

文章编号: 1008-2786-(2018)5-731-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000369

金沙江干热河谷区坡面剑麻的水土保持效应

何周窈^{1,2}, 苏正安^{1*}, 熊东红¹, 王 勇³, 杨鸿琨^{1,4}

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

2. 四川农业大学 林学院, 成都 611130; 3. 四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014;

4. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500)

摘 要: 为查明剑麻的水土保持效应, 以金沙江干热河谷作为研究区域, 通过径流小区定位观测法, 分别观测了 10° 和 20° 坡面上种植剑麻的产流产沙特征。结果表明: (1) 元谋县 2014—2016 年, 年均降雨量为 659.46 mm, 年均降雨天数为 82 天。(2) 三年间 10° 剑麻地和裸地平均径流深分别为 101.91 ± 7.56 mm 和 236.70 ± 9.06 mm, 剑麻地比裸地减少 56.95%; 20° 剑麻地和裸地平均径流深分别为 152.78 ± 8.12 mm 和 252.20 ± 10.47 mm, 剑麻地比裸地减少 39.42%。(3) 2014—2016 年, 10° 剑麻地平均径流系数仅为 0.23 ± 0.17 , 裸地为 0.50 ± 0.17 , 剑麻地比裸地减少了 54.00%; 20° 的剑麻地与裸地平均径流系数分别为 0.36 ± 0.16 和 0.53 ± 0.17 , 两者相比减少 32.08%。综上所述, 剑麻不仅拥有明显的拦沙作用, 其截流效应也十分显著, 在金沙江干热河谷区表现出良好的水土保持效应。(4) 观测期间 10° 坡面上剑麻地和裸地的平均土壤侵蚀模数分别为 355.27 ± 31.86 t/(km²·a) 和 1788.68 ± 153.11 t/(km²·a), 剑麻地相比裸地减少 80.14%; 20° 坡面上剑麻地平均土壤侵蚀模数为 2023.29 ± 189.22 t/(km²·a), 裸地为 4506.14 ± 362.70 t/(km²·a), 两者相比减少 55.10%。

关键词: 干热河谷; 剑麻; 产流产沙; 径流系数; 水土保持效应

中图分类号: S154

文献标志码: A

金沙江干热河谷位于长江上游, 属于较早利用的山地农业区, 也是我国生态环境最脆弱, 水土流失最严重的地区之一^[1]。强烈的水土流失造成本区域产生大量泥沙, 影响下游水库等水利设施的安全和库容, 严重威胁村庄和道路的安全。同时该区域土层厚度大, 土壤结构性差, 在雨季容易形成地表径流, 加速冲沟发育^[2], 加之干热的气候环境, 使得金沙江干热河谷的生态环境日益恶劣, 植被恢复工作遭遇极大挑战。目前, 为解决该区所面临的严峻生

态环境问题, 国内外学者开展了大量关于人工造林方式、土地利用方式变化、乡土植物利用等对减缓土壤侵蚀速率影响的研究, 并在探究干热河谷区生态退化过程和机制等方面取得了丰厚的研究成果^[3-8], 但对一些适生物种的截流拦沙等方面的生态效益缺乏长期定量的科学监测。

剑麻 (*Agave americana*) 作为一种热带植物, 适应性强、用途广, 其纤维具有耐盐碱、弹性大等特点, 多用来制作各种工业用品和生活用品, 内含的剑麻

收稿日期 (Received date): 2018-01-26; **改回日期** (Accepted date): 2018-07-13

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划 (2017YFC0505102); 国家自然科学基金 (41401313, 41571267, 41701324); 国家重大基础研究项目 (973 项目) (2015CB452704)。[National Key Research and Development Program of China (2017YFC0505102); National Natural Science Foundation of China (41401313, 41571267, 41701324); National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (2015CB452704)]

作者简介 (Biography): 何周窈 (1994—), 女, 四川雅安人, 硕士研究生, 主要研究方向为植被恢复和生态效益。[HE Zhouyao (1994—), female, born in Ya'an, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on vegetation restoration and ecological efficiency] E-mail: thezhouyao@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 苏正安 (1980—), 男, 四川江油人, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。[SU Zheng'an (1980—), male, born in Jiangyou, Sichuan province, Ph. D., M. Sc. supervisor, research on soil erosion and soil and water conservation] E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

皂素等可用于抗癌药物的合成,而剑麻残渣可作饲料肥料^[9-12],具有较高的经济价值。此外,王春雪等人研究发现剑麻在干旱胁迫下,叶片叶绿素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活力都有一定程度的增加,叶片含水量则有一定程度地降低^[9]。这些特性使得剑麻能够适应干热河谷严酷的气候条件,促进当地的经济发展。

目前,国内学者对剑麻的研究主要集中在各成分的利用、病虫害防治、快繁体系的建立及基因改良^[9-12]等方面;而在干热河谷区开展的关于剑麻的研究则主要集中于优良品种的筛选、栽种季节、密度、整地方式、施肥水平等实用技术的完善以及生理指标的相关性分析和抗旱性评价^[2,13,14]等,对剑麻的生态效益的研究则仅限于对土壤理化性质的改善,对其水土保持效应的研究则较少。因此,本研究主要利用金沙江干热河谷区 2014—2016 的定位监测数据,监测天然降雨下剑麻的水土保持效应,这对以后利用剑麻治理金沙江干热河谷水土流失具有积极意义,更为金沙江干热河谷生态系统的恢复与重建提供了切实可行的科学依据。

1 试验材料与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于云南省楚雄彝族自治州元谋县(101°48'48"~101°49'54"E, 25°50'30"~25°51'18"N)。该区海拔介于 1067~1138 m,地处青藏高原东部的过渡区,属低纬度亚热带至北热带半干旱高原季风气候,日照充足,光能资源丰富^[15]。地势大致南高北低,山脉、盆地、丘陵、河谷等纵横交错,形成“筲箕凹”地形,境内最高海拔 2835.9 m,最低海拔 898 m,相对高差 1937.9 m^[15]。元谋干热河谷区为典型的类热带稀树灌丛草被景观^[16],年均气温 21.9℃,年日照时数 2670.4 小时,多年平均降雨量 626 mm,年均潜在蒸发量 3911 mm,约为降雨量的 5 倍^[17];主要土壤类型是燥红土,土壤砂粒含量较高,容重稍高^[16];乡土植被以扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、旱茅(*Eremopogon delevayi*)、孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)等多年草本植物为主,余甘子(*Phyllanthus emblica*)、仙人掌、山合欢(*Acacia farnesiana*)、铁橡栎(*Quercus cocciferoides*)、木棉(*Gossampinus malabarica*)、酸角(*Tamarindus*

indica)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)等灌、乔木稀疏分布,植被覆盖度低,仅为 5.2%^[18]。

1.2 研究方法

本研究的实验区位于中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所与云南省农科院共建的元谋沟蚀崩塌试验站(101°49'25"E, 25°51'03"N),该试验站位于金沙江干热河谷内具有典型性和代表性的元谋县。

本实验采用野外径流小区定位观测法。为了最大程度地消除土壤的空间异质性,本研究选择试验场地内的同一坡面,在 10°坡面的小区上设置六个试验小区和两个对照小区,在 20°的坡面设置三个试验小区和一个对照小区。在试验小区种植剑麻,剑麻株高 60 cm,行距 1 m,株距 80 cm,盖度 >50%,种植时间在 2013 年。对照地不种植任何作物,保持其盖度 <5%。每个小区垂直投影面积为 2.5 m × 10 m。为阻止地表径流进出小区,周边设置围埂,围埂高出地表 30 cm,埋深 45 cm,用混凝土砖块砌成^[19]。每个小区出口处设置一个 1.2 m × 1 m 径流池收集径流和泥沙,详见图 1。池壁上安装有水尺,每次降雨后,可直接读出水深并计算地表径流量;采用 1000 ml 径流瓶在径流池中取径流泥沙样品,每次取三个重复样。降雨数据采用 Vantage Pro2 有线自动气象站进行观测。小区管理方法均按《水土保持试验规范 SD239-1987》标准进行^[19]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 10 进行均值配对分析和相关性分析,采用 Origin 8 进行绘图。



图 1 10°坡面径流小区概况

Fig. 1 Overview of runoff plot of 10°

2 研究结果

2.1 元谋县降雨特征及变化

从表 1 可以看出,元谋县 2014—2016 年降雨量分别为 589.40、650.80、738.19 mm,年平均降雨量为 659.46 mm,三年来降雨量呈逐渐增加的趋势。但降雨天数总体变化却不显著,2014—2016 年总降雨天数分别为 78、85、84 天,年平均降雨天数为 82 天。

如表 1 所示,元谋县月降雨量最大值出现在 2014 年的 7 月、2015 年的 8 月和 2016 年的 9 月,分别为 230.00、211.00、235.38 mm,降雨的高峰月一年比一年晚。整体来看,降雨主要集中在 6—10 月,极端暴雨也出现在该段时间,其他时段的降雨量较少。2014—2016 年 6—10 月份的降雨量分别为 557.00、512.80、683.61 mm,占全年的 94.50%、78.80%、92.60%;2014—2016 年 6—10 月降雨天数分别为 62、60 和 68 天,均占全年降雨天数的一半以上。由此可见,该地区降雨量在年内分配不均匀,适应性较差的植物难以存活,生态恢复难度较大,需种植耐热、耐旱,且适应性强的植物来防止水土流失。

2.2 坡面产流及径流系数的动态变化

从图 2 可知,剑麻在坡面上的保水效果非常显

著。2014—2016 年间,10°坡面上,剑麻地的径流深分别为 118.42 mm、116.87 mm、70.43 mm,年均径流深为 101.91 ± 7.56 mm;裸地的分别为 213.51 mm、249.40 mm、247.10 mm,年均径流深为 236.70 ± 9.06 mm;对比剑麻地和裸地的产流量可以发现,两者产流依次减少了 44.54%、53.14%、71.50%;2014 年两者的产流相差最小,2016 年相差最大;三年间,剑麻地的平均径流深比裸地的减少了 56.95%。在 20°的坡面上,剑麻地径流深分别是 153.76、180.99、138.32 mm,平均径流深为 152.78 ± 8.12 mm;裸地的径流深依次为 235.00、261.60、260.10 mm,平均径流深为 252.20 ± 10.47 mm;剑麻地的径流深相比裸地分别减少了 34.57%、30.81%、46.82%,平均减少了 39.42%。此外,通过对剑麻地和裸地的产流进行配对方差分析发现两者之间差异性显著($P < 0.01$),详见表 2。以上结果表明,在缓坡上种植剑麻可有效减少地表径流的形成,并且剑麻的截流效应随其种植时间的增加而效果愈加显著。其次,10°坡面剑麻地的产流量相比 20°剑麻地的产流量减少 33.30%,由此可见,剑麻的截流效果受坡度的影响,在 10°坡面上的截流效应成效显著,在 20°坡面上效果相对较差。

如图 3 所示,剑麻可以有效拦截地表径流,从而减少径流系数。2014—2016 年,在 10°坡面上,剑麻地的径流系数分别是 0.29 ± 0.03 、 0.25 ± 0.03 、

表 1 2014—2016 年研究区降雨情况表

Tab. 1 Rainfall of study area from 2014 to 2016

时间/月	2014		2015		2016	
	降雨量/mm	降雨天数/d	降雨量/mm	降雨天数/d	降雨量/mm	降雨天数/d
1	5.80	3	56.40	7	0.00	0
2	2.20	3	0.20	1	10.40	4
3	1.60	2	34.60	2	0.60	1
4	0.20	1	17.60	5	1.20	2
5	6.20	3	13.40	3	9.14	3
6	120.40	15	57.80	8	81.90	11
7	230.00	22	119.00	20	205.97	16
8	109.20	11	211.00	18	102.50	14
9	66.00	7	54.80	7	235.38	17
10	31.40	7	70.20	7	57.86	10
11	8.40	2	9.20	2	29.44	4
12	8.00	2	6.60	5	3.80	2
总计	589.40	78	650.80	85	738.19	84

表2 2014—2016年裸地与剑麻地产流配对方差分析结果

Tab.2 Analysis of paired variance of the runoff depth in the bare land and *Agave americana* land from 2014 to 2016

配对项	成对差分					<i>t</i>	<i>N</i>	<i>P</i> 值
	均值	标准差	均值的标准误	差分的 95% 置信区间				
				下限	上限			
10°裸地－10°剑麻地	6.15650	5.17151	0.81769	4.50257	7.81043	7.529	39	0.001
20°裸地－20°剑麻地	5.00713	4.09738	0.64785	3.69672	6.31754	7.729	39	0.001

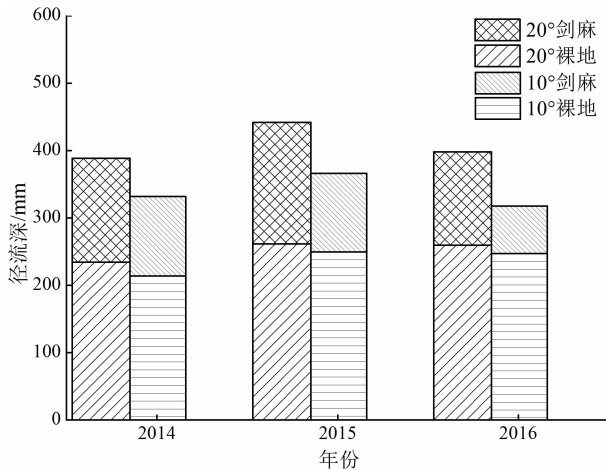


图2 裸地与剑麻地年径流深对比

Fig.2 Comparison of runoff depth in the bare land and *Agave americana* land during 2014 to 2016

0.15 ± 0.04, 平均径流系数为 0.23 ± 0.17; 裸地为 0.54 ± 0.04、0.56 ± 0.04、0.40 ± 0.03, 平均径流系数为 0.50 ± 0.17, 剑麻地平均径流系数相对于裸地降低了 54.00%。在 20°坡面上, 三年间, 剑麻地的径流系数依次为 0.38 ± 0.03、0.42 ± 0.03、0.29 ± 0.06, 平均径流系数为 0.36 ± 0.16; 裸地的径流系数依次为 0.60 ± 0.02、0.56 ± 0.02、0.45 ± 0.03, 平均径流系数为 0.53 ± 0.17, 剑麻地的平均径流系数相对于裸地减少了 32.08%。通过对两者径流系数的配对分析发现(表3), 相同坡度下, 剑麻地的径流系数与裸地的径流系数存在着显著差异 ($P < 0.01$)。由此可见, 在缓坡上种植剑麻可有效减少坡面侵蚀产流, 且随着剑麻种植时间的增加, 截流效益愈加显著。此外, 10°坡面剑麻地的径流系数比 20°剑麻地的径流系数减少 36.11%, 表明随着坡度的增加, 坡面径流流失量增加, 剑麻的截流效果有所减弱。

2.3 坡面产沙量的变化特征

裸地与剑麻地土壤侵蚀模数变化如图4所示。在 10°坡面上, 2014—2016 年剑麻地的土壤侵蚀模

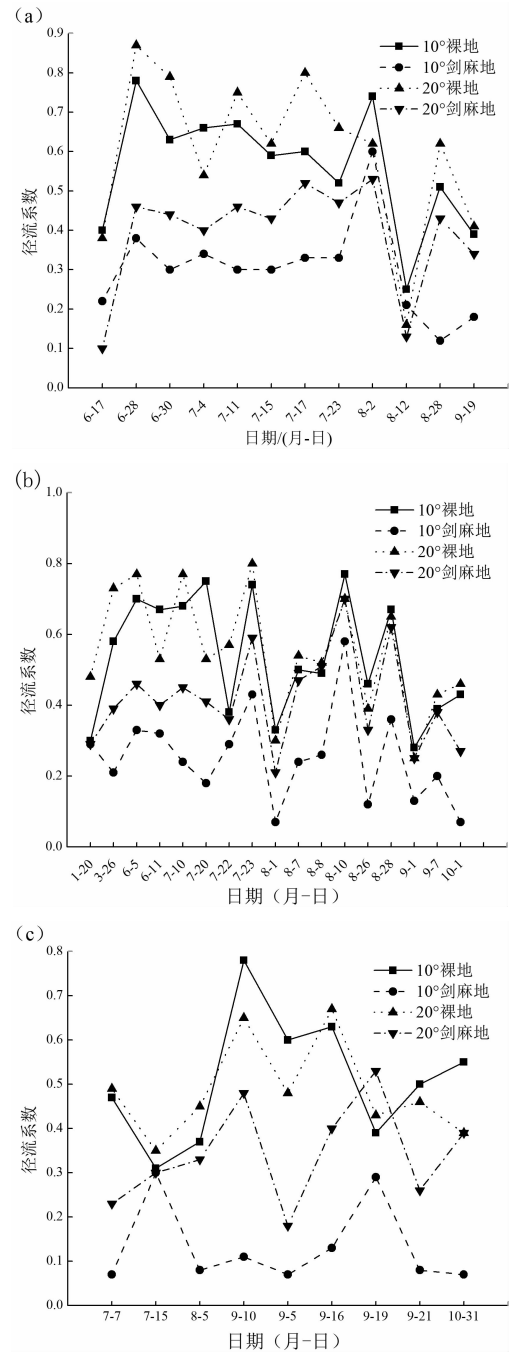


图3 裸地与剑麻地径流系数变化

((a) 2014年; (b) 2015年; (c) 2016年)

Fig.3 Variations of the runoff coefficient in the bare land and *Agave americana* land in 2014 (a), 2015 (b) and 2016 (c)

表3 2014—2016年裸地与剑麻地径流系数配对方差分析结果

Tab. 3 Analysis of paired variance of the runoff coefficient in the bare land and *Agave americana* land from 2014 to 2016

配对项	成对差分					<i>t</i>	<i>N</i>	<i>P</i> 值
	均值	标准差	均值的标准误	差分的 95% 置信区间				
				下限	上限			
10°裸地－10°剑麻地	0.29928	0.15245	0.02410	0.25052	0.34803	12.416	39	0.001
20°裸地－20°剑麻地	0.05050	0.12629	0.01997	0.01011	0.09089	2.529	39	0.016

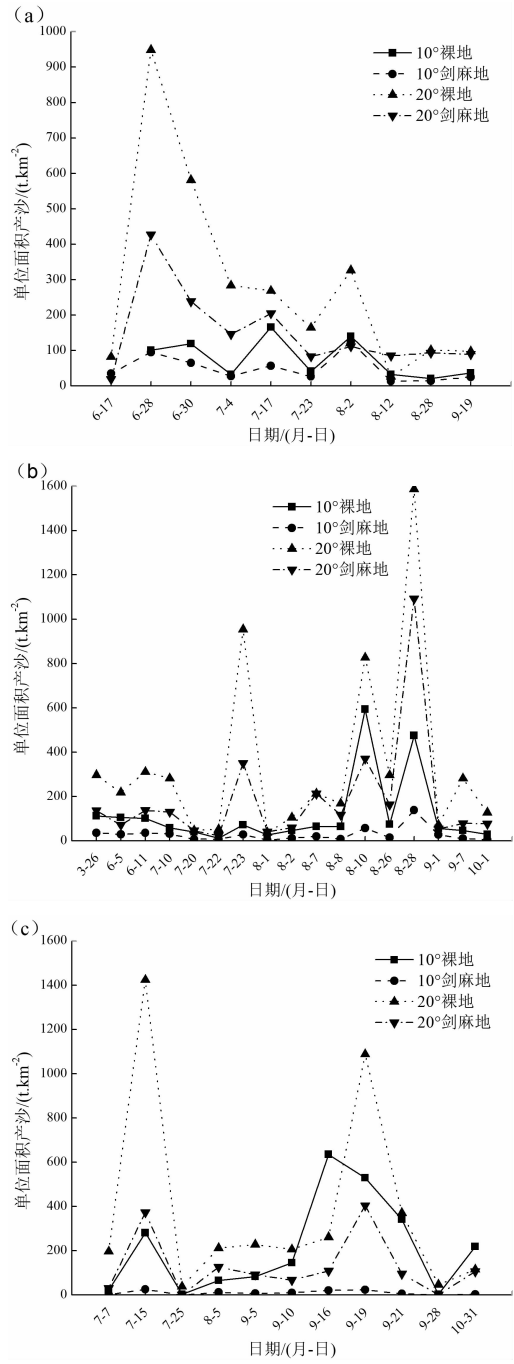


图4 裸地与剑麻地产沙变化

((a) 2014年; (b) 2015年; (c) 2016年)

Fig.4 Variations of the soil erosion modulus in bare land and *Agave americana* land in 2014 (a), 2015 (b) and 2016 (c), respectively

数依次为 458.26 t/(km²·a)、468.67 t/(km²·a)、111.89 t/(km²·a),平均土壤侵蚀模数为 355.27 ± 31.86 t/(km²·a)。裸地土壤侵蚀模数依次是 736.35 t/(km²·a)、2022.20 t/(km²·a)、2607.49 t/(km²·a),平均土壤侵蚀模数为 1788.68 ± 153.11 t/(km²·a);剑麻地的土壤侵蚀模数比裸地依次减少了 37.77%、76.82%、95.71%,而剑麻地的平均土壤侵蚀模数比裸地的减少了 80.14%。在 20°坡面上,2014—2016 年,剑麻地的土壤侵蚀模数依次为 1496.14 t/(km²·a)、3155.93 t/(km²·a)、1417.78 t/(km²·a),平均土壤侵蚀模数为 2023.29 ± 189.22 t/(km²·a);裸地的土壤侵蚀模数依次是 2878.73 t/(km²·a)、6015.41 t/(km²·a)、4624.27 t/(km²·a),平均土壤侵蚀模数为 4506.14 ± 362.70 t/(km²·a);剑麻地土壤侵蚀模数比裸地分别减少了 48.03%、47.54%、69.34%,三年平均减少了 55.10%;通过对剑麻地和裸地的土壤侵蚀模数配对分析(表 4),发现二者之间存在着显著性差异(*P* < 0.01)。结果表明,在 10°~20°的坡面上,剑麻地的土壤侵蚀模数均明显低于裸地的土壤侵蚀模数,因此缓坡上种植剑麻可有效抑制坡面侵蚀产沙,达到良好的拦沙效益,且减沙效果逐年增加。此外,在 10°坡面上,剑麻地的土壤侵蚀模数比 20°的坡面上降低了 82.44%,表明当坡度变大,剑麻的固土效果变差。

2.4 坡面产沙与产流之间的关系

坡地产流产沙量的多少取决于土壤可蚀性,而坡面侵蚀的主要方式是土壤颗粒随着地表径流发生迁移、损失^[29]。一般情况下,降雨越多,地表径流量越大,对泥沙的搬运能力越大。通过对三年观测数据进行相关性分析可知(表 5),坡面产流与产沙之间存在显著的正相关关系,产沙量随产流量的增加而增加。表 5 所示,在 10°和 20°坡面上,剑麻地和裸地的产流与产沙之间线性相关性均显著(*P* < 0.01),关系式拟合程度较高。结果表明,坡面产沙受产流情况的影响。

表 4 2014—2016 年裸地与剑麻地土壤侵蚀模数配对方差分析

Tab. 4 Analysis of paired variance of the soil erosion modulus in the bare land and *Agave americana* land from 2014 to 2016

配对项	成对差分					<i>t</i>	<i>N</i>	<i>P</i> 值
	均值	标准差	均值的标准误	差分的 95% 置信区间				
				下限	上限			
10°裸地 - 10°剑麻地	68.19094	108.52676	17.15959	33.48240	102.89948	3.974	39	0.001
20°裸地 - 20°剑麻地	171.34637	227.76232	36.01238	98.50444	244.18829	4.758	39	0.001

表 5 2014—2016 年元谋地区产流与产沙关系表

Tab. 5 Relationship between runoff and sand production in the Yuanmou County

坡度	处理	相关方程	相关系数	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
10°	裸地	$Y = -27.4848 + 9.6399X$	0.687	39.225	0.001
20°	裸地	$Y = -22.0885 + 20.5359X$	0.646	31.573	0.001
10°	剑麻	$Y = 10.2906 + 2.3978X$	0.579	17.147	0.001
20°	剑麻	$Y = 20.5375 + 12.0553X$	0.516	12.314	0.001

注:Y—产沙量,X—产流量。

3 讨论

金沙江干热河谷区气候干燥、降雨集中、蒸发量大,加之本区土壤肥力较差,植被恢复需要采取显著不同于其他区域的策略。唐国勇等人指出干热河谷区生态恢复的关键在于造林树种的选择和土壤关键限制因子间的相互配合^[5];因此,干热河谷区植被恢复应选择耐旱、耐热、耐瘠薄、抗逆性强、适生性广的植物,同时,植被还应具备萌芽力高、自我繁殖和更新能力强、覆盖或郁闭性快等优势^[5,20,21]。李纪潮等人在探究剑麻在干热河谷荒山治理的应用前景中指出,剑麻在元谋县内种植多年,已完全适应了当地的气候条件,产业发展具有较好前景^[14]。因此,剑麻作为该地区的适宜植被,具有较高的科研价值。

本研究表明,剑麻具有良好的水土保持效应,其机理主要有以下几个方面:一是剑麻叶面积指数大,土壤覆盖程度高,地上部分可拦截降雨,减弱雨水对地表的直接冲击力,减缓土壤侵蚀;二是剑麻的枯落物具有蓄持作用,可增加持水量,延迟地表径流的形成;三是剑麻为须根系,根系发达,可深入土壤,能增加土壤碳氮固存,提高入渗率和土壤孔隙度,从而阻碍地表径流形成。此外,通过根的物理固结效应和生物化学作用强化土壤抗冲击和抗侵蚀能力,根系分泌物等可有效增加根土间的摩擦力和粘结力,进

而提高根土复合体的抗剪强度,达到良好的固土效果^[19,28]。

研究发现剑麻地的产流产沙量远低于裸地,且水土保持效益逐年增加。其原因在于径流和泥沙的产生受下垫面类型的影响,裸地通气保水性弱,直接受到降雨的冲击,土壤表层结皮严重,入渗机率小^[19-25],随着降雨时间和降雨量的增加,土壤持水量快速饱和而开始产流产沙,径流系数也更易达到较高的稳定值^[26],而剑麻随着其根茎叶的逐年生长,不断对地面情况和土壤状况进行改良,可有效改善下垫面类型,因而截留拦沙效益明显。

综上所述,在 10°~20°的坡面上种植剑麻能有效固土截流,提高植被覆盖率,改善生态环境,达到治理干热河谷地区的水土流失问题的目的,且栽种越久、生长越好,水土保持效应也就越佳;同时通过收割剑麻叶片也能为当地农民带来一定的经济效益,可进行大面积推广。

4 结论

(1)元谋县年均降雨量为 659.46 mm,主要集中在 6—10 月,干湿季分明,且近年来降雨量呈逐渐增加的趋势。

(2)剑麻地截流和涵蓄地表径流的效果显著。2014—2016 年间,10°剑麻地的平均径流深为

101.91 ± 7.56 mm, 裸地为 236.70 ± 9.06 mm, 剑麻地比裸地减少了 56.95%; 20° 剑麻地平均产流为 152.78 ± 8.12 mm, 裸地为 252.20 ± 10.47 mm, 剑麻地比裸地减少了 39.42%。这表明剑麻的截流效益较好, 且剑麻在较缓坡地 (10°) 的截流效益高于陡坡地 (20°)。

(3) 2014—2016 年, 10° 剑麻地的平均径流系数为 0.23 ± 0.17, 裸地为 0.50 ± 0.17, 剑麻地比裸地减少了 54.00%; 20° 剑麻地平均径流系数为 0.36 ± 0.16, 裸地为 0.53 ± 0.17, 剑麻地比裸地减少了 32.08%。这表明在缓坡上种植剑麻可有效减少坡面侵蚀产流, 且径流系数随其种植时间的增加而逐年减小。

(4) 2014—2016 年间, 在 10° 坡面上, 剑麻地的平均土壤侵蚀模数为 355.27 ± 31.86 t/(km²·a), 裸地为 1788.68 ± 153.11 t/(km²·a), 剑麻地比裸地减少了 80.14%; 20° 坡面上, 剑麻地的平均土壤侵蚀模数为 2023.29 ± 189.22 t/(km²·a), 裸地为 4506.14 ± 362.70 t/(km²·a), 剑麻地比裸地减少了 55.10%。这表明剑麻具有显著的保土拦沙效果, 且随坡度的变缓效果愈加明显。

参考文献 (References)

- [1] 熊东红, 杨丹, 李佳佳, 等. 元谋干热河谷区退化坡地土壤裂缝形态发育的影响因子[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(1): 102–108 [XIONG Donghong, YANG Dan, LI Jiajia, et al. Influence factors of morphological development of soil cracks in degraded slopes in Yuanmou dry-hot valley region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(1): 102–108]
- [2] 刘刚才, 刘淑珍. 金沙江干热河谷区水环境特性对荒漠化的影响[J]. 山地研究, 1998, **16**(2): 156–159 [LIU Gangcai, LIU Shuzheng. The effect of water environmental characteristic in Dry-hot valley of Jinsha river on soil desertification [J]. Mountain Research, 1998, **16**(2): 156–159]
- [3] 杨丹, 熊东红, 张宝军, 等. 沟床草被对干热河谷冲沟产沙特性影响的野外模拟试验[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(15): 124–132 [YANG Dan, XIONG Donghong, ZHANG Baojun, et al. Field experiment on impacts of grass belt length on characteristics of sediment yields and transport rates for gullies in Jinsha Dry-hot Valley Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(15): 124–132]
- [4] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, **57**(6): 717–722 [FU Bojie, QIU Yang, WANG Jun, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, **57**(6): 717–722]
- [5] 周红艺, 熊东红, 杨忠. 元谋干热河谷土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(3): 135–138 [ZHOU Hongyi, XIONG Donghong, YANG Zhong. Effects of land use change on ecosystem service value in Yuanmou Dry-hot Valley [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, **24**(3): 135–138]
- [6] 唐国勇, 高成杰, 李昆. 植被恢复对于干热河谷退化土壤改良的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(15): 5157–5167 [TANG Guoyong, GAO Chengjie, LI Kun. Effects of vegetation restoration on the amelioration of degraded soil in a Dry-hot valley [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(15): 5157–5167]
- [7] SU Zhengang, ZHANG Jianhui, QIN Fachao, et al. Land-form change due to soil redistribution by intense tillage based on high-resolution DEMs [J]. Geomorphology, 2012, **175/176**(6): 190–198
- [8] 刘刚才, 高美荣, 林三益, 等. 紫色土两种耕作制的产流产沙过程与水土流失观测准确性分析[J]. 水土保持学报, 2002, **16**(4): 108–111 [LIU Gangcai, GAO Meirong, LIN Sanyi, et al. Process characteristics of soil and water loss under two tillage systems and valuation of measurement for soil erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, **16**(4): 108–111]
- [9] 王春雪, 纪中华, 李纪潮, 等. 3 个品种剑麻抗旱生理指标比较及抗旱性评价[J]. 热带作物学报, 2014, **35**(10): 1912–1919 [WANG Chunxue, JI Zhonghua, LI Jichao, et al. Drought-resistance physiological characteristics of three agave sisalana varieties in Yuanmou Dry-hot Valley [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, **35**(10): 1912–1919]
- [10] 兰碧, 王烨烨, 左成莉, 等. 二恶唑啉改性剑麻纤维增强聚乳酸复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2017, **45**(10): 37–42 [LAN Bi, WANG Yeye, ZUO Chengli, et al. Research on the preparation and properties of bisoxazoline modified Sisal fibers reinforced polylactide biocomposites [J]. China Plastics Industry, 2017, **45**(10): 37–42]
- [11] 吴伟怀, 贺春萍, 郑金龙, 等. 剑麻斑马纹病菌多聚半乳糖醛酸酶 Szpg6 ~ Szpg10 基因的分子检测及其序列分析[J]. 中国麻业科学, 2016, **38**(2): 62–68 [WU Weihuai, HE Chunping, ZHENG Jinlong, et al. Molecular detection and sequence analysis of polygalacturonase Szpg6 to Szpg10 gene of zebra disease of Sisal [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2016, **38**(2): 62–68]
- [12] 郑金龙, 贺春萍, 易克贤, 等. 剑麻病虫害预测预报研究进展及展望[J]. 中国麻业科学, 2015, (6): 330–335 [ZHENG Jinlong, HE Chunping, YI Kexian, et al. Advances and outlook of forecast work for sisal diseases and pests in China [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2015, (6): 330–335]
- [13] 王春雪, 纪中华, 潘志贤, 等. 不同苗龄剑麻 (Agave sisalana) 生理指标的相关性分析及抗旱性评价[J]. 热带作物学报, 2015, **36**(7): 1254–1260 [WANG Chunxue, JI Zhonghua, PAN Zhixian, et al. Correlation analysis on physiological indexes

- and drought resistance evaluation of different age of agave sisalana seedlings [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, **36**(7): 1254 – 1260]
- [14] 李纪潮, 易克贤, 岳学文, 等. 剑麻在干热河谷荒山治理的应用前景[J]. 中国热带农业, 2012(4): 43 – 44 [LI Jichao, YI Kexian, YUE Xuewen, et al. Application of sisal in the management of barren hills in Dry-hot Valley of Jinsha river[J]. China Tropical Agriculture, 2012(4): 43 – 44]
- [15] 陈奇伯, 王克勤, 刘芝芹, 等. 金沙江干热河谷封禁管护坡面的产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(4): 217 – 219 [CHEN Jibai, WANG Keqin, LIU Zhiqin, et al. Characteristic of runoff and sediment production on slope land of enclosure for recovering vegetation in dry-hot valley of jinsha river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, **13**(4): 217 – 219]
- [16] 苏正安, 张建辉, 聂小军. 紫色土坡耕地土壤物理性质空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(5): 54 – 60 [SU Zheng'an, ZHANG Jianhui, NIE Xiaojun. Response of spatial variability of soil physical properties to soil erosion in purple soil slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, **25**(5): 54 – 60]
- [17] 刘海, 陈奇伯, 王克勤, 等. 金沙江干热河谷典型区段水土流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 28 – 33 [LIU Hai, CHEN Hongqi, WANG Keqing, et al. Soil erosion properties in typical section of Dry-hot Valley of Jinsha Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(5): 28 – 33]
- [18] 王小丹, 钟祥浩, 范建容, 等. 金沙江干热河谷元谋盆地冲沟沟头形态学特征研究[J]. 地理科学, 2005, **25**(1): 63 – 67 [WANG Xiaodan, ZHONG Xianghao, FAN Jianrong, et al. Study on the morphological characteristics of the gully heads in Yuanmou Basin, Arid River Valley of Jinsha River, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, **25**(1): 63 – 67]
- [19] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(24): 165 – 173 [ZHANG Jie, CHEN Xiaolan, TANG Chongjun, et al. Benefit evaluation on typical soil and water conservation measures in citrus orchard on red soil slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(24): 165 – 173]
- [20] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报, 2011, **31**(11): 3060 – 3068 [YANG Lei, WEI Wei, MO Baoru, et al. Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the Semi-arid Hilly Region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(11): 3060 – 3068]
- [21] 张建平, 张信宝, 杨忠, 等. 云南元谋干热河谷生态环境退化及恢复重建试验研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2001, **26**(6): 733 – 739 [ZHANG Jianping, ZHANG Xinbao, YANG Zhong, et al. Studies on eco-environment degradation and the experiment of environment recovering and rebuilding [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2001, **26**(6): 733 – 739]
- [22] FOX D M, BRYAN R B, PRICE A G. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions [J]. Geoderma, 1997, **80**(1/2): 181 – 194
- [23] POLYAKOV V O, KIMOTO A, NEARING M A, et al. Tracing sediment movement on a semiarid watershed using rare earth elements [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(5): 1559 – 1565
- [24] KIMOTO A, NEARING M A, ZHANG X C, et al. Applicability of rare earth element oxides as a sediment tracer for coarse-textured soils [J]. Catena, 2006, **65**(3): 214 – 221
- [25] LI Z, LIU C, DONG Y, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess Hilly-gully Region of China [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 1 – 9
- [26] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(4): 6 – 11 [XIE Yun, LIU Baoyuan, ZHANG Wenbo. Study on standard of erosive rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **14**(4): 6 – 11]
- [27] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. 地理学报, 2002, **57**(5): 587 – 594 [QIU Yang, FU Bojie, WANG Jun, et al. Variability of the soil physical properties on the loess plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, **57**(5): 587 – 594]
- [28] 刘宝元, 刘瑛娜, 张科利, 等. 中国水土保持措施分类[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 80 – 84 [LIU Baoyuan, LIU Yingna, ZHANG Keli, et al. Classification for soil conservation practices in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(2): 80 – 84]
- [29] 成玉婷, 李鹏, 徐国策, 等. 冻融条件下土壤可蚀性对坡面氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(24): 141 – 149 [CHENG Yuting, LI Peng, XU Guoce, et al. Effect of soil erodibility on nitrogen and phosphorus loss under condition of freeze-thaw [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(24): 141 – 149]

Effects of *Agave americana* on Soil and Water Conservation of Slope in Dry-Hot Valley of Jinsha River

HE Zhouyao^{1,2}, SU Zheng'an^{1*}, XIONG Donghong¹, WANG Yong³, YANG Hongkun^{1,4}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface processes & Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Forestry College, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Ya'an, Sichuan 625014, China; 4. School of Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

Abstract: In this study, effects of *Agave americana* on soil and water conservation of slope were studied by the runoff plot positioning observation method using 10° and 20° runoff plot in the dry-hot valley of Jinsha River. The result showed that the annual rainfall was 659.46 mm and the rainfall days were 82 d in Yuanmou. The annual soil erosion modulus in the 10° bare land was estimated at $1788.68 \pm 153.11 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ during 2014 to 2016 and the same slope of *Agave americana* land was $355.27 \pm 31.86 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Compared to the bare land, there was a decrease of 80.14% in the *Agave americana* land. For the slope of 20°, the annual soil erosion modulus in the bare land was $4506.14 \pm 362.70 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, while that of the *Agave americana* land was $2023.29 \pm 189.22 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. Planting *Agave americana* reduced the amount of sediment by 55.10%. The average runoff depth of different slopes was also significantly different in three years. On the slope of 10°, bare land was $236.70 \pm 9.06 \text{ mm}$ and *Agave americana* land was $101.91 \pm 7.56 \text{ mm}$. The average runoff depth in the 10° *Agave americana* land was 56.95% less than that of bare land. The average runoff depth in the 20° bare land and *Agave americana* land were estimated at $252.20 \pm 10.47 \text{ mm}$ and $152.78 \pm 8.12 \text{ mm}$, respectively. The average runoff depth in the 20° *Agave americana* land was 39.42% less than that of bare land. During the monitoring time, the average runoff coefficient of bare land with a slope of 10° was 0.50 ± 0.17 and same slope of *Agave americana* land was 0.23 ± 0.17 , indicating that the average runoff coefficient of 10° *Agave americana* land was 54.00% less than that of bare land. For 20° slope, the average runoff coefficients were estimated at 0.53 ± 0.17 and 0.36 ± 0.16 in the bare land and the *Agave americana* land, respectively, which demonstrated that the average runoff coefficient of 20° *Agave americana* land was 32.08% lower than bare land. These results indicated that the *Agave americana* exhibited a preferable effect on the soil and water conservation in the dry-hot valley of Jinsha River.

Key words: dry-hot valley; *Agave Americana*; runoff and soil loss; runoff coefficient; soil and water conservation effect