桂东北坡地果园生草栽培减流减沙效应

李婷婷[1,2]，何铁光[2]，俞月凤[2]，董文斌[2]，韦彩会[2]，唐红琴[2]，李忠义[2]
(1.广西大学 农学院，广西 南宁 530004；2.广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所，广西 南宁 530007)

摘　要：[目的] 对桂东北坡地果园生草栽培的减流减沙效应进行研究，为该区坡地果园的水土保持工作的顺利开展提供科学参考。[方法] 野外自然降雨条件下对比分析不同坡度（即坡度为 12°，23°，42°）金桔园分别间套雀稗和白花藿香蓟的减流减沙数据。[结果] ①当坡度为 12°时，降雨量对雀稗及白花藿香蓟的坡面产流产沙有显著影响（$p<0.05$）；②同一生草栽培下，坡面产流产沙量随着坡度增大而增大，相对于清耕，雀稗减少坡面产流产沙量分别为 33.06%～50.35%和 67.09%～77%，白花藿香蓟减少坡面产流产沙量分别为 21.89%～28.85%及 41.65%～47%，雀稗减流减沙效果优于白花藿香蓟；③生草栽培、坡度及两者的交互作用对坡面产流产沙均有极显著的影响（$p<0.001$）。随着坡度的升高，生草栽培对坡面产流产沙的作用逐渐减弱，而坡度的作用逐渐增强，但雀稗对坡面产沙的作用始终大于坡度。[结论] 研究区内同一坡度下雀稗减流减沙效果优于白花藿香蓟，生草栽培对坡面产流产沙的作用随着坡度增加逐渐减小，而坡度的作用逐渐增强，雀稗对坡面产沙的作用始终大于坡度。

关键词：果园；生草栽培；坡度；产流；产沙
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)02-0031-06　　**中图分类号**：S157.1

文献参数：李婷婷，何铁光，俞月凤，等.桂东北坡地果园生草栽培减流减沙效应[J].水土保持通报，2020，40(2)：31-36. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.005；Li Tingting，He Tieguang，Yu Yuefeng，et al. Effects of runoff and sediment reduction by sod culture in sloping orchards in Northeastern Guangxi region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(2)：31-36.

Effects of Runoff and Sediment Reduction by Sod Culture in Sloping Orchards in Northeastern Guangxi Region

Li Tingting[1,2]，He Tieguang[2]，Yu Yuefeng[2]，Dong Wenbin[2]，Wei Caihui[2]，Tang Hongqin[2]，Li Zhongyi[2]
(1. *Agricultural College*，*Guangxi University*，*Nanning*，*Guangxi* 530004，*China*；2. *Agricultural Resources and Environmental Research Institute*，*Guangxi Academy of Agricultural Sciences*，*Nanning*，*Guangxi* 530007，*China*)

Abstract：[Objective] The effects of runoff and sediment reduction by orchard grass cultivation in Northeast Guangxi Zhuang Autonomous Region was studied，in order to provide scientific reference for the development of soil and water conservation in this area. [Methods] Under the condition of natural rainfall，the runoff and sediment data of *Paspalum thunbergii* and *Ageratum conyzoides* were compared and analyzed in different slopes (i.e. 12 °，23 °，42 °). [Results] ① When the slope was 12 °，rainfall had a significant effect on runoff and sediment yield of *Paspalum thunbergii* and *Ageratum conyzoides* ($p<0.05$). ② Under the same life cultivation，the runoff and sediment yield increased with the increase of slope gradient. Compared with the clear cultivation，the runoff and sediment yield of *Paspalum thunbergii* decreased by 33.06%～50.35% and 67.09%～77%，respectively，while that of *Ageratum conyzoides* decreased by 21.89%～28.85% and 41.65%～47%，respectively. The runoff and sediment reduction effect of *Paspalum thunbergii* was better than that of *Ageratum conyzoides*. ③ The interaction effects of slope and grass cultivation were significant on runoff and sediment yield ($p<0.001$). With the increase of slope，the effects of grass cultivation on runoff

收稿日期：2019-10-08　　**修回日期**：2019-12-07
资助项目：现代农业产业技术体系专项“国家绿肥产业技术体系建设”(CARS-22)；广西创新驱动发展专项(桂科 AA17204097)；广西农业科学院科技发展基金资助项目(桂农科 2017JM09)
第一作者：李婷婷(1988—)，女(汉族)，广西壮族自治区柳城县人，硕士研究生，研究方向为农业生态环境可持续发展。Email：litt@gxaac.com。
通讯作者：韦彩会(1983—)，女(壮族)，广西壮族自治区罗城县人，硕士，高级农艺师，主要从事环境生态方面的研究。Email：caihui0026@163.com。

and sediment yield on slope were gradually weakened, while the effect of slope was gradually enhanced. Nevertheless, the effect of *Paspalum thunbergii* cultivation on slope sediment yield was always greater than that of the slope. [Conclusion] The runoff and sediment reduction effect of *Paspalum thunbergii* was better than that of *Ageratum conyzoides* in the same slope. The effect of grass cultivation on runoff and sediment production on slope decreased with the increase of slope, while the effect of slope increased gradually. The effect of *Paspalum thunbergii* on slope sediment yield was always greater than slope.

Keywords: orchard; sod culture; slope; runoff yield; sediment yield

坡面产流产沙受多因素影响,其中植物和坡度影响显著。果园生草栽培于 20 世纪 40 年代兴起[1]。早在 1961 年,Perrier[2]对果园生草栽培进行了研究。1998 年果园生草作为绿色果品生产技术在我国进行推广。在果园中种植适生草本植物或保留园中有益原生植被,可防治水土流失、维持坡地果园健康发展[3-6]。有多数研究学者已针对不同植物措施的减流减沙效应等研究开展不少工作,如张贤明等[7]认为雀稗可在红壤果园发挥较好的水土保持作用,王恒松等[8]在喀斯特石漠化区,定量研究发现典型乡土植物刺梨在自然降雨条件下,可对坡耕地起到减流减沙作用;谢颂华等[9]在南方红壤丘陵区的研究结果表明乔—草模式与对照相比可减流 90%以上;黄炎和等[10]针对果园生草方式与土壤侵蚀的关系分析也得到了相同的研究结果。但大多数不同植物之间的对比多集中在同一坡度的比较,而忽视了即便在相同降雨条件下,水土流失状况会因坡度差异而存在较大不同。如杜捷等[11]的模拟放水冲刷试验结果表明减沙效益与坡度有显著相关性,王蕙等[12]采用人工模拟降雨方式研究了红壤坡面的产流产沙特征,发现产流率产沙量与坡度呈正相关关系。而较多的野外试验表明坡面产沙存在临界坡度,如,文雅琴等[13]针对黔东北喀斯特地区产流产沙的研究表明,随着坡度增大,产沙量表现为先增大后减小,25°是临界坡度;郭军权等[14]针对坡度与坡面浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验研究表明产沙量也呈现同样的趋势,只是临界坡度不同。

桂东北果园多为金桔园,金桔产值高,是重要的经济支柱。然而金桔园多开垦于坡度为 10°～50°的山区,母质大多为砂页岩,土层薄,加上常年清耕,地表裸露,抗蚀性弱,坡耕地易导致该区域水土流失,果园状况堪忧。关于生草栽培和坡度对坡地果园减流减沙效应的研究,之前的研究者较少考虑两者综合作用及相对贡献影响,同时大多数研究只考虑外源引入草种对坡面减流减沙的影响,较少考虑经区域自然界优胜劣汰法则筛选出的自然草种[15]的产流侵蚀规律及与外源草种的缓流固土能力对比。因此,本研究选用外源草种雀稗和自然汰选草种白花霍香蓟,以清耕作为对照,基于野外自然降雨条件下不同坡度各处理产生地表径流量和土壤流失量的数据,研究了 2 种生草栽培减流减沙效果,剖析生草栽培和坡度对坡面产流产沙的作用,旨在能为桂东北坡地果园的水土保持提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在广西桂林市阳朔县白沙镇石塘村金龟洞屯张家果园(110°28′59.33″N,24°50′3.44″E),果园土壤母质是砂页岩,土壤类型为红壤,pH 值为 4.5～5.5。阳朔县年均气温和年均降雨量分别为 19 ℃和 1 640 mm,日照为 1 465 h,处亚热带季风气候。由于长期果园种植,原生植物遭到破坏,现存植物多为果树,果园其余地表多为裸露状态。

1.2 研究方法

供试金桔品种为实生苗,2001 年定植,东西距向,南北行向,株行间距 3 m×2.5 m,树高 3.5 m 左右,冠幅 3 m 左右。根据《水土保持试验规程(SL419-2007)》建设径流小区的要求及当地果园实况,2017 年 6 月 30 日径流场顺坡而建,南向,水平投影面积为 20 m(长)×3 m(宽),径流场两侧边建于金桔树行间距(3 m)的 1.5 m 处,径流场小区边界用材料为防水 ASA 合成树脂瓦,插入土壤(深 25±5 cm)固定,地上露出 25±5 cm 在径流场附近的空旷处,安装慧云智能种植监控系统记录降雨过程和降雨量。在试验设计中,坡度范围为 0～15°,15°～30°,30°～45°,实际山体坡度分别对应为 12°,23°和 42°。每个坡度设 3 种处理:雀稗、白花霍香蓟、清耕(对照)。同样的坡度(即同一个处理)进行 3 次重复,每个坡度有 9 个径流场小区,同一个坡度的径流场并排分布在一起,共计 27 个径流场小区。清耕即试验过程中采用人工锄草的办法,以保持地面无草。阳朔金桔园每年 11 月至翌年 3 月采取盖膜方式保果,雀稗和白花霍香蓟于 2018 年 3 月在径流小区内人工撒播,撒播量为 30 kg/hm^2。2018 年 6 月开始观测,试验监测时间为 6—11 月。结合本研究实际情况,通过对程琴娟等[16]和曹梓豪等[17]针对相对作用大小的计算方法的借鉴和改进,计算不同生草栽培和坡度对坡面产流产沙的相对贡献指数。以最小坡度(12°)作为基准,计

算任意坡度 X°(23°,42°)下各因素引起的坡面产流量增量和产沙量增量,取绝对值,计算公式为:

$$P_{LB}=Q_L(X°)-Q_L(12°)$$
$$C_{LB}=C_L(X°)-Q_L(X°)$$
$$Z_{LC}=P_{LB}+C_{LB}$$
$$P_i=P_{LB}/Z_{LC}$$
$$C_i=C_{LB}/Z_{LC}$$

式中:P_{LB}为坡地引起的产流变化量;Q_L 为清耕产流量;C_{LB}为由生草引起的坡面产流变化量;C_L 为生草栽培产流量;Z_{LC}为总产流变化量;P_i 为坡度对坡面产流量影响的相对贡献指数;C_i 为生草对坡面产流量影响的相对贡献指数。按照此理可计算出生草栽培和坡度对坡面产沙量影响的相对贡献指数。

1.3　径流泥沙观测与数据处理

试验过程中,每日降雨量观测时间段为当日 8:00 am至次日 8:00 am,24 h 内发生的所有降雨合并为 1 场降雨量。次日上午 8:00 测量不同处理径流小区集流池中水面所在刻度值,根据集流池面积计算径流量,之后用木棍将集流池中的泥水搅拌,使泥和水充分混合均匀后,用 600 ml 塑料瓶取样。每次取样后,将集流池用清水清洗干净。将样品带回室内过滤,烘干,称量,计算,测定泥土重量(t/hm^2)。根据集流池体积推算得到的径流量,结合径流泥沙浓度,计算土壤流失量。采用 SPSS 21.0 进行数据统计分析,Origin 8.0 作图。

2　结果与分析

2.1　降雨特征分析

从 2018 年 6 月 5 日至 2018 年 11 月 3 日,试验区共降雨 44 次,降雨量共 827.58 mm。6,7 及 8 月分别降雨 5,2 和 8 次,9,10 和 11 月分别有 18,10 及 1 次降雨。发生小雨,中雨,大雨,暴雨和大暴雨次数分别占测定时期总降雨次数的 61.36%,11.35%,15.91%,9.09%和 2.27%。小雨是该区此时段内降雨的主要类型。暴雨级别的降雨在 6,7,8,9,10 月均有发生,7 月甚至出现了一次大暴雨。其中,有 8 次降雨形成地表径流(表 1),占测定时期总降雨次数的 18.18%,产生地表径流的 8 场降雨中暴雨级别的占 50%。

表 1　研究区坡面产流的 8 场降雨量

日期	20180606	20180613	20180625	20180709	20180729	20180812	20180909	20181016
降雨量/mm	87.14	44.86	43.87	129.78	54.31	62.63	66.43	68.09

2.2　不同坡度下的径流量和土壤流失量

不同坡度下各试验小区的水土流失情况如图 1—2 所示。不同生草措施对坡面产流均有一定的控制效果。同一降雨条件下,同一处理的坡面产流量随着坡度增大而逐渐增多,当坡度为 12°,23°和 42°时,清耕地面径流量分别为 81.06,131.71 及 159.59 mm。而雀稗和白花藿香蓟两种生草栽培可有效降低小区径流。12°坡度条件下,与清耕相比,雀稗和白花藿香蓟减少径流分别为 50.35%,28.85%;23°坡度条件下,雀稗与白花藿香蓟分别比清耕减少径流39.05%,26.96%;42°坡度条件下,雀稗与白花藿香蓟比清耕减少径流分别为 33.06%,21.89%。随着坡度增大,生草栽培的控制效果减弱。坡面产沙量随着坡度增大而增大。相对于清耕,采取生草栽培的小区的坡面产沙量明显降低,泥沙减少比例均在 40%以上。但不同生草栽培产生的土壤治理效果不同,其中,雀稗效果最好,均在 65%以上。当坡度为 12°时,相对比于清耕,雀稗泥沙减少百分比达 77%,白花藿香蓟泥沙减少比例为 47%;当坡度为 23°时,雀稗和白花藿香蓟泥沙减少比例分别为 68.03%和 45.73%;当坡度为 42°时,雀稗减少泥沙比率为 67.09%,白花藿香蓟减少泥沙比率为 41.65%。坡度越大,生草栽培对土壤流失治理效果有所降低。

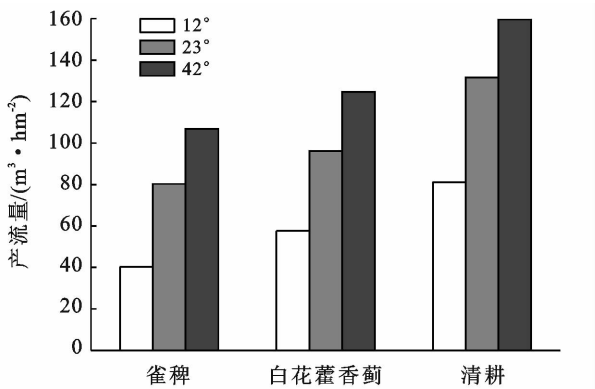


图 1　研究区不同生草措施 3 个坡度下各小区产流量

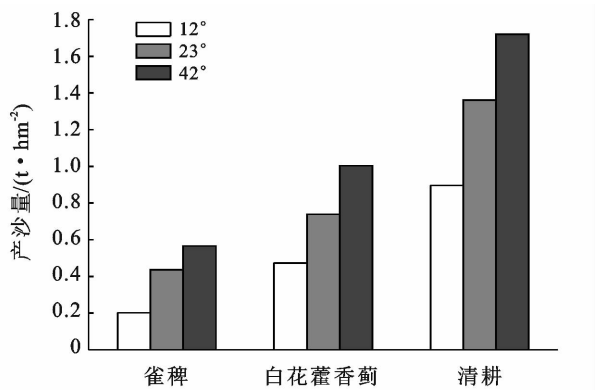


图 2　研究区不同生草措施 3 个坡度下各小区产沙量

2.3 降雨量与坡面产流产沙的关系

由表 2 可知，当坡度为 12°时，所有处理的坡地产流量与降雨量呈显著的线性相关关系（$p<0.05$），而只有雀稗与白花藿香蓟处理的坡地土壤流失量与降雨量的关系显著，说明在 12°坡度下，降雨量对雀稗及白花藿香蓟的坡面产流产沙量起主要的贡献作用。当坡度为 23°时，白花藿香蓟与清耕的坡面产流量与降雨量呈显著的线性相关关系（$p<0.05$）。在低坡度下，降雨量对雀稗及白花藿香蓟坡面产流产沙起主要作用。

2.4 坡度与生草栽培对坡面产流产沙的相对贡献

由表 3 可知，坡度、生草栽培及两者之间的交互作用对坡面产流量和产沙量均有极显著的影响（$p<0.001$）。由图 3—4 可知，雀稗和白花藿香蓟对坡面产流产沙的相对贡献指数随着坡度增加呈现逐渐下降的趋势，而坡度的相对贡献指数呈逐渐上升趋势。以 23°为界限，当坡度＜23°时，雀稗和白花藿香蓟对坡面产流产沙的贡献下降明显，坡度对坡面产流产沙的贡献明显增加；当坡度＞23°后，生草和坡度对坡面产流产沙的贡献变化幅度减小。当坡度为 23°时，雀稗对坡面产流产沙的相对贡献指数分别为 0.50 和 0.67，而白花藿香蓟对坡面产流产沙的相对贡献指数分别为 0.41，0.57；当坡度为 42°时，雀稗对坡面产流产沙的相对贡献指数分别为 0.40，0.58，而白花藿香蓟对坡面产流产沙的相对贡献指数分别为 0.31 和0.47，说明在同样的坡度下，雀稗对坡面的影响大于白花藿香蓟。在 42°坡度条件下，种植雀稗时，坡度对坡面产沙的相对贡献指数为 0.41，低于雀稗；而同样的坡度条件下，种植白花藿香蓟时，坡度对坡面产沙的相对贡献指数为 0.53，高于白花藿香蓟。

表 2 降雨量与坡面产流量产沙量线性回归分析

处 理	回归方程	R^2	样本数
12°雀稗	$Y=0.108X-2.475$	0.936*	8
12°白花藿香蓟	$Y=0.105X-0.104$	0.699*	8
12°清耕	$Y=0.107X+2.673$	0.521*	8
23°雀稗	$Y=0.127X+1.189$	0.404	8
23°白花藿香蓟	$Y=0.160X+0.849$	0.512*	8
23°清耕	$Y=0.157X+5.533$	0.513*	8
42°雀稗	$Y=0.165X+1.885$	0.464	8
42°白花藿香蓟	$Y=0.202X+1.538$	0.451	8
42°清耕	$Y=0.18X+7.449$	0.431	8
12°雀稗	$S=0.001X-0.019$	0.856*	8
12°白花藿香蓟	$S=0.001X-0.026$	0.819*	8
12°清耕	$S=0.001X+0.049$	0.193	8
23°雀稗	$S=0.001X+0.001$	0.467	8
23°白花藿香蓟	$S=0.001X+0.007$	0.459	8
23°清耕	$S=0.001X+0.091$	0.139	8
42°雀稗	$S=0.001X-0.001$	0.429	8
42°白花藿香蓟	$S=0.001X+0.028$	0.345	8
42°清耕	$S=0.001X+0.114$	0.135	8

注：Y 为坡面产流量（m^3/hm^2），X 为降雨量（mm），S 为土壤流失量（t/hm^2）；* 表示在 $p<0.05$ 水平显著相关。

表 3 坡度与生草类型对坡面产流产沙影响的双因素方差分析结果

因 素	产流量			产沙量		
	d_f	F	sig.	d_f	F	sig.
坡 度	2	15 905.946	0.000***	2	18 334.90	0.000***
生草栽培	2	33 706.873	0.000***	2	6 921.24	0.000***
坡度×生草栽培	4	146.561	0.000***	4	381.91	0.000***

注：* * * 表示因素对产流量或产沙量的影响极显著（$p<0.001$）。

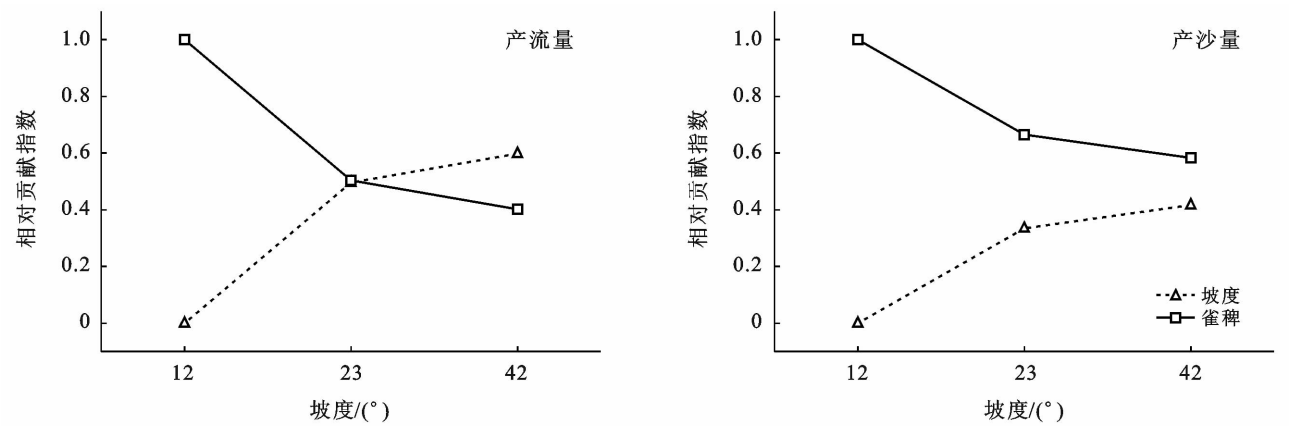


图 3 雀稗与坡度对坡面产流产沙的贡献分析

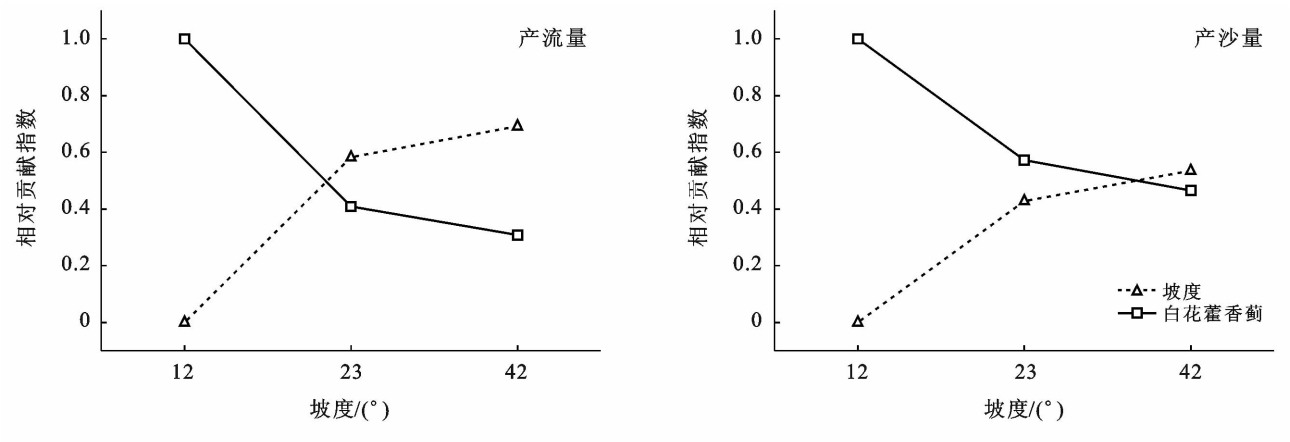


图 4　白花藿香蓟与坡度对坡面产流产沙的贡献分析

3　讨 论

生草栽培可发挥缓流减蚀作用[18],原因在于提高了植被盖度[19],增强土壤水分入渗能力[20-21],植物根系增加了边坡稳定性[22-23],减缓土壤侵蚀。本研究中,在 12°,23°和 42°坡度条件下,两种生草栽培模式均明显降低降雨造成的坡面产流量和产沙量,但不同生草栽培的作用存在差异。相对于清耕,雀稗表现优于白花藿香蓟,说明草种生物学性状影响坡面减流减沙效果,雀稗茎秆触地生根,根系在地表形成网格状,茎叶繁茂,而白花藿香蓟根系是直根系,单株生长,互不相连,且成熟期的白花藿香蓟茎秆挺立,叶片较雀稗稀疏。进一步说明草种之间的叶面积指数及植被盖度的差异导致缓解雨水直接冲刷的能力不同,同时,草种根系在土壤表层中形成的特定网络特征,改善下垫面状况,减缓流速及减小水流中携带的泥沙含量,另外根系自身具有吸水和保水特性,从而减少土壤侵蚀。修正后的通用土壤流失方程(RUSLE)预测,坡度与产沙量之间的关系为幂函数和线性函数[24]。本研究中,同一生草栽培条件下,随着坡度的增加,土壤流失量增大,与多数野外自然降雨条件下存在临界坡度影响土壤流失量大小的研究结果[13-14]不一致,原因可能是降雨特征及下垫面具有区域特征性。降雨量、雨强、降雨时长等降雨特征对水土流失的影响多地已有研究[25-28],但区域降雨特征存在差异,需因地制宜进一步探讨。

坡度、生草栽培及两者的交互作用对坡面产流产沙均有极显著的影响,与马波等[29]结果一致。随着坡度增加,雀稗、白花藿香蓟对坡面产流量与产沙量的贡献指数基本下降,而坡度的贡献指数基本呈上升趋势,说明随着坡度增大,坡度的作用逐渐增大,与曹梓豪的研究结果一致[17],而生草栽培的作用逐渐减弱。当坡度<23°时,雀稗和白花藿香蓟对坡面产流产沙的作用大于坡度,这与李秋艳等[30]研究认为当坡度<25°时,采取植物措施可减少水土流失的结果一致。我国《水土保持法》第 14 条明确规定“禁止在 25°以上陡坡地开垦种植农作物”,中央[1998]15 号文件指出 25°以上陡坡地应该退耕还林,表明当坡度>25°后,土壤侵蚀程度会迅速加重,土壤退化严重。本研究中当坡度升高到 42°时,坡度对坡面产沙的作用大于白花藿香蓟,而雀稗对坡面产沙的相对贡献高于坡度,占主导作用,说明在高坡度的山地选择适合的草种可以有效缓解因坡度而引起水土流失的增强效应。综上,一定的坡度范围内,雀稗和白花藿香蓟均能增强土壤抗蚀性,超过一定坡度时,雀稗的坡面减沙效果优于白花藿香蓟。

4　结 论

(1) 试验期间,当坡度为 12°时,降雨量对雀稗及白花藿香蓟的坡面产流产沙有显著影响。

(2) 随着坡度增大,同一生草栽培坡面产流产沙量增加。相对于清耕,雀稗减少坡面产流产沙量分别为 33.06%～50.35%和 67.09%～77%,白花藿香蓟减少坡面产流产沙量分别为 21.89%～28.85%及 41.65%～47%,雀稗减流减沙效果优于白花藿香蓟。

(3) 在生草栽培和坡度对红壤坡地果园的产流产沙影响中,生草栽培、坡度及两者的交互作用对坡面产流产沙均有极显著的影响;在生草栽培和坡度对坡面产流产沙的交互作用下,生草栽培的作用随坡度的增加而逐渐减小,而坡度的作用逐渐增强,但雀稗对坡面产沙的相对贡献指数始终高于坡度。

[参 考 文 献]

[1] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等.我国果园生草的研究进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1892-1900.

[2] Perrier E R, Mckell C M, Davidson J M. Plant-Soil-

Water relations of two subspecies of orchard grass [J]. Soil Science, 1961,92(6):413-420.

[3] 黄鹏飞,陈晓安,郑太辉,等.红壤坡地不同植物措施消减径流峰值研究[J].水土保持学报,2016,30(1):79-82,102.

[4] 毕明浩,梁斌,董静,等.果园生草对氮素表层累积及径流损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):102-105.

[5] 俞巧钢,叶静,马军伟,等.山地果园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):6-10,20

[6] Sharpley A N, Troger W W, Smith S J. The measurement of bioavaible phosphorus in agriculture runoff [J]. Journal of Environment Quality. 1991, 20(1):235-238.

[7] 张贤明,董文达,李德荣,等.江西红壤坡地果园水土保持措施效益之研究[J].水土保持学报,2001,15(2):102-104.

[8] 王恒松,张芳美.黔西北乡土植物篱对典型石漠化区石灰土侵蚀动力学过程的调控[J].水土保持学报,2019,33(4):16-23,80.

[9] 谢颂华,郑海金,杨洁,等.南方丘陵区水土保持植物措施减流效应研究[J].水土保持学报,2010,24(3):35-38.

[10] 黄炎和,杨学震,蒋芳市.侵蚀坡地果园不同生草方式对土壤和果树生长的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):111-114.

[11] 杜捷,高照良,王凯.布设植物篱条件下工程堆积体坡面产流产沙过程研究[J].水土保持学报,2016,30(2):102-106.

[12] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.

[13] 文雅琴,熊康宁,李瑞.黔东北喀斯特坡面产流产沙及土壤含水量特征[J/OL].人民黄河:1-6[2019-09-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1128.TV.20190819.1128.020.html.

[14] 郭军权,王文龙.坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J].水土保持学报,2019,33(4):87-92,212.

[15] 袁久芹,梁音,曹龙熹,等.红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J].土壤,2015,47(2):400-407.

[16] 程琴娟,蔡强国,廖义善.土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2007,21(2):9-11,15.

[17] 曹梓豪,赵清贺,丁圣彦,等.坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J].自然资源学报,2017,32(11):1892-1904.

[18] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析[J].自然资源学报,2019,34(7):1405-1416.

[19] 杨帆,张宽地,马小玲,等.植被覆盖度对坡面流相对水动力学特性的影响[J].水力发电学报,2017,36(2):29-39.

[20] 林桂志.百喜草对坡地果园水土保持及土壤改良效果的研究[J].亚热带水土保持,2012,24(3):10-13,70.

[21] 白岗栓,邹超煜,杜社妮.渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J].农业工程学报,2018,34(3):151-158.

[22] 姚鑫.植物根系对红黏土边坡的加固效应研究[D].安徽合肥:合肥工业大学,2017.

[23] 占海歌.3种草本植物根系特征对土壤抗侵蚀性能影响[D].湖北 武汉:华中农业大学,2017.

[24] Fox D M, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. [J]. Catena, 2000, 38(3):211-222.

[25] 杜轶,郭青霞,郭汉清,等.汾河上游不同土地利用方式对坡地水土流失的影响[J].水土保持学报,2019, 33(4): 44-51.

[26] 张海涛,宫渊波,付万权,等.次降雨对马尾松低效林改造初期坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):51-55.

[27] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30,35.

[28] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.喀斯特小流域坡面与流域降雨产流产沙特征[J].水土保持研究,2017,24(1):1-6.

[29] 马波,吴发启,李占斌,等.作物与坡度交互作用对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):33-38.

[30] 李秋艳,蔡强国,方海燕,等.长江上游紫色土地区不同坡度坡耕地水保措施的适宜性分析[J].资源科学,2009,31(12):2157-2163.