

模拟降雨条件下草被覆盖对坡地水土 养分流失的调控机制研究

李婧, 程圣东, 李占斌, 李鹏

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: [目的] 研究黄土坡面草被覆盖对拦蓄水沙及调控养分的作用, 为黄土坡面治理提供科学依据。[方法] 通过模拟降雨试验, 收集降雨过程中坡面的径流泥沙样品, 采用数据对比与统计分析相结合的方法, 分析在不同草被覆盖条件下坡面径流泥沙以及养分磷流失过程, 探讨草被覆盖率和草被格局对坡面泥沙及养分流失的调控作用。[结果] 随着降雨历时的增加, 径流呈平稳增长过程, 泥沙、径流总磷、泥沙速效磷均呈波动变化过程; 25%, 50%, 75% 覆盖率坡面径流总磷和泥沙速效磷分别为裸坡流失量的 66%, 85%, 80% 和 62%, 47%, 21%; 草被格局对水沙养分调控作用的差异性表现为: 泥沙 > 径流 > 泥沙速效磷 > 径流总磷。[结论] 草被对径流总磷的调控作用不强, 对泥沙速效磷的调控作用显著; 草被格局对径流和径流总磷的调控作用有限, 对泥沙与泥沙速效磷的调控作用显著。

关键词: 草被覆盖率; 草被格局; 水土流失; 养分迁移

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0028-06

中图分类号: S157.1, S157.2

文献参数: 李婧, 程圣东, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下草被覆盖对坡地水土养分流失的调控机制研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 28-33. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.005; Li Jing, Cheng Shengdong, Li Zhanbin, et al. Experimental investigation of effects of grass coverage on soil erosion and nutrient transportation under simulated rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 28-33. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.005

Experimental Investigation of Effects of Grass Coverage on Soil Erosion and Nutrient Transportation Under Simulated Rainfall

LI Jing, CHENG Shengdong, LI Zhanbin, LI Peng

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The effects of grass coverage on the regulation of soil erosion and nutrient loss were investigated to provide ways for the treatment of soil erosion on loess slope. [Methods] The data of runoff and sediment were collected under simulated rainfall experiments. Statistical analysis was used to investigate the processes of runoff, sediment and nutrient loss in the loess slope with different grass coverage. Different percentage and pattern of grass coverage were selected to analyze the regulation of runoff, sediment and nutrient loss. [Results] With the increase of rainfall duration, the runoff increased correspondingly. However, sediment, runoff total phosphorus and sediment available phosphorus fluctuated. As compared with the ones on bare slope, the quantity of runoff total phosphorus on the slopes with 25%, 50% and 75% coverages were reduced 66%, 85%, 80%; sediment available phosphorus loss on those slopes were reduced 62%, 47%, 21%, respectively. The effects of grass pattern on the regulation of runoff, sediment and nutrient loss ranked as sediment > runoff > sediment available phosphorus > runoff phosphorus. [Conclusion] The regulatory effects of grass coverage on sediment available phosphorus was better than that on runoff total phosphorus.

收稿日期: 2017-04-20

修回日期: 2017-06-12

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原流域植被空间分布量化与侵蚀产沙关系研究”(51609196); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404)

第一作者: 李婧(1986—), 女(汉族), 陕西省西乡县人, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: lijing8615@163.com。

通讯作者: 程圣东(1983—), 男(汉族), 安徽省霍山县人, 博士, 讲师, 主要从事植被建设的生态环境响应研究。E-mail: xautesd@163.com。

The regulatory effects of grass pattern on sediment and sediment available phosphorus were better than the ones on runoff and runoff total phosphorus.

Keywords: grass coverage percentage; grass pattern; soil and water loss; nutrient transportation

黄土高原是中国水土流失最严重的地区,植被是该区域重要的水土保持措施之一。植被在坡面所处位置及覆盖率的变化对调控坡面径流泥沙流失以及养分迁移具有不同的作用^[1-2],坡面植被措施的合理配置,能够有效控制水土养分的流失,减少水环境非点源污染^[3-4]。已有研究表明,草被覆盖坡面养分流失量均低于裸坡坡面流失量,而养分随泥沙流失浓度与裸坡差异不显著^[5-6];远离河岸的最外侧区域的草本植被带是截留非点源污染的主要区域^[7];坡面中上部是水土流失最严重的地带,坡下部居中,坡顶和坡脚较小^[8-9];坡面植被覆盖度与土壤养分存在一定的相关性,且在上坡位布设的植被覆盖度较高时,能够更好地调控土壤养分在整个坡面上的分布^[10-11];相同覆盖度下,草被布设在坡面的不同位置对降雨侵蚀产沙和氮磷迁移的有着不同的影响^[12-13];在中小雨强时,植被覆盖度越高,植被的减流减沙效益也就越明显^[14-16]。由此可见,坡面植被覆盖不仅对坡面径流泥沙具有一定的控制作用,而且还可以减少坡面养分的流失。本研究以黄土为研究对象,主要探讨草被在

坡面的不同位置和不同覆盖度条件下,坡面的产流产沙过程和磷的迁移过程,定量分析草被覆盖对径流、泥沙以及磷的调控作用,以期为黄土坡面配置草被拦蓄措施,调控坡面水土养分流失提供科学依据。

1 试验设计与方法

试验利用坡面土槽模型进行模拟降雨试验,试验土槽宽 1 m,长 4 m,坡度为 21°。土槽下部铺填 20 cm 厚沙,试验用土取自西安东郊黄土,所取土壤经风干过筛后,填入沙层上部约 40 cm,将磷酸二氢钾约 300 g 均匀混入土壤中,将混合好的土壤平铺于 0—10 cm 土壤表层。试验用草取自东郊长势良好的草坡上,选取 0.5 m×0.5 m×0.5 m 完整草块,并保留根系。试验草被覆盖度分别为 25%,50%和 75%。根据草被布设的空间位置和覆盖度,设置了多种草被格局,25%覆盖度设置了 4 种格局(L₁,ML₁,MU₁,U₁),50%覆盖度设置了 3 种格局(L₂,M₂,U₂),75%覆盖度设置了 2 种格局(L₃,U₃),具体布设如图 1 所示。

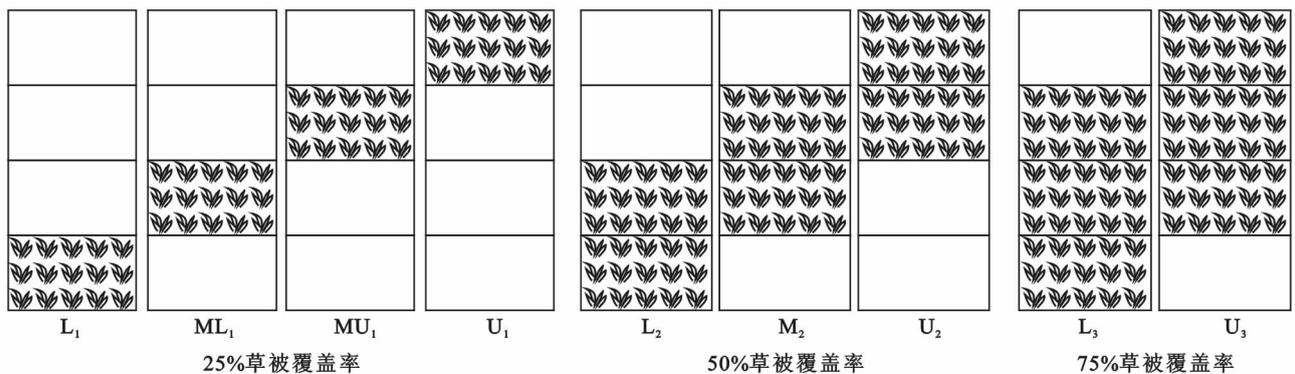


图 1 草被格局布设示意图

模拟降雨试验采用针管式降雨装置,降雨装置距离土槽的高度约为 13 m。试验雨强 2 mm/min,坡面产流后开始计时,历时 60 min,每 2 min 收集坡面出流样。收集样品的径流总磷浓度采用钼酸铵分光光度法(GB/T11893-1989)测定,泥沙速效磷浓度采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法测定,利用所测得的浓度公式计算磷流失量(m):

$$m = C \cdot R$$

式中: C ——所测样品中的磷浓度; R ——对应样品的径流泥沙量。

2 结果与分析

2.1 产流产沙过程

由于试验坡面草被配置格局比较多,相同覆盖度条件下每种格局的径流、泥沙随时间的流失过程基本类似,因此选取不同格局在覆盖率为 25% (L₁,ML₁,MU₁,U₁),50% (L₂,M₂,U₂,IL₂,IU₂)及 75% (L₃,U₃)3 种情况下的平均产流产沙结果分析其变化过程。从图 2 可以看出,3 种覆盖率下坡面径流随时间的变化过程基本一致的,随着草被覆盖率的增大,产

流量减小,50%和 25%植被覆盖的产流总量分别是 75%植被覆盖的 1.2 和 1.4 倍,说明草被覆盖率的增加对削减坡面径流作用良好。3 种覆盖率坡面的产流稳定时间出现在 12~16 min 之间,差异不明显。25%覆盖率坡面稳定产流量约 8 L,50%覆盖率坡面约 7 L,75%覆盖率坡面约 6 L,表明草被覆盖率的增加对产流达到稳定的过程基本不产生影响,而稳定产

流的流量逐渐减小。不同草被覆盖率下的产沙量与产流量相似,覆盖率增加,产沙量减少;产沙过程较产流过程波动明显,且随着降雨历时的增加,产沙量逐渐增大。在降雨结束前的 10 min,25%和 75%覆盖率坡面产沙量表现为上升趋势,随着降雨历时的延长,面蚀逐渐发展,局部发生细沟侵蚀,造成侵蚀量增加,流失量增大。

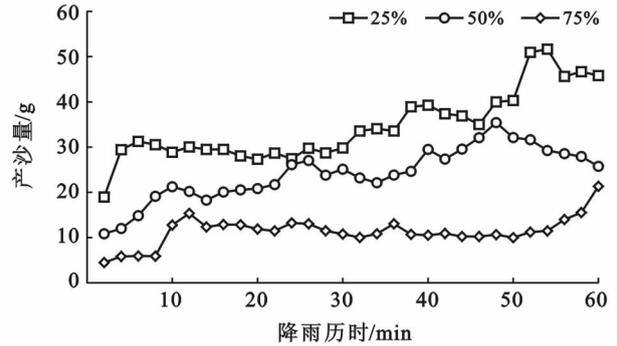
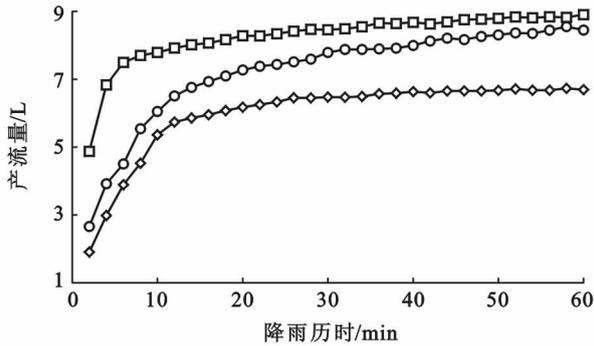


图 2 不同覆盖率坡面产流产沙过程

2.2 磷迁移过程

2.2.1 径流总磷 由图 3 可以看出,径流总磷呈现出波动状的流失过程。产流初始时刻的流失量最小,分析在开始产流阶段,坡面为局部产流,产流量小,土壤中磷被解析的数量有限,致使径流总磷的初始流失量小。

25%覆盖率坡面初始径流总磷流失量约为 1.10 mg,50%覆盖率为 0.77 mg,75%覆盖率为 0.66 mg,随着覆盖率的增大,径流总磷的流失量逐渐减小。当全坡面产流发生后,随着径流过程的逐渐稳定,径流总磷流失过程在 10~15 min 出现波动中心,随后的流失过程围绕该流失量上下波动。50%覆盖率坡面径流总磷流失量的变化范围为 0~5 mg,其中 L_2 格局流失量在 1.15 mg 上下波动, U_2 格局流失量均值为 2.22 mg, M_2 格局草被位于坡面中部,流失量最

大,分析坡面的坡顶位置以雨滴击溅侵蚀为主,使附着在土壤颗粒上的磷被溶解于径流流失;坡面下部位受雨滴击溅和上方径流冲刷的双重作用,相当于坡面侵蚀发生最为严重的两个区域没有采取相应的措施,水土流失的同时造成了养分的大量流失。25%草被覆盖率坡面径流总磷流失量稳定在 1.5~3 mg 范围内波动,75%覆盖率在 1.4 和 3 mg 附近波动, U_3 格局的径流总磷流失率几乎是 L_3 格局流失量的 2 倍。相比较而言,50%草被覆盖率坡面的总磷流失量变化幅度最大,由于在这种条件下,径流在裸土表面形成了薄层水流,草被覆盖又将水流分散,对坡面形成新的冲蚀作用,较 25%覆盖率坡面汇合形成新坡面流的距离短,冲刷作用强,造成流失过程的波动幅度大;较 75%覆盖率坡面裸地面积大,受降雨径流侵蚀冲刷作用影响大,使其波动明显。

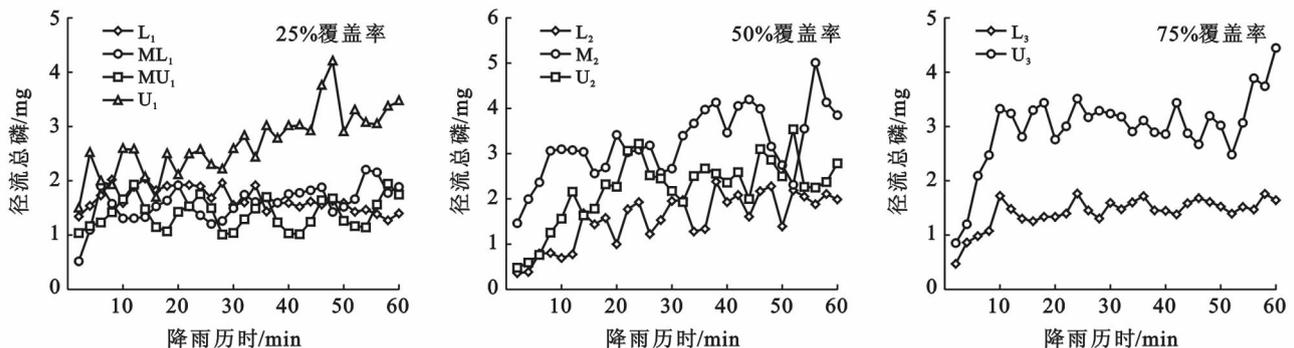


图 3 不同草被覆盖率下坡面径流总磷流失过程

2.2.2 泥沙速效磷流失过程 泥沙速效磷的流失过程较径流总磷波动性更强,总体来说,随着坡面覆盖率的增大,泥沙速效磷流失量是减小的(图 4)。初始泥沙速效磷流失量均值 25% 覆盖率坡面是 75% 的 5.8 倍,而径流总磷流失量这一比值仅 1.7 倍;从流失总量上分析,以 L_1 , L_3 格局为例,泥沙速效磷流失量分别为 55.15 和 13.63 mg,径流总磷流失量分别为 49.84 和 42.61 mg。一方面覆盖率的增加产沙量减少,另一方面草被宽度的增加,被拦截在草被中的泥沙量增加,加大了径流与沉降泥沙吸附解析作用的时间和过程,使得径流溶解更多的磷素并随之流失,也说明了草被对泥沙流失养分的调控作用大于对径流

流失的养分。磷流失过程大体可以分为 3 个阶段,第一阶段为逐渐增大阶段,第 2 阶段为稳定流失阶段,第 3 阶段为动态变化阶段。初始降雨阶段发生雨滴击溅侵蚀,使表面“孤立”且粒径较小的土粒被径流挟走,而细颗粒土壤养分含量高,造成产流初期泥沙养分含量高。趋稳阶段径流挟沙力增加,挟带较大粒径的土粒,造成泥沙中的养分含量略有降低。第 3 阶段随着降雨时间的推移,坡面未发生明显的细沟侵蚀,则径流泥沙中磷的浓度会逐渐减小;坡面发育有细沟时,由于细沟内土壤与径流的相互作用增大了养分的吸附解析作用,造成径流泥沙中的磷流失出现增大的情形。

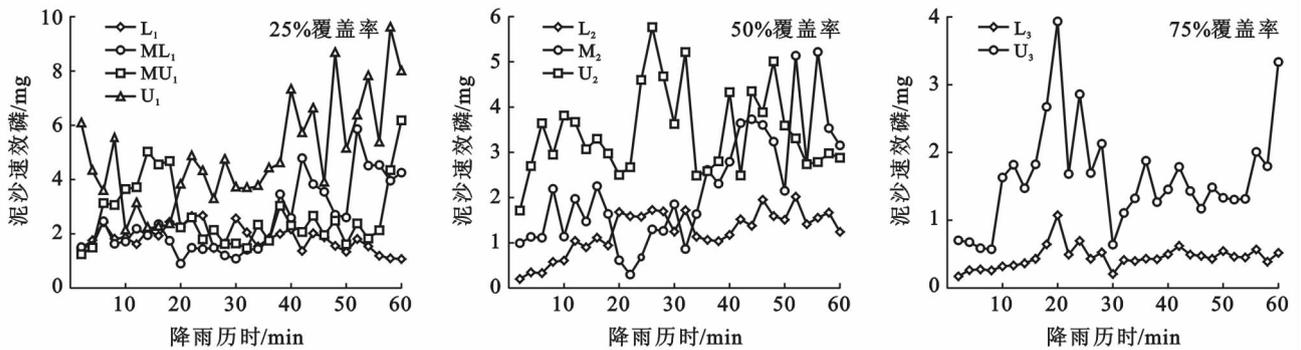


图 4 不同草被覆盖率坡面泥沙速效磷流失过程

2.3 草被覆盖对水沙养分的调控作用

2.3.1 草被覆盖率 通过以上分析,坡面草被对水土—养分流失最主要的影响表现在随着覆盖率的增大,径流、泥沙、养分磷的流失量是减小的。为了进一步说明坡面草被覆盖率、布设格局减小流失量的作用及其程度,采用蓄水量、储沙量和减磷量指标进行对比分析,其中,

蓄水量 = 裸坡产流量 - 草被坡面产流量

储沙量 = 裸坡产沙量 - 草被坡面产沙量

控磷量 = 裸坡磷流失量 - 草被坡面磷流失量

通过图 5 可以看出,随着坡面覆盖率的增加,蓄水储沙量逐渐增大,控磷量表现各异。坡面草被覆盖对泥沙及其养分流失的调控作用较一致,对径流及其养分流失的调控具有一定差异性。以裸坡流失量为基准,随着草被覆盖率的增加,蓄水量与储沙量相应增加,特别是储沙量。相对于裸坡而言,在 25%, 50%, 75% 覆盖率下坡面径流流失量分别减少了 29%, 38% 和 48%, 泥沙流失量分别减少了 37%, 56%, 79%, 由此可以看出,草被覆盖对泥沙的调控效益明显优于径流。草被的对养分同样具有明显调控作用,在 25%, 50%, 75% 覆盖率下坡面径流总磷相对与裸坡分别减少了 34%, 15%, 20%, 而泥沙速效

磷分别减少了 62%, 47%, 21%, 结果表明,草被对径流总磷的调控作用不强,甚至不及草被对径流的削减作用,且随着覆盖率的增加调控作用减弱,一方面在进行草被覆盖率的调控作用分析时取各格局的平均值,坡面上方格局的流失量将平均值拉大,另一方面草被覆盖使径流流速增加,对坡面土壤的冲刷作用增强,致使土壤养分更易被径流解析带走。然而,草被对泥沙速效磷的调控作用显著,且与泥沙表现一致,反映出养分磷的流失形态确以吸附泥沙为主。

2.3.2 草被格局 为了更清晰地分析不同草被格局对水沙养分的调控作用,利用配对 t 检验最小显著差异法(LSD)进行统计分析。

由表 1 可以看出,相对裸坡而言,径流率变化范围为 5.63 ~ 11.66 mm, 草被格局减少径流率为 15.5% ~ 51.7%, 位于坡面下部的草被格局对径流削减效益效果良好。在 9 种草被格局中, MU_1 和 U_1 格局与其他格局有着显著差异, L_1 , ML_1 , M_2 , U_2 格局差异不明显($\alpha=0.05$), 说明坡面 50% 覆盖率中上部格局与 25% 覆盖率坡下格局对调控径流所起的作用相似。格局 L_2 和 U_3 对径流的调控作用无显著差异, 表明当坡面草被覆盖率达到一定比例时,对调控径流的作用是有限的。

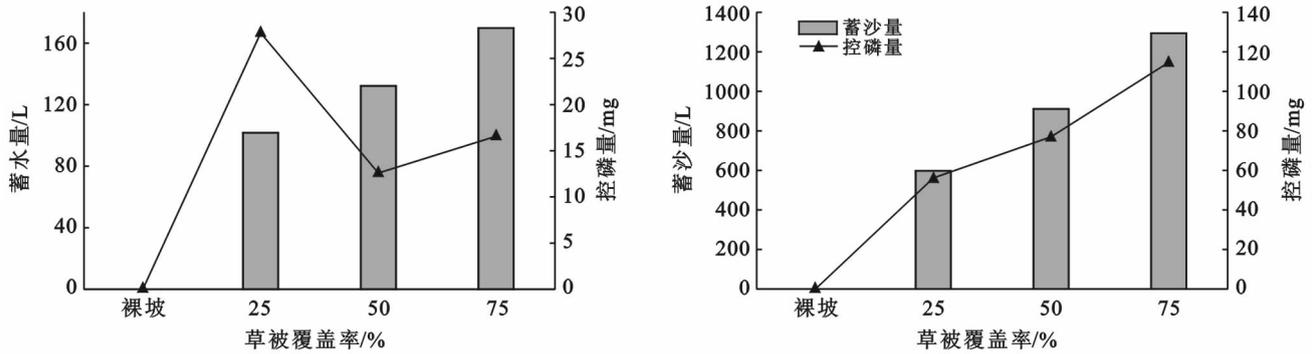


图 5 不同草被覆盖率坡面调控作用对比

表 1 不同草被覆盖格局调控作用对比

草被格局	径流/ (L·min ⁻¹)	泥沙/ (g·min ⁻¹)	径流总磷/ (mg·min ⁻¹)	泥沙有效磷/ (mg·min ⁻¹)	削减效益/%			
					产流	产沙	径流总磷	泥沙速效磷
裸坡	11.66 ^a	54.51 ^a	2.75 ^b	4.87 ^a	—	—	—	—
L ₁	7.00 ^{de}	24.93 ^{de}	1.66 ^d	1.84 ^{cde}	39.9	54.3	39.7	62.2
ML ₁	7.43 ^d	26.72 ^{cd}	1.58 ^d	2.53 ^{bed}	36.3	51.0	42.5	47.9
MU ₁	8.78 ^c	36.65 ^b	1.39 ^d	2.70 ^{bc}	24.7	32.8	49.7	44.4
U ₁	9.85 ^b	50.04 ^a	2.68 ^b	4.89 ^a	15.5	8.2	2.5	-0.6
L ₂	6.41 ^{ef}	15.17 ^f	1.55 ^d	1.25 ^{ef}	45.0	72.2	43.6	74.3
M ₂	7.48 ^d	22.90 ^{def}	3.23 ^a	2.21 ^{cd}	35.9	58.0	-17.4	54.6
U ₂	7.89 ^{cd}	34.39 ^{bc}	2.22 ^c	3.44 ^b	32.3	36.9	19.5	29.4
L ₃	5.63 ^f	4.88 ^g	1.42 ^d	0.45 ^f	51.7	91.0	48.4	90.7
U ₃	6.37 ^{ef}	17.85 ^{ef}	2.98 ^{ab}	1.63 ^{de}	45.4	67.3	-8.3	66.5

注:同一列中具有相同小写字母表示不同格局间无显著性差异(显著水平 $\alpha=0.05$)。

草被格局对泥沙的调控作用为削减了裸坡产沙量的 8.2%~91.0%，格局 L₃ 的减沙效益最好。草被格局对产沙量的调控作用可分为 3 组：① U₁ 格局位于坡面上部，拦截泥沙的能力有限，其流失量与裸坡无明显差异。② MU₁, U₂, ML₁, L₁, M₂, L₂, U₃，该组包含了 25%, 50%, 75% 这 3 种覆盖率，25% 和 50% 覆盖率各有 3 种格局，75% 覆盖率格局位于坡面上部，说明位于坡面上部高覆盖率的草被对产沙量的调控作用与位于坡面下部低覆盖率草被调控作用差异不显著。③ L₃ 格局综合了覆盖率以及覆盖格局的优势布设，是所有试验格局中减沙效益最好的格局。同草被格局对泥沙的作用一样，泥沙速效磷可分为 2 组：① U₁；② U₂, MU₁, ML₁, M₂, L₁, U₃, L₂, L₃，各格局与草被对泥沙的调控作用相似，说明养分磷与泥沙流失有着良好的相关关系，经分析，各格局累计磷流失量与产沙量呈线性关系，相关系数均在 0.99 以上，则可以通过调控产沙量来削减养分磷的坡面流失量。

相比较而言，不同于径流、泥沙以及泥沙速效磷，坡面草被格局对径流总磷的调控作用区分度更高，差

异性显著，可分为 3 组：① M₂, U₃, U₁；② U₂；③ L₁, ML₁, MU₁, L₂, L₃。当草被覆盖位于坡面下部时调控作用最强，位于上部调控作用最弱。①组③组中的格局均涵盖了试验条件下的草被覆盖率，说明覆盖率对径流总磷流失的调控作用不大；还出现了流失量均值大于裸坡的情况，分别为格局 M₂ 和格局 U₃，都是覆盖率较大的坡面。同调蓄径流的作用有局限性一样，草被覆盖对径流携带流失养分磷的调控作用也有局限性。

3 结论

坡面草被在蓄水拦沙的过程中同时作用于随其流失的养分。试验表明，模拟降雨条件下，坡面径流随降雨历时的增加呈现平稳增长过程，泥沙呈波动变化过程；径流总磷流失过程总体上呈波动状，50% 草被覆盖率的波动程度较 25% 和 75% 大；泥沙速效磷的流失过程较径流总磷波动性更强，草被对泥沙速效磷流失的调控作用大于径流总磷。

随着坡面覆盖率的增加，蓄水储沙量逐渐增大，控磷量表现各异。25%, 50%, 75% 覆盖率坡面径流

总磷和泥沙速效磷分别为裸坡流失量的66%,85%,80%和62%,47%,21%,草被对径流总磷的调控作用不强,对泥沙速效磷的调控作用显著。

草被格局对水沙养分调控作用的差异性表现为:泥沙>径流>泥沙速效磷>径流总磷,径流总磷对草被格局的分选度高,格局作用分组明显。草被格局对径流和径流总磷的调控作用有限,对泥沙与泥沙速效磷的调控作用显著,泥沙速效磷累计流失量与累计产沙量具有良好的线性关系,可以通过调节产沙量来调控随泥沙流失养分磷的量。

[参 考 文 献]

- [1] 李婧,李占斌,李鹏,等.模拟降雨条件下植被格局对径流总磷流失特征的影响分析[J].水土保持学报,2010,24(4):27-30.
- [2] 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.
- [3] 徐国策.丹江中游小流域氮素分布与流失机理研究[D].北京:中国科学院研究生院:教育部水土保持与生态环境研究中心,2013.
- [4] 安娟.东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D].北京:中国科学院研究生院:教育部水土保持与生态环境研究中心,2012.
- [5] Wang Longfei, Shi Zhihao, Wang Jinshan, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2014,512(10):168-176.
- [6] Gao Bin, Walter M T, Steenhuis T S, et al. Investigating raindrop effects on transport of sediment and non-sorbed chemicals from soil to surface runoff[J]. Journal of Hydrology, 2005,308(1):313-320.
- [7] 程圣东,李占斌,李鹏,等.不同草被格局坡面水土—养分流失动力过程试验研究[J].水土保持学报,2014,28(5):58-61.
- [8] 唐佐芯,王克勤.草带措施对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的控制作用[J].水土保持学报,2012,26(4):17-22.
- [9] 戴矜君,程金花,张洪江,等.草被覆盖对养分迁移机制的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):147-153.
- [10] 梁丽,赵梅.施肥与植被覆盖对坡地铵态氮流失的影响[J].南方农业学报,2012,43(12):1986-90.
- [11] 李海强,郭成久,李勇,等.植物篱对坡面土壤养分流失的影响[J].水土保持研究,2016,23(5):42-48.
- [12] 马琨,王兆骞,陈欣,等.不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J].水土保持学报,2002,16(3):16-19.
- [13] 姚志杰,张社朝,陈云明.黄土丘陵区红豆草和苜蓿植物篱对土壤颗粒组成的影响[J].水土保持研究,2014,21(6):20-4.
- [14] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.
- [15] 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.
- [16] 游珍,李占斌,蒋庆丰.植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响[J].水土保持通报,2006,26(6):28-31.