

90% 盖度狗牙根草地对次降雨径流削减作用

朱永杰¹ 毕华兴^{1,2} 常译方¹ 霍云梅¹ 王晓贤¹

(1 北京林业大学水土保持学院 2 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心)

摘要:利用人工模拟降雨试验研究了不同降雨强度和坡度条件下,90% 盖度狗牙根草地(以裸地为对照)对次降雨地表径流产生过程的影响以及对径流总量的削减作用。结果表明:1)与裸地相比,狗牙根草地对初始产流时间延长效果明显,最小延长4'2",最大延长29'8";对裸地径流总量的削减率最高达59.04%,平均削减率为47.76%,削减效果显著;2)狗牙根草地相比裸地能够很好地延缓峰现时间。随着坡度和降雨强度的增加,狗牙根草地和裸地产流速率趋于稳定所需时间也在缩短,狗牙根草地和裸地的稳定产流速率也在不断增大;3)随着坡度的增大,狗牙根草地和裸地稳定产流速率之间的差距逐渐缩小,狗牙根草地对总径流量的削减是呈减弱的趋势;4)拟合了径流削减率与降雨强度、坡度的方程, $E = I^{-0.23} (1 - \sin \theta)^{0.58} \times e^{4.93} \times 100\%$,双侧统计相关性显著。

关键词:人工模拟降雨; 狗牙根草地; 削减地表径流; 降雨强度; 坡度

中图分类号:S715.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2015)10-0103-07

ZHU Yong-jie¹; BI Hua-xing^{1,2}; CHANG Yi-fang¹; HUO Yun-mei¹; WANG Xiao-xian¹. **Effects of Cynodon dactylon grassland with 90% coverage on reducing single rainfall runoff.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(10) 103-109 [Ch, 28 ref.]

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Forestry Ecological Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

We studied the effects of *Cynodon dactylon* grassland with 90% coverage on the generation process of surface runoff on bare land at each rainfall event and the reduction of total runoff by means of simulated rainfall experiment. The results showed that *C. dactylon* grassland had a remarkable effect in extending the initial runoff time, with the minimum 4'2", the maximum 29'8", and the average of 11'42". The grassland had a remarkable runoff reduction rate of 59.04% of the total runoff on the bare land, with an average of 47.76%. Grassland can well delay the peak runoff time compared with the bare land. Time for runoff generation rate tending to be stable on grassland and bare land was also shortened with the slope degree and rainfall intensity increasing, and the stable rate of runoff generation was also increased. The difference in stable rate of runoff generation between grassland and bare land was smaller as the slope degree increased, and the capacity of grassland to reduce total runoff tended to decline. Rainfall intensity and slope gradient were negatively correlated with reduction rate, following the equation of $E = I^{-0.23} (1 - \sin \theta)^{0.58} \times e^{4.93} \times 100\%$, with statistical significance on both sides.

Key words artificial simulated rainfall; *Cynodon dactylon* grassland; runoff reduction; rainfall intensity; slope degree

狗牙根(*Cynodon dactylon*)是应用广泛的一种暖季型草坪草^[1]。其主要分布在我国黄河流域以

收稿日期: 2015-03-24 修回日期: 2015-04-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项(2013ZX07304-001)。

第一作者: 朱永杰。主要研究方向: 林业生态工程。Email: 455710351@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 毕华兴,教授,博士生导师。主要研究方向: 水土保持与林业生态工程。Email: bhx@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

南地区,在南方护坡绿化中较为常见^[2],是良好的固土护坡植物^[3]。目前针对狗牙根在防治水土流失方面的作用研究较多,汤崇军等^[4]研究表明,不同种植处理方式下的狗牙根对堤坝径流和泥沙流失影响显著。稽晓雷等^[5]对狗牙根根系须根数量和长度对边坡表层土体稳定性的影响研究发现根系的存在能够很好地提高边坡表层土的稳定性。也有研究表明,狗牙根对削减降雨侵蚀力效果较好,削减率达89.6%^[6]。现有研究表明,在既定植被条件下,地表径流系数是随着雨量的增加而增大的,植被对径流量的削减率与雨量并不是单一的递增或递减关系^[7]。现阶段已有许多学者用定性或定量方法去研究林地植被对地表径流系数以及径流量的影响^[8-9]。同时也有不少学者对城区大区域综合径流系数的变化进行了相关研究^[9-12],但这些研究并没有突出不同降雨强度和坡度等组合条件下狗牙根草地对径流削减作用的量化研究,本文通过不同降雨强度、坡度的模拟人工降雨试验,分析了以狗牙根草地为植被类型、土壤质地为黏土的下垫面对地表径流初始形成时间以及径流量变化的影响,并得到了不同降雨强度和坡度条件下削减率变化的回归方程,对指导相关区域水土流失防治以及狗牙根草地雨水径流的控制具有一定价值,同时也为狗牙根草地径流的进一步深入研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验设备与材料

试验在北京林业大学鹫峰降雨大厅进行,试验系统包括人工降雨系统、坡地试验系统、试验控制系统、供水系统4个部分。其中,降雨装置为下喷式,有效降雨高度12 m,雨滴终点速度接近自然降雨速度,可模拟10~300 mm/h的降雨强度,降雨强度值可以精确到1 mm,经标定,该降雨系统降雨均匀度可达到85%以上^[13]。

本试验所采用的土槽规格为0.5 m(宽)×2.0 m(长)×0.3 m(深),底部留有若干直径5 mm的小孔,以便土壤水自由下渗。土槽坡度在0~30°范围内自由可调,精度为2°。

试验用土为江苏省无锡市耕作土,无锡市位于江苏省南部,东临苏州,南濒太湖,西接常州,北临长江。主要土壤类型包括7个土类、12个亚类、28个土属,在长时间的劳动生产中,修建水利设施、平整土地、围湖造田,形成大面积水稻土,占耕地面积的90%以上,其土性较黏,因淋溶作用较强,土壤密度约为1.40 g/cm³。通过Microtrac公司生产的激光粒径分析仪(S3500)得到其粒径组成(表1)。

表1 供试土壤机械组成

Tab. 1 Mechanical composition of experimental soil

粒径 Particle size/mm	颗粒质量比 Mass fraction of particles/%
砂粒 Sand(≥0.02 mm)	47.68
粉粒 Powder(0.02~0.002 mm)	51.53
黏粒 Clay(<0.002 mm)	0.79

1.2 试验方法

试验时,先将土样在自然状态下风干过10 mm土筛,装填于试验土槽。填土前,根据1.40 g/cm³的土壤密度和土层厚度(20 cm)计算填土量,分4层填土并压实。填土前在底部铺10 cm厚的细沙,以保证透水性良好。为了排除土壤初始含水率对试验的影响,试验采用6050X3K1B-MiniTrase Kit土壤水分测定仪每天不间断监测土壤水分,以期每次试验前土壤含水率基本相同。草被覆盖度(VFC)采用方格法测定^[14],本试验狗牙根草地盖度为90%。

装填好土槽后,在土槽内种植狗牙根。种植后每天将土槽推至室外接受一定量光照,如遇高温或者阴雨天气则将土槽放置在室内,隔天浇灌一定量水。狗牙根草皮取自北京林业大学昌平草坪科学基地,为了减少草皮自带土壤对试验产生的影响,将草皮根系所附带的大块土全部轻轻敲碎抖落,尽量保留主根根系,草皮厚度控制在1~2 cm,刚种植的狗牙根草皮茎叶由于蒸腾作用失水枯萎,叶片卷缩,主根及侧根根系长度不到5 cm。利用剩余的草皮在花盆里用同一种填土方式种植,生长条件及养护条件与土槽内的狗牙根相同。1周左右狗牙根茎叶全部舒展并且颜色翠绿,2周后用土钻在花盆里取土,由于狗牙根的根系主要分布在0~10 cm土层^[15],狗牙根根系伸展长度达到10 cm左右即认为其生长稳定,此时土槽内的狗牙根也生长稳定,接近自然状态草地,然后进行降雨产流试验。

江苏省无锡市暴雨强度公式:

$$I = \frac{A_1(1 + Clg T)}{(t + b)^n} \quad (1)$$

式中:I为t时段内的平均暴雨强度,mm/min;t为降雨历时,min;T为暴雨重现期,a;A₁、b、C、n为地区参数。在江苏无锡,上述参数取值分别为105.79、46.4、0.828、0.99。

根据上述公式,本试验共设3种降雨强度(30、60、90 mm/h),分别代表重现期为1、2、3年的暴雨,根据该地暴雨统计数据^[16],1、2、3年重现期是该地发生频数较大的暴雨,3个坡度(5°、10°、20°)、2种下垫面(盖度为90%的狗牙根草地、盖度为0的裸

地), 共 18 种试验组合, 每次降雨量设定为 90 mm。每种试验重复 2 次, 将得到的 2 次平行数据进行差异性分析, 若差异性不显著则取 2 次的平均值, 若差异性显著则再进行 1 次该条件下的试验, 排除误差大的 1 次, 取其余 2 次的平均值。

降雨开始后用秒表计时, 记录开始产生径流的时间, 秒表所记录的时间精确到秒, 开始产流后的前 20 min 每 2 min 取 1 次径流泥沙样, 20~60 min 每 5 min 取 1 次径流泥沙样, 1 h 后每 10 min 取 1 次径流泥沙样。径流泥沙样用量筒测定, 量筒规格有 50、100、500、1 000 mL 4 种规格, 50、100 mL 精度为 1 mL, 500 mL 精度为 5 mL, 1 000 mL 精度为 10 mL, 根据径流量选择相对应的不同规格量筒进行测量, 最终读数精确到 1 mL。由于径流总量值较大, 单位用 L 表示, 由 mL 化为 L, 采取 4 舍 5 入, 最后精确到 10 mL。

1.3 径流削减率

$$Q = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q 为削减率, %; Q_1 为裸地产生的径流总量, L; Q_2 为狗牙根草地产生的径流量, L。

2 结果与分析

2.1 裸地与狗牙根草地初始产流时间对比

试验测定的初始产流时刻结果见表 2。从表 2 可以看出, 在相同坡度和相同降雨强度条件下, 与裸地相比, 90% 盖度的狗牙根草地(以下简称狗牙根草地)对初始产流时间延长效果明显, 最小延长 4'2", 最大延长 29'8", 平均延长初始产流时间 11'42"。随着降雨强度的增大, 狗牙根草地对坡面初始产流时间的延缓作用是呈逐渐减弱的趋势, 延缓作用越来越小。这与陈洪松等^[17]的研究结果相似, 即同一植被类型降雨强度越大, 产流越快, 而裸地由于会产生土壤结皮, 因此降雨强度的影响减弱。所以随着降雨强度的增大, 狗牙根草地的延缓作用呈减弱趋势。降雨强度为 30 mm/h 条件下, 狗牙根草地对初始产流时间延缓效果较 60、90 mm/h 好, 30 mm/h、20°条件下狗牙根草地相比裸地对初始产流时间的延缓作用最好, 达到 29'8"。从表 2 还可以看出, 坡度和降雨强度也是影响初始产流时间的重要因子, 初始产流时间随着降雨强度和坡度的增大而明显缩短。

2.2 狗牙根草地与裸地产流过程

不同降雨强度和坡度条件下狗牙根草地、裸地的产流过程如图 1 所示。从图 1 可以看出, 裸地和狗牙根草地的径流产生规律相似, 在降雨初始阶段,

表 2 不同降雨条件下初始产流时间

Tab. 2 Initial runoff generation time under different rainfall conditions

降雨强度 Rainfall intensity/ (mm·h ⁻¹)	坡度 Slope degree/ (°)	下垫面盖度 Coverage rate/%	初始含水率 Initial moisture content/%	开始产流时间 Initial runoff generation time
30	5	90	15.06	54'
		0	14.28	49'58"
	10	90	15.50	50'10"
		0	16.82	32'10"
	20	90	20.00	40'45"
		0	21.46	11'37"
60	5	90	15.30	33'19"
		0	14.90	22'
	10	90	15.26	18'40"
		0	14.80	12'33"
	20	90	15.42	16'
		0	16.90	8'13"
90	5	90	10.48	16'50"
		0	9.08	5'
	10	90	13.15	12'27"
		0	12.72	6'
	20	90	16.94	13'30"
		0	14.72	2'18"

产流速率较小, 随着降雨进行产流速率不断增大, 最后产流速率趋于稳定, 在某一值附近波动。由图 1 可知, 裸地出现产流峰值所需时间比狗牙根草地要短; 不同坡度和降雨强度下狗牙根草地产流出现峰值所需时间为 10~40 min, 裸地所需时间为 5~30 min, 最大相差 25 min, 说明狗牙根草地相比裸地能够很好地起到延缓峰现时间, 郭雨华等^[18]、朱连奇等^[19]认为这主要是因为狗牙根草地中草的根系在一定程度上改良了土壤的物理性状, 增加了土壤孔隙度, 从而增加土壤入渗; 同时草的叶片也会对雨水起到截留作用, 延缓部分雨水到达地面的时间, 所以狗牙根草地相比裸地出现峰值时间要长。同时, 随着坡度和降雨强度的增加, 狗牙根草地和裸地产流速率趋于稳定所需的时间也在缩短, 裸地从 55 min 缩短至 10 min 左右, 狗牙根草地从 70 min 缩短至 30 min 左右。

从图 1 中还可以看出, 随着降雨强度和坡度的增加, 狗牙根草地和裸地的稳定产流速率也在不断增大。赵会娟^[20]在坡度对草坪草径流影响的研究中也认为, 坡度和降雨强度的增加会使草坪的径流效率提高, 从而使产流量增加。狗牙根草地的稳定

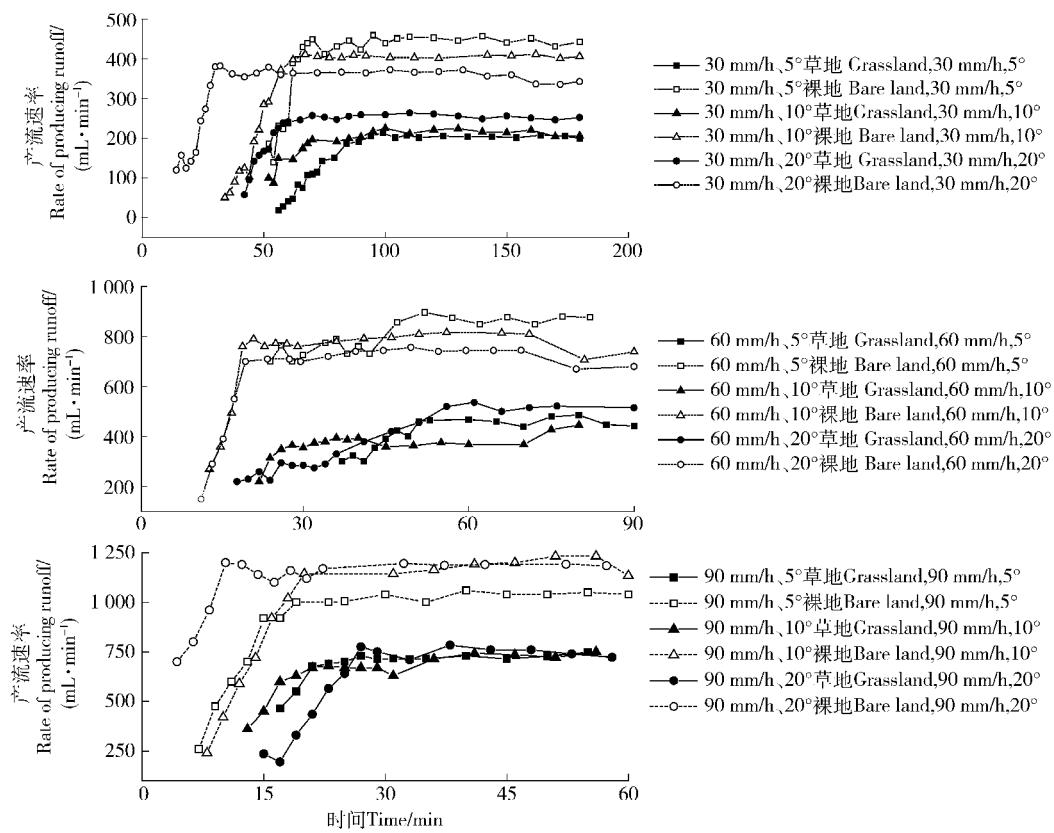


图1 裸地和狗牙根草地产流速率

Fig. 1 Runoff generation rate on bare land and grassland

产流速率在 200 ~ 750 mL/min, 裸地的稳定产流速率在 380 ~ 1 200 mL/min。图 1 显示, 在同一降雨强度下, 随着坡度的增大, 狗牙根草地和裸地稳定产流速率之间的差距逐渐缩小。降雨强度 30 mm/h, 两者之间相差 29.72% ~ 54.32%; 降雨强度 60 mm/h, 稳定产流速率相差 29.84% ~ 52.62%; 降雨强度为 90 mm/h, 两者之间相差值为 29.88% ~ 40.76%。这说明随着坡度增加, 狗牙根草地在产流稳定时相比裸地的削减作用有减弱趋势, 这主要是由于坡度增加, 土壤入渗量减少, 狗牙根草地产流加快、产流增加, 从而使狗牙根草地对径流的削减量减少。

2.3 狗牙根草地对径流总量的削减

表 3 所示为不同试验条件下狗牙根草地与裸地的坡面总径流量及其削减率试验结果。从表 3 可以看出, 各试验条件下, 狗牙根草地产生的径流总量与裸地相比, 其径流削减效果显著, 总径流量差异性极显著 ($P < 0.01$); 对总径流量的最大削减率达到 59.04%, 平均削减率为 47.76%。

从表 3 还可以看出, 相同坡度条件下, 随着降雨强度增大, 狗牙根草地对径流总量的削减率总体上是减小的, 狗牙根草地植物对降雨的截留作用会减小, 截留率明显不如小强度的降雨。同时, 随着降雨强度增大, 土壤入渗率也会降低, 从而导致产流时间

比小降雨强度要早, 产流量增大, 削减率减小。

由表 3 中数据计算可知, 5°、10°、20°坡度条件下, 狗牙根草地对各坡度径流总量的平均削减率分别为 53.28%、49.94%、40.07%, 说明随着坡度增大, 在 30、60、90 mm/h 3 种降雨条件下, 狗牙根草地对径流总量的削减是呈减弱的趋势, 坡度越大, 各降雨强度条件下的平均削减率也越小。同时对比削减作用发现, 降雨强度为 30 mm/h 条件下各坡度狗牙根草地对径流总量的削减效果最好, 比其他 2 种降雨强度的削减率都要高。

根据上述分析可知, 降雨强度和坡度与狗牙根草地的削减作用有较大的相关关系。王万中等^[21]、田风霞等^[22]对黄土高原坡面径流泥沙研究表明, 降雨强度与土壤侵蚀的径流泥沙呈显著幂函数关系; 彭文英等^[23]发现, 有植被覆盖的土地利用方式条件下, 用幂函数方程对降雨量与径流量进行拟合的效果较好; 李宏伟等^[24]发现, 径流产生效率随降雨强度和坡度的增大呈幂函数形式递增, 且相关系数较高; 同时有研究表明, 在 10°、15°、20° 3 个不同坡度条件下, 降雨强度与径流量表现为幂函数相关关系^[25]。根据径流与降雨强度以及坡度的相关关系, 对降雨强度和坡度的弦值同时取对数, 采用回归分析, 得到如下方程:

表3 裸地和狗牙根草地径流总量及径流削减率

Tab. 3 Total runoff volume and reduction rate on bare land and grassland

试验条件 Conditions	裸地径流总量	狗牙根草地径流总量	径流削减率
	Total runoff volume on bare land/L	Total runoff volume on grassland/L	Runoff reduction rate/%
雨强 Rainfall intensity 30 mm/h, 坡度 Slope degree 5°	55.13	22.58	59.04
雨强 Rainfall intensity 60 mm/h, 坡度 Slope degree 5°	57.10	24.31	57.42
雨强 Rainfall intensity 90 mm/h, 坡度 Slope degree 5°	52.02	29.45	43.39
雨强 Rainfall intensity 30 mm/h, 坡度 Slope degree 10°	53.55	25.84	51.75
雨强 Rainfall intensity 60 mm/h, 坡度 Slope degree 10°	56.39	27.26	51.65
雨强 Rainfall intensity 90 mm/h, 坡度 Slope degree 10°	59.43	31.85	46.41
雨强 Rainfall intensity 30 mm/h, 坡度 Slope degree 20°	57.83	32.76	43.35
雨强 Rainfall intensity 60 mm/h, 坡度 Slope degree 20°	54.62	33.20	39.21
雨强 Rainfall intensity 90 mm/h, 坡度 Slope degree 20°	54.16	33.77	37.65
平均 Average	55.58	29.00	47.76

$$E = I^{-0.23} (1 - \sin \theta)^{0.58} \times e^{4.93} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E 表示径流削减率, %; I 表示降雨强度, mm/min; θ 表示坡度(°)。

方程决定系数 $R^2 = 0.77$, 回归方程的相关性见表4。从表4可以看出, 坡度和降雨强度是影响狗牙根草地削减率的重要因子, 坡度和降雨强度与狗牙根草地削减率呈显著性相关, 这与张新和^[26]、李裕元等^[27]、李君兰等^[28]的研究结果相类似。

从式(3)可以看出, 坡度和降雨强度与削减率是幂函数相关, 降雨强度 I 的指数为负, 所以方程中的降雨强度 I 与削减率 E 呈负相关关系; $1 - \sin \theta$ 的指数为正, 而 $1 - \sin \theta$ 是减函数, 根据复合函数规律, 递增函数与递减函数的复合还是减函数, 因此坡度 θ 与削减率 E 也是呈负相关关系, 这与前面的分析结果相一致。

表4 回归方程统计分析

Tab. 4 Statistical analysis of regression equation

	df	SS	MS	显著性 Significance (F)
回归分析 Regression analysis	2	0.16	0.08	0.01*
残差 Residual error	6	0.05	0.01	
总计 Total	8	0.20		

注: * 表示差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。Note: * represents the significance level is $P < 0.05$.

3 结论与讨论

1) 在土壤含水率基本相同时, 相同坡度和相同雨强条件下, 与裸地相比, 90% 盖度的狗牙根草地对初始产流时间延长效果明显。

2) 裸地出现产流峰值所需时间比狗牙根草地

要短, 狗牙根草地相比裸地能够很好地起到延缓峰现时间。随着坡度和降雨强度的增加, 狗牙根草地和裸地产流速率趋于稳定所需时间也在缩短。随着降雨强度和坡度的增加, 狗牙根草地和裸地的稳定产流速率也在不断增大。在同一降雨强度下, 随着坡度的增大, 狗牙根草地和裸地稳定产流速率之间的差距逐渐缩小。

3) 狗牙根草地与裸地在同样降雨条件下所产生的径流总量差异性极显著($P < 0.01$), 说明狗牙根草地对地表径流的削减效果明显; 在 30、60、90 mm/h 3 种降雨条件下, 随着降雨强度的增大, 狗牙根草地对径流总量的削减率总体是减小的; 随着坡度增大, 狗牙根草地对径流总量的削减作用也是呈减弱趋势。

4) 坡度和降雨强度是影响狗牙根草地削减率的重要因子, 经回归分析得到了削减率与坡度、降雨强度的拟合方程 $E = I^{-0.23} (1 - \sin \theta)^{0.58} \times e^{4.93} \times 100\%$, 根据方程计算分析, 降雨强度和坡度与削减率呈负相关关系。

本文在揭示狗牙根草地对径流的削减规律上所设置的坡度梯度较少, 还可以根据所研究区域的具体坡度条件增加坡度在 25° 以上的径流削减变化规律, 如果进行交互作用研究, 可按正交设计试验方案, 以减少降雨场次。此外, 草地所削减的径流雨水可以主要分为草冠截留和下渗到土壤 2 部分, 蒸发部分由于降雨历时较短, 可以忽略不计, 在以后的研究中如果可以分别对草冠截留以及土壤入渗量 2 部分进行量化分析, 对比二者对径流削减的贡献率, 将会更好地说明削减的原理和效果。

参 考 文 献

[1] 张旭, 王俊珍, 崔健, 等. 狗牙根草茎建植成坪质量的施肥和播

- 种研究[J].草业科学,2011,20(5):237-244.
- ZHANG X, WANG Q Z, CUI J, et al. Study on fertilizer and planning depth in bermudagrass sprigs growth and establishment [J]. *Acta Prataculturae Science*, 2011, 20(5):237-244.
- [2] 张小艾,张新全,杨春华,等.狗牙根种质资源及遗传多样性的研究概况[J].草原与草坪,2003(3):17-21.
- ZHANG X A, ZHANG X Q, YANG C H, et al. General conditions of bermudagrass germ resources and inheritance diversity [J]. *Grassland and Turf*, 2003(3):17-21.
- [3] 齐晓芳,张新全,凌瑶,等.我国狗牙根种质资源研究进展[J].草业科学,2011,28(3):444-448.
- QI X F, ZHANG X Q, LING Y, et al. Research progress of the *Cynodon dactylon* germplasm in China[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(3):444-448.
- [4] 汤崇军,杨洁,陈晓安,等.狗牙根护坡不同实施处理方式下堤坝产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2012,10(5):43-48.
- TANG C J, YANG J, CHEN X A, et al. Characteristics of runoff and sediment yield of different *Cynodon dactylon* protection models in Huai River levee[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(5):43-48.
- [5] 稽雷,杨平.狗牙根根系形态对边坡稳定性的影响[J].福建农林大学学报:自然科学版,2013,42(5):531-535.
- JI X L, YANG P. Effects of roots of bermuda grass on stability of slopes[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, 2013, 42(5):531-535.
- [6] 田国行,杨春,杨晓明,等.路基边坡草灌植被消减降雨侵蚀定量分析[J].中国农业大学学报,2010,15(2):24-29.
- TIAN G X, YANG C, YANG X M, et al. Quantitative analysis of effects of grass-shrub vegetation in decreasing rainfall erosion on subgrade slope [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(2):24-29.
- [7] 肖金强,张志强,武军.坡面尺度林地植被对地表径流与土壤水分的影响初步研究[J].水土保持研究,2006,13(5):227-231.
- XIAO J Q, ZANG Z Q, WU J. Preliminary study of the influence of vegetation in natural forested land runoff plots slope on ground runoff[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(5):227-231.
- [8] 闫俊华,周国逸,申卫军.用灰色关联法分析森林生态系统植被状况对地表径流系数的影响[J].应用与环境生物学报,2000,6(3):197-200.
- YAN J H, ZHOU G Y, SHEN W J. Grey correlation analysis of the effect of vegetation status on surface runoff coefficient of forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2000, 6(3):197-200.
- [9] 张志强,秦永胜,余新晓,等.水源涵养林对密云县水库小流域尺度产流的影响[J].北京林业大学学报,1998,20(1):86-92.
- ZHANG Z Q, QIN Y S, YU X X, et al. Water conservation forest impacts on the runoff generation and sediment at small watershed scale in Miyun Reservoir Watershed[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(1):86-92.
- [10] 岑国平,沈晋,范荣生.城市暴雨径流计算模型的建立和检验[J].西安理工大学学报,1996,12(3):184-190.
- CEN G P, SHEN J, FAN R S. The establishment and verification of urban storm runoff model [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 1996, 12(3):184-190.
- [11] ACKERMAN D, SCHIFF K. Modeling storm water mass emissions to the southern California bight [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(4):308-317.
- [12] CRISTINA C M, SANSALONE J J. Kinematic wave model of urban pavement rainfall-runoff subject to traffic loadings [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129(7):629-636.
- [13] 常玉,余新晓,陈丽华,等.模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J].北京林业大学学报,2014,36(3):69-74.
- CHANG Y, YU X X, CHEN L H, et al. Effects of undergrowth litter layer on runoff and sediment reduction under simulated rainfall conditions [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(3):69-74.
- [14] 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,2010,42(1):130-133.
- GUAN F C, LIANG Z W, WANG Z H, et al. Comparison of digital image method and articulation method for vegetation coverage measurement in salinized grassland [J]. *Journal of Northeast Agriculture University*, 2010, 42(1):130-133.
- [15] 陶俊.三峡库区不同护坡草本根系分布对土壤理化性质的时间尺度效应[D].昆明:西南大学,2013.
- TAO J. Time-scale effect of different herb plant roots distribution on soil physical and chemical properties in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Kunming: Southwest University, 2013.
- [16] 孙燕,朱伟军.江苏省梅汛期暴雨特征及其对长江下游水位的影响[J].地理科学,2013, 33(2):238-243.
- SUN Y, ZHU W J. Rainstorm characteristics during meiyu period in Jiangsu and its effect on water levels of lower reaches of the Changjiang River [J]. *Scientia Geographica Siaica*, 2013, 33(2):238-243.
- [17] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- CHEN H S, SHAO M A, ZHANG X C, et al. Field experiment on hill slope rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2):5-8.
- [18] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等.草坪绿地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J].水土保持研究,2006,13(4):264-267.
- GUO Y H, ZHAO T N, SUN B P, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4):264-267.
- [19] 朱连奇,许叔明,陈沛云.山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].地理研究,2003, 22(4):423-438.
- ZHU L Q, XU S M, CHEN P Y. Study on the impact of land use/land cover change on soil erosion in mountainous areas [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(4):423-438.
- [20] 赵会娟.地面坡度对草坪径流的影响试验研究[D].北京:北京林业大学,2008.

- ZHAO H J. Experimental research on the impacts of ground slope on the runoff of turf [J]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [21] 王万中, 张宪奎. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (I) [J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 7-18.
- WANG W Z, ZHANG X K. Study on rainfall erosion in China (I) [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(4): 7-18.
- [22] 田风霞, 王占礼, 牛振华, 等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 141-146.
- TIAN F X, WANG Z L, NIU Z H, et al. Experimental research on soil erosion process in loess hill slope [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 141-146.
- [23] 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): 25-29.
- PENG W Y, ZHANG K L. Relationship of runoff and sediment with rainfall characteristics in different land use [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(4): 25-29.
- [24] 李宏伟, 王文龙, 王贞, 等. 神府东胜煤田扰动地面野外降雨试验 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 11-15.
- LI H W, WANG W L, WANG Z, et al. Field rainfall experiment on the disturbed lands during the Shenfu-Dongsheng Coalfield Exploitation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 11-15.
- [25] 代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1-5.
- DAI S, JIANG G Y, XIA Q, et al. Effects of slopes and rainfall intensities on runoff and sediment characteristic of arid hillside land with yellow soil in Chongqing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 1-5.
- [26] 张新和. 黄土坡面片蚀-细沟侵蚀-切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- ZHANG X H. Experimental study on evolution process of sheet erosion-rill erosion-gully erosion and sediment yield process on loess hill slope [J]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2007.
- [27] 李裕元, 邵明安. 降雨条件下坡地水分转化特征实验研究 [J]. 水利学报, 2004, 35(4): 48-53.
- LI Y Y, SHAO M A. Experimental study on characteristics of water transformation on slope land [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(4): 48-53.
- [28] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析 [J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 8-13.
- LI J L, CAI Q G, SUN L Y, et al. Analysis of interaction effects of rainfall intensity, slope degree and slope length on rill erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 8-13.

(责任编辑 李 娴
责任编委 蔡强国)