

模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程

甘卓亭¹, 叶佳¹, 周旗¹, 周正朝^{2,3,*}, 上官周平³

(1. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室、宝鸡文理学院, 宝鸡 721007; 2. 陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710062;
3. 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, 杨陵 712100)

摘要: 采用人工模拟降雨的方法, 定量研究了黄土高原地区不同生长阶段黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 和红豆草 (*Onobrychis viciaefolia* Scop.) 及裸地坡面的降雨产流产沙过程, 并通过降雨前剪掉冠层的方法对比分析了两种牧草根系与冠层在减少坡面径流与侵蚀产沙中的贡献率。试验结果表明: 与裸土坡面相比, 两种牧草都能有效的控制坡面土壤侵蚀, 在试验末期黑麦草和红豆草的减流效益分别为 65% 和 45%, 而两者的减沙效益均在 93% 以上。两种牧草根系与冠层减少坡面径流与泥沙贡献率存在一定的差异, 黑麦草冠层比根系具有更大的减流贡献率, 除最后试验阶段冠层减流贡献率为 44.7% 外, 在其他试验阶段黑麦草冠层的贡献率大于 60%。相反, 红豆草对坡面径流的减少则主要依赖于根系的作用。植物根系在控制坡面土壤侵蚀产沙中发挥着很大的作用。从实验初期到实验末期, 黑麦草和红豆草根系的减沙贡献率分别由 72% 和 16% 增加到 96% 和 93%。

关键词: 根系与冠层; 减流减沙; 坡面侵蚀; 黄土高原

Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls

GAN Zhuoting¹, YE Jia¹, ZHOU Qi¹, ZHOU Zhengchao^{2,3,*}, SHANGGUAN Zhouping³

1 Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721007, China

2 College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract: The processes of running off and sedimentation over slope lands covered by ryegrass (*Lolium perenne* L.) and sainfoin (*Onobrychis viciaefolia* Scop.) in their different growing periods as well as by bare soil were studied in simulated rainfall conditions on the Loess Plateau. The contributions of the roots and canopies of ryegrass and sainfoin to reducing the runoff and sediment over the slope lands were compared, by means of cutting off the canopies of the two types of grasses over some experimental pans before a rainfall. The results showed that both ryegrass and sainfoin could control the soil erosion over the slope lands effectively. At the final period of the experiment, the runoff was decreased by 65% over the ryegrass lands and 45% over the sainfoin lands respectively; the sediment was reduced by over 93% on both lands. It was also indicated that the contributions of the roots and canopies to reducing the runoff and sediment were different for both ryegrass and sainfoin. The ryegrass canopies contributed more than the roots to reducing the runoff, by over 60% runoff decreased in most periods except for a 44.7% runoff reduction in the final period. On the contrary, the decreasing of runoff by the sainfoin over slope lands mainly relied on the roots. Meanwhile, the roots of the plants largely affected the controlling of soil erosion on the slope lands; from the first to the final period during the experiment, with the growth of the roots, the reduction of the sediment by the ryegrass was increased from 72% to 96%, and prominently increased from 16% to 93% by the sainfoin.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40901131); 教育部高等学校博士点学科新教师基金资助项目(SRFDP200807181008); 陕西省教育厅科研计划资助项目(09JS071, 09JS073); 宝鸡文理学院重点资助项目(ZK0846)

收稿日期: 2009-08-01; 修订日期: 2009-11-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouzhengchao@126.com

Key Words: roots and canopies; runoff and sediment reduction; soil erosion; the Loess Plateau

黄土高原丘陵沟壑区是我国水土流失最严重的地区之一,也是黄河中下游河道泥沙的主要来源区,严重的水土流失不仅降低了土地生产力,同时由于侵蚀径流与泥沙携带的化学物质对下游河流和湖泊等水体造成严重的非点源污染,进一步导致生态环境恶化,从而成为制约区域生态和经济可持续发展的首要环境问题^[1-3]。

植树种草进行生态恢复是控制土壤侵蚀、减少水土流失的有效途径之一^[4-7]。但对于干旱半干旱的黄土高原区,林木的生长常受到土壤水分匮乏的限制。已有的一些实践表明,在土壤水分极度匮乏的黄土高原地区,过于强调植树造林可能出现大面积的“小老树”并形成严重的土壤干层,其生态效益极差^[8-9]。近年来,国家退耕还林还草工程的实施,把对草地植被控制水土流失和恢复生态作用的认识提高到了一个新的高度,因此开展草地植被调控坡面土壤侵蚀过程及其效益分析研究是非常必要的。

红豆草和黑麦草具有较高的营养价值和较强的萌发再生能力,同时二者耗水量低、适应性强,是当前黄土高原地区退耕(牧)还草工程中重点推广的两种牧草。本文通过人工降雨模拟试验研究红豆草和黑麦草坡面降雨产流产沙过程,分析红豆草和黑麦草的减流减沙效益,讨论草地植被根系与冠层在调控坡面土壤侵蚀过程中的贡献率,以期在理论上为全面理解植被与土壤侵蚀的关系提供参考,为合理的评价两种牧草的生态效应提供依据,同时,在实践中为侵蚀地区草地资源的合理利用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验准备

自制移动变坡式土槽 22 个,尺寸为长×宽×高 = 2.0 m×0.55 m×0.35 m,槽底充分开孔,从而使土壤水分可以自由向底部入渗。供试土壤为杨陵区耕层土壤,土壤先过 1 cm 土筛进行预处理。装土时,先在槽底铺上一层纱布,使土壤水分能均匀下渗。分级过筛后按一定的土粒级配置供试土壤。拌匀后的土壤按设计的容重(容重为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)分层装入径流小区中。每层厚度为 5 cm,并且边装边压实。装土结束后,将土面整平且与槽底平行,以保证试验条件的一致性。装土种草时间为 4 月上旬,草种为黄土高原地区比较常见的多年生黑麦草和红豆草。随机选取 10 个土槽种植黑麦草,另外 10 个土槽种植红豆草,余下两个土槽为裸地作为对照。同一草种类型试验小区种植密度一致,采用穴播,每穴大约 4—5 粒种子。在出苗一周进行定苗,使各个小区牧草苗数相等,以便形成基本一致的盖度。

1.2 侵蚀实验

降雨侵蚀实验在人工模拟降雨大厅进行,降雨时间为牧草出苗后第 12 周开始,整个降雨试验分为 4 个阶段,每隔 5 周进行 1 次。每次降雨只观测 10 个径流小区(4 个黑麦草 + 4 个红豆草 + 2 个裸地,其他小区不测定项目,但仍降雨以保证小区条件的可衔接性)。在降雨前分别剪去两种牧草的任意两个土槽中植被的冠层部分,从而得到仅有根系的土槽。降雨试验采用侧喷式人工降雨设备,降雨高度为 16 m,这个高度可以满足所有雨滴在降落到地面时达到终点速度。根据黄土高原暴雨统计,选择出现频率较高的 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 为人工降雨雨强。参考黄土高原地区退耕还林草坡度(15°)标准,在降雨过程中,土槽坡度为 15° 。在降雨开始后,前 4 min 每 2 min 收集 1 次坡面过程样,之后每 4 min 收集 1 次坡面过程样。记录每次的过程样的质量,通过烘干称重计算产沙量,然后计算产流量和径流泥沙含量。

1.3 数据分析

在本研究中,为了定量分析根系与冠层在减少坡面侵蚀过程中的贡献率,假定草地植被对坡面土壤侵蚀的调控仅为冠层与根系作用之和(实验过程中牧草处于生长旺盛阶段,其枯落物较少,因此在本研究中不考虑枯落物的影响)。因此,冠层对坡面土壤侵蚀的调控作用为牧草的作用减去根系的作用。

牧草减水减沙效益的计算:

$$\begin{cases} CS_p = \frac{S_f - S_p}{S_f} \times 100\% \\ CR_p = \frac{R_f - R_p}{R_f} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中, CS_p 和 CR_p 分别表示牧草的减沙率和减流率; S_f 和 R_f 分别表示裸土(无牧草)土槽的产沙和产流量; S_p 和 R_p 分别表示有牧草覆盖土槽的产沙和产流量。

根系减流减沙效益的计算:

$$\begin{cases} CS_r = \frac{S_f - S_r}{S_f} \times 100\% \\ CR_r = \frac{R_f - R_r}{R_f} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中, CS_r 和 CR_r 分别表示根系的减沙率和减流率; S_f 和 R_f 分别表示裸土(无牧草)土槽的产沙和产流量; S_r 和 R_r 分别表示仅有根系的土槽(降雨前剪去牧草冠层的土槽)的产沙和产流量。

草地冠层减流减沙效益的计算:

$$\begin{cases} CS_s = CS_p - CS_r \\ CR_s = CR_p - CR_r \end{cases} \quad (3)$$

式中, CS_s 和 CR_s 分别表示冠层的减沙率和减流率。

土壤入渗速率的计算:

$$i = I \times \cos\theta - \frac{10^{-3} R_i}{A \cos\theta \times t} \quad (4)$$

式中, i 表示入渗速率(mm min^{-1}); I 表示降雨强度(mm min^{-1}); θ 表示土槽坡度($^\circ$); R_i 表示第 i 次取样所收集的径流量(mL); t 为取样时间(min); A 为土槽的面积(m^2); 10^{-3} 为单位换算系数。

2 结果与分析

2.1 牧草对坡面径流与泥沙的调控

2.1.1 牧草减流减沙效益

与裸土相比植物的减水减沙效益都随植物生长阶段的延长而增加(图1)。从第1次降雨实验(第12周)到最后一次降雨实验(第27周),黑麦草和红豆草的减流效益分别由24.86%和10.83%增加到66.88%和43.17%;同时,黑麦草和红豆草的减沙效益也分别由88.88%和24.45%增加到98.03%和99.84%。在同一生长阶段两种牧草的减沙效益都大于减流效益(图1)。由此说明,当植被生长到一定程度时,由于植物根系和冠层的生长,植物根系通过穿插缠绕土壤颗粒极大的提高了土壤的抗侵蚀能力,同时由于冠层对降雨的截留作用,可以比较完全的控制坡面土壤侵蚀和产流产沙发生,对坡面侵蚀产沙可以起到完全控制的作用,并对坡面径流也有相当大的控制效益。

图1还显示,两种牧草的减流减沙效益存在一定差异。在整个试验过程中,黑麦草的减沙效益明显高于同期红豆草的减沙效益;另外,在整个实验过程中黑麦草的减沙效益都很高,在不同生长阶段黑麦草的减沙效益差异不大;但在不同试验阶段,红豆草的减沙效益差异较大,在试验阶段前期(第12周和第17周)红豆草减沙效益远低于黑麦草的减沙效益,但在试验阶段后期两种牧草间的减沙效益基本一致。其主要原因可能是由于黑麦草的生长速度较快而红豆草的生长速度较慢,在第1次降雨时,种植黑麦草的径流小区植被盖度基本达到75%左右,而种植红豆草的径流小区植被盖度只有25%—30%。并且两种牧草冠层形态也存在一定差异,黑麦草为簇生状叶片,具有很高的叶面积指数,因而可以较大程度拦蓄降雨,延长降雨入渗时间。另

外,由于黑麦草具有较厚的冠层,这些冠层也可以截持一部分降水。综合这些因素,黑麦草能发挥很大的减流效益。相对于黑麦草,在试验前期,一方面红豆草小区的植被覆盖度较低,另外由于红豆草叶片着生于枝条上,并且比较稀疏,因此对降雨的拦蓄截留作用较弱;同时,由于红豆草冠层厚度也较小,对雨水的保持量也很少。综合这些因素,红豆草小区产流较多,其减流效益不如黑麦草具有优势。

在试验前期,由于黑麦草生长较快,基本能有效控制坡面侵蚀产沙的发生,而红豆草由于生长慢,特别是根系还不能充分发挥起水土保持作用,因此在试验初期,红豆草的减沙效益很低,而到后期,由于根系生长可以发挥较好的水土保持效益,因此虽然红豆草的减流效益比黑麦草的减流效益低很多,但是两者之间的减沙效益基本没有差异,都能完全地控制坡面土壤侵蚀的发生。

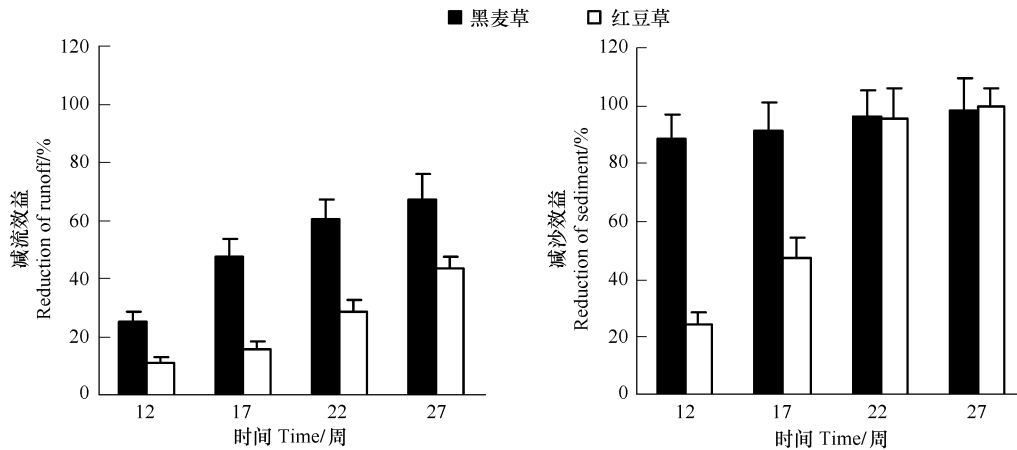


图1 不同生长阶段牧草的减流效益和减沙效益

Fig.1 The reduction of runoff and sediment in different stages of grasses

2.1.2 根系与冠层的减流贡献率

在整个试验过程中,与根系相比黑麦草冠层具有较大的减流贡献率,除第27周冠层贡献率为44.7%外,黑麦草冠层的贡献率大于60%。而与黑麦草根系和冠层的减流贡献率相反,在试验过程中,红豆草根系比冠层具有更大的减流贡献率,整个试验过程中,红豆草根系减流贡献率都大于52%。两种牧草的减流机制存在一定差异(图2)。其主要原因表现为,对于黑麦草,其冠层盖度大且叶面积指数大,整个冠层较厚并且有较大的蓄水能力,在降雨过程中可以拦蓄较多的降雨量,并能延长降雨入渗时间,使较多的雨水渗入土壤中。而且,黑麦草的根比较细,在生长过程中虽然可以改良土壤结构,促进土壤的入渗能力,但是毕竟这个作用是有

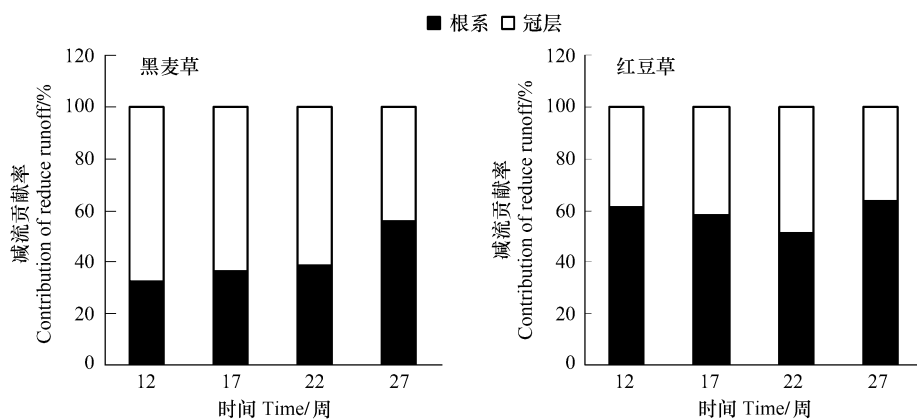


图2 黑麦草与红豆草根系与冠层减流效益比

Fig.2 Root and shoot contribution ratios of reducing runoff of Ryegrass and sainfoin

限的,在剪去地上冠层后,由于缺乏地表覆盖,雨滴直接打击在土壤坡面,在很大的雨强下可能会形成超渗产流,因而其减流量与冠层形成的减流量相比就显得比较小,即减流贡献率较低。与黑麦草不同,红豆草的冠层盖度相对要小,并且冠层较薄,其蓄水能力较弱,减流效益不如黑麦草冠层明显。但是,红豆草根比较粗,在根系的生长过程中,红豆草根不断穿插土壤在一定程度上改善了土壤结构,同时由于一部分根系死后,形成一些比较大的根孔,这些根孔和良好的土壤结构极大的促进降雨的入渗,与冠层相比表现出较大的减流效益,即较大的减流贡献率。

2.1.3 根系与冠层的减沙贡献率

植物根系在控制坡面土壤侵蚀产沙中,发挥着较大的作用(图3)。从第12周到第27周,黑麦草和红豆草根系的减沙贡献率分别由72%和16%增加到96%和93%。由于黑麦草根很细,在生长初期不会破坏原有的土壤结构,并通过根系对土壤土壤颗粒的穿插和缠绕作用,促进了土壤团聚体形成和抗冲刷能力的增强,特别是在实验的后期,土壤中根系生物量达到最大,土壤抗侵蚀的能力也极大的增强。因此,在去除地表冠层后,坡面侵蚀产沙量并不比有冠层覆盖时增加太多,从而表现出根系巨大的减沙贡献率。对于根系增强土壤抗侵蚀的能力前人的研究也得出了相似的结论^[10-15]。

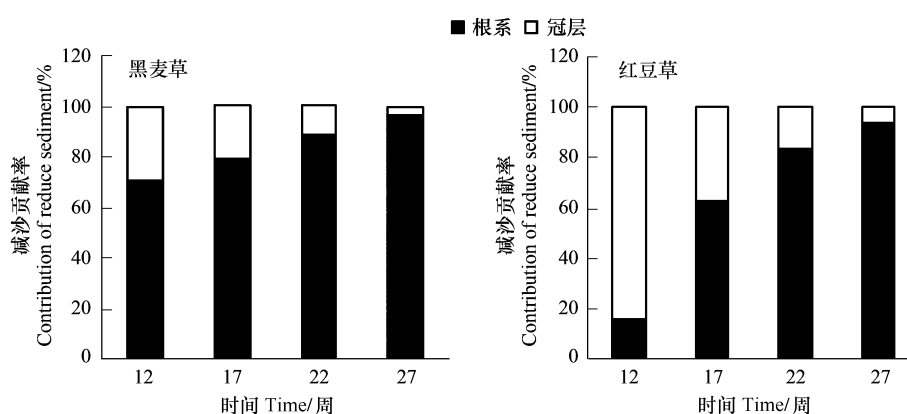


图3 黑麦草与红豆草根系与冠层减沙效益比

Fig.3 Root and shoot contribution of reduce sediment of Ryegrass and sainfoin

对于红豆草,虽然在试验的后期,根系的减沙贡献率也达到93%。但在试验前期,红豆草根系的减沙贡献率很低(图3),这可能是由于红豆草生长较慢,而且根系较粗,试验的初期阶段由于根系活动破坏了土壤原有的结构,在剪去地上部分以后,雨滴直接打击在坡面土壤表面,容易产生较大的侵蚀产沙。而在实验的后期,由于根系生物量增加并产生一些根系分泌物胶结土壤颗粒,形成比较稳定的团聚体结构,当剪去地表冠层后,在降雨过程中坡面侵蚀产沙量也不会比有冠层覆盖时大,从而表现为较大的根系减沙贡献率, Gyssels等^[14]研究种植豌豆后土壤侵蚀产沙过程时也指出,实验的前期豌豆小区坡面侵蚀产沙量大于对照小区,而后期坡面侵蚀量很小,这一研究结果与本文的结果相似,这可能是由于本文所用材料红豆草与豌豆都为豆科植物且两者形态相近所致。

2.2 牧草对坡面径流含沙量的影响

坡面径流泥沙含量主要由降雨过程的侵蚀产沙量和径流量所决定,而坡面侵蚀产沙量和径流量是降雨特性和下垫面共同作用的结果^[16-19]。图4 a、图5 a均显示,与裸土相比,有牧草覆盖的径流小区其径流含沙量要远小于裸土小区的径流含沙量。从坡面产沙机理分析,坡面产沙主要是由坡面的降雨动能对土壤颗粒的分散和径流搬运能力两个方面所决定。对于裸土小区,在降雨开始后,雨滴直接打击在裸露的地面,由于溅蚀作用,将一些比较松散的土壤颗粒分散并为径流搬运提供了物质基础。同时由于实验雨强较大形成超渗产流,坡面降雨不能及时的就地入渗进而形成坡面径流为坡面泥沙的搬运提供了载体条件,进而在降雨初期裸土坡面径流含沙量相当大($28.8 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$)。而随降雨历时延长,裸地坡面径流水深增大,雨滴动能对土壤颗粒

直接打击分散作用减小,并且由于前期降雨对坡面的打击,使得地表产生结皮作用,因此在一定程度上减弱了降雨的土壤入渗作用并导致更多的径流产生,综合这两方面的原因,在降雨后期裸地坡面径流含沙量减小。

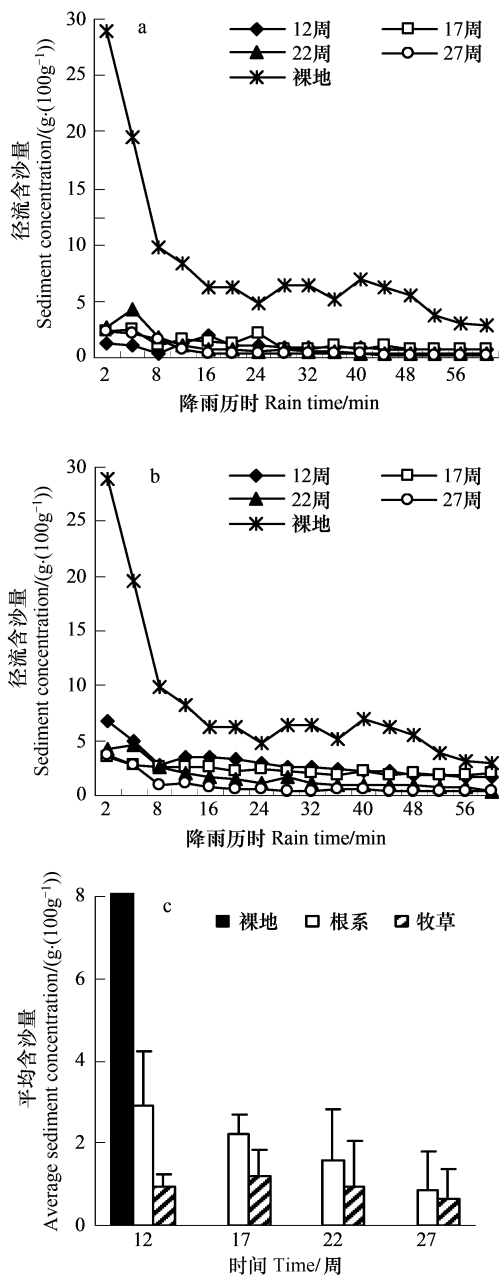


图4 黑麦草地(a)和黑麦草根系(b)径流含沙量及各生长阶段径流平均含沙量(c)

Fig. 4 Sediment concentration in ryegrass pan (a) and ryegrass root pan (b), and the average sediment concentration in different stages of fallow pan, ryegrass root pan and ryegrass pan (c)

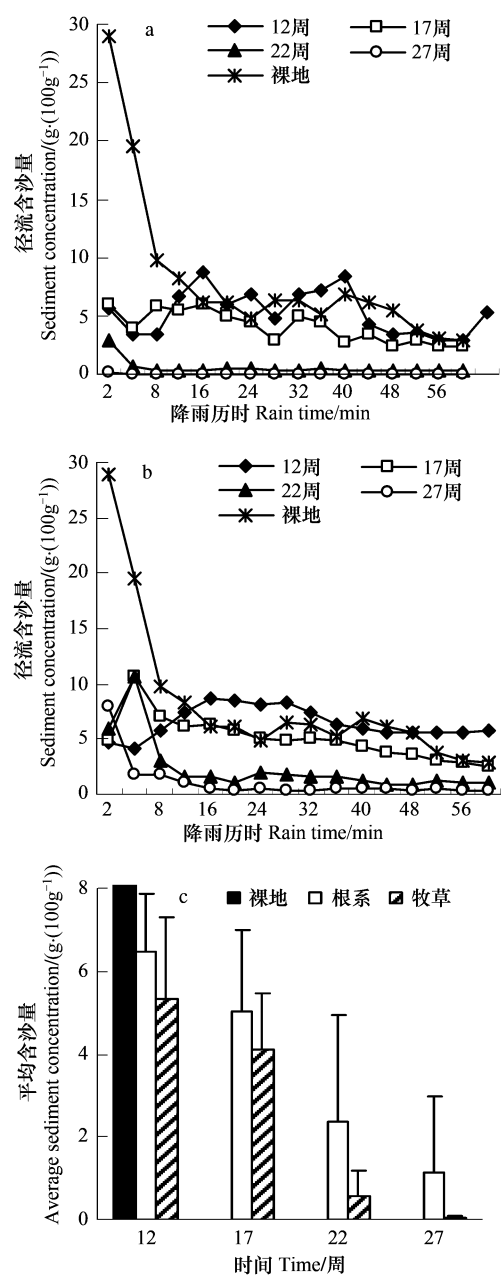


图5 红豆草地(a)和红豆草根系(b)径流含沙量及各生长阶段径流平均含沙量(c)

Fig. 5 Sediment concentration in sainfoin pan (a) and sainfoin root pan (b), and the average sediment concentration in different stages of fallow pan, red cover root pan and sainfoin pan (c)

对于有牧草覆盖的径流小区,坡面径流泥沙含量要相对较小(图4a、c,图5a、c),其主要原因是,由于有植被覆盖,雨滴降落到植物冠层以后其动能被极大的削减,当水滴从冠层滴落到土壤表面时,由于距离很短,其动能很小,基本不能对土壤颗粒起到打击分散作用,坡面产沙量在很大程度上由径流冲刷形成,因此与裸地相

比,有植被覆盖的径流小区坡面径流泥沙含量小。另外,在降雨初期,一些比较松散的土壤颗粒比较容易被冲出形成坡面泥沙,并且同期由于土壤含水量未达到饱和状态,土壤入渗速率很高坡面径流量相对较少,导致坡面径流含沙量相对较大。但随降雨的进行,坡面上结合比较松散的土壤颗粒已被冲出冲走,因此,径流冲刷作用产生的泥沙量减少,并且由于后期土壤含水量基本达到饱和状态土壤入渗速率降低,坡面径流量增大,从而在后期坡面径流泥沙含量降低。

图4、图5还显示,不论是仅有根系的径流小区还是同时具有冠层的径流小区,坡面径流泥沙含量都随牧草生长阶段的增加而减小。从种植第12周到种植第27周,黑麦草和黑麦草根系小区径流平均含沙量分别由 $0.92 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 和 $2.90 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 降低到 $0.64 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 和 $0.85 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$;同期,红豆草和红豆草根系小区径流平均含沙量分别由 $5.33 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 和 $6.47 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 降低到 $0.03 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 和 $1.22 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 。这可能是由于随植物的生长发育,植物根系和冠层极大的增加,冠层增加可以更大的削弱降雨动能并减弱对土壤表面的打击,同时能极大的对降雨起到拦蓄作用减少径流形成和对坡面的冲刷作用;而根系的生长,可以极大的改善土壤结构,提高土壤的入渗能力和抗侵蚀能力,进而减少坡面的径流和泥沙;在冠层和根系对坡面泥沙和径流的控制过程中,泥沙的减少幅度更大,从而在牧草生长的后期其坡面径流泥沙含量要比前期坡面径流泥沙含量低。

两种牧草对坡面径流泥沙含量的削弱也存在一定差异(图4,图5)。黑麦草生长后期(第27周)比前期(第12周)坡面径流平均含沙量减少了 $0.28 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$,而同期红豆草小区坡面径流平均含沙量减少了 $5.3 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ 。并且在生长后期,红豆草坡面径流平均含沙量远小于同期的黑麦草小区。形成这种差异的原因主要是两种牧草在生长期对坡面泥沙和径流的削减作用差异导致的。在前文中已经提到,即黑麦草小区在第一次降雨时,就表现出很强的减沙效益,在整个实验周期内,黑麦草的减沙效益增加幅度不大(由88.9%增加到98.03%),而对于红豆草同期减沙效益增加幅度则很大(由24.45%增加到99.84%)(图1)。因此,在整个试验周期中,红豆草小区的径流含沙量递减幅度更大。另外,在实验的后期阶段,红豆草和黑麦草的减沙效益相差很小(99.84%比98.03%),即两者的产沙量相当;但由于红豆草的减水效益要低于黑麦草(43.17%比66.88%)(图1),即红豆草小区的产流量要大于黑麦草小区,综合这两方面的因素,在试验的后期阶段,红豆草小区的径流泥沙含量要比黑麦草小区的径流泥沙含量低。

对于两种牧草其仅有根系的小区径流含沙量都要比具有冠层的径流小区径流含沙量大(图4,图5)。这可能是有冠层覆盖的小区,冠层对径流的减少幅度要大于对坡面泥沙的减小幅度,因此有冠层存在时,坡面径流泥沙含量相对要小于仅有根系情况下的径流泥沙含量。

2.3 牧草对坡面入渗速率的影响

图6和图7显示,裸地坡面土壤入渗速率要小于有植被覆盖小区的土壤入渗速率。裸地小区初渗速率为 $0.73 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,并随降雨历时延长土壤入渗速率降低,在降雨进行近48 min以后,裸地小区坡面土壤入渗速率才初步达到稳定入渗速率($0.24 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),在整个降雨历时过程中,土壤坡面平均入渗速率为 $0.42 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。而对于有牧草覆盖的小区,在生长前期,土壤入渗速率都相对较高,特别是黑麦草小区,在第12周时,土壤初渗速率为 $1.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,平均入渗速率为 $0.66 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,并且在降雨进行到20 min后,基本形成稳渗即 $0.65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。这说明,与有植被的小区相比,裸地小区土壤结构差,并且由于缺乏地表冠层的保护,降雨直接打击在土壤表面,飞溅的土壤颗粒可能堵塞部分土壤空隙,进而导致土壤初渗和平均入渗速率都很低,并且由于坡面径流较大对土壤进行不断的冲刷,使得达到稳渗的时间也较长。

对于黑麦草和红豆草其土壤入渗速率都随生长阶段延长而增加(图6,图7)。从第1次降雨到最后一次降雨,黑麦草的初渗速率和平均入渗速率分别由 $1.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.66 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $1.39 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $1.15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;与此同时,红豆草的初渗速率和平均入渗速率也分别由 $1.23 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.56 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加到 $1.38 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.86 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在生长后期,不仅土壤入渗速率有所增加,同时降雨产流时间也有所推迟,对黑麦草小区降雨产流时间由55s延迟到96s;而红豆草小区降雨产流时间由42s延迟到84s。其原

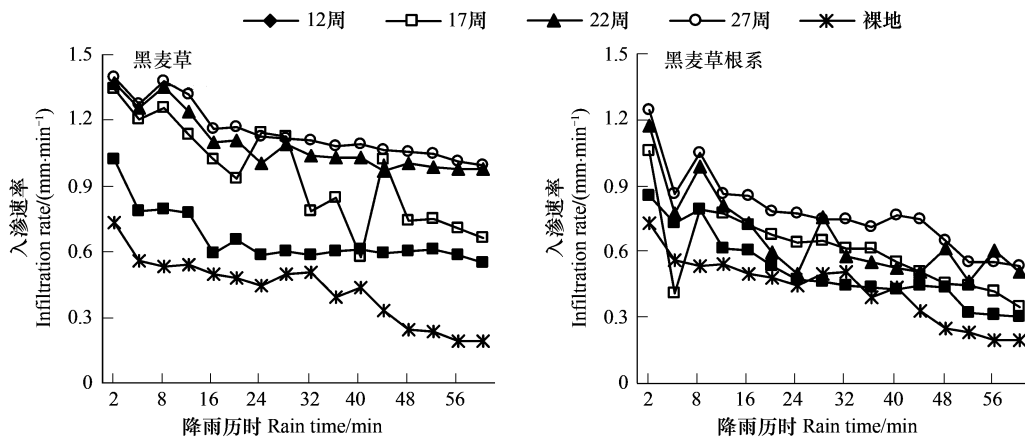


图6 黑麦草与黑麦草根系降雨土壤入渗速率

Fig. 6 Infiltration rate in ryegrass pan and ryegrass root pan

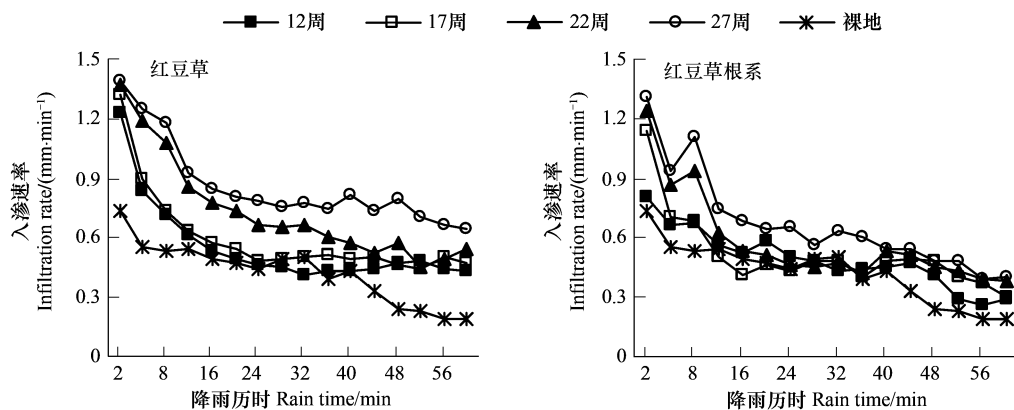


图7 红豆草与红豆草根系降雨土壤入渗速率

Fig. 7 Infiltration rate in sainfoin pan and sainfoin root pan

因主要是由于,随植被的生长,植被冠层增加,冠层拦蓄截流降雨作用增强,同时由于根系生长在很大程度上改善了土壤结构,提高了土壤入渗能力。因此在生长的后期,降雨产流时间延长,并且土壤平均入渗速率增大。

黑麦草和红豆草小区,土壤入渗速率也存在一定的差异。表1显示,在同一生长阶段,黑麦草和仅有黑麦草根系的小区其土壤入渗速率都要分别高于红豆草和仅有红豆草根系的小区。黑麦草与红豆草入渗速率差别主要是由两种植物的冠层差异所形成的。在整个生长阶段,黑麦草的冠层盖度和厚度都要大于红豆草的冠层盖度和厚度,较大的盖度和厚度,尤其是厚度,可以有效的拦蓄降雨延长入渗的时间,增加径流的入渗量。在仅有根系的径流小区,因黑麦草根系比同一阶段的红豆草根系密集,在根系对土壤结构改善的作用下,表现出仅有黑麦草根系的径流小区平均入渗率高于仅有红豆草根系的径流小区。

从表1还可以分析出,红豆草根系对土壤入渗的贡献率要大于黑麦草根系对土壤入渗的贡献率。其主要原因是,对于红豆草小区其地上冠层薄弱,对降雨的拦蓄截流作用也较弱,坡面土壤入渗速率的提高在很大程度上是由根系的作用而形成,因此根系的入渗速率比例更大;相反,黑麦草冠层盖度和厚度较大,可以充分的拦蓄截留降雨,并延长降雨的入渗时间,因此与红豆草根系相比,黑麦草根系虽然具有较大的入渗速率,但根系的入渗速率比例却相对较小。

3 结语

通过模拟降雨试验,定量研究了不同生长阶段黑麦草和红豆草及裸地坡面的降雨产流产沙过程,并通过

降雨前剪掉冠层的方法对比分析了两种牧草根系与冠层在减少坡面径流与侵蚀产沙中的贡献率,为阐明草地植被与坡面侵蚀关系提供了一定依据。

表 1 不同生长阶段黑麦草和红豆草小区平均入渗率

Table 1 Average infiltration rate of different stages in ryegrass pan and sainfoin pan

时间 Time	第 12 周 12th week	第 17 周 17th week	第 22 周 22nd week	第 27 周 27th week
黑麦草 / 根系 Ryegrass/root	0.66 / 0.51	0.95 / 0.60	1.09 / 0.67	1.15 / 0.78
红豆草 / 根系 sainfoin /root	0.56 / 0.49	0.60 / 0.52	0.73 / 0.58	0.86 / 0.67

研究结果表明,草地植被具有较强的控制坡面土壤侵蚀的能力。在实验末期两种牧草的减沙效益均在 93% 以上,且对坡面径流的控制也达到 50% 左右。研究结果还表明,不同的牧草对坡面水沙的调控途径存在一定差异。黑麦草主要通过发达的冠层截流降水,进而达到调控坡面径流的产生,而红豆草则主要通过发达的根系增强入渗,从而实现减少坡面径流。两种牧草的根系对减少坡面侵蚀产沙都发挥出巨大的贡献率。

实验过程中牧草处于生长旺盛阶段,其枯落物较少,因此在本研究中没有单独分析枯落物的影响,草地植被对土壤侵蚀的调控作用仅从根系和冠层部分着手,这在一定程度上存在误差;另外,由于牧草冠层对降雨的截流作用,使得实验后期入渗速率的计算有所偏大。

References:

- [1] Cai Q G. Soil erosion and management on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Science*, 2001, 11(1): 53-70.
- [2] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 2003, 50(2/4): 91-133.
- [3] Gobin A, Jones R, Kirkby M, Campling P, Govers G. Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *Environmental Science and Policy*, 2004, 7(1): 25-38.
- [4] Yu X X, Bi H X, Zhu J Z, Wu B. Soil and water conservation by forest vegetation in Loess Area. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(5): 433-440.
- [5] Gabet E J, Reichman O J, Seabloom E W. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 31(31): 249-273.
- [6] Zhang Y, Liu B Y, Zhang Q C, Xie Y. Effect of different vegetation types on soil erosion by water. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1204-1209.
- [7] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [8] Zhao J B, Du J, Chen B Q. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(1): 114-126.
- [9] Li Y S, Huang M B. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 124(1/2): 24-32.
- [10] Ghidry F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability. *Transactions of the ASAE* 1997, 40(1): 129-135.
- [11] Li Y, Xu X Q, Zhu X M. The intensifying effect of plant roots on the soil anti-scourability on the Loess Plateau. *Science in China (Series B)*, 1992, 22(3): 254-259.
- [12] Wu W D, Zheng S Z, Lu Z H. Effect of plant roots on penetrability and anti-scourability of red soil derived from Granite. *Pedosphere*, 2000, 10(2): 183-188.
- [13] Joseph L, Pikul J, Aase J K. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 859-866.
- [14] Gyssels G, Poesen J, Nachtergaele J, Govers G. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(3/4): 189-201.

- [15] Martens D A. Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1857-1867.
- [16] Pan C Z, Shangguan Z P. Influence of forage grass on hydrodynamic of slope erosion. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 371-377.
- [17] Li Y, Xu X Q, Zhu X M, Tian J Y. The intensifying effect of plant roots on soil penetrability on Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37(4): 366-369.
- [18] Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil anti-scourability during the vegetation succession in Ziwuling secondary forest area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10): 3270-3275.
- [19] Liu G B. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on Loess Plateau. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 93-96.

参考文献:

- [4] 余新晓, 毕华兴, 朱金兆, 吴斌. 黄土地区森林植物水土保持作用研究. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 433-440.
- [11] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究. *中国科学 B 辑: 化学*, 1992, 22(3): 254-259.
- [16] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响. *水利学报*, 2005, 36(3): 371-377.
- [17] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性. *科学通报*, 1992, 37(4): 366-369.
- [18] 周正朝, 上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性. *生态学报*, 2006, 26(10): 3270-3275.
- [19] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 93-96.