙含量可以看出,当布设上帕特草之后,其泥沙含量明显低于裸地对照。

综上所述,无论是在大雨强还是在小雨强,其拦蓄坡面径流,增加土壤入渗的效果都明显比裸地对照好,其土壤含水量明显高于裸地对照,是一种比较理想的坡面径流调控措施,作为本试验的一种推荐措施,值得推广。同时应注意种草布设的主要技术要求:一是草坪的坡度不宜过大,以小于

15° 为宜;二是不同的水土流失地区须因地制宜,选取适用当地种植的草种;三是所选的草种最好是当地筛选出来的乡土植物,其主要原因是容易成活,而且具有很好的水土保持效应。另一个原因是因为在水土流失严重区,土层瘠薄,种树难,成活率低,即使成林了,也常常形成空中绿化,地面缺乏覆盖物。而牧草不同,它可以“一岁一枯荣”,实现当年种植,当年就可全部覆盖地面。这样,一方面由于牧草株体的截留作用,可以有效地防止雨滴直接去溅击地面而减少径流;另一方面,由于牧草分蘖多,呈丛生型生长,可以有效地分散、延缓、减少径流,这样牧草就构成了保护土壤的两道防线,因而控制水土流失的效果也就十分显著。土壤流失控制住了,土壤肥力提高了,植物生长的微域生态环境改善了,乔木生长的立地条件也就具备了。从这个角度上来说种草还能促进树木的生长,因此,在不同的干旱地区选择适宜的草种进行水土保持是相当重要的。

表 5 种草对坡面径流调控的影响 ( $I = 0.526\text{ mm/min}$ )

坡度	措施	产流 时间/s	侵蚀量/ kg	径流量/ mm	泥沙含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
12°	裸地	605	0.296	10.43	2.87
	种草	856	0.068	5.36	1.29
15°	裸地	300	0.456	12.43	3.68
	种草	1082	0.097	8.62	1.13

2.3 四翅滨藜对坡面径流调控的影响

本次试验所选取的树木为灌木——四翅滨藜。在 2 个不同的坡度、两个不同的雨强( $I = 2.139\text{ mm/min}$  和  $I = 0.581\text{ mm/min}$ ) 下研究四翅滨藜对坡面径流调控效果的影响。

2.3.1 大雨强  $I = 2.139\text{ mm/min}$  四翅滨藜措施对坡面径流调控的影响

从表 6 可以看出在大雨强时,在裸地条件下,产流时间随着坡度的增加而提前,径流量和侵蚀量都随着坡度的增大而增加。当种植了灌木(四翅滨藜)措施后,较对照产流时间都推迟。在 15° 时推迟了 8.6%,在 20° 时推迟了 20.0%。径流量和侵蚀量较裸地对照降低。径流量分别减少了 25.67% 和 1.91%。侵蚀量减少了 33.48% 和 17.77%,泥沙含量较对照也有减少的趋势。

表 6 种四翅滨藜对坡面径流调控的影响( $I = 2.139\text{ mm/min}$ )

坡度	措施	产流 时间/s	侵蚀量/ kg	径流量/ mm	泥沙含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
15°	裸地	81	4.184	16.40	25.83
	四翅滨藜	88	2.783	12.19	8.75
20°	裸地	75	15.739	19.85	79.49
	四翅滨藜	90	12.942	19.47	44.02

2.3.2 小雨强  $I = 0.581\text{ mm/min}$  四翅滨藜措施对坡面径流调控的影响

从表 7 可发看出,在裸地条件下,产流时间随着坡度的增加也推迟。其径流量和侵蚀量随着坡度的增加而减少。当种植了四翅滨藜措施之后,在同一坡度下较裸地对照 15° 坡面产流时间较裸地对照推迟了 49%, 20° 时较裸地对照推迟了 10.38%,这一结果与裸地对照的变化趋势是一致的。径流量

较对照分别减少了 14.82% 和 12.42%, 侵蚀量较对照减少了 14.3% 和 43.42%。泥沙含量较对照也有减少的趋势。

表 7 四翅滨藜对坡面径流调控的影响 ( $I=0.581\text{ mm/min}$ )

坡度	措施	产流 时间/s	侵蚀量/ kg	径流量/ mm	泥沙含量/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
15°	裸地	300	0.456	12.55	3.68
	四翅滨藜	447	0.313	10.69	2.09
20°	裸地	289	0.919	15.94	5.78
	四翅滨藜	319	0.52	13.96	3.47

综上所述,无论是在大雨强还是在小雨强,其拦蓄坡面径流,增加土壤入渗的效果都明显比裸地对照好,是一种比较理想的坡面径流调控措施。但四翅滨藜与同坡度裸地相比其增加入渗、蓄水拦沙效果没有帕特草与同坡度裸地相比的效果明显。初步研究结果认为产生这种结果的可能原因为:本研究所种植的四翅滨藜株距和行距均为 20 cm,且实行“梅花形”布设,这给人为控制容重造成了一定困难,特别是四翅滨藜根部的土就更难踩实,因此就很难达到预期的容重,当该试验结果与容重达到  $1.3\text{ g/cm}^3$  对比时,自然出现由于人为误差和系统所造成的试验结果偏离。另一方面的原因是试验所布设的植株下面跟自然界相比没有一定厚度的枯枝落叶层,而只有枝叶的拦截作用,因此当部分雨滴顺着枝叶流下时对坡面某点的打击力度反而增强,进而加速了土壤的侵蚀力度。

### 3 结论与讨论

(1) 在本试验所选定的技术参数下,地孔措施的坡面径流调控效果较差。地孔较裸地对照径流量增加,侵蚀量也增强,其可能原因是:其一,地孔措施属于坡面径流的点拦截,而坡面所产生的纵向径流须横向拦截,尽管为了弥补此不足,在布设地孔时,将从地孔中取出的土在其下方边缘围成了一个半圆形的土埂横向拦截,但仍未达到雨水就地拦蓄利用的目的;其二,本试验未能对不同的暴雨标准进行深入的研究,只是在所选定的暴雨条件下(总降雨量 50 mm,降雨强度分别为  $0.579\text{ mm/min}$  和  $2.135\text{ mm/min}$ ) 所得到的试验结果;其三,由于对地孔的深入仍处于一个探索性的阶段,可能在布设方式上不尽合理,因此,需进一步的深入研究。

(2) 在单坡度径流小区上筛选出的帕特草具有明显增加

土壤入渗、减少地表径流、增强土壤防蚀的能力,其次是四翅滨藜。在总降雨量为 50 mm,两种降雨强度下,帕特草及四翅滨藜都随着坡度增加,较同坡度的裸地产流时间推迟,径流量和侵蚀量降低。研究结果表明,与裸地对照相比,种帕特草产流时间平均推迟 1.4 倍,径流量较裸地对照降低了 40.17%,侵蚀量降低了 87.28%;四翅滨藜较裸地对照产流时间平均推迟 22%,径流量较裸地对照降低了 13.7%,侵蚀量降低了 27.24%。

(3) 从裸地对照的试验结果来看,无论是产流时间,还是径流量和侵蚀量,其在不同的坡度和降雨强度下均是与前人的研究结果相一致的,这就进一步证明了试验具有可比性。对于  $12^\circ$ ,  $15^\circ$  和  $20^\circ$  三种坡度,两种雨强来说,产流时间是随着坡度的增加而提前,而径流量、侵蚀量均是随着坡度的增大而增大,泥沙含量随着坡度的增大先增大而后减小。

(4) 从不同降雨强度泥沙含量的过程可以看出,不同的措施在大雨强下,都有一个明显特点,就是随着时间的进行,其泥沙含量先逐渐增大,再逐渐减小,并在 20 min 左右出现了一个突变的临界拐点。在总降雨量为 50 mm 时,降雨强度  $I=2.1\text{ mm/min}$  时,其泥沙含量出现一个突变的临界点时间,为 20 min。分析产生这种情况的原因可能有:第一,降雨初始,地表的部分地方“虚土(容重比较小的地方的土壤)”随着水流被带下,但当降雨进行到一定的时间后,地面被较大的雨滴所击实,即出现了泥沙含量减少的趋势。第二,因为是大雨强,所以降雨刚开始是一些较小的颗粒随着水泥被带下到下坡段,但这些较小的黏性颗粒阻塞了下坡段的土壤孔隙,因此形成一些较大的土壤团聚体,所以其泥沙含量相对开始减小。

#### 参考文献:

[1] 《中国大百科全书·水利卷》(1992.3)  
[2] 江忠善,刘志,贾志伟.降雨和地形因素与坡地水土流失关系研究[M]//黄土高原小流域综合治理与发展.北京:科学技术文献出版社,1991:300-310.  
[3] 朱强.水资源可持续发展和雨水集蓄水利[J].防渗技术,2002(1):2-6.  
[4] 吴普特.动力水蚀实验研究[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.