

模拟降雨条件下不同覆被减流减沙 效益与侵蚀影响因子

孙佳美, 余新晓, 梁洪儒, 常玉

(北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 研究不同坡度和降雨强度条件下, 不同覆被的减流减沙效果, 定量分析各侵蚀影响因子的权重。[方法] 采用室内人工模拟降雨的方法。[结果] (1) 与裸地相比, 枯落物、砾石和黑麦草均具有良好的减流减沙效果, 枯落物的减流效果最好, 减流效益最大为 79.7%, 平均减流效益 46.1%。其次为黑麦草, 最大减流效益 68.9%。第三为砾石, 最大减流效益 68.0%。(2) 黑麦草的减流效果存在临界盖度, 其值在 60% 左右, 当盖度大于 60% 后其减流效益不再增加。(3) 减沙效益随着盖度的增加而增加, 枯落物、砾石和草地最大减沙效益分别为 98.8%, 64.6% 和 88.1%。(4) 经过灰色关联定量分析得出选取的 8 个影响因子与径流均有较高的关联性, 关联度都在 0.622 3 以上。[结论] 不同试验条件和不同覆被对坡面产流产沙具有明显影响, 降雨强度和降雨量是对泥沙量影响较大的因素, 降雨强度、降雨量、覆被盖度和坡度是对径流量影响较大的 4 个因子, 影响因子与径流和泥沙的关联度和关联序因土壤种类不同而存在差异。

关键词: 模拟降雨; 产流; 产沙; 灰色关联

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0046-06

中图分类号: S157.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.010

Reduction Benefits of Different Land Cover on Runoff-Sediment and Its Erosion Factors Under Simulated Rainfall

SUN Jiamei, YU Xinxiao, LIANG Hongru, CHANG Yu

(Key Lab. of Soil & Water Conservation and Desertification Combating of
Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] To explore the effect of different rainfall intensity and slope gradient under the conditions of different cover on runoff and sediment reduction effect, and to quantitative determine the weight of erosion influence factors. [Methods] Use the methods of artificial rainfall and gray correlation analysis. [Results] (1) Compared with bare land, the slope with litter, gravel and ryegrass had a good effect on runoff and sediment reduction, reducing the flow of benefits to a maximum of 79.7%, the average current reducing benefits was 46.1%. Followed by ryegrass, with maximum flow reducing benefits of 68.9%. The third is gravel, with maximum flow reducing benefits of 68%. (2) Ryegrass flow reducing effect exists critical coverage, its value was in the 60% or so, when the coverage was more than 60% after the current reducing benefits, no longer increased. (3) Sediment reduction effect increased with the increase of coverage, the biggest sediment reduction effect of the litter, gravel and lawn were 98.8%, 64.6% and 88.1% respectively. (4) Through gray correlation quantitative analysis on selected 8 influence factors and runoff had high correlation, correlation degree was more than 0.622 3. [Conclusion] The different test conditions and different cover on runoff and sediment yield had significant effect, the rainfall intensity and rainfall is larger on the factors affecting sediment yield, rainfall intensity, rainfall, cover and slope were 4 factors which had greater influence on runoff, the influence of correlation degree and correlation factors and runoff and sediment sequence for different types of soil.

Keywords: simulated rainfall; runoff; sediment; grey correlation

收稿日期: 2014-03-03

修回日期: 2014-04-11

资助项目: 国家自然科学基金“基于稳定同位素的典型森林生态系统水、碳过程及其耦合机制研究”(41430747); 国家林业局林业公益性行业科研专项(20130430104)

第一作者: 孙佳美(1990—), 女(汉族), 河北省张家口市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: sunkami@yeah.net。

通信作者: 余新晓(1961—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 主要从事森林水文和水土保持方面的研究。E-mail: yuxinxiao11@126.com。

坡面径流是造成水土流失最主要的原因^[1],通过在坡面种植植被能够有效地调节径流的产生^[2],研究表明增加地表覆被可以有效地减少径流和泥沙的产生,起到良好的水土保持作用。不同的地表覆被具有不同程度的减流减沙效果,草被能够调节坡面流流态,减弱雨滴对土表的动能侵蚀,地表覆被砾石和枯落物也能够达到减弱雨滴动能减少侵蚀的目的^[3],同时枯落物还有截留降雨的功能^[4],能够有效减少径流。同时还有一些影响径流产生的因素,这些影响因子主要可以归纳为两个方面,一是降雨过程的影响,包括降雨强度、历时、降雨量^[5]等;二是下垫面变化的影响,主要是土壤、覆被和坡长、坡度、坡面面积等地形因子^[6]。目前针对单个影响因子对径流产生过程的影响研究较多^[7],尤其是降雨强度、坡度^[8]、土壤类别和草地^[9-10]的研究。综合针对各个因子之间的作用以及共同作用的综合研究稍显不足^[11],并且多为定性描述各个因子对侵蚀的影响程度^[12]以定量的方法来确定不同因子在影响侵蚀产生的主要和次要因子以及相关程度,对有效控制土壤侵蚀,指导水土保持措施的合理配置具有重要意义^[13]。灰色关联法能够反映数据进行不同初始化处理对关联度的影响,因此可以用来模拟各个因子的不同处理对侵蚀过程的影响。灰色关联方法首次应用到林业行业是闫俊华等^[14]采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进行分析。李香云等^[15]进行了不同植被类型对地表径流影响的灰色关联分析,以及张强等^[16]进行了黄土区土质道路径流水动力学参数的灰色关联度分析。

本研究通过模拟降雨试验,设置不同坡度、降雨强度和盖度,对比分析了不同覆被减弱水土流失的效益,在此试验基础上,查阅文献获得大量人工降雨试验数据,对不同土壤类型和控制条件下径流和泥沙影响因子之间的灰色关联度进行综合分析,确定各个影响因子对径流和泥沙的影响权重,为有效分析侵蚀过程和进行科学的水土保持措施配置提供科学参考和实践^[17]。

1 材料与方法

1.1 试验准备和布设

试验在北京林业大学降雨大厅进行,降雨分布均匀度达到 85% 以上,坡面系统为可自由调节坡度的土槽,土槽规格为 2 m×0.5 m×0.4 m,槽内回填北京市典型土壤褐土,取自北京市昌平区。土槽尾部设置 V 形收集口,用来收集形成的径流和泥沙,底部打孔,使土壤水可以渗透出土槽外。其他 3 边额外加

10 cm 高度,防止雨滴使侵蚀的泥沙溅出土槽之外,造成泥沙量的损失。按照设计容重分层回填土,设计试验容重为 1.34 g/cm³,每 10 cm 为 1 层,下面两层分层填天然细沙,然后铺一层纱布,上面装试验用土。装土时要注意土面保持平整,每层装完要刻意制造一定的地表糙度,防止土的滑移^[18];为保证试验初始含水量相同,对坡面进行预降雨,待土壤达到饱和刚开始产流停止降雨,用塑料布盖上静置 24 h 保证试验前期含水量相同用于降雨试验^[19];降雨过程中,记录产流时间,产流开始后前 10 min 每 2 min 收集一组径流样,以后每 5 min 收集一组径流样,量取径流体积用于分析。

1.2 试验设计

模拟降雨试验选定试验坡度为 10°和 20°,降雨强度选定 30 和 60 mm/h,并确定枯落物、砾石和黑麦草(*Lolium perenne* L.) 3 种覆被种类,并分别设置 20%,40%,60%,80%和 100%这 5 个试验盖度,同时设置裸地作为空白对照,按照此控制条件,最后共进行试验 64 场次。

(1) 黑麦草试验设置。采用条带状种植的方法达到控制效果,黑麦草种植控制盖度分别为 0,20%,40%,60%,80%和 100%,首先通过种业公司调查黑麦草在实际生产中种植的最大密度,将按照最优密度种植作为 100%的盖度,然后按照控制盖度比例确定单位面积需要的黑麦草种子质量,将这些种子条带状均匀种植。

(2) 砾石试验设置。砾石控制盖度与黑麦草一致,试验用砾石取自北京市鹫峰试验林场,将砾石分别过 6 和 20 mm 直径的方孔筛,选取直径范围在 6~20 mm 的砾石用于试验,盖度通过 CAD 勾图法确定,选择部分砾石随机均匀的铺在土表面,测量其盖度,依据勾图法确定的结果调整盖度,直至盖度符合试验要求停止调整。

(3) 枯落物试验设置。枯落物控制盖度与黑麦草一致,选取鹫峰试验林场风干状态的人工栓皮栎林的枯落物,枯落物覆被盖度确定方法和砾石相同。

(4) 灰色关联分析。试验条件可控制是模拟降雨试验的最大优势,在实际生产当中径流产生的影响因子对于控制土壤侵蚀的过程,防治水土流失有重要意义。为研究不同试验因子对侵蚀影响程度的差异,采用灰色关联分析法对径流量和泥沙量产生影响因子进行研究分析,但是本试验的试验条件相对简单,控制因子较少,为了分析更多的影响因子并且得到更准确的分析结果,进行灰色关联分析时结合了王志伟^[5]的模拟降雨试验(对褐土和棕壤坡面在不同雨强

和坡度条件下土壤侵蚀过程的研究),王万忠^[20]的模拟降雨试验(对黄土坡面在不同试验条件下土壤侵蚀过程的研究),田育新^[3]的模拟降雨试验(对红壤坡面在不同试验条件下土壤侵蚀过程的研究),丰富了试验条件,得到了对应的分析结果。

1.3 试验方法

使用公式(1)计算减流效益^[9]:

$$L_p = (S_f - S_p) / S_f \times 100\% \quad (1)$$

式中: L_p ——有覆盖物时的减流效益; S_f ——裸地土槽的产流量; S_p ——有覆盖物的土槽的产流量。

使用公式(2)计算减沙效益^[9]:

$$N_p = (R_f - R_p) / R_f \times 100\% \quad (2)$$

式中: N_p ——有覆盖物时的减沙效益; R_f ——裸地土槽的产沙量; R_p ——有覆盖物的土槽的产沙量。

对不同土壤侵蚀影响因子进行灰色关联分析。分析步骤为:

(1) 确定参考数列和比较数列。参数数列 x_0 为径流量, x_{1-8} 为各个因素的实际条件, 分别为: 土壤容重、土槽面积、坡长、坡度、降雨强度、降雨历时、降雨量、覆被盖度。

(2) 对原始数据进行转换, 消除量纲, 转换为可以比较的数据序列。

$$x'_i = x_i / X_i(1) = [x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)] \quad (i=0, 1, 2, \dots, 8)$$

(3) 计算差序列, 计算公式为:

$$\Delta_i = |x'_0(k) - x'_i(k)| \quad (i=0, 1, 2, \dots, n)$$

求出两级最大差和最小差。记为:

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k)$$

$$m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$$

(4) 分辨系数 $\delta = 0.5$, 计算关联系数 $\gamma_{oi}(k)$, 公式为:

$$\gamma_{oi}(k) = \frac{m + \delta M}{\Delta_i(k)} \quad (k=1, 2, \dots, 8; i=1, 2, \dots, n)$$

(5) 计算关联度 γ_{oi} , 计算公式为:

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{oi}(k) \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

(6) 列出关联序进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同覆被减流效益分析

各试验条件下减流效益随盖度变化如图 1 所示, 对其数据进行统计检验, 均达到显著水平(取显著水平为 0.01)。

图 1 为不同覆被和雨强条件下各小区的减流效益。由图 1 可以看出, 与裸地相比枯落物、砾石和黑麦草均具有明显的抑制径流产生效果, 能够有效地减少径流量, 3 种覆被均表现为坡度较小、降雨强度较大时减流效益明显。其中枯落物的减流效果最好, 在坡度为 10° , 降雨强度 60 mm/h , 盖度为 100% 时减沙效益高达 79.7% , 能够实现有效的水土保持效应。坡度为 10° 时砾石的平均减流效益优于黑麦草, 坡度为 20° 时黑麦草的平均减流效益优于砾石。

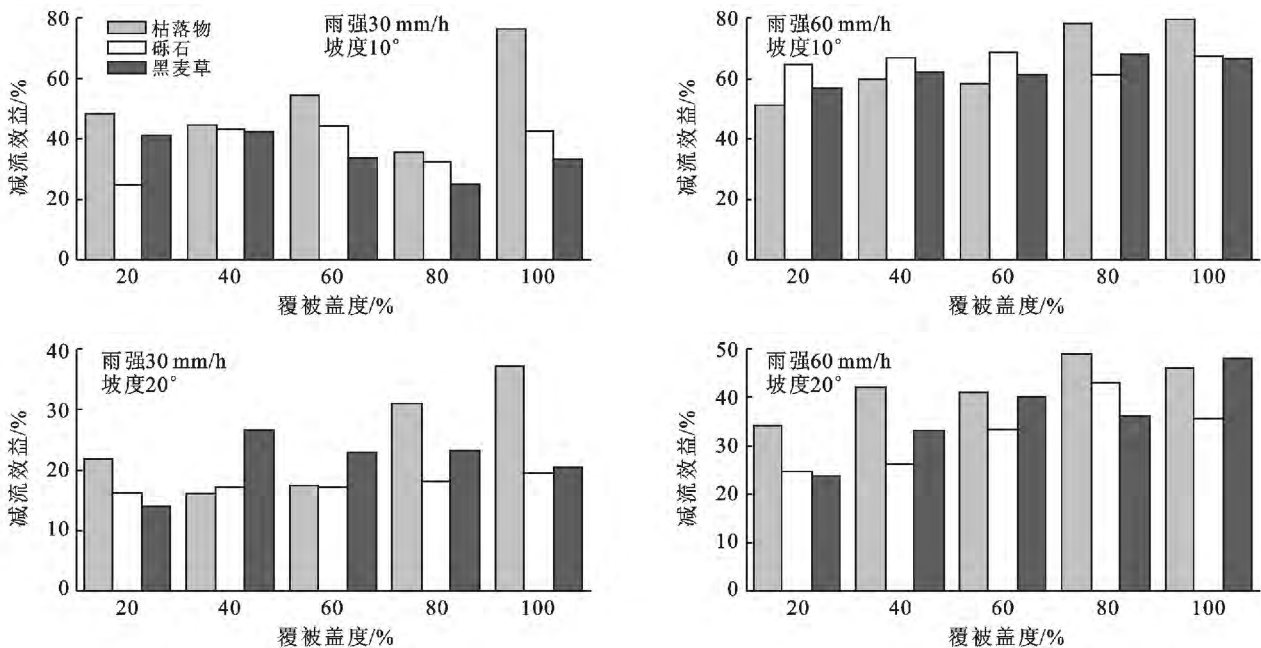


图 1 不同覆被和雨强条件下各小区的减流效益

枯落物的减流效益随着盖度的增加而增加,当降雨强度变化时减流效益的增幅较大,说明降雨强度对径流产生的影响较大,并且在坡度较小时减流作用更加明显。在以上 4 种控制条件下,随砾石盖度从 20% 增加到 100% 减流效益增幅分别为 19.7%, 7.6%, 3.4%, 18.1%; 黑麦草减流效益随盖度增加分别为 17.3%, 9.8%, 12.7%, 24.4%, 均表现为在坡度 10°, 降雨强度为 60 mm/h 时砾石的减流作用最明显。砾石表现为减流效益受坡度影响较大,而黑麦草表现为减流效益随降雨强度变化较大,这主要是由于砾石减弱了雨滴动能,增加入渗,当降雨强度较大,砾石盖度较大时,砾石的入渗增加效果不能很好地发挥,因此试验过程中当砾石盖度高于 60% 时,减流效益不再增加,反而呈现减小的趋势。黑麦草在降雨强度为 30 mm/h 时也呈现出随盖度增加减流效益减小的趋势,但不明显。枯落物由于自身的截留作用较强,因而随着枯落物量的加大,截留作用增强,因而减流效益增加。

2.2 不同覆被减沙效益分析

各试验条件下减沙效益随盖度的变化如图 2 所示。对其数据进行统计检验,均达到显著水平(取显著水平为 0.01)。经过计算得出枯落物、砾石和黑麦草具有较强减沙作用,在坡度 10°, 降雨度 30 mm/h, 盖度为 100% 时,枯落物的减沙效益高达 98.8%, 防蚀效果非常明显。同时降雨强度和坡度也是影响坡面

产沙的重要因素之一。由图 2 可以看出,减沙效益随盖度的增加而增加,随坡度和降雨强度的增加均呈现明显增大的变化趋势。

枯落物随盖度增加减沙效益增加趋势明显,增幅最大是坡面 20°, 降雨强度 60 mm/h, 盖度从 20% 增加到 100% 减沙效益共增加 54.9%, 砾石增幅最大在 20° 降雨强度 30 mm/h 时,增幅为 37.4%。而黑麦草增幅最大出现在条件 10°, 降雨强度 60 mm/h 时,增幅为 55.4%。3 者相比较枯落物盖度增加对减沙作用影响最大,枯落物的减沙作用最强,在坡度 10° 降雨强度 30 mm/h 时可达减沙 98.2%, 既发挥了其自身的截留作用,又能够有效减弱雨滴动能,减少土壤侵蚀,防止水土流失。黑麦草的减沙效益也较高,在坡度 10°, 降雨强度 30 mm/h 时可减沙 88.1%, 这是由于黑麦草根系较细,在生长初期不会破坏土壤本身的结构,同时能够对土壤形成很好的团聚作用,增强土壤团聚体的形成,提高土壤抗冲蚀能力。3 者之中砾石的减沙效益最差,其减沙效益平均为 47.2%, 最大减沙效益为 64.6%, 但也能够达到很好的水土保持效果。3 种覆被的最大效益出现条件均为坡度 10°, 降雨强度 30 mm/h, 这主要是由于坡度和降雨强度较小时坡面流速较慢,坡面流对土表产生的剪切力较弱,同时流速慢则坡面流流经整个坡面的时间较长,增加了土壤入渗作用,都可以减少产流和产沙,减弱土壤侵蚀。

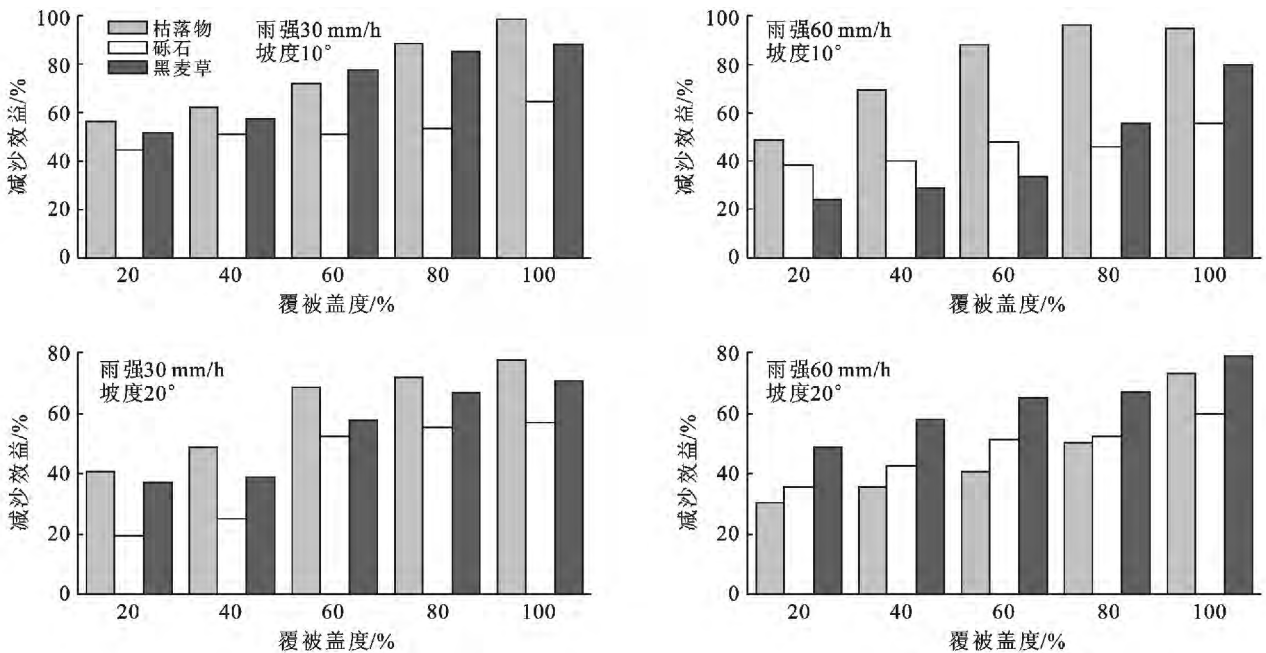


图 2 不同覆被和雨强条件下的减沙效益

2.3 侵蚀影响因子灰色关联分析

影响坡面土壤侵蚀过程的因素很多,研究这些因

子对侵蚀的影响权重大小,对有效控制水土流失,保护生态环境意义重大。随着灰色关联度的增大,比较

数列与参数数列的发展趋势越接近,也可以说比较参数对参考数列的影响就越大。即某侵蚀影响因子的灰色关联度越大,该因子对侵蚀的影响越大,选择径流量和泥沙量表示侵蚀量。

从表 1—2 的关联度可以看出,所选择的影响因子对径流量和泥沙量的影响较大,关联度均在 0.613 以上,并且对于不同的土壤,影响因子与径流量以及泥沙量的关联度和关联序存在差异,但是差异不显著。黄土、褐土、红壤和棕壤这 4 种土壤的降雨强度、降雨量与径流的灰色关联度均较大(表 1),但是 4 种土壤中对泥沙量影响较大的影响因素是降雨强度和降雨量(表 2),在黄土区降雨强度与径流的关联度甚至高达 1.00,说明强度是影响黄土地区径流最重要的因子。这是因为降雨不仅是产生径流的原因,也是径流的来源,大量的研究都发现,降雨强度越大,雨滴的中径越大,更利于产生径流。在降雨强度和其他条

件一定时,径流量和泥沙量的大小就主要取决于降雨量。

对径流影响关联结果中坡度和植被的盖度关联序分别为第 3 和第 4,只有在黄土地区覆被覆盖因子排在坡度前,覆被盖度关联序为第 3,坡度为第 3。这主要是因为黄土本身多孔,入渗性好,入渗是影响产流的重要因子,入渗量直接决定径流量的多少,而覆被主要通过影响雨滴能力和入渗来影响径流的产生,因此覆被对黄土产生径流的影响比坡度大。但是褐土和棕壤条件下,覆被盖度对泥沙量影响较小,关联序均为第 8,这是由于覆被盖度对泥沙的产生干扰较大,较小盖度覆被即可对泥沙的产生造成很大干扰,因此盖度增加过程对泥沙产生较小。坡长和土槽面积对径流和泥沙的产生影响相同,降雨历时和土壤容重对不同土壤产生径流和泥沙的影响差异明显,对褐土和棕壤影响较大,对黄土和红壤影响相对较小。

表 1 径流量影响因子构成的关联度及关联序

项目	降雨强度	降雨量	覆被盖度	坡度	坡长	面积	容重	降雨历时
黄土	关联度	1	0.998	0.988	0.984	0.982	0.982	0.981
	关联序	1	2	3	4	5	6	7
褐土	关联度	0.882	0.816	0.637	0.715	0.625	0.622	0.626
	关联序	1	2	4	3	7	8	6
红壤	关联度	0.907	0.828	0.719	0.727	0.661	0.661	0.659
	关联序	1	2	4	3	5	6	7
棕壤	关联度	0.923	0.910	0.644	0.682	0.637	0.636	0.639
	关联序	1	2	4	3	7	8	5

表 2 泥沙量影响因子构成的关联度及关联序

项目	降雨强度	降雨量	覆被盖度	坡度	坡长	面积	容重	降雨历时
黄土	关联度	1.000	0.998	0.986	0.984	0.982	0.979	0.971
	关联序	1	2	3	4	5	6	7
褐土	关联度	0.873	0.823	0.617	0.718	0.627	0.622	0.628
	关联序	1	2	8	3	6	7	5
红壤	关联度	0.902	0.801	0.724	0.746	0.666	0.661	0.644
	关联序	1	2	4	3	5	6	7
棕壤	关联度	0.919	0.911	0.634	0.684	0.639	0.638	0.643
	关联序	1	2	8	3	6	7	4

3 结论

(1) 枯落物、砾石和黑麦草均具有良好的减流减沙效益,效益大小排序为:枯落物>黑麦草>砾石,枯落物减流效益最大为 79.7%,减沙效益最大为 98.8%,平均减流减沙效益分别为 46.1%和 65.5%。黑麦草最大减沙效益达到 68.9%,砾石最大减沙效

益为 68.0%。

(2) 黑麦草的减流效果存在临界盖度,其值在 60%左右,当盖度太大时其减流效益不再增加;减沙效益随着盖度增加而增加。

(3) 经过灰色关联定量分析得出,对于不同种类的土壤,影响因子与径流量和泥沙量的关联度和关联序均存在差异;降雨强度和降雨量是对泥沙量影响较

大的因素,降雨强度、降雨量、覆被盖度和坡度是对径流量影响较大的 4 个因素。

(4) 本试验过程只涉及单一覆被,未对两种覆被或两种以上覆被组合进行减流减沙效益试验,且收集的枯落物均为未分解枯落物,没有模拟自然环境中的半分解以及分解状态枯落物,需要今后做进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 农业工程学报,2006,22(6):39-44.
- [2] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报,2006,24(1):19-26.
- [3] 张振明,余新晓,牛健植,等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报,2005,19(3):139-143.
- [4] 程金花,张洪江,史玉虎,等. 三峡库区几种林下枯落物的水文作用[J]. 北京林业大学学报,2003,25(2):8-13.
- [5] 冯国祿,龚军慧. 人工降雨对稻田中氮磷动态变化的影响研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):130-133.
- [6] 田育新,李锡泉,陶接来,等. 人工降雨条件下不同坡度红壤坡面径流泥沙变化特征研究[J]. 湖南林业科技,2006,33(1):1-3.
- [7] 杨晓俊. 降雨产流影响因素分析[J]. 地下水,2007,29(5):50-51,113.
- [8] 王志伟,陈志成,艾钊,等. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):17-20,26.
- [9] 甘卓亭,叶佳,周旗,等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报,2010,30(9):2387-2396.
- [10] 董月群,李淑芹,原翠萍,等. 黑麦草对黄土坡面降雨产流产沙过程的影响[J]. 中国农业大学学报,2011,16(4):67-73.
- [11] 李鹏,李占斌,郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):444-449.
- [12] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1391-1396.
- [13] 王占礼,靳雪艳,马春艳,等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. 水土保持学报,2008,22(2):24-28.
- [14] 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.
- [15] 李香云,王玉杰. 不同植被类型对地表径流影响的灰色关联度分析[J]. 水土保持通报,2007,27(2):83-86.
- [16] 孙晓东,焦玥,胡劲松. 基于灰色关联度和理想解法的决策方法研究[J]. 中国管理科学,2005,13(4):63-68.
- [17] 田民,刘思峰,卜志坤. 灰色关联度算法模型的研究综述[J]. 统计与决策,2008(1):24-27.
- [18] 刘振波,史学正,于东升,等. 模拟降雨下土壤前期含水量对土壤可蚀性的影响[J]. 生态环境,2008,17(1):397-402.
- [19] 琚彤军,刘普灵,徐学选,等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. 泥沙研究,2007(4):65-71.
- [20] 唐小娟,郭雪莲. 几种坡面径流调控措施的筛选试验研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):125-128.

(上接第 45 页)

- [14] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants[J]. Plant, Cell and Environment, 2002,25(2):275-294.
- [15] 郭海军. 山西北部风沙区小叶杨低产(效)成过熟林更新针叶树模式探讨[J]. 内蒙古林业调查设计,2010,33(6):55-56.
- [16] 王金胜,郭栋生,丁起盛,等. 水分胁迫对玉米幼苗几种生理生化指标的影响及其抗旱性的关系[J]. 山东农业大学学报,1992,12(2):137-140.
- [17] Sharp R E, Poroyko V, Hejlek L G, et al. Root growth maintenance during water deficits: Physiology to functional genomics[J]. Journal of Experimental Botany, 2004,55(407):2343-2351.
- [18] 高世斌,冯质雷,李晚忱,等. 干旱胁迫下玉米根系性状和产量的 QTLs 分析[J]. 作物学报,2005,31(6):718-722.
- [19] Steudle E. Water uptake by plant roots: An integration of views[J]. Plant and Soil, 2000,226(1):45-56.
- [20] 孙龙,彭祚登,王冲,等. 干旱胁迫对两种沙地灌木能源树种光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报,2014,38(2):99-104.
- [21] 文志,王丽,王效科,等. O_3 和干旱胁迫对元宝枫叶片气孔特征的复合影响[J]. 生态学杂志,2014,33(3):560-566.
- [22] 刘帅华,贺康宁,秦景,等. NaCl 胁迫下银水牛角光响应的研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,7(26):145-149.