

不同盖度羊草地对水土流失的影响

李 龙¹, 郝明德^{1,2}, 肖庆红³, 郭胜安⁴, 刘公社⁵

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 宁夏农业综合开发办公室, 宁夏 银川 750011; 3. 宁夏盐池县
农业综合开发办公室, 宁夏 盐池 751500; 5. 中国科学院 植物研究所 北方资源植物重点实验室, 北京 100093)

摘 要: [目的] 研究羊草盖度与产流产沙量和风蚀量关系, 为羊草种植区水土流失防治提供依据。
[方法] 通过人工模拟降雨试验和风洞模拟试验, 研究 5 种盖度下羊草地的产沙产流特性和抗风蚀特性, 对
不同盖度羊草地的水土保持效应进行探讨。[结果] 坡度相同时, 随羊草盖度的增加产流时间逐渐延后; 随
着盖度的增加, 累积径流量的减少率小于累积产沙量的减少率。当羊草盖度由 20% 增加到 100% 时, 风蚀
量减少 96.78%; 当羊草盖度从 60% 增加到 80% 时, 风蚀量的减少率明显大于其他相邻盖度风蚀量的减少
率。0~23 cm 高度内收集到的风蚀物占整体风蚀量的 70% 以上。[结论] 羊草地的产流和产沙特征与盖
度有密切关系, 随着羊草盖度的逐渐增加, 产流量和产沙量逐渐减小; 羊草地的风蚀速率与盖度呈负相关
关系, 与风速呈正相关关系。

关键词: 羊草; 盖度; 水土流失; 人工降雨; 风洞

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0022-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 李龙, 郝明德, 肖庆红, 等. 不同盖度羊草地对水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36
(2): 22-27. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.005

Effects of *Leymus Chinensis* Grassland Coverage on Soil and Water Loss

LI Long¹, HAO Mingde^{1,2}, XIAO Qinghong³, GUO Shengan⁴, LIU Gongshe⁵

(1. College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Ningxia Comprehensive Agricultural Development Office, Yinchuan, Ningxia

750011, China; 4. Ningxia Yanchi County Agricultural Comprehensive Development Office, Yanchi, Ningxia

751500, China; 5. Key Laboratory of Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: [Objectives] The relation between community coverage of *Leymus chinensis* and yields of runoff and sediment were explored to provide references for the control of soil and water loss in those grassland which is dominated by *Leymus chinensis*. [Methods] Experiments using artificial rainfall and wind tunnel were conducted to study the yield of runoff and sediment and the resistance to wind erosion of five cover scales of *Leymus chinensis* grassland. [Results] At certain slope degree, the runoff-yielding time was delayed when the cover scale gradually increased. The accumulated decreasing rate of runoff yield loss was less than the corresponding one of sediment yield loss. When *Leymus chinensis* community coverage increased from 20% to 100%, the wind erosion amount decreased by 96.78%; When *Leymus chinensis* community coverage increased from 60% to 80%, the relative decreasing amount of wind erosion loss was the largest in comparison with the ones of other adjacent communities. The wind erosion amount collected by the sand sampler in 0~23 cm height account for more than 70% of the total amount of wind erosion. [Conclusion] The runoff and sediment yields of *Leymus chinensis* land were correlated closely with cover. I. e., with the increase of cover, the accumulated runoff and sediment yield showed a trend of declining. It showed a negative correlation

收稿日期: 2015-03-17

修回日期: 2015-06-02

资助项目: 国家科技支撑计划项目“黄土高原旱区增粮增效潜力与提升技术研究”(2015BAD22B01-01-04); 宁夏农业综合开发科技推广项目 [NTKJ-2013-03-(1)]

第一作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 研究方向为农田水土保持研究。E-mail: lilong8580@163.com。

通信作者: 郝明德(1957—), 男(汉族), 陕西省华县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事农田生态系统生产力研究。E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn。

between the amount of wind erosion and *Leymus chinensis* cover scale and a positive correlation between the amount of wind erosion and wind speed.

Keywords: *Leymus chinensis*; cover degree; soil and water loss; artificial rainfall; wind tunnel

羊草作为欧亚大陆草原区东部草甸草原及干旱草原上的重要建群种,在防止水土流失,改善生态环境方面具有很大的潜力,其根茎穿透侵占能力很强,且能形成强大的根网,盘结固持土壤作用很大,是很好的水土保持植物^[1],对于改善草原生态环境和治理荒漠化土地意义重大。植被对降雨侵蚀的影响具有不可忽视的作用,植被覆盖可以降低雨滴动能,增加土壤入渗,分散或消除坡面上方袭来的股流,增加径流运动阻力,削弱径流侵蚀能力,进而有效的减少径流量和侵蚀量^[2-6]。退耕建植草地可以明显减轻土壤风蚀程度,并有利于土壤在雨季对降水的蓄积^[7-10]。羊草根茎发达,根茎上具有潜伏芽,有很强的无性更新能力,早春返青早,生长速度快,秋季休眠晚,生育期可达 150 d 左右,生长年限长达 10~20 a,可以长时间保护土壤表面不被侵蚀。对草地的水土保持作用而言,起关键作用的是草地的有效盖度^[11-13],因而中国一直以来以草地的有效盖度来评价草地的水土保持功能^[14-19]。由于不同学者研究角度、研究方法和研究对象的不同,研究结果有一定局限性,研究结论也有很大的差异,因此学术界对于羊草盖度与产流产沙量和风蚀量的关系尚未形成统一的认识。为了深入研究羊草盖度与产流产沙量和风蚀量关系,本研究通过人工降雨试验和风洞试验,分析不同盖度羊草地的产流产沙特征和风蚀特征,探讨不同盖度羊草地的水土保持效应,以期对羊草种植区水土流失防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验布设

模拟降雨试验所用土槽规格为:长×宽×高=2.00 m×0.50 m×0.32 m 的坡度可调式钢槽,坡度调节范围为 0~30°,土槽下端设有集流装置,用以采集径流和泥沙样品。风蚀试验所用的土槽规格为:长×宽×高=1.25 m×1.00 m×0.12 m,供试土壤为风沙土的耕层土壤,土样进行风干后分级过筛,按照一定的土粒级配置混合均匀后分层装土,每次填土深度 5 cm,控制土壤容重为 1.31 g/cm³。种草时间为 4 月上旬,草种为中科院植物所培育出“中科 2 号羊草”,种植时采用行播,保证每个土槽的种植密度一致,在出苗 1 个月 after 按照试验设计冠层盖度进行定苗,在试验开始前采用方格法^[20]进行剪苗,保证羊草的冠层盖度达到试验要求。

1.2 试验设备

降雨试验于黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅进行,采用喷头高度为 16 m 的侧喷式自动模拟降雨系统,雨滴降落终速可以达到天然降雨雨滴降落终速的 98% 以上,降雨均匀度大于 80%。该降雨系统的降雨强度可调范围为 20~200 mm/h,通过调节回水压力和 4 个阀门可以产生 14 种组合^[21]。风蚀试验于中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室内风洞进行,风洞全长 19.8 m,高 1.2 m,宽 1 m,由动力段、调风段、整流段、试验段和集沙段五个主要部分组成。风洞主要截面宽 1 m,高 1.2 m,风机出口段截面直径 1.4 m。通过配套的变频器 0~50 Hz 调节风速,风速可在 0~20 m/s 内连续均匀地调节。在试验段前 30 cm 处设置不同高度的涡轮式风速仪,集沙段设置集沙仪收集不同高度的风蚀物。

1.3 试验设计

降雨试验以羊草的冠层盖度为研究因子设盖度分别为 20%,40%,60%,80% 和 100% 这 5 个处理。每场降雨重复 1 次,分别设 5°,10°,15° 共 3 个坡度,目标雨强 90 和 120 mm/h,每场降雨持续 50 min。在降雨前控制土壤含水量在 12% 左右,降雨时对雨强进行率定,以保证统一的雨强和开度。降雨结束后,测定径流量和产沙量。

风蚀试验以羊草的冠层盖度为研究因子分别设盖度 20%,40%,60%,80% 和 100% 这 5 个处理。试验前控制土壤含水量在 2% 以下,调整控制风机转速的通用变频器的额定频率,待风速达到试验要求时再开始试验,试验风速为 6,8,10,12 和 14 m/s,试验统一进行 10 min 的吹蚀,每次试验重复 1 次,采用集沙仪对 0~62 cm 高度风蚀物进行收集,各层高度依次为 0~10 cm,13~23 cm,26~36 cm,39~49 cm 和 52~62 cm,集沙仪入口的规格为 10 cm×3 cm。吹蚀结束后用精度为 0.01 的电子天平对集沙仪的收集量进行称量。

2 结果与分析

2.1 不同羊草盖度对土壤水蚀的影响

2.1.1 羊草盖度对初始产流时间的影响 相同坡度和雨强下,地表径流的产生随羊草盖度的增加而减缓,羊草盖度越大,产流时间越晚;相同盖度和雨强

下,产流时间随着坡度的增加而逐渐加快;相同盖度和坡度下,产流时间与雨强呈现负相关关系(图 1)。由图 1 可以看出,羊草盖度为 100%、坡度 5°及雨强为 90 mm/h 时,产流时间最晚,相比产流时间最快的处理延迟了 628 s。羊草盖度越大,产流时间滞后幅度越大,当雨强为 90 mm/h 时,与盖度为 20%相比,盖度 40%产流时间平均滞后 48.90%,盖度 100%平均滞后 3.15 倍;当雨强为 120 mm/h 时,与盖度为 20%相比,盖度 40%产流时间平均滞后了 30.46%,盖度 100%平均滞后 2.58 倍。坡度越大,产流时间越快,当雨强为 90 mm/h 时,与 5°坡度相比,10°坡度下产流时间平均加快 14.00%,15°坡度下产流时间平均加快 36.48%;当雨强为 120 mm/h 时,10°坡度

下产流时间比 5°坡度下平均加快 19.13%,15°坡度下平均加快 38.86%。雨强越大,产流时间越快,当盖度为 20%时,90 mm/h 雨强下长流时间平均为 196 s,比 120 mm/h 雨强下减缓 18.03%,当盖度为 100%时,90 mm/h 雨强下产流时间比 120 mm/h 雨强下减缓 44.29%。由此可知,羊草盖度、坡度、雨强是影响产流时间的重要因素,羊草盖度越大、坡度越小、雨强越小,产流时间越慢,这主要是由于,随着羊草盖度的逐渐增加,羊草根层和枝叶对降雨雨滴的截流作用逐渐增大,增加了土壤水分的入渗作用;坡度越大,坡面径流的势能越大,土壤水分的入渗越小,雨强越大,短时间内到达土壤表面的雨量越大,土壤表面水分达到饱和的时间越短,因而产流时间越快。

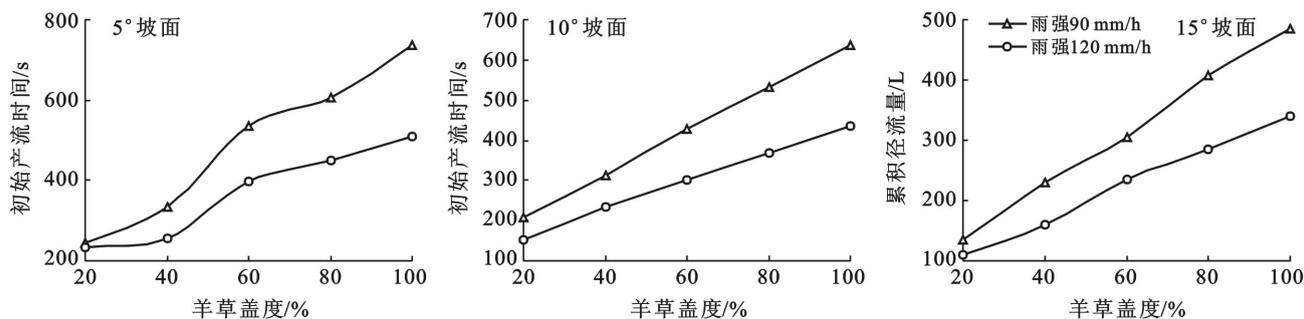


图 1 不同坡度下羊草盖度对初始产流时间的影响

2.1.2 不同羊草盖度对累积径流量的影响 累积径流量指的是在某个时间段内通过某一过水断面的径流总量,径流是水循环的主要环节,径流量是陆地上最重要的水文要素之一,是水量平衡的基本要素,是研究水土保持效应的重要参考因子。累积径流量随着羊草盖度的逐渐增加而逐渐减少,坡度越大,累积径流量越小(图 2)。由图 2 可以看出,羊草盖度越大,减流效应越明显。当羊草盖度为 20%时,累积径流量平均为 60.14 L,盖度为 40%时平均减少 13.87%,盖度 100%时平均减少 43.94%。随着坡度的逐渐增加,累积径流量迅速增加。与 5°坡度相比,10°坡度下累积径流量平均增加 9.06%,15°坡度下平均增加 25.24%。雨强越大,累积径流量越大。当雨强由 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,累积径流量平均增加了 41.35%。由此可知,羊草盖度、坡度、雨强均可影响累积径流量。羊草盖度的增大伴随着植被冠层密度的增大和根层密度的增大,冠层密度的增大,有效的减小了雨滴的动能,使雨滴对土壤表面的冲击力减小,加之根层截流作用的增强,促使到达土壤表面的雨滴有充分的时间入渗,进而有效减少了累积径流量;随着坡度的增加,坡面水流的势能逐渐增大,水流的流速逐渐增大,水分无法有效入渗至土壤深层,过

多的水分变成径流流失,累积径流量变大;雨强的增大促使短时间内到达土壤表面的雨水迅速增多,土壤表面迅速达到饱和,形成一个饱和层,阻止了水分的入渗,后面到达表层的水分绝大多数变成了径流流失,所以累积径流量随着雨强的增大明显增大。

2.1.3 不同羊草盖度对累积产沙量的影响 累积产沙量指的是某一时间段内被侵蚀的土壤经过输移过程中的冲淤变化,到达流域出口断面的泥沙数量。径流侵蚀过程中的产沙是由径流的挟带而发生的,所以说累积产沙量与累积径流量有直接的关系,因而影响累积径流量的因素均可影响累积产沙量。羊草盖度越大,累积产沙量越大,累积产沙量还受雨强和坡度的影响(图 3)。由图 3 可以看出,羊草盖度为 20%,雨强 120 mm/h,坡度 15°时累积产沙量最大,羊草盖度为 100%,雨强 90 mm/h,坡度 5°时累积产沙量最小,前者是后者的 8.51 倍。羊草盖度为 20%时,累积产沙量平均为 419.30 g,盖度为 40%,60%,80%和 100%时,分别减少 24.92%,44.25%,55.76%和 61.22%,由此可知,当羊草盖度增加时,累积产沙量逐渐减少,当羊草盖度由 80%增加到 100%时,累积产沙量的减少幅度最小,这说明当羊草盖度增加到一定程度时,羊草盖度对累积产沙量的影响逐渐减小。

当坡度由 5° 增加到 10° 时, 累积产沙量仅增加 17.56%, 而当坡度由 10° 增加到 15° 时, 累积产沙量等增加幅度迅速攀升至 29.30%, 这说明在一定坡度范围内, 累积产沙量的增加率逐渐增大。当雨强为 90 mm/h 时, 累积产沙量平均为 182.25 g, 雨强为 120 mm/h 时增加了 88.83%。随着羊草盖度的增加, 一方面羊草冠层对雨滴的阻挡有效的减少了雨滴

对土表的击溅作用, 另一方面根层密度的增加可以增强根部固结土壤的能力, 增加土壤的抗蚀能力, 两方面的综合作用使累积产沙量逐渐减少; 坡度主要是通过对径流的影响来影响累积产沙量; 雨强的增加, 一方面增加了坡面径流, 另一方面雨滴动能的增加使土壤表面的溅蚀作用增强, 进而累积产沙量逐渐增大。

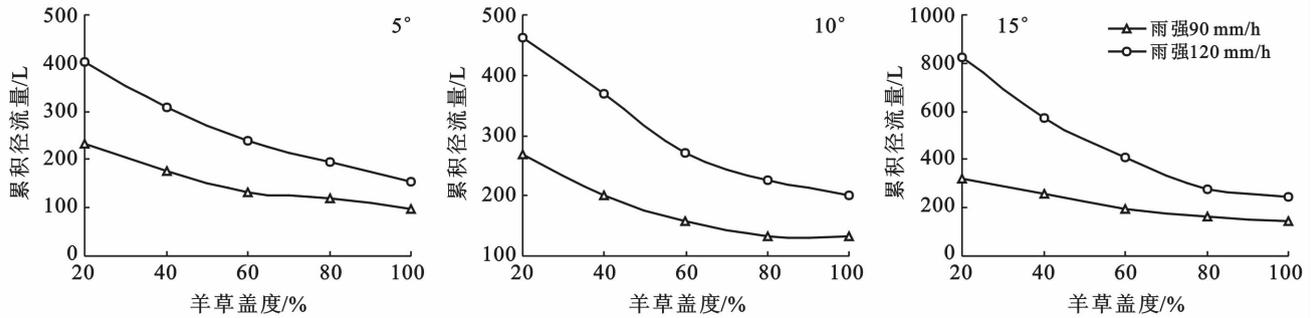


图2 不同坡度下羊草盖度对累积径流量的影响

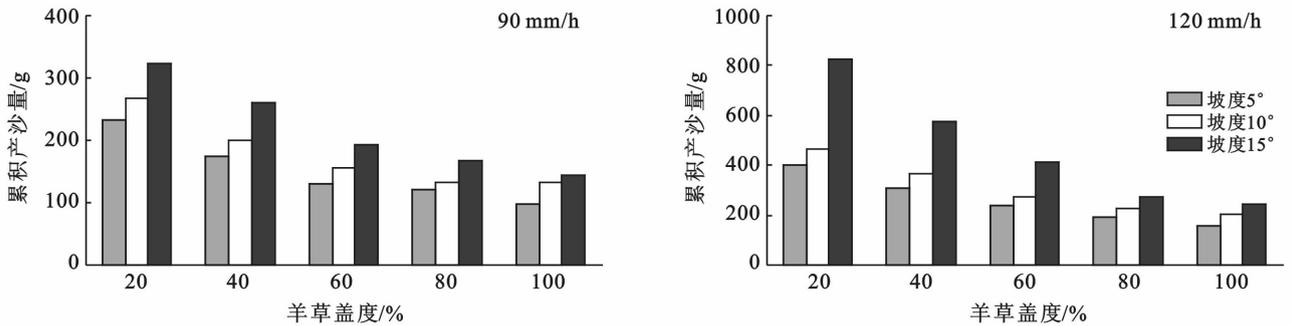


图3 不同雨强下羊草盖度对累积产沙量的影响

2.2 不同羊草盖度土壤风蚀的影响

2.2.1 羊草盖度对风蚀量的影响 由表1可以看出, 在相同风速下, 随着羊草盖度的逐渐增大, 风蚀量逐渐减小; 相同盖度下, 随着风速的逐渐增大, 风蚀量明显增大。羊草盖度为 20%、风速为 14 m/s 时, 风蚀量最大, 当羊草盖度为 100%、风速为 6 m/s 时, 风蚀量最小, 仅为 2.95 g。当羊草盖度为 20% 时, 风蚀量平均为 478.17 g, 羊草盖度为 40%, 60%, 80% 和 100% 时, 减蚀率分别为 42.27%, 73.52%, 96.18%, 96.78%。当风速为 6 m/s 时, 风蚀量平均为 6.19 g, 随着风速的逐渐增大, 风蚀量逐渐增大, 风速为 14 m/s 时, 风蚀量达到最大, 增加到 520.42 g。风蚀量的产生主要是取决于土粒获得动能的大小, 土粒获得的动能越大, 风蚀量就越大, 土粒获得的动能越小, 风蚀量则越小。羊草盖度的增加使土壤表层受到保护的面积随之增加, 与侵蚀气流发生直接作用的面积则相对减少, 也就是更少的土壤颗粒会因为和气流发生直接作用而获得足够动能并产生运移, 因此捕获到的

风蚀物的量便会减少; 风速的增大会使土粒获得的动能逐渐增大, 所以风蚀量会明显增加。

表1 羊草盖度对土壤风蚀量的影响

盖度/%	风速/(m·s ⁻¹)				
	6	8	10	12	14
20	11.57	39.97	311.28	691.84	1 336.19
40	9.09	26.68	151.69	368.94	823.69
60	4.39	13.54	88.39	167.98	358.91
80	2.96	3.34	13.38	24.95	46.67
100	2.95	3.14	13.08	21.08	36.64

2.2.2 羊草盖度对风沙流结构的影响 通过称量风洞集沙段 0~62 cm 范围内各层集沙仪的风蚀物收集量, 分析可得出各种处理措施下的风沙流分布规律, 即风沙流结构, 也就是气流搬运风蚀物在搬运层中随高度的分布情况。风沙土的可蚀性颗粒量非常多, 其中极细砂粒的比重就有 45%~50% 左右, 由于其沉降速度通常小于气流向上的分速度, 所以很可能上

会以悬浮形式运动,加之作羊草枝叶不仅可以起到拦截蠕移颗粒和一部分跃移颗粒的作用,还对扬沙有一定的助长作用,即悬移颗粒的搬运高度会因此而有所增加,这就成了上层集沙仪收集量的沙源。风沙土 0~10 cm 层集沙仪的风蚀量占整体输沙比例的 30.85%~40.77%,13~23 cm 层集沙仪的风蚀量占整体输沙比例的 32.16%~39.05%,这两层集沙仪风蚀量较接近,但 0~10 cm 的风蚀量略高于 13~23 cm 的风蚀量,且明显高于其他各层的风蚀量(表 2)。在风力的作用下风沙土的蠕移颗粒最多,进入到 0~10 cm 高度的集沙仪,蠕移颗粒和大部分跃迁颗粒进入到 13~23 cm 高度的集沙仪,因此在 0~23 cm 高度的集沙仪收集到的风蚀土粒在整体输沙量中占有 70%以上的比例,而 23 cm 以上高度的集沙仪中只能收集到一小部分的跃迁颗粒。

表 2 研究区不同盖度羊草地风沙流结构

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	集沙仪 高度/cm	不同盖度下风沙流特征值				
		20%	40%	60%	80%	100%
6	0~10	37.60	36.74	40.77	34.46	37.97
	13~23	37.25	37.29	36.22	38.85	37.63
	26~36	19.53	20.79	16.63	19.59	18.31
	39~49	3.80	3.41	3.87	4.39	3.73
	52~62	1.82	1.76	2.51	2.70	2.37
8	0~10	35.00	34.03	38.40	32.63	33.44
	13~23	34.98	32.16	35.75	37.72	37.58
	26~36	16.24	19.90	20.53	19.16	18.79
	39~49	8.46	8.73	3.25	6.89	6.69
	52~62	5.33	5.17	2.07	3.59	3.50
10	0~10	37.59	34.10	36.47	36.77	37.39
	13~23	36.93	38.35	37.81	37.59	38.00
	26~36	19.78	21.04	19.78	20.10	19.42
	39~49	3.72	4.11	3.74	3.44	2.98
	52~62	1.97	2.41	2.19	2.09	2.22
12	0~10	30.85	36.69	32.62	32.75	33.73
	13~23	36.40	37.59	39.05	34.83	34.35
	26~36	20.91	20.59	19.51	17.11	17.46
	39~49	6.58	3.08	5.62	9.06	9.20
	52~62	5.26	2.05	3.20	6.25	5.27
14	0~10	34.14	36.77	35.36	35.80	35.75
	13~23	37.15	38.41	37.25	36.02	35.64
	26~36	19.76	19.42	19.37	15.71	14.41
	39~49	4.88	3.23	4.82	8.25	8.52
	52~62	4.07	2.17	3.21	6.36	5.68

注:所列风沙流特征值为相应盖度和风速下该层风蚀量占总体风蚀量的比例。

3 讨论

坡地水蚀主要是由于坡地径流的挟沙作用引起的,而坡地径流的产生与降雨入渗密切相关,产流的机理主要有 3 种:超渗产流、蓄满产流以及两者混合

起来的产流理论。在黄土高原地区,由于地下水埋藏深,常为超渗产流,因而有效的减少超渗产流就可以有效的控制风沙土的水土流失。羊草地在干旱、半干旱地区保水保土的作用有着重要的意义,其较强的根茎穿透能力和强大的生命力更可为干旱、半干旱地区的水土保持提供有力的保障。研究表明,草地覆盖度达到 80%以上时,其减沙效益平均可达到 70%~80%^[22],这与本研究结果相似,这主要是由于在羊草地盖度达到 60%~80%时,其枝叶和根茎都很密集,一方面可以减小雨滴对地面的直接击溅作用,控制土壤侵蚀过程开始阶段的“溅蚀”;另一方面其须根系非常发达,表层土壤的有机质含量较高,从而提高了土壤的持水、保水能力和入渗速率,两方面的综合作用极大的提高了土壤的抗蚀性。

风蚀主要发生在干旱、半干旱气候区和遭受周期性干旱的湿润地区,土壤风蚀的严重性是由风速、地表土壤物理特性、地表覆盖及粗糙度状况决定的。在羊草种植地区提高羊草地的盖度可以改善土壤的物理特性,增加植物对地表的保护作用,进而有效的减少土壤风蚀的风蚀效应。研究表明,同一中心风速下,空气动力学粗糙度和摩阻速度随植被盖度的增大而增大,不同风速下土壤风蚀量随植被盖度的增加而降低^[23]。当羊草盖度小于 60%时,可能是由于粗糙度和摩阻速度随羊草盖度的逐渐增大而迅速增大,进而风蚀量迅速减小;当羊草盖度大于 80%时,粗糙度和摩阻速度随羊草盖度的逐渐增大没有明显变化,因而风蚀量减小不明显。

4 结论

(1) 模拟降雨条件下,随羊草盖度的增加初始产流逐渐延后;坡度越大,产流时间越快;雨强越大,产流时间越快。当羊草盖度小于 60%时,盖度对产流时间的影响相对较小,羊草盖度为 100%时,产流时间最慢。坡度为 5°时,产流时间最慢,随着坡度的逐渐增加,产流时间的增加率逐渐增大。

(2) 相同坡度下,随羊草盖度的增加,累积径流量和产沙量呈持续减少的趋势。坡度和雨强同样是影响累积径流量和产沙量的重要因素。盖度为 20%时,平均累积产流量和产沙量最小,盖度为 40%时平均减少 13.87%和 24.92%,盖度为 100%时平均较少 43.94%和 61.22%,随着盖度的增加,累积产流量的减少率小于累积产沙量的减少率。

(3) 风蚀量与羊草盖度呈正比,与风速呈反比,当羊草盖度增加 20%时,羊草盖度从 60%增加到 80%时风蚀量的减少率最大,由此可知,羊草抵抗风

蚀的临界盖度介于60%~80%。0~23 cm高度的集沙仪收集到的风蚀物主要是由蠕移颗粒和大部分的跃迁颗粒组成,这一高度内收集到的风蚀物占整体风蚀量的70%以上。

[参 考 文 献]

- [1] 洪光宇. 退化草原羊草种群根系形态特征对水分与氮素梯度的响应[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [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] 罗伟祥. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报,1990,4(1):30-35.
- [4] 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,2001,11(3):176-182.
- [5] 马志林. 三峡库区坡耕地水土流失特征及防治效应研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [6] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1):74-80.
- [7] 韩永伟,韩建国,张蕴薇,等. 农牧交错带草地植被的水土保持作用研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):24-28.
- [8] 董治宝,陈渭南,李振山,等. 风沙土水分抗风蚀性研究[J]. 水土保持通报,1996,16(2):17-23.
- [9] 黄富祥,牛海山,王明星,等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报,2001,56(6):700-710.
- [10] 王翔宇,赵名彦,丁国栋,等. 天然灌草植被防治土壤风蚀机理[J]. 水土保持通报,2008,28(5):55-59.
- [11] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖度及其确定方法的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):67-72.
- [12] 焦菊英,王万中,李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J]. 植物生态学报,2000,24(5):8-12.
- [13] 张光辉,梁一民. 论有效植被盖度[J]. 中国水土保持,1996(5):28-29.
- [14] 韦红波,李锐,杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [15] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报,2006,26(9):137-143.
- [16] 王光谦,张长春,刘家宏,等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究,2006(2):10-16.
- [17] 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,2008,28(6):68-73.
- [18] 罗伟祥,白立强,宋西德,等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报,1990,4(1):32-37.
- [19] 张光辉,梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. 水土保持研究,1996,3(2):104-110.
- [20] 关法春,梁正伟,王忠红,等. 方格法与数字图像法测定盐碱化草地植被盖度的比较[J]. 东北农业大学学报,2010,54(1):130-133.
- [21] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报,2000,20(4):27-30.
- [22] 勃海锋. 模拟降雨条件下人工苜蓿和柠条群落对产流、产沙的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [23] 赵永来. 利用移动式风洞测试评估植被盖度对土壤风蚀的影响[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
- [9] Gui Dongwei, Lei Jiaqiang, Zeng Fanjiang, et al. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands: A case study of the Cele Oasis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11): 1306-1311.
- [10] Jim C Y. Physical and chemical properties of a Hongkong roadside soil in relation to urban tree growth[J]. Urban Ecosystems, 1998, 2(2/3): 171-181.
- [11] Li Qian, Ji Hongbing, Qin Fei, et al. Sources and the distribution of heavy metals in the particle size of soil polluted by gold mining upstream of Miyun Reservoir, Beijing: Implications for assessing the potential risks [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(10): 6605-6626.
- [12] 李月辉,胡远满. 道路生态研究进展[J]. 应用生态学报,2003,14(3):447-452.
- [13] 宗跃光,周尚意,彭萍,等. 道路生态学研究进展[J]. 生态学报,2003,23(11):2396-2405.
- [14] Klute A. Methods of soil analysis(Part 1): Physical and Mineralogical Methods[M]. American Society of Agronomy, Inc., 1986: 363-375.
- [15] 韩立发,刘亚龙. 试论沉降法测定颗粒粒度及其分布[J]. 水泥工程,2005(6):19-21.
- [16] 章明奎,姜宏. 用微量吸管法测定红壤颗粒组成的研究[J]. 浙江大学学报,2001,27(6):649-6511.
- [17] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 185-194.
- [18] Wu Wei, Xie Deti, Liu Hongbin. Spatial variability of soil heavy metals in the three gorges area: Multivariate and geostatistical analyses[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(1/4):63-71.

(上接第21页)