

# 紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究

刘纪根, 张昕川, 李力, 黄旭华, 徐灿

(长江水利委员会 长江科学院, 武汉 430010)

**摘要:** 植被是防止地面水土流失的积极因素,但在三峡库区紫色土关于植被对水土流失的影响还相对比较薄弱。本研究通过人工模拟降雨试验,分析不同草地覆盖度对紫色土坡地径流产沙的影响,定量研究不同草地覆盖度的减水减沙效益。结果表明:流量随草地植被覆盖度的增加而减小,小雨强时表现特别显著。特别是当植被覆盖度 $>60\%$ 后,径流量明显低于裸地及 $20\%$ 、 $40\%$ 植被覆盖度;植被覆盖度越高,植被降低径流含沙率的作用也就越明显,径流含沙量就越低;与草地的减沙功能相比,其削减径流作用明显弱于减沙效应,且盖度对坡面的减水特征值影响不太明显;植被覆盖的减流减沙效益在中小雨强时随雨强的增加而增加,在大雨强时,其减流减沙效益反而降低。

**关键词:** 紫色土; 植被; 覆盖度; 水土流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0016-05

## Research of Effect of Vegetation Coverage on Soil and Water Loss in Purple Soil Slope Land

LIU Jigen, ZHANG Xinchuan, LI Li, HUANG Xuhua, XU Can

(Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Vegetation is the positive factor preventing ground soil and water loss, but the research of effect of vegetation on soil and water loss is still very weak in purple soil in the Three Gorges Reservoir area. Artificial rainfall simulation experiment was used to analyze the effects of different grass coverage on runoff and sediment in purple soil slope land, quantitatively study the benefits of reducing runoff and sediment under different grass coverage. The results showed that the runoff flow decreased with increase of grass coverage, and it was particularly significant under small rainfall intensity. Especially when vegetation coverage was greater than  $60\%$ , the runoff volumes were significantly lower than those of bare land, the lands with  $20\%$  and  $40\%$  of vegetation coverage. The higher vegetation coverage is, the more obvious that reducing runoff and sediment yield, and the lower the sediment concentration is. Compared with grass-reduced sediment, it was obviously weaker for reducing runoff, and it was not clear that the effect of vegetation coverage on characteristic value of reducing runoff. The benefits of vegetation-reduced runoff and sediment increased with rise of rainfall under small and medium rainfall intensities, on the contrary, under the big rainfall intensity, the benefits of reduction of runoff and sediment declined.

**Keywords:** purple soil; vegetation; coverage; soil and water loss

植被具有良好的保持水土、涵养水源、改善生态环境的作用。植被从林冠至根系在不同层面上减缓径流对土壤的冲刷,并改善土壤入渗,减少坡面泥沙的输移,使水土流失量减少。不同类型植被覆盖控制土壤侵蚀的机理不尽相同,其水土保持效益存在明显差异。我国不同类型植被覆盖的水土保持效益对比研究多集中在黄土高原地区<sup>[1-5]</sup>。在紫色土区,蒋光毅等<sup>[6]</sup>研究了紫色土坡地不同种植模式下的径流及

养分流失规律。刘刚才等<sup>[7]</sup>研究了四川低山丘陵区紫色土不同土地利用类型的水蚀特征。刘纪根等<sup>[8]</sup>分析了紫色土土地利用类型与降水变化对水土流失的影响,研究发现:当土地利用类型覆盖度较低时,侵蚀主要受降水变化影响;当覆盖度较高时,土壤侵蚀与降水变量没有相关性,主要受植被覆盖影响。在三峡库区紫色土,关于植被类型及其覆盖度对产流产沙影响研究缺乏应有的广度和深度,难以用于指导大范

围的植被建设。因此,本研究以三峡库区紫色土为研究对象,研究植被与水土流失间内在的联系,定量分析植被覆盖的减沙作用与机理,以期为三峡库区水土保持综合治理提供科学依据。

## 1 试验材料与方法

本研究采用人工模拟降雨试验,选取5个植被覆盖度(80%,60%,40%,20%,0)、3种雨强(0.8,1.2,1.6 mm/min)、3种植被格局(上部、中部、下部)组合进行试验。试验在室内建立的简易径流小区上进行,径流小区设计长8 m,宽1 m。试验坡度为15°。试验用紫色土采自湖北省秭归县王家桥小流域坡耕地,土壤容重 $1.32\text{ g/cm}^3$ ,土壤有机质 $5.61\text{ g/kg}$ ,不同粒径颗粒组成为: $>2\text{ mm}$ 颗粒27.08%, $1\sim 2\text{ mm}$ 颗粒13.56%, $0.5\sim 1\text{ mm}$ 颗粒7.25%, $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 颗粒8.83%, $0.05\sim 0.25\text{ mm}$ 颗粒10.24%, $<0.05\text{ mm}$ 颗粒33.04%。试验采用侧喷式降雨器,雨滴降落有效高度为4 m。每次降雨前率定雨强,控制雨量和均匀系数,使降雨达到要求,降雨均匀度达到90%以上。为了控制土壤前期含水量基本一致,消除土壤前期含水量的影响,每场降雨时间间隔48 h,初次降雨前土壤含水率均在12%左右。中间不换土,试验前对坡面平整。每次试验降雨历时控制在产流后30 min停止。

坡面植被的铺设用10 cm厚、 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 的

草皮(草种为早熟禾)植入坡面的方法布设坡面的不同植被覆盖度及空间格局,其植被格局及覆盖度布置如图1所示。在植被与坡面土壤的衔接处,填充土壤,以保证坡面的连续性,并且土壤与植被衔接处水流顺直,不发生非正常下渗。

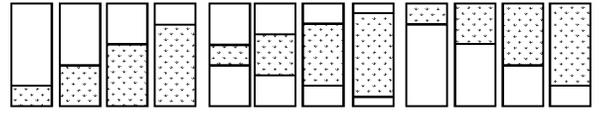


图1 模拟降雨试验坡面植被格局及覆盖度示意图

每次试验开始前和试验后在坡面上利用环刀法测定土壤容重,采用烘干法测定土壤含水量。试验开始至坡面上完全产流后,记录产流时间,同时开始采集坡面出口的径流泥沙样(包括壤中流),产流后每2 min取1次径流泥沙样,记录采样的时间。每3 min用高锰酸钾溶液测定坡面径流流速,同时记录径流收集桶刻度,换算径流总量。每次试验后,用量筒测定采集的径流泥沙样体积,用烘干法测定各个样品中的泥沙量,换算出坡面出口的径流量和输沙率过程。量测径流桶总径流量及泥沙量。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面植被不同覆盖度对径流影响

为了探讨坡面植被不同覆盖度对坡面产流的影响,绘制不同植被格局、雨强、植被覆盖度的径流变化曲线,如图2所示。

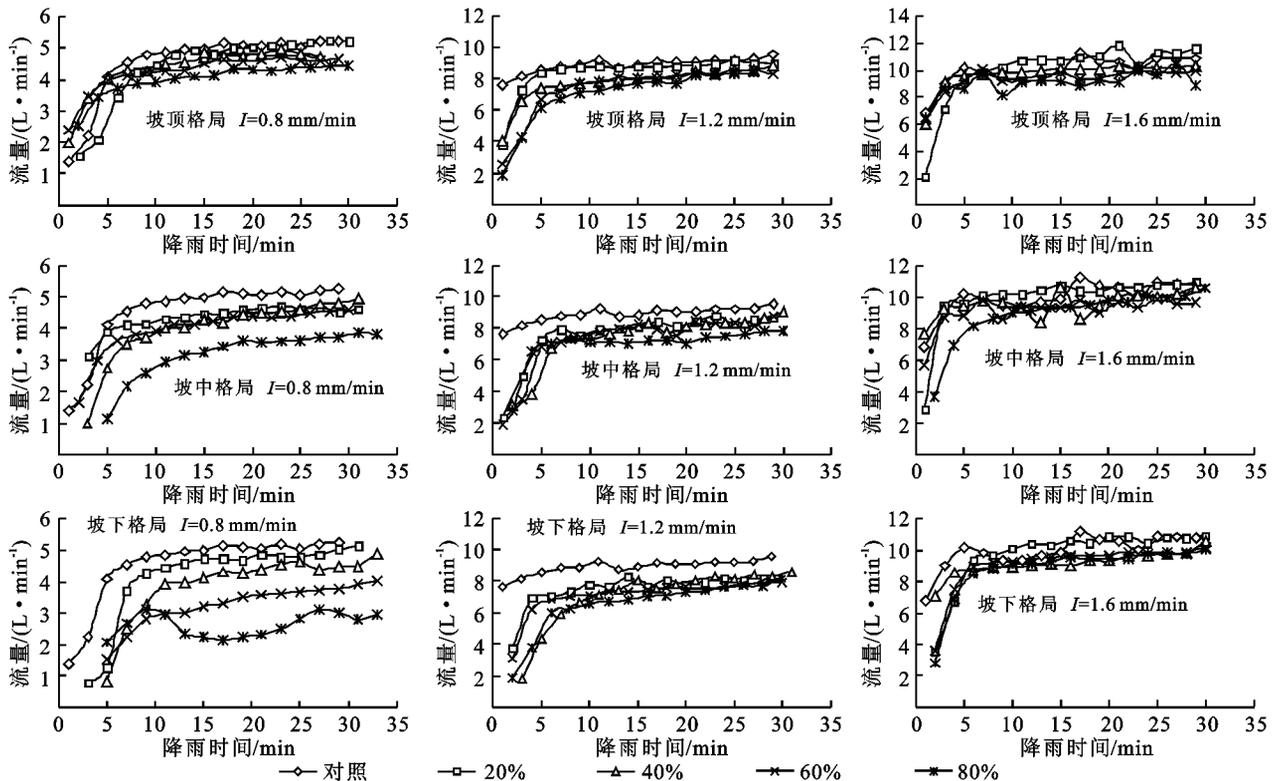


图2 不同植被格局、雨强、植被覆盖度下流量随时间变化曲线

地表产流主要与两种因素有关,一是降雨,二是下垫面。下垫面特征主要包括地形、土壤、地表覆盖等。在地形、土壤一致的情况下,地表覆盖决定了地表产流的差异,表现在覆盖度大小和覆盖类型差异。地表覆盖的不同在雨水拦截和入渗等方面产生很大差异,使产流和产沙过程产生差异,主要体现在开始产流时间和产流产沙随降雨变化的差异上。由图2可知,相对于裸地,草地由于地被物的存在,水流运动被阻碍,坡面径流深加深,水流有更充分的时间下渗到土壤,坡面产流时间延后,裸地产流时间一般在1 min左右,而草地产流时间一般在2 min后,植被覆盖度越大,产流时间越延迟。草地不仅明显地延迟了径流产生,而且更延缓产流后的汇流过程。相对于裸地,由于草地地被物的存在,坡面糙率增加,坡面径流流速及径流量明显减小。

裸坡及各覆盖度下的径流量随时间延长呈先增加然后再趋于稳定的趋势,裸坡径流流量在前5 min内迅速增长,5 min后增长速度变缓,最后基本达到稳定;有植被覆盖时,径流流量在前10 min内增长速度较大,10 min后基本稳定。这是因为在降雨初期,土壤的初始含水量较小,入渗率较大,产流量较小,随着降雨时间的增长,土壤含水量逐渐增加,入渗率减小,产流量逐渐增大;当土壤达到饱和含水量后,径流入渗基本达到平衡,流量达到稳定;而有植被覆盖时,土壤渗透性因植物根系的密布缠绕而提高,坡面径流入渗时间延长,径流流量达到稳定时间也相应延后。

当雨强条件一致时,草地径流量随着草地覆盖度的增大而减少,而且这种趋势极为明显,分析其原因可能在于:(1)草地覆盖度越大,草体对降雨动能的拦截作用越强,地表结皮不易形成,土壤入渗量增加,地表径流减少;(2)草地覆盖度越大,草地拦蓄径流能力越大,径流量减少;(3)草地覆盖度越大,草地对地表径流的拦阻作用越大,地表径流流速减小,地表径流流动时间增加,相应增加了入渗时间,减少径流<sup>[9]</sup>。如图2所示,在坡顶格局条件下,0.8 mm/min雨强时,裸地、20%草地覆盖流量基本维持在5.1 L/min左右,而40%、60%、80%草地覆盖的流量分别为4.8、4.6、4.4 L/min;1.2 mm/min雨强时,裸地流量维持在9.2 L/min左右,20%、40%、60%、80%草地覆盖流量在8.9、8.4、8.3、8.2 L/min左右;1.6 mm/min雨强时,裸地、20%草地覆盖流量基本维持在11.0 L/min左右,而40%、60%、80%草地覆盖的流量在10.2、9.7、9.4 L/min。随着草地植被覆盖度的增加,流量减小;随着雨强的增加,流量也随之增大。

流量随草地植被覆盖度的增加而减小,在坡下格

局、小雨强下表现的特别显著。0.8 mm/min雨强时,裸地流量维持在5.1 L/min左右,20%、40%、60%、80%草地覆盖流量分别在4.8、4.5、3.8、2.9 L/min左右;特别是当植被覆盖度>60%后,径流量明显低于裸地及20%、40%植被覆盖度。径流流量减小导致径流搬运泥沙和径流剪切土壤的能力下降,从而使侵蚀产沙量减小。

## 2.2 坡面植被覆盖度对侵蚀含沙量影响

绘制不同格局、雨强、植被覆盖度含沙量随时间的变化曲线(图3),可见在不同的雨强模拟条件下,裸地的含沙量明显大于不同植被覆盖度径流含沙量,裸地的坡面含沙量过程随时间的延续而上下波动,而不同覆盖度下含沙量的波动范围很小。在0.8 mm/min雨强时,降雨后期裸地的含沙量基本都在10 g/L以上,不同植被格局不同植被覆盖度含沙量基本都在5 g/L以下;在1.2 mm/min雨强时,降雨后期裸地的含沙量基本都在20 g/L左右,而不同格局不同植被覆盖度含沙量基本都在7 g/L以下;在1.6 mm/min雨强时,降雨后期裸地的含沙量基本都在22 g/L,而不同格局不同植被覆盖度含沙量基本都在8 g/L以下。

对于裸地,在小雨强下,降雨初期的坡面侵蚀以溅蚀作用为主,坡面径流以输沙为主,输沙率相对较大,当坡面径流水深增大到一定程度时,雨滴打击分散土粒作用减小,从而输沙率减小。随着降雨历时的延长,土壤含水量逐渐增加,入渗量减小,径流冲刷作用增强,局部形成跌坎,跌坎进一步贯通,发育形成细沟。在降雨历时5 min左右时,细沟发育基本稳定,坡面的输沙率也趋于一个稳定值。在中大雨强下,随着径流冲刷作用的加大,坡面细沟迅速形成,随着细沟溯源侵蚀、沟底下切、沟壁扩张,侵蚀量不断加大,径流含沙量迅速增大,如此反复,便出现了侵蚀产沙量呈锯齿状的变化规律。

草地土壤坡面的产沙过程与裸地坡面明显不同。由于草地坡面盖度的增加减小了雨滴对坡面的打击动能,而且由于草地根系的缠绕阻拦,增加地表糙率,降低径流对地表的冲刷能力,径流含沙量明显低于裸地;而且植被覆盖的径流含沙量都随着试验的进行而逐渐减小,植被覆盖度越高,植被降低径流含沙率的作用也就越明显,径流含沙量就越低。坡顶格局1.2 mm/min雨强时,降雨后期20%、40%、60%、80%植被覆盖度下径流含沙量基本维持在6、4、3、2 g/L。

降雨强度对坡面侵蚀产沙过程同样具有十分重要的影响。当下垫面条件一致时,模拟降雨的雨强大小不同,坡面产流产沙过程也不同。大量研究表明,

雨强越大、历时越长、雨量越大,对下垫面提供的侵蚀动能越大,对土壤的侵蚀能力越强。对于5种覆盖度坡面,侵蚀量随降雨强度增大而增加。降雨强度增大,最直观的表现就是径流增大,对土壤的冲刷力增大。此外,降雨强度增大,雨滴的直径和末速都增大,因而它的动能也增大,对土壤的击溅作用表现也十分

强烈;同时,使坡面水层紊动强度加大,水流的挟沙能力加强。所以,随着降雨强度的增大,侵蚀含沙量也增大。以40%植被覆盖度为例,在坡顶格局,0.8,1.2,1.6 mm/min三种雨强下降雨后期径流含沙量分别为3.26,4.39,6.23 g/L。关于不同植被覆盖格局对径流泥沙的影响,研究成果将会在其他文章中报道。

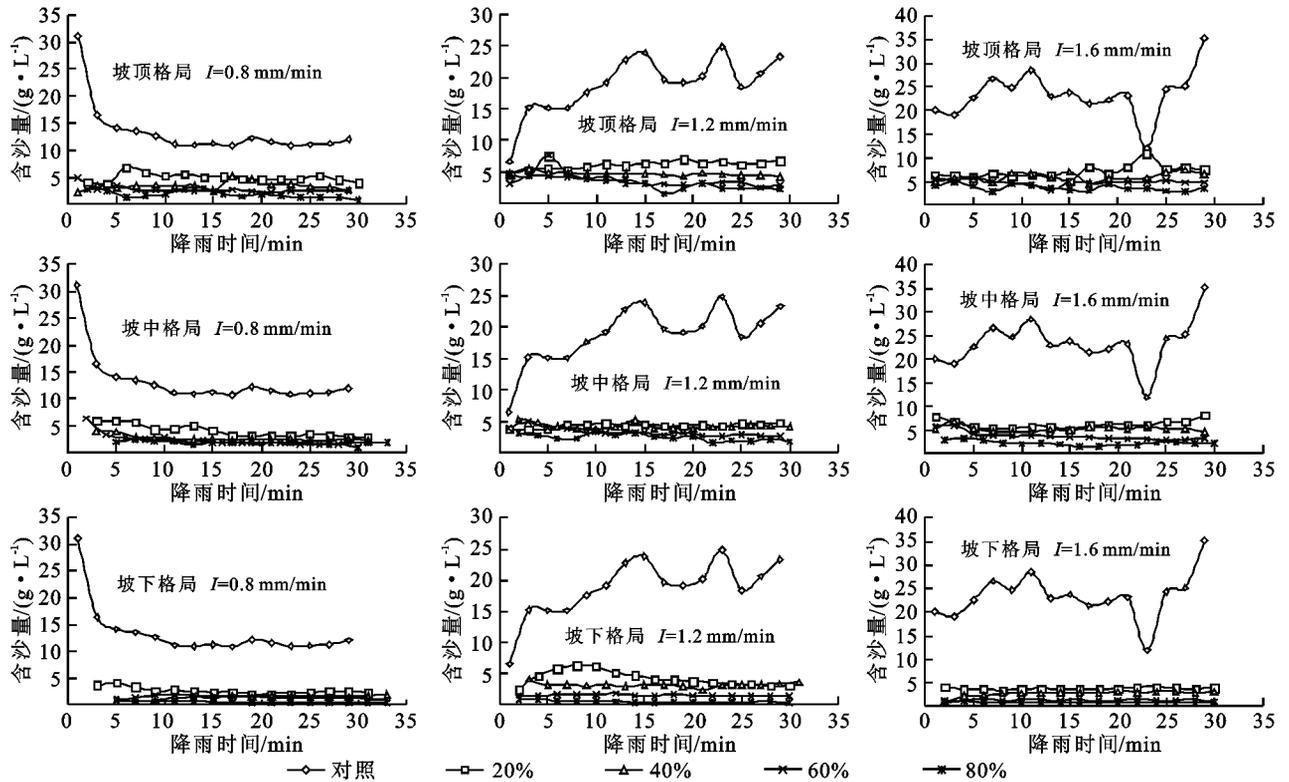


图3 不同植被格局、雨强、植被覆盖度下含沙量随时间变化曲线

### 2.3 坡面植被不同覆盖度减水减沙效益

曾伯庆<sup>[10]</sup>、侯喜禄<sup>[11]</sup>、焦菊英<sup>[3]</sup>等的研究表明,降雨条件与盖度对草地减水减沙效益影响很大。彭文英等<sup>[12]</sup>研究了不同土地利用随降雨变化的减流减沙特征,研究表明在小雨强、小雨量下各林草基本不减流减沙,当 $I_{30} \geq 0.2$  mm/min,  $P \geq 20$  mm林草减流减沙作用才明显,尤其当 $I_{30} \geq 0.4$  mm/min,  $P \geq 50$  mm时减流减沙相当明显。

如表1所示,与裸土坡面相比,草地坡面具有显著的减沙效应;与草地的减沙功能相比,其削减径流作用明显弱于减沙效应,且盖度对坡面的减水特征值影响不太明显。坡顶格局、0.8 mm/min雨强下,不同植被覆盖度减流效益2.34%~11.20%,减沙效益达34.45%~80.10%,减沙效益明显高于减流效益;随着植被覆盖度的增加,其减流减沙效益增加,但其减流效益明显不如减沙效益显著。20%,40%,60%,80%植被覆盖度下减流效益分别为2.34%,3.51%,5.97%,11.20%;但其减沙效益分别为34.45%,57.57%,66.60%,80.10%。可见,覆盖度对减流效

益的影响远不如对减沙效益的影响。20%,40%植被覆盖度下的减沙还十分显著,植被覆盖度达到60%以上时,减沙作用趋于稳定,覆盖度的增加不能引起减沙效益的大幅度增加。

20%,40%的草地植被覆盖,除了有效截持降水外,更能增加降雨入渗,增强土壤抗冲能力。草地植被对于阻延地表径流流速、提高土壤对径流侵蚀的抵抗力远远大于其对降雨蓄渗的影响。总的说来,草地自身拦截泥沙的功效要强于它增加入渗减少径流的功效。60%,80%植被覆盖度下,减沙效益的差距变化小,说明覆盖度60%~80%是草被水沙调控的一个临界点。利用S-N-K法对覆盖度进行均值多重比较发现,覆盖度对径流量的影响可以分为3组:0~20%,40%~60%,80%,覆盖度对侵蚀量的影响分为3组:0,20%~40%,60%~80%。组内差异不显著,组间在 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著。说明存在临界植被盖度,在此临界盖度下,径流量随植被盖度的增加而减小,但影响不显著;当覆盖度达到临界盖度后,覆盖度的增加对径流量的影响显著增强,而后随着植被

覆盖度的增加,对径流量的影响又趋弱。植被覆盖度达到 60%以上时,减沙作用趋于稳定,覆盖度的增加不能引起减沙效益的大幅度增加<sup>[13]</sup>。

对 3 个雨强、5 种植被覆盖度下径流量、侵蚀量进行方差(ANOVO)分析,LSD 多重比较(最小显著性差异, $p < 0.05$ ),结果显示:在不同雨强与植被覆盖度下径流量、侵蚀量差异显著,相同雨强不同植被覆盖度下径流量、侵蚀量差异显著,相同植被覆盖度下不同雨强径流、侵蚀量差异显著。可知,雨强、植被覆盖度都是影响径流量、侵蚀量的关键因素。依据统计学原理,对变量的度量,方差分析中唯一有用的就是离差平方和,离差平方和越大,对总体的贡献率越高。径流量方差分析结果表明,雨强的离差平方和(其值为 711.524)远大于植被覆盖度的离差平方和(其值为 15.178),因而,认为雨强的作用要大于植被

覆盖度对径流量的影响;侵蚀量方差分析表明,雨强的离差平方和(其值为 7 996 473.835)与植被覆盖度的离差平方和(其值为 7 400 903.690)相差不大,因而,认为雨强的作用与植被覆盖度对侵蚀量的作用大致相当。

在不同格局,植被覆盖的减流减沙效益在中小雨强下随雨强的增加而增加,在大雨强时,其减流减沙效益反而降低。如在坡中格局、40%覆盖度时,0.8, 1.2, 1.6 mm/min 三种雨强下减流效益分别 11.49%,17.05%,4.22%;1.6 mm/min 雨强下的减流效益远远小于 0.8 mm/min 与 1.2 mm/min 雨强;三种雨强下的减沙效益分别为:70.49%,77.42%,75.77%。1.2 mm/min 雨强下的减沙效益最佳,其他不同植被覆盖度的减流减沙效益随雨强的变化也呈现相同的规律。

表 1 不同植被格局、雨强、植被覆盖度下减流减沙效益

雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	覆盖度	坡顶格局				坡中格局				坡下格局			
		累积 径流/L	累积 产沙/g	减少 径流/%	减少 泥沙/%	累积 径流/L	累积 产沙/g	减少 径流/%	减少 泥沙/%	累积 径流/L	累积 产沙/g	减少 径流/%	减少 泥沙/%
0.8	对照	135.62	1033.78	—	—	135.62	1033.78	—	—	135.62	1033.78	—	—
	20%	132.45	677.60	2.34	34.45	130.45	520.94	3.81	49.61	125.38	306.20	7.55	70.38
	40%	130.86	438.64	3.51	57.57	120.04	305.07	11.49	70.49	117.96	179.20	13.02	82.67
	60%	127.53	345.31	5.97	66.60	119.30	254.82	12.03	75.35	97.67	139.89	27.98	86.47
	80%	120.43	205.69	11.20	80.10	96.26	181.70	29.02	82.42	78.43	55.92	42.17	94.59
1.2	对照	266.57	4189.47	—	—	266.57	4189.47	—	—	266.57	4189.47	—	—
	20%	251.31	1408.01	5.72	66.39	226.96	967.76	14.86	76.90	225.32	956.63	15.47	77.17
	40%	231.74	1148.43	13.07	72.59	221.13	945.90	17.05	77.42	212.40	774.02	20.32	81.52
	60%	220.78	723.52	17.18	82.73	216.69	680.50	18.71	83.76	212.29	324.66	20.36	92.25
	80%	212.22	630.49	20.39	84.95	209.27	500.13	21.50	88.06	195.63	107.75	26.61	97.43
1.6	对照	298.46	6352.38	—	—	298.46	6352.38	—	—	298.46	6352.38	—	—
	20%	298.23	1972.80	0.08	68.94	295.62	1670.14	0.95	73.71	292.33	1090.10	2.05	82.84
	40%	290.89	1768.67	2.54	72.16	285.87	1539.03	4.22	75.77	274.91	847.46	7.89	86.66
	60%	279.69	1378.57	6.29	78.30	272.14	1049.53	8.82	83.48	271.80	363.84	8.93	94.27
	80%	270.62	946.92	9.32	85.09	267.02	565.19	10.53	91.10	263.56	263.94	11.69	95.85

### 3 结论

通过对不同植被覆盖度的产流产沙初步分析,得到如下主要结论:

(1) 流量随草地植被覆盖度的增加而减小,在坡下格局、小雨强下表现的特别显著。特别是当植被覆盖度>60%后,径流量明显低于裸地及 20%,40%植被覆盖度。

(2) 不同植被覆盖度下坡面径流含沙量明显低于裸地;而且植被覆盖的径流含沙量都随着试验的进行而逐渐减小,植被覆盖度越高,植被降低径流含沙率的作用也就越明显,径流含沙量就越低。

(3) 与裸土坡面相比,草地坡面具有显著的减沙

效应;与草地的减沙功能相比,其削减径流作用明显弱于减沙效应,且盖度对坡面的减水特征值影响不太明显。在不同格局,植被覆盖的减流减沙效益在中小雨强下随雨强的增加而增加,在大雨强时,其减流减沙效益反而降低。

(4) 利用 S-N-K 法对覆盖度进行均值多重比较发现,覆盖度对径流量的影响可以分为 3 组:0~20%,40%~60%,80%,覆盖度对侵蚀量的影响分为 3 组:0,20%~40%,60%~80%。组内差异不显著,组间在  $\alpha=0.05$  水平上差异显著。植被覆盖度达到 60%以上时,减沙作用趋于稳定,覆盖度的增加不能引起减沙效益的大幅度增加。

(下转第 27 页)

- [7] 王留好. 陕西省渭北苹果主产区苹果园土壤养分现状评价[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- [8] 李会科, 赵政阳, 张广军. 种植不同牧草对渭北苹果园土壤肥力的影响[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 31-34.
- [9] 高义民, 同延安, 路永莉, 等. 陕西渭北红富士苹果园土壤有效养分及长期施肥对产量的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(4): 613-622.
- [10] 郝雅璐, 常庆瑞, 刘海飞. 基于 GIS 的县域土地利用与地形因子关系研究: 以陕西省黄陵县为例[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 134-137.
- [11] 刘世贤. 半干旱区苹果树根系分布规律调查[J]. 西北园艺, 2003(6): 48-49.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1992.
- [13] 郑小春, 车金鑫, 卢海蛟, 等. 陕西白水红富士苹果示范园土壤养分状况分析[J]. 西北农业学报, 2011, 20(10): 97-101.
- [14] 方睿红, 常庆瑞. 关中平原台塬区土壤养分空间格局研究: 以西安市长安区为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 141-145.
- [15] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [16] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [17] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils [J]. Soil Science, 1997, 162(4): 291-298.
- [18] 徐四新, 姚政, 宋科, 等. 浦东新区果园村土壤养分状况评价及其空间变异分析[J]. 上海农业学报, 2012, 28(2): 72-74.
- [19] 白勇龙, 王远东, 张正军, 等. 甘肃正宁苹果园土壤养分测定分析[J]. 现代园艺, 2012(19): 14-15.
- [20] 张进. 渭北苹果园土壤养分状况调查与评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [21] 居玛汗·卡斯木, 张丽娜, 范鹏, 等. 黄土高原不同生态类型区果园地土壤肥力特征综合评价及其区域差异特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 316-323.
- [22] 李庚飞, 周胜波, 李亚梅. 澄城县苹果园土壤养分及空间变异分析[J]. 福建林业科技, 2014, 41(3): 90-93.
- [23] 郭晓敏, 牛德奎, 郭熙奉, 等. 新毛竹林土壤养分空间变异性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 420-425.
- [24] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同肥料运筹对夏玉米田间土壤氮素淋溶与挥发影响的原位研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 998-1005.
- [25] 王淑英, 胡克林, 路苹, 等. 北京平谷区土壤有效磷的空间变异特征及其环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1290-1298.
- [26] 姜远茂. 苹果园科学施肥技术试验示范建议[R]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.

(上接第 20 页)

#### 参考文献:

- [1] 侯喜禄, 曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33-40.
- [2] 刘元宝, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 25-29.
- [3] 焦菊英, 王万忠. 人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J]. 草地学报, 2001, 9(3): 176-182.
- [4] 吴钦孝, 赵鸿雁, 韩冰. 黄土丘陵区草灌植被的减沙效益及其特征[J]. 草地学报, 2003, 11(1): 23-26.
- [5] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68-73.
- [6] 蒋光毅, 史东梅, 卢喜平, 等. 紫色土坡地不同种植模式下径流及养分流失研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 54-58.
- [7] 刘刚才, 朱波, 代华龙, 等. 四川低山丘陵区紫色土不同土地利用类型的水蚀特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 96-99.
- [8] 刘纪根, 李蓉. 紫色土区土地利用类型与降水变化对水土流失的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 10-14.
- [9] 张光辉, 梁一民. 模拟降雨条件下人工草地产流产沙过程研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 56-59.
- [10] 曾伯庆, 马文中, 李俊文, 等. 人工草地植被对产流产沙影响的研究[C]// 晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990: 80-86.
- [11] 侯喜禄, 梁一民, 曹清玉. 黄土丘陵区主要水保林类型及草地水保效益的研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1991, 14: 96-103.
- [12] 彭文英, 张科利. 不同土地利用产流产沙与降雨特征的关系[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 4-8.
- [13] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407.