

城市高羊茅草坪绿地水沙调控效应

魏小燕¹, 毕华兴^{1,2,3,4}, 李敏¹, 霍云梅¹, 杨晓琪¹, 肖聪颖¹, 张书函⁵

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学, 林业生态工程教育部工程研究中心,

北京 100083; 3. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206;

4. 水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学), 北京 100083; 5. 北京市水科学技术研究院, 北京 100083)

摘要: 通过人工模拟降雨试验, 研究了 60% 覆盖度城市高羊茅草坪绿地(种草当年)在不同坡度(5°, 10°)、不同雨强(30, 60, 90 mm/h)条件下的产流、产沙过程以及径流携带泥沙的作用机制, 并用裸地作为对照, 同时定量分析城市高羊茅草坪绿地的水沙调控作用。结果表明: (1) 高羊茅草坪绿地能够有效延缓初始产流时间, 但随着雨强及坡度的增加其延缓效果降低, 当雨强 90 mm/h、坡度 10° 时草坪绿地几乎没有延缓初始产流时间的效果; (2) 各试验条件下高羊茅草坪绿地与裸地产流率差异性显著, 但雨强 90 mm/h、坡度 10° 时二者差异性不显著; (3) 各试验条件下高羊茅草坪绿地总径流量是裸地的 0.8 倍左右, 总产沙量是裸地的 1/244.68~1/28.34 倍; (4) 60% 覆盖度城市高羊茅草坪绿地能够有效削减径流量和土壤侵蚀量, 但削减程度有差异, 雨强为 30, 60, 90 mm/h 时草坪绿地的平均减流效益分别为 33.23%, 23.04%, 13.78%, 在各场次降雨条件下减沙效益均可达 95% 以上; (5) 试验条件相同时, 高羊茅草坪绿地和裸地的径流挟沙能力有差异, 同一径流量下草坪绿地的土壤侵蚀量远低于裸地; (6) 分别建立城市高羊茅草坪绿地、裸地的径流量与泥沙侵蚀量之间的水沙关系。

关键词: 高羊茅草坪绿地; 产流产沙; 减流减沙; 水沙关系

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0045-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.008

A Study on the Effects of Urban *Festuca arundinacea* Grassland on the Regulation of Runoff and Sediment

WEI Xiaoyan¹, BI Huaxing^{1,2,3,4}, LI Min¹, HUO Yunmei¹,

YANG Xiaoqi¹, XIAO Congying¹, ZHANG Shuhan⁵

(1. College of soil and water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. MOE Forestry Ecological Engineering Research Center, Beijing Forestry University,

Beijing 100083; 3. Forestry Ecological Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 102206; 4. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation

(Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100083)

Abstract: Through artificially simulated rainfall experiments, we studied the regularities of the runoff and sediment yield on slopes of different gradients (5° and 10°) under different rainfall intensities (30 mm/h, 60 mm/h, and 90 mm/h) with different coverages (60% coverage of *Festuca arundinacea* grassland in the first year of planting, and bare land). A quantitative study was carried out on the soil and water regulation of *F. arundinacea* grassland. The results showed that: (1) *Festuca arundinacea* grassland had a remarkable effect on extending the initial runoff time. However, such effect decreased with the increase of rainfall intensity and slope gradient. The effect on the extension the initial runoff time of grassland was not significant under rainfall intensity of 90 mm/h on the 10° slope. (2) Under different experimental conditions, there were significant differences between *F. arundinacea* grassland and bare land, except under rainfall intensity of 90 mm/h on the 10° slope. (3) Under different experimental conditions, the total runoff of *F. arundinacea* grassland was about 0.8 times as much as that of the bare land, and the total sediment yield of *F. arundinacea* grassland was 1/244.68—1/28.34 times as much as that of the bare land. (4) A 60% coverage of *F. arundinacea* grassland could effectively reduce runoff and soil erosion, but the reduction degree was differ-

收稿日期: 2017-01-06

资助项目: 国家水体污染控制与治理重大专项“城市地表径流减控与面源污染削减技术研究(2013ZX07304-001); 科技创新服务能力建设—协同创新中心—林果业生态环境功能提升协同创新中心(PXM2016_014207_000083)

第一作者: 魏小燕(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: 1976835739@qq.com

通信作者: 毕华兴(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与林业生态工程。E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

ent. When the rainfall intensity was 30 mm/h, 60 mm/h, and 90 mm/h, the average runoff reduction was 33.23%, 23.04%, and 13.78%, respectively. The sediment reduction could be more than 95% under different rainfall conditions. (5) Sediment-carrying capacity of *F. arundinacea* grassland was different from that of the bare land under the same test conditions. The amount of soil erosion in the *F. arundinacea* grassland was lower than that of the bare land under the same runoff conditions. (6) The relation between runoff and sediment was established for *F. arundinacea* grassland and bare land.

Keywords: *Festuca arundinacea* grassland; runoff and sediment yield; runoff and sediment yield reduction; relation between runoff and sediment

高羊茅(*Festuca arundinacea*)是我国北方典型冷季型城市草坪草,不仅适应气候能力强,而且其抗热、耐旱性能明显优于其他草种,因此在国内城市草坪绿地中被广泛使用^[1-3]。有研究表明,城市高羊茅草坪绿地能有效减少地表径流量、削减暴雨径流峰值、减少水土流失,对防治土壤侵蚀发挥着不可或缺的作用^[4-7]。目前,大多数针对草被产流产沙的研究主要以不同覆盖度水土保持草种或牧草为主。赵春红等^[8]通过人工模拟降雨试验,研究了沙打旺(*As-tragalus adsurgens*)草地调控绵沙土坡面侵蚀机理,得出 40% 盖度的沙打旺牧草减沙效益可达 70%,且牧草能够显著降低径流流速。姚文艺等^[9]采用人工模拟降雨试验研究了产流过程对立地条件的响应关系,得出紫花苜蓿(*Medicago sativa*)草地的产流过程波动性小于裸地,且裸地平均产流率为草地的 2.0~14.4 倍。潘成忠等^[10]通过人工模拟降雨试验对不同盖度黑麦草(*Lolium perenne*)坡面与裸地坡面的产流产沙过程进行了研究,得出与裸地相比,草地的含沙量、输沙率、径流量及径流流速均有不同程度的降低。张思毅等^[11]采用人工模拟降雨试验,研究了不同覆盖度的香附子(*Cyperus rotundus*)调控南方红壤坡面土壤侵蚀机理,得出香附子具有较好的减沙作用,其中盖度为 33% 的香附子减少土壤侵蚀可达 72%。刘纪根等^[12]、孙佳美等^[13]研究表明,与裸地相比,草地具有良好的减流减沙效益,且草地泥沙量主要受降雨强度和降雨量的影响,径流量主要受降雨强度、降雨量、覆盖度和坡度的影响。总体来讲,现有大多数研究都表明,不同草被措施均具有良好的减流减沙效益。然而,关于降雨强度和坡度对城市草坪草水土保持效益影响,尤其是直接针对城市高羊茅草坪绿地的水沙调控作用及径流携带泥沙作用机制的研究较少。因此本文选取 60% 盖度的城市高羊茅(*Festuca arundinacea*)草坪草,研究城市高羊茅草坪绿地(以下简称草坪绿地)种草当年的水沙调控作用及水沙关系,以期进一步丰富我国城市草坪绿地水土保持功能研究,为城市草坪绿地水土保持规划和土壤侵蚀预报提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设备与材料

试验进行时间为 2015 年、2016 年 5 月—9 月,地点位于北京林业大学鹭峰模拟降雨大厅,模拟降雨装置为 QYJY—503C,经研究得出该模拟降雨装置各项指标均达到试验要求,可以用于水土保持试验研究^[14]。

试验所用土槽的规格为 2 m(长)×0.5 m(宽)×0.3 m(深),坡度调节范围为 0~30°,底部留有直径为 5 mm 的小孔,使水分可自然下渗。试验土壤为取自北京市昌平区的砂壤土,土壤容重为 1.33 g/cm³,通过对供试土壤机械组成进行分析,其土壤颗粒组成为砂粒(2~0.02 mm)占 77.04%,粉粒(0.02~0.002 mm)占 22.58%,黏粒(<0.002 mm)占 0.38%。

根据北京地区城市草坪绿地实地调查,确定试验所用草种为高羊茅,出于绿地造价等问题的综合考虑,绿地覆盖度一般取 60% 左右且可以基本覆盖地面。因此,试验用草为北方典型冷季型城市草坪草高羊茅,盖度为 60%。

1.2 试验设计与测定

试验共设 3 个降雨强度(30, 60, 90 mm/h)、2 个坡度(5°, 10°)、2 种下垫面(60% 盖度高羊茅、裸地)共 12 组试验,总降雨量均为 90 mm。

每组试验均设 1 组平行,以保证试验的准确性,共进行了 24 场人工模拟降雨试验。具体试验设计如表 1 所示,并为 12 组试验编号为 B1, B2, B3, B4, B5, B6, L1, L2, L3, L4, L5, L6。

填土前在槽底铺 10 cm 厚的细沙,以保证透水性良好。然后再填入试验用土,根据设计容重和土层厚度(20 cm)计算填土质量,填土时以 5 cm 为 1 层分层填土并压实,控制土壤容重在设计范围之内。填土完成后,行播高羊茅使其覆盖度达到 60%,采用照相法^[15]对其覆盖度进行分析。由于裸地主要用于对照,因此其土壤的装填方法与高羊茅一致。

每次正式降雨开始前首先进行雨强率定。为保证土壤前期含水率基本一致,正式降雨前还需采用 TDR 测定土壤水分。正式降雨开始后用秒表计时并

记录初始产流时间,产流开始后前 20 min 由于产流不稳定,每隔 2 min 取 1 次径流泥沙样,20~60 min 每隔 5 min 取 1 次径流泥沙样,60 min 后每隔 10 min 取 1 次径流泥沙样。降雨结束后,利用量筒量取径流体积,用烘干称重法测定径流中的泥沙量。

表 1 试验设计

试验 编号	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨量/ mm	坡度/ (°)	降雨 历时/h	草被 类型	盖度/ %	平行数
B1	30	90	5	3.0	高羊茅	60	2
B2	30	90	10	3.0	高羊茅	60	2
B3	60	90	5	1.5	高羊茅	60	2
B4	60	90	10	1.5	高羊茅	60	2
B5	90	90	5	1.0	高羊茅	60	2
B6	90	90	10	1.0	高羊茅	60	2
L1	30	90	5	3.0	裸地	60	2
L2	30	90	10	3.0	裸地	60	2
L3	60	90	5	1.5	裸地	60	2
L4	60	90	10	1.5	裸地	60	2
L5	90	90	5	1.0	裸地	60	2
L6	90	90	10	1.0	裸地	60	2

1.3 减流减沙效益计算方法

$$\alpha = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\%$$

式中:α为减流效益(%);Q₁为裸地总径流量(mL);Q₂为草坪绿地总径流量(mL)。

$$\beta = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%$$

式中:β为减沙效益(%);M₁为裸地总产沙量(g);

表 2 草坪绿地与裸地初始产流时间

指标	试验编号											
	B1	L1	B3	L3	B5	L5	B2	L2	B4	L4	B6	L6
初始含水率/%	30.2	31.4	31.5	30.2	30.6	29.7	32	29.3	28.5	29.5	31.5	30.3
初始产流时间/min	65	45.5	7.5	5.5	4	3.2	25	23	5.2	4.2	3.5	3

2.1.2 不同雨强及坡度条件下草坪绿地和裸地的产流率 由图 1 可以看出,雨强和坡度对草坪绿地和裸地的产流过程均有一定的影响,且试验条件下两者产流过程相似,随降雨时间的增加,产流率均呈先增加后逐渐达到稳定的趋势。雨强对产流率影响显著,雨强越大,产流率越大。坡度对产流率也有一定影响,但较雨强影响程度小。雨强为 30,60,90 mm/h 时,草坪绿地和裸地的产流率始终是 10°坡面处理大于 5°坡面处理。通过差异性分析发现,草坪绿地与裸地在各坡度条件下,不同雨强之间产流率差异性均极显著($p<0.01$);草坪绿地与裸地在各雨强条件下,不同坡度之间产流率差异性均不显著($p>0.05$),说明雨强是影响草坪绿地和裸地产流率的主要因子。此外,雨强对产流率到达峰值所需时间的影响也较为显著,且雨强越大,产流率到达峰值所需时间越短。同样,相比雨强,坡度对产流率到达峰值时间的影响不明显。

M₂为草坪绿地总产沙量(g)。

2 结果与分析

2.1 不同雨强及坡度条件下草坪绿地的水沙调控作用

2.1.1 不同雨强及坡度条件下草坪绿地和裸地的初始产流时间 由表 2 可以看出,在初始含水率相近的情况下(保持在 30%左右),随雨强和坡度的增加,草坪绿地与裸地的初始产流时间都逐渐减小。雨强 30 mm/h、坡度 5°时草坪绿地与裸地初始产流时间均最长,分别是草坪绿地初始产流时间为 65 min、裸地初始产流时间为 45.5 min;雨强为 90 mm/h、坡度为 10°时草坪绿地与裸地初始产流时间均最短,分别是草坪绿地初始产流时间为 3.5 min、裸地初始产流时间为 2 min。由表 2 可知,草坪绿地的初始产流时间明显晚于裸地,说明 60%盖度草坪绿地能延缓初始产流时间,这是由于不仅草被冠层能够拦蓄雨水,而且草被根系能增加土壤入渗性能^[16]。坡度为 5°时,雨强 30,60,90 mm/h 条件下草坪绿地延缓初始产流时间分别 14.5,2,0.8 min;坡度为 10°时,其延缓初始产流时间分别 2,1,0.5 min。由此可以看出,随着坡度及雨强的增加,高羊茅草坪绿地延缓初始产流时间的效果逐渐降低,在 90 mm/h、10°条件下,草坪绿地几乎没有延缓初始产流时间的效果。此外,坡度相同时,高羊茅草坪绿地在 60,90 mm/h 2 种雨强下延缓初始产流时间的差异不大。

由图 1 可以看出,草坪绿地能够延缓产流率。经过分析得出:雨强 30 mm/h、坡度 5°、10°时草坪绿地与裸地产流率差异性极显著($p<0.01$);雨强 60 mm/h、坡度 5°时草坪绿地与裸地产流率差异性极显著($p<0.01$),坡度 10°时两者差异性显著($p<0.05$);雨强 90 mm/h、坡度 5°时两者差异性显著($p<0.05$),坡度 10°时两者差异性不显著($p>0.05$)。由此可以得出,随着雨强和坡度的增加草坪绿地与裸地之间产流率的差异性逐渐降低。雨强 90,60,30 mm/h 时草坪绿地分别在降雨 40,60,80 min 以后产流达到峰值,而裸地分别在 30,40,60 min 以后产流达到峰值。由此可以得出,相同条件下草坪绿地达到产流峰值所需时间要大于裸地,说明草坪绿地能够延缓径流达到峰值的时间。这是由于草坪绿地的土壤渗透性高于裸地,坡面径流入渗时间长,从而延缓了径流流量达到峰值的时间。

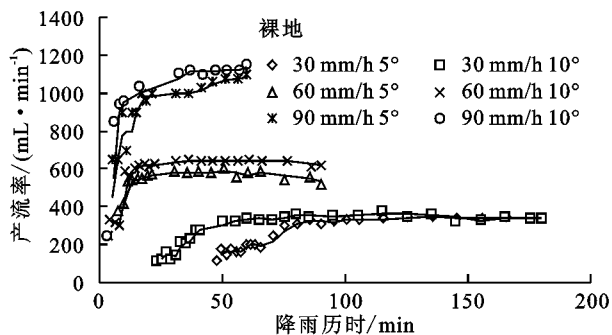
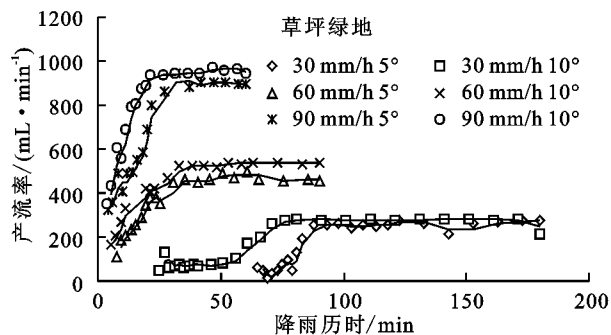


图 1 不同雨强及坡度下草坪绿地与裸地产流过程

2.1.3 不同雨强及坡度条件下草坪绿地和裸地的产沙过程 坡面土壤侵蚀的主要动力是降雨和径流,主要地形因素是坡度。从图 2 可以看出,与产流过程相比,产沙过程更为复杂,曲线波动幅度更大,且坡度对产沙率较产流率的影响更为显著。通过差异性分析发现,草坪绿地和裸地在各坡度条件下,不同雨强之间产沙率差异性均极显著($p < 0.01$);草坪绿地和裸地在各雨强条件下,不同坡度之间产沙率差异性均极显著($p < 0.01$),除了裸地在 90 mm/h 雨强下不同坡度之间产沙率差异性显著($p < 0.05$)。由此可以看出,雨强及坡度均是影响草坪绿地和裸地产沙率的主要因素。

根据图 2 可以明显看出,草坪绿地的产沙率远远

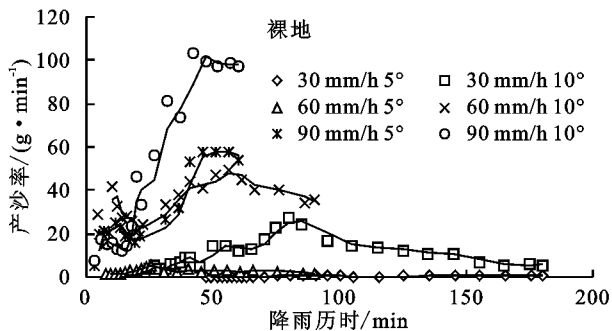
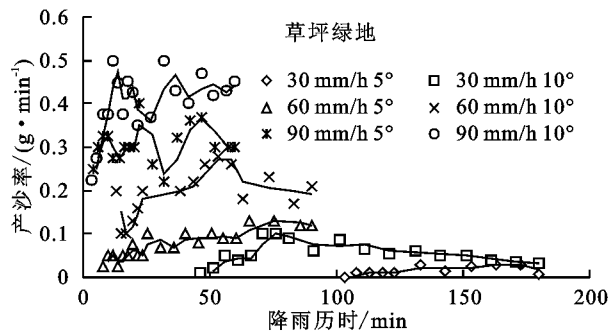


图 2 不同雨强及坡度下草坪绿地与裸地产沙过程

2.2 不同雨强及坡度条件下草坪绿地减流减沙效益

从表 3 可以看出,在总径流量方面:30 mm/h 5°草坪绿地处理的总径流量是裸地的 0.64 倍;30 mm/h 10°草坪绿地处理的总径流量是裸地的 0.70 倍。60 mm/h 5°草坪绿地处理的总径流量是裸地的 0.76 倍;60 mm/h 10°草坪绿地处理的总径流量是裸地的 0.78 倍。90 mm/h 5°草坪绿地处理的总径流量是裸地的 0.86 倍;90 mm/h 10°草坪绿地处理的总径流量是裸地的 0.86 倍。由此可以看出,在各个试验条件下草坪绿地的总径流量是裸地的 0.8 倍左右。同时也说明随着雨强和坡度的增加草坪绿地与裸地之间总径流量的差距逐渐降低,但雨强的影响作用更显著。此外,当雨强为 90 mm/h 时,坡度对总径流量的削减效果几乎没有影响。在总产沙量方面,各试验条件下草坪绿地处理的总产沙量是裸地的 1/244.68~

小于裸地。分别对相同条件下的草坪绿地和裸地的产沙率的差异性进行分析发现,在各个试验条件下差异性均极显著($p < 0.01$)。说明草坪绿地能够有效降低土壤的侵蚀产沙速率。另外,单影响因子对草坪绿地和裸地产沙规律的影响一致,即相同雨强下草坪绿地及裸地的产沙率始终是 10°坡面处理大于 5°坡面处理,相同坡度条件下草坪绿地及裸地的产沙率始终是 30 mm/h 雨强处理 < 60 mm/h 雨强处理 < 90 mm/h 雨强处理。但综合雨强和坡度 2 个因素,发现草坪绿地和裸地的产沙规律有差异,在各试验条件下草坪绿地的产沙率大小为 B1 < B2 < B3 < B4 < B5 < B6,裸地的产沙率大小为 L1 < L3 < L2 < L5 < L4 < L6,说明草坪绿地能够降低坡度对产沙率的影响。

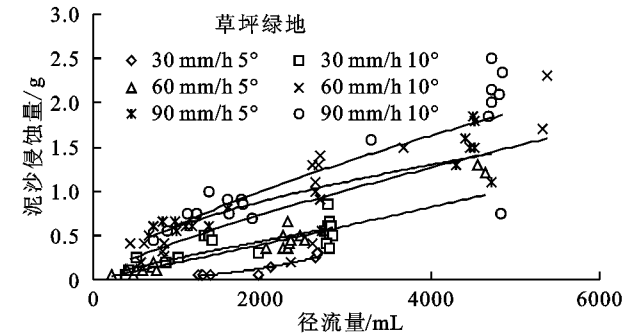
1/28.34 倍。此外,草坪绿地削减总产沙量的规律不同于总径流量,雨强和坡度均对草坪绿地削减总产沙量有关键作用。在减流减沙效益方面,根据表 3 可以得出,(1)随着雨强及坡度的增加草坪绿地减流效益逐渐降低,且雨强对减流效益的影响大于坡度,同时随着雨强增加坡度对减流效益的影响逐渐降低。雨强 30, 60, 90 mm/h 时,草坪绿地平均减流效益分别为 33.23%, 23.04%, 13.78%。另外,通过分析发现雨强 30 mm/h 时 2 种坡度的减流效益相差最大,为 6.22%;雨强 90 mm/h 时 2 种坡度的减流效益相差最小,为 0.38%。(2)草坪绿地在各场次降雨条件下减沙率均可达 95% 以上。这是由于植被能够降低降雨侵蚀力,有效削减径流量,使得土壤受到的侵蚀程度较低。说明 60% 盖度城市高羊茅草坪绿地防止土壤侵蚀效果十分显著。

表 3 各降雨场次产流产沙特征值及减流减沙效益

下垫面 类型	雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	平均产流率/ (mL·min ⁻¹)	平均产沙率/ (g·min ⁻¹)	总径 流量/mL	总产 沙量/g	草地减流 效益/%	草地减 沙效益/%
裸地	30	5	267.78	0.330	41460	54.970		
	60	5	561.26	2.625	46685	213.985		
	90	5	869.00	29.718	51760	2102.930		
	30	10	284.53	10.740	51105	1859.570		
	60	10	568.68	32.611	52940	3305.910		
	90	10	946.26	50.353	58460	3941.960		
高羊茅草 坪绿地	30	5	181.54	0.014	26393	1.700	36.34	96.91
	60	5	374.43	0.077	35460	7.550	24.04	96.47
	90	5	687.76	0.304	44528	17.300	13.97	99.18
	30	10	179.94	0.055	35711	7.600	30.12	99.59
	60	10	419.27	0.178	41275	13.900	22.03	99.58
	90	10	808.40	0.404	50514	22.880	13.59	99.42

2.3 不同条件下草坪绿地和裸地水沙关系分析

地表径流是泥沙侵蚀的动力,因而两者存在着密切的关系。因此基于 60%盖度的城市高羊茅草坪绿地和裸地在不同雨强及坡度条件下的试验数据,分别建立水沙关系曲线(图 3)。从图 3 可以看出,随着径流量的增加泥沙侵蚀量也逐渐增加,其中草坪绿地水沙关系曲线总体上呈上凸形,裸地呈下凸形。说明随着径流量的增加草坪绿地的泥沙侵蚀量变化速率逐渐趋于平缓,但裸地的仍呈增加的趋势。此外,根据图 3 还可以看出,试验条件相同时,在相同径流量下,



分别对不同试验条件下草坪绿地和裸地的径流量(Q)与泥沙侵蚀量(M)进行拟合分析,得出回归方程(表 4)。发现在各试验条件下草坪绿地、裸地的径

草坪绿地的土壤侵蚀量远远低于裸地,这是由于草被不仅能够削弱雨滴动能、降低雨滴溅蚀量、延缓径流流速,而且草被能够拦截泥沙^[17]。说明在相同试验条件下,产生相同径流量时草坪绿地的径流的挟沙能力小于裸地。另外,相同下垫面、不同雨强、不同坡度条件下,产生相同径流时,各试验条件下产生的泥沙侵蚀量不同,即雨强和坡度越大,产生相同径流量时泥沙侵蚀量越大。这是由于径流挟沙能力主要由径流冲刷特性和雨滴击溅能力决定,下垫面一定时,随着雨强和坡度的增大,地表径流及其冲刷增强,泥沙侵蚀量增加^[18]。

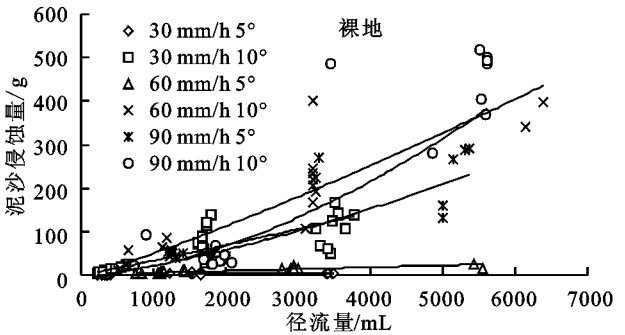


图 3 草坪绿地及裸地水沙关系

流量与泥沙量均呈幂函数关系 $Q=aM^b$ (a 、 b 为常数),其中 R^2 值均大于 0.7,说明拟合效果较好。这与丁文峰等的研究结果一致^[19]。

表 4 草坪绿地与裸地水沙关系回归方程

雨强/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	草坪绿地		裸地	
		方程	R^2	方程	R^2
30	5	$Q=2\times10^{-9}M^{2.3977}$	0.8649	$Q=0.0004M^{1.1375}$	0.8895
30	10	$Q=0.0007M^{0.8466}$	0.7377	$Q=0.0221M^{1.0581}$	0.8686
60	5	$Q=0.0001M^{1.0389}$	0.9188	$Q=0.005M^{0.9863}$	0.7484
60	10	$Q=0.0017M^{0.8559}$	0.7175	$Q=0.0155M^{1.1691}$	0.8818
90	5	$Q=0.0127M^{0.5582}$	0.7966	$Q=0.0012M^{1.14162}$	0.8642
90	10	$Q=0.0049M^{0.701}$	0.7539	$Q=0.0002M^{1.6927}$	0.7316

3 结论

(1)草坪绿地在种草当年能够延缓初始产流时

间,但随着雨强和坡度的增加草坪绿地延缓初始产流时间的效果逐渐降低,当雨强 90 mm/h、坡度 10°时草坪绿地几乎没有延缓初始产流时间的效果。

(2)雨强是影响草坪绿地和裸地产流率的主要因子,坡度对产流率的影响较雨强弱。雨强和坡度均是影响产沙率的主要因子。

(3)草坪绿地在种草当年能够延缓产流率和土壤侵蚀产沙率,在各试验条件下草坪绿地和裸地产流率差异性显著,但雨强 90 mm/h、坡度 10°时两者差异性不显著。在各试验条件下草坪绿地和裸地产沙率差异性均极显著。

(4)各个试验条件下草坪绿地种草当年的总径流量是裸地的 0.8 倍左右,总产沙量是裸地的 1/244.68~1/28.34 倍。此外,60% 盖度草坪绿地能够有效削减径流量和土壤侵蚀量,但削减程度有差异,雨强 30,60,90 mm/h 时草坪绿地的平均减流效益分别为 33.23%,23.04%,13.78%,在各场次降雨条件下减沙效益均可达 95% 以上;

(5)分别建立种草当年草坪绿地、裸地的径流量与泥沙侵蚀量之间的水沙关系,并得出草坪绿地和裸地的径流量与泥沙侵蚀量之间均呈幂函数关系。

参考文献:

- [1] 邓娟娟. 高羊茅草坪草冠气温差时间变化特征及其水分利用效率的研究[D]. 河北 保定:河北农业大学,2014.
- [2] Krans J V, Morris K. Determining a profile of protocols and standards used in the visual field assessment of turfgrasses: A survey of national turfgrass evaluation program-sponsored university scientists[EB/OL]. [2017-01-10]. <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/1/IND44030817.pdf>
- [3] 余高镜,林奇田,柯庆明,等. 草坪型高羊茅的研究进展与展望[J]. 草业科学,2005,22(7):77-81.
- [4] Zhou Z C, Gan Z T, Shangguan Z P, et al. China's Grain for Green Program has reduced soil erosion in the upper reaches of the Yangtze River and the middle reaches of the Yellow River[J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2009, 16

(4): 234-239.

- [5] Osterkamp W R, Hupp C R, Stoffel M. The interactions between vegetation and erosion: new directions for research at the interface of ecology and geomorphology[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(1): 31-36.
- [6] 朱永杰. 城市典型草坪绿地对地表径流削减作用研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [7] 霍云梅. 覆盖度、雨强及坡度对城市典型草坪绿地坡面产沙影响[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [8] 赵春红,高建恩,徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报,2013,24(1):113-121.
- [9] 姚文艺,肖培青,申震洲,等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J]. 水利学报,2011,42(12): 1438-1444.
- [10] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报,2011,36(3):371-377.
- [11] 张思毅,梁志权,谢真越,等. 植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理[J]. 水土保持学报,2016,3(3):1-5.
- [12] 孙佳美,余新晓,樊登,等. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响[J]. 生态学报,2015,35(8):1-9.
- [13] 刘纪根,张昕川,李力,等. 紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):16-20.
- [14] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等. QYJY-503C 人工模拟降雨装置降雨特性试验[J]. 中国水土保持科学,2015,13(2):31-36.
- [15] 路炳军,刘洪鹄,符素华,等. 照相法结合数字图像技术计算植被覆盖度精度研究[J]. 水土保持通报,2007,27(1):78-85.
- [16] 朱红霞. 城市绿地雨水渗透利用(二):绿地土壤的渗透[J]. 园林,2012(2):50-53.
- [17] 张晓艳,周正朝,党珍珍. 草被地上部分水土保持作用研究进展[J]. 中国水土保持,2011(1):47-50.
- [18] 史致男. 不同降雨特性对坡面产流产沙过程的影响[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [19] 丁文峰,李勉,姚文艺,等. 坡沟侵蚀产沙关系的模拟试验研究[J]. 土壤学报,2008,45(1):32-38.

(上接第 44 页)

- [16] Qwens P N, Duzant J H, Deeks L K. Evaluation of contrasting buffer within an agricultural landscape for reducing sediment and sediment-associated phosphorus delivery to surface waters[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(S1): 165-175.
- [17] 肖波,王慧芳,王庆海,等. 坡耕地上等高草篱的功能与效益综合分析[J]. 中国农业科学,2012,45(7):1318-1329.
- [18] Julien F, Benoit T, Daniel G, et al. Biomass carbon, nitrogen and phosphorus stocks in hybrid poplar buffers, herbaceous buffers and natural woodlots in the ri-

parian zone on agricultural land[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154(5): 333-345.

- [19] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草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.
- [20] Pansak W, Hilger T H, Dercon G, et al. Changes in the relationship between soil erosion and N loss pathways after establishing soil conservation systems in uplands of Northeast Thailand[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 128(3): 167-176.