

黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响

吴 蕾¹, 穆兴民^{1,2}, 高 鹏^{1,2}, 赵广举^{1,2}, 孙文义^{1,2}, 田 鹏^{1,2}

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.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, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了研究黄土高原地区不同植被盖度对产流产沙的影响。通过文献检索,收集到 30 篇相关文献 158 组有效数据,运用系统整合分析的方法研究了不同植被盖度的减流减沙效益。结果表明:(1)室内外人工模拟降雨条件下,产流产沙量都随着盖度的增加而逐渐减少,植被的减流效益随盖度的增加先增加后减少,低盖度(0~40%)时植被的减流效益较低,高盖度时减流效益也有所降低,植被的减沙效益则随盖度的增加而一直增加,且其减沙效益大于减流效益。(2)减流减沙效益随盖度增加呈对数变化,即符合 $y=a\ln x+b$ 型,该图形具有开始增长快,当达到某一值后增长变缓并趋于稳定的特点。(3)黄土高原地区植被的有效盖度为 40%~50%,临界盖度为 70%~80%。因此,在黄土高原进行植被建设时初始盖度应达到有效盖度,即 40%~50%,在之后的植被恢复过程中,维持植被盖度在 70%~80%,使植被能发挥最大的蓄水保土作用。该研究可为黄土高原地区植被建设和生态修复提供科学依据,同时为区域科学布设植被措施提供参考。

关键词:黄土高原; 植被盖度; 减流效益; 减沙效益

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0133-06

Effects of Vegetation Coverage on Runoff and Sediment Yield in the Loess Plateau

WU Lei¹, MU Xingmin^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, ZHAO Guangju^{1,2}, SUN Wenyi^{1,2}, TIAN Peng^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil

Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the effect of different vegetation coverage on runoff sediment yield in loess plateau. Through literature search, a total of 158 sets of valid data were collected from 30 related literatures. The system integration analysis method was used to study the variation of runoff and sediment reductions with different vegetation covers. The results show that: (1) under indoor and outdoor artificial simulated rainfall conditions, the yields of the runoff and sediment gradually decrease with the increase of coverage, the runoff reduction benefit by vegetation increases first and then decreases with the increase of coverage; at low coverage (0~40%), the runoff reduction benefit by vegetation is low; the flow reduction benefit also reduced when the coverage is high; the sediment reduction benefit of vegetation has been increasing with the increase of coverage, and its sediment reduction benefit is greater than the runoff reduction benefit; (2) the runoff and sediment reduction benefit changes follow the logarithmic function ($y=a\ln x+b$) with the increase of coverage, and the graph has the characteristics with starting to grow fast, and when it reaches a certain value, the growth slows down and tends to be stable; (3) the effective coverage of vegetation in the Loess Plateau is between 40%~50%, and the critical coverage is 70%~80%. Therefore, the initial coverage of vegetation construction in the Loess Plateau should reach an effective coverage of 40%~50%. In the subsequent vegetation restoration process, the vegetation coverage should be maintained at 70%~80%, so that the vegetation can play the role of maximum water storage and soil preservation. This study can provide the scientific basis for vegetation construction and ecological restoration in the region of the Loess Plateau and a

收稿日期:2018-12-21

修回日期:2019-02-23

资助项目:十三五国家重点研发计划专题计划“黄土高原水土流失综合治理技术及示范”(2016YFC0501707)

第一作者:吴蕾(1994—),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为生态水文。E-mail:757366897@qq.com

通信作者:高鹏(1976—),男,陕西宝鸡人,博士,副研究员,博士生导师,主要从事水土保持和流域生态水文研究。E-mail:gaopeng@ms.iswc.ac.cn

reference for regional scientific vegetation arrangement measures.

Keywords: the Loess Plateau; vegetation coverage; runoff reduction benefit; sediment reduction benefit

植被是控制水土流失的有效措施,具有保持水土的作用,因此,进行植被建设有利于治理水土流失和改善生态环境。黄土高原的土壤侵蚀面积达 39.08 万 km², 占总面积的 62.63%。经过长期治理,尤其从 1999 年实施退耕还林工程以来,黄土高原地区植被建设速度加快,植被治理措施面积占治理总面积的 75%。该地区水土流失得到初步控制,生态环境得到改善。植被发挥水土保持作用主要是由于植被对地表的覆盖,植被盖度是减少水土流失的主要因素,盖度的变化对地表径流和土壤流失有很大影响。随着植被盖度的增加,植被对降雨的有效拦截作用也随之增强,同时,雨滴对土壤的击溅侵蚀力和作用面积随之减小,使得土壤侵蚀量逐渐减少^[1]。

目前在黄土高原地区,大量研究者从不同的目的出发进行试验设计,研究植被盖度对水土流失的影响。张光辉等^[2]研究裸地及不同盖度草地的产流产沙过程,结果表明,裸地的产流产沙过程可用指数函数 $y = e^{a+bx}$ 型式描述,不同盖度的草地产流产沙过程均可用幂函数 $y = ax^b$ 来描述。鲁克新等^[3]研究发现随植被覆盖率的增加,径流和产沙总量分别呈幂函数和指数函数减小的趋势,并且植被对水沙调控作用逐渐增强。

植被建设中的一个重要指标是有效盖度。有效植被盖度是指在一定区域内,植被保持土壤并使土壤侵蚀量降低到土壤最大允许侵蚀量以内所需的植被盖度^[4]。郭百平等^[5]在野外通过人工降雨试验研究沙棘林在不同郁闭度下的减水减沙效益,确定沙棘林的有效郁闭度为 0.5。王万中等^[6]通过分析小区资料得出坡度为 20°,25°,30°,35°时,林地的有效盖度要分别达到 57.2%,64.5%,70.4%,75.5%,草地的有效盖度要分别达到 63.4%,71.1%,77.3%,82.6%;并发现当其他条件相同时,要发挥同一水土保持作用草地的有效盖度要比林地大。蒋定生等^[7]分析了安塞、离石等试验区的观测资料,发现当植被的覆盖度小于 40%时,减沙效益明显降低。段庆杉^[8]通过分析黄土高原地区森林植被与流域产流和产沙资料,得出在黄土高原地区无论是在小流域还是大中流域中,当森林植被覆盖率达到 40%左右时可有效地控制流域的产流量和产沙量。Zhao 等^[9]在黄土高原地区通过人工降雨试验研究天然草地的产流产沙规律,结果发现当盖度达到 40%时,坡面产流和产沙量明显减少,之后随着盖度的增加减流减沙幅度逐渐减小。

植被临界盖度是指植被群落的水土保持作用达到最大或极限时的群落盖度。当植被盖度达到临界盖度时,此时的土壤流失量非常轻微,远远小于允许土壤流失量。当群落盖度大于临界盖度时,植被保持水土功能几乎不随盖度的增加而增强^[10]。焦菊英等^[11]研究发现林地的水土保持作用受其盖度的影响非常大,当盖度达到一定程度时,就能有效地保持水土,减少水土流失量。罗伟祥等^[12]研究表明,冲刷量在允许值 20 kg/100 m² 范围内的植被覆盖度临界值为 35.27%。王升等^[13]研究发现当植被覆盖度为 43.2%时,植被的减沙和保持养分的作用已经很显著,再增加盖度其效果并不显著。李龙等^[14]通过人工模拟降雨试验发现当羊草盖度由 80% 增加到 100%时,累积产沙量的减少幅度最小。朱冰冰等^[15]研究发现草本植物的临界覆盖度为 60%~80%,当覆盖度在 0~60%范围内时,产流产沙量随覆盖度的增加迅速降低;而植被覆盖度>80%时,产流、产沙量不再随覆盖度的增加而大幅度下降,此时,植被水沙调控作用趋于稳定。

综上,虽然在黄土高原地区有关植被盖度水土保持作用的研究繁多,但没有统一的变化规律,因此本文对该地区通过人工模拟降雨试验进行的不同植被盖度的产流产沙相关文献数据进行系统地整合分析,总结植被减流减沙效益随植被盖度的变化特征,确定黄土高原有效盖度,探寻一个使植被发挥较高水土保持作用的盖度范围,为黄土高原地区进行植被恢复和建设提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

针对黄土高原地区不同植被盖度对产流产沙的影响,本研究运用中国期刊全文数据库(CNKI, <http://www.cnki.net/>)和 Web of Science(SCI 科学引文索引数据库)数据库,以“人工降雨(artificial rainfall)”、“植被覆盖(vegetation cover)”、“水土保持(conservation of water and soil)”等为关键词,全面收集国内外公开刊物上发表有关黄土高原地区植被盖度对产流产沙影响的文献中的数据。

为了保证所用数据符合分析要求,减少对分析结果造成的偏差,对收集的文献进一步进行筛选,筛选标准如下:(1) 研究区为黄土高原;(2) 文献中详细交代试验的降雨强度及植被盖度;(3) 文献中清楚交代试验方法即室内人工降雨和室外人工降雨;(4) 文

献中清楚交代所用表征的径流泥沙量的指标;(5) 试验中要有对照和处理,且对照组为裸地。

通过整理和筛选,共有 30 篇有效文献。将所用文献基本情况汇总在数据来源情况表中(表 1)。

表 1 研究数据来源

序号	研究者	研究年份	植被盖度/%	小区面积/m ²	雨强/(mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	研究地点
1	潘成忠等 ^[16]	2005	0,35,45,65,90	1.1	90	15	室内
2	Pan 等 ^[17]	2006	0,35,45,65,90	1.1	100	15	室内
3	宋维峰等 ^[18]	2008	0,60~80	1	90	10,15	室内
4	甘卓亭等 ^[19]	2010	0,25~30,75	1.1	90	15	室内
5	杨春霞等 ^[20]	2010	0,20,40,60,80	5	90	20	室内
6	肖培青等 ^[21]	2010	0,60~65	5	45,87,127		室内
7	Liu 等 ^[22]	2010	0,30,40,50,60,70	1.1	120	15	室内
8	贾莲莲 ^[23]	2010	0,25,50,75	4	120	21,28	室内
9	姚文艺等 ^[24]	2011	0,60~65,70	5	45,90,130	20	室内
10	董月群等 ^[25]	2011	0,25,50,75	1.6	60,90,120	0~30	室内
11	肖培青等 ^[26]	2012	0,63~70	5	45,90,130		室内
12	李婧等 ^[27]	2017	0,25,50,75	4	120	21	室内
13	邓景成 ^[28]	2018	0,18,26,35,42,43,60,66,70	5	60,150	10,15,20	室内
14	刘元保等 ^[29]	1990	0,40,90	7.5	105,6,195	5,10,20	
15	张光辉等 ^[30]	1995	0,20,36,44,55,69	10	50.4	23	安塞
16	郭百平等 ^[31]	1996	0,30,50,60,70	9	91.2	19	方山县马坊乡
17	张光辉等 ^[2]	1996	0,28,32,40,45,56,70	10	50.4	23	安塞
18	石生新 ^[32]	1996	0,30,50,60,70,80,90	3	78	25	纸坊沟
19	袁建平 ^[33]	2000	0,20,40,60,70,85,100		120		安塞
20	张建军等 ^[34]	2002	0,40,50,60,75,80,85,90,95		153.36	17	红旗林场
21	陈洪松等 ^[35]	2005	0,85	60	34.8,36.6	30	王东沟
22	孙飞达等 ^[36]	2007	0,75	2	128.4,147.6,176.4,225	15	安家沟
23	李广等 ^[37]	2009	0,75	2	118.2,128.4,147.6,176.4,225	15	安家沟
24	张冠华等 ^[38]	2009	0,29,78	46.75	89.7	15	安塞
25	张冠华 ^[39]	2009	0,30,80	46.75	60	15	安塞
26	朱冰冰等 ^[15]	2010	0,20,40,60,80,100	4	60,90,120	15	固原
27	Zhang 等 ^[40]	2010	0,30,80	46.75	100	15	安塞
28	Zhao 等 ^[9]	2013	0,20,40,60,80	3	45,90,120		米脂
29	刘钦 ^[41]	2016	0,40	100	20,30,40,50,60,70,80,90,100	15,25	纸坊沟
30	温永福等 ^[42]	2018	0,80,85	100	78,103.2	12,25	吴起

1.2 分析方法

为了比较不同植被盖度的减流减沙效果,计算其减流减沙效益,以每组文献数据作为一个独立的试验结果,以裸地小区作为对照。

减流减沙效益的计算方法为:

$$CR_V=\frac{R_{CK}-R_V}{R_{CK}}\times 100\%$$

(1)

$$CS_V=\frac{S_{CK}-S_V}{S_{CK}}\times 100\%$$

(2)

式中:CR_V,CS_V为植被的减流效益和减沙效益;R_V,S_V为植被的产流、产沙指标值;R_{CK},S_{CK}为对应的对照的产流、产沙指标值。

2 结果与分析

2.1 室内人工模拟降雨条件下植被盖度对产流产沙的影响

将收集到的数据整理绘制得到不同植被盖度下减流减沙效益的分布图(图 1—2),可见,植被的覆盖能有效降低产流产沙量。由于不同试验间试验条件存在差异,同一盖度下减流减沙效益值分布较广,最低的减流减沙效益分别为 1.8%,8.5%,最高的减流减沙效益可达 99.1%,99.6%。植被的覆盖能保护地表,且对降雨有拦截作用,同时消减降雨动能,降低径流流速,使径流在坡面上滞留的时间延长,增加了径流下渗时间,减少

了地表径流量;在植被的保护下,雨滴对土壤的击溅侵蚀能力也有所减弱,致使土壤侵蚀量减少。植物根系在保持水土方面也发挥了重要作用,它能提高土壤的理化性质,稳定土壤结构;改善土壤团聚结构和孔隙状况,增加土壤入渗能力;通过固持土壤、改善土壤物理性质,提高土壤抗冲性和抗蚀性。

如图 1 所示,减流效益随植被盖度的增加呈现先增加后降低的趋势,当植被盖度达到 60% 时减流效益达到最大,大于 60% 后减流效益降低。低盖度时减流效益随盖度的增加而增加的原因:一是随着盖度的增加,植被的截留量增加,径流量相应减少;二是盖度的增加,也提高了植被降低雨滴打击动能的能力,使地表不易形成结皮,增加土壤的入渗,从而减少了地表径流;三是随着盖度的增加,植被对径流的拦截作用增加,径流流速降低,使得径流运动时间延长,入渗总量增加,径流量减少。由于植被的拦截能力是有限的,当持续的降雨超过了其拦截能力时就会增加地表径流量,降低植被的减流效益,因此出现了植被盖度较大时其减流效益反而降低的现象。

植被的减沙效益随盖度的变化与减流效益一致,也是随着盖度的增加先增加后减少。在图 2 中,减沙效益在盖度为 80% 时出现最大值,即当盖度达到 80% 时,植被发挥了最大的保土作用。

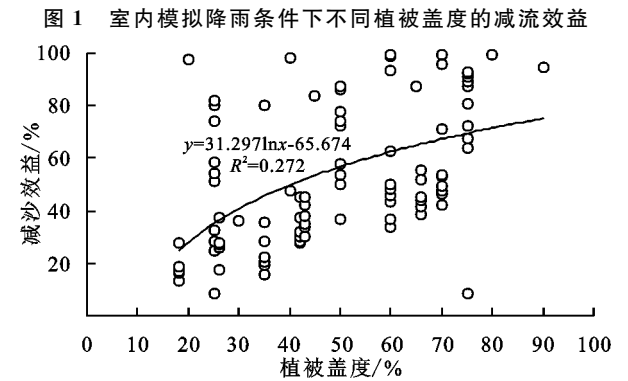
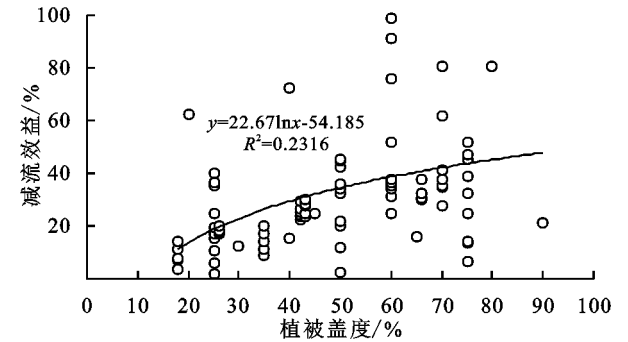


图 1 室内模拟降雨条件下不同植被盖度的减流效益

图 2 室内模拟降雨条件下不同植被盖度的减沙效益

2.2 室外人工模拟降雨条件下植被盖度对产流产沙的影响

如图 3—4 所示,室外人工降雨条件下减流减沙

效益达到极值的盖度范围为 80%~90%,该范围之前减流减沙效益随盖度的增加而增加,并在盖度为 40%~50% 时发生突变,超过该范围减流减沙效益均有降低。与室内人工降雨相比,减流减沙效益变化过程一致,均先增加后降低。但该变化是在总结不同试验条件的减流减沙效益条件下得到的,事实上在同一试验条件下,减流变化规律与前者一致均为先增加后减少,减沙效益则呈现随盖度的增加而一直增加的趋势。随着植被盖度的增加,一方面植被冠层对雨滴的阻挡有效地降低了雨滴对土表的击溅侵蚀作用,另一方面植被根系的增加可以增强其固结土壤的能力,增加土壤的抗蚀能力,在二者的综合作用下产沙量逐渐减少,植被的减沙效益逐渐增加^[14]。综合以上各种原因,植被的减流效益的变化规律为随盖度的增加先增加后减少,而减沙效益一直随盖度的增加而增加。

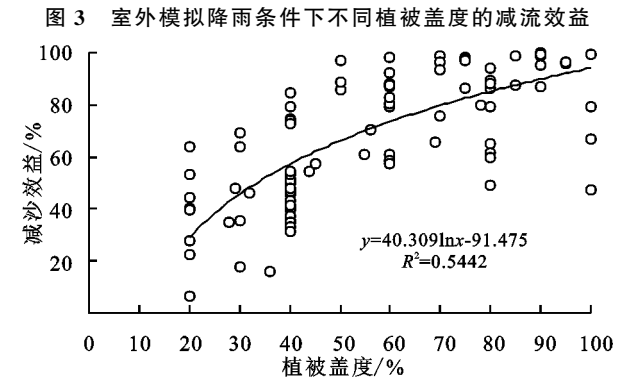
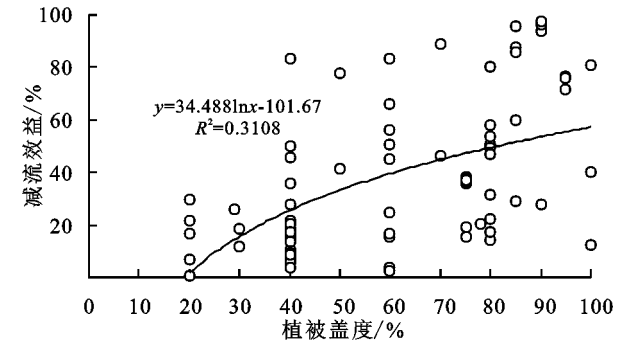


图 3 室外模拟降雨条件下不同植被盖度的减流效益

图 4 室外模拟降雨条件下不同植被盖度的减沙效益

结合室内室外两种降雨条件下减流减沙效益的变化结果可以看出,植被的水土保持临界盖度为 60%~70%,即在此范围以下植被的减流减沙效益随着植被盖度的增加而增加,但影响不显著;随着植被盖度达到临界盖度时,植被盖度的增加对减流减沙效益影响显著;随后减流减沙效益趋于稳定,不再大幅度增加。根据减流减沙效益数值在图中的分布情况,发现减沙效益的数值分布普遍比减流效益数值高,即植被的减沙效益大于减流效益。造成这种现象的原因:一是植被枝叶保护地表防止土壤侵蚀的能力大于其拦截径流的能力,使在同一植被盖度条件下侵蚀产

沙量低于地表径流量;二是植被根系的固结,造成土壤入渗速率较低,容易产流,且提高了土壤的抗蚀性减少了土壤的侵蚀量。

2.3 不同植被盖度下减流减沙效益的变化规律

为了更好地体现植被减流减沙效益随盖度的变化趋势,将植被盖度从 0~100% 进行分级,植被盖度分级见表 2,并计算各等级的平均减流减沙效益,得到不同等级下平均减流减沙效益统计图(图 5—6)。

表 2 植被盖度分级

等级	植被盖度范围/%
1	[0,20]
2	(20,40]
3	(40,50]
4	(50,60]
5	(60,70]
6	(70,80]
7	(80,90]
8	(90,100]

如图 5 所示,在室内人工模拟降雨条件下,平均减流效益的变化过程呈抛物线型,可用 $y = ax^2 + bx + c$ 型(a, b, c 均为常数)来表示,其阶段性变化十分明显,大致可分为 4 个阶段。第一阶段为缓慢增加阶段,低盖度(0~40%)下植被减流效果不佳,随盖度增加减流效益增加缓慢;第二阶段为迅速增加阶段,盖度在 40%~60% 时减流效益迅速增加,最高达 50% 左右;第三阶段为稳定阶段,植被盖度从 50%~60% 到 60%~70% 时变化不大;第四阶段为降低阶段,当盖度等级大于 5 即盖度大于 70% 时,平均减流效益开始下降。而平均减沙效益的变化过程符合对数函数的变化过程,即可用 $y = a \ln x + b$ 型(a, b 均为常数)表示。并且平均减沙效益的阶段性变化不太明显,大致分为两个阶段。第一阶段为迅速增加阶段,与减流效益不同,减沙效益在低盖度(0~40%)时增加迅速,这也表明植被覆盖的减沙作用强烈;第二阶段为稳定增加阶段,随着盖度的增加减沙效益也持续增加但各等级间增加幅度比较稳定。植被盖度在 60%~70% 范围内,平均减流减沙效益均有所降低,这是由于该范围内所收集的数据较低导致平均水平不高。在室内人工模拟降雨条件下,植被的有效盖度在 40%~50%,植被的临界盖度在 60%~70%。

如图 6 所示,在室外模拟降雨条件下,各等级的平均减流效益变化大致分为 3 个阶段。第一阶段为缓慢增长阶段,植被盖度从 0~20% 增长到 20%~40% 的过程中,平均减流效益增长缓慢,平均减流效益也不高,在 20% 左右;第二阶段为稳定增长阶段,

植被盖度在 40%~50% 时的减流效益比 20%~40% 时的减流效益有大幅度增加,随后减流效益随盖度的增加而稳定增加;第三阶段为降低阶段,当盖度超过 80%~90% 时,减流效益呈现下降趋势。其中,覆盖度等级为 6 即覆盖度范围为 70%~80% 时减流效益明显降低,这是由于不同试验的试验条件不同,导致不同试验间的减流效益存在差异,使得平均效益较低。平均减沙效益表现为随着植被盖度的增加而增加,在 40%~50% 的盖度范围时平均减沙效益突增至 70% 以上,随后整体保持稳定增加。根据图 6 所示,在室外人工模拟降雨条件下,平均减流减沙效益均呈对数函数变化趋势即 $y = a \ln x + b$ (a, b 均为常数),植被的减沙作用大于减流作用,且植被的有效盖度在 40%~50%,其临界盖度在 70%~80%。

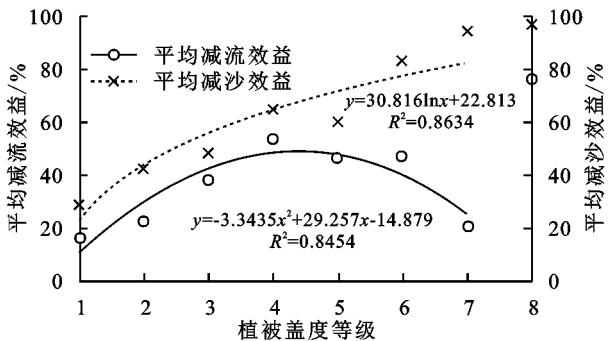


图 5 室内人工模拟降雨条件下不同植被盖度等级的平均减流减沙效益

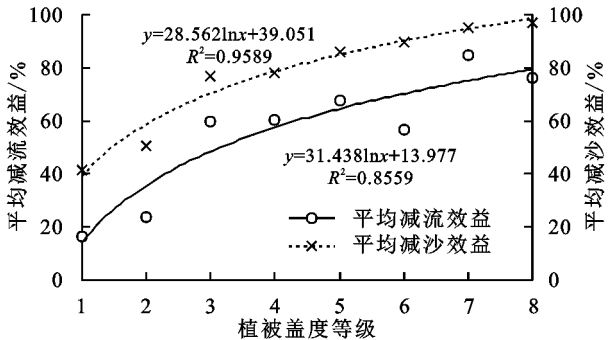


图 6 室外人工模拟降雨条件下不同植被盖度等级的平均减流减沙效益

综合室内外结果发现,平均减流减沙效益变化趋势有所不同,且室内试验的数值比室外试验的小。室内条件单一,植被下贴地表层无其他覆盖,植被的生长时间短会对试验结果造成一定的影响。而室外环境复杂,地形变化及枯枝落叶层也会影响试验结果,其中枯枝落叶层在降水过程中对地面也起到一定的保护作用。结合前文可以看出植被减流效益的变化趋势为先增加后降低,低植被盖度下减流减沙效益低,高植被盖度时减流效益有所降低,并不随植被盖度的增加一直增加;而减沙效益随植被盖度的增加持续增长,植被盖度越高植被保护土壤的作用越好,侵

蚀量降低。同时,植被的减沙效益总是大于减流效益。综合两种情况下的减流减沙效益变化,发现植被的有效盖度为 40%~50%,在该范围内植被的减水减沙效益显著提高,而临界盖度为 70%~80%,低于该范围植被的减水减沙效益随植被盖度的增加而增加,当植被盖度大于临界盖度时,植被保持水土的作用几乎不再随植被盖度的增加而增加,甚至降低。

3 结论

(1) 在室内外人工降雨条件下,由于植被的覆盖,拦截径流、降低雨滴打击动能、减弱径流冲刷力,使得产流产沙量随着盖度的增加而逐渐减少。植被的减流减沙效益明显,且减沙效益大于减流效益。

(2) 植被的减流效益随盖度的增加先增加后减少,低盖度时植被的减流效益低,高盖度时减流效益也有所降低,减沙效益则随盖度的增加而一直增加,植被的覆盖能很好地保护地表土壤,减少径流的冲刷。减流减沙效益随盖度增加呈对数变化,即符合 $y = a \ln x + b$ 型(a, b 均为常数)。

(3) 黄土高原进行植被建设时初始盖度应达到有效盖度,即 40%~50%,在之后的植被恢复过程中,维持植被盖度在 70%~80%,使植被能发挥最大的蓄水保土作用。

参考文献:

- [1] 孙贵军.植被盖度与土壤侵蚀量模型建立与分析[J].水利规划与设计,2015(2):52-55.
- [2] 张光辉,梁一民.模拟降雨条件下人工草地产流产沙过程研究[J].水土保持学报,1996(3):56-59.
- [3] 鲁克新,李占斌,张霞,等.室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J].水土保持学报,2011,25(2):6-9,14.
- [4] 张光辉,梁一民.论有效植被盖度[J].中国水土保持,1996(5):28-28.
- [5] 郭百平,王子科,阎晋民,等.暴雨条件下沙棘林减水减沙效益研究[J].人民黄河,1997(2):26-28.
- [6] 王万中,李靖,焦菊英.黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J].植物生态学报,2000,24(5):608-612.
- [7] 蒋定生,江忠善.黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持施优化配置研究[J].水土保持学报,1992(3):14-17.
- [8] 段庆彬.黄土高原森林植被对径流与侵蚀产沙的影响研究[D].北京:北京林业大学,2009.
- [9] Zhao X, Chen X, Huang J, et al. Effects of vegetation cover of natural grassland on runoff and sediment yield in loess hilly region of China[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2014, 94(3):497-503.
- [10] 郭忠升.水土保持植被的有效盖度、临界盖度和潜势盖度[J].水土保持通报,2000,20(2):60-62.
- [11] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土丘陵沟壑区水土保持人工林减蚀效应研究[J].林业科学,2002,38(5):87-94.
- [12] 罗伟祥,白立强,宋西德,等.不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J].水土保持学报,1990(1):30-35.
- [13] 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.
- [14] 李龙,郝明德,肖庆红,等.不同盖度羊草地对水土流失的影响[J].水土保持通报,2016,36(2):22-27.
- [15] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.
- [16] 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,2005,36(3):371-377.
- [17] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grass-plots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(1/2):178-185.
- [18] 宋维峰,余新晓,张颖.坡度和刺槐覆盖对黄土坡面产流产沙影响的模拟降雨研究[J].中国水土保持科学,2008,6(2):15-18.
- [19] 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,2009,30(9):2387-2396.
- [20] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.不同立地条件下坡面水土流失的差异化试验研究[J].水土保持研究,2010,17(1):222-224.
- [21] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被减流减沙效应及其力学机制分析[J].中国水土保持科学,2010,8(2):15-19.
- [22] Liu G, Tian F, Warrington D, et al. Efficacy of grass for mitigating runoff and erosion from an artificial loessial earthen road[J]. Transactions of the Asabe, 2010, 53(1):119-125.
- [23] 贾莲莲.模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 肖培青,姚文艺,王昌高.灌木减流减沙效应及其水力学机理试验研究[J].泥沙研究,2012(5):33-37.
- [27] 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.
- [28] 邓景成.灌草植被盖度对产流产沙影响的模拟降雨试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

- small scale[J]. Earth Surface Process and Landform, 2010, 35(8): 932-940.
- [19] 朱良君, 张光辉, 任宗萍. 4 种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 163-167.
- [20] Yang Y S, Bu C F, Mu X M, et al. Effects of differing coverage of moss-dominated soil crusts on hydrological processes and implications for disturbance in the Mu Us Sandland, China[J]. Hydrological Process, 2015, 29(14): 3112-3123.
- [21] 李以康, 欧阳经政, 林丽, 等. 高寒草甸植被退化过程中生物土壤结皮演变特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2238-2244.
- [22] Chamizo S, Canton Y, Rodriguez-Caballero E, et al. Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems[J]. Ecohydrology, 2016, 9(7): 1208-1221.
- [23] 石薇, 王新平, 张亚峰. 腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 600-609.
- [24] 周丽芳, 阿拉木萨. 生物结皮发育对地表蒸发过程影响机理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(4): 193-200.
- [25] 刘立超, 李守中, 宋耀选, 等. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 191-195.
- [26] 李婧, 杜岩功, 张法伟, 等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5): 863-841.
- [27] 王浩, 张光辉, 刘法, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 117-123.
- [28] 吴丽, 陈晓国, 张高科, 等. 人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1138-1143.
- [29] 苏培玺, 周紫鹃, 侍瑞, 等. 高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1040-1052.
- [30] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.
- [31] Zhang Z S, Liu L C, Li X R, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China[J]. Journal of Arid Envoriments, 2008, 72: 964-973.
- [32] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24.
- [33] 岳广阳, 赵林, 王志伟, 等. 多年冻土区高寒草甸根系分布与活动层温度变化特征的关系[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1381-1387.
- [34] 杨思维, 张德罡, 牛钰杰, 等. 短期放牧对高寒草甸表层土壤入渗和水分保持能力的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 96-101.
- [35] 柴雯. 高寒草甸覆盖变化洗啊土壤水分动态变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.

(上接第 138 页)

- [29] 刘元保, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报, 1990(1): 25-29.
- [30] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区人工草地盖度季动态及其水保效益[J]. 水土保持通报, 1995(2): 38-43.
- [31] 郭百平, 王子科, 阎晋民. 天然沙棘林减水减沙效益试验研究[J]. 沙棘, 1996(4): 32-36.
- [32] 石生新. 高强度人工降雨条件下地面坡度、植被对坡面产沙过程的影响[J]. 山西水利科技, 1996(3): 77-80.
- [33] 袁建平, 蒋定生, 甘淑. 不同治理度下小流域正态整体模型试验: 林草措施对小流域径流泥沙的影响[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 91-96.
- [34] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 50-53.
- [35] 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.
- [36] 孙飞达, 王立, 龙瑞军, 等. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 16-18.
- [37] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85-90.
- [38] 张冠华, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀泥沙颗粒组成及养分流失的比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 1-6.
- [39] 张冠华. 模拟降雨条件下柠条群落坡面产流产沙及养分流失特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [40] Zhang G H, Liu G B, Wang G L. Effects of *Caragana Korshinskii* Kom. cover on runoff, sediment yield and nitrogen loss [J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3): 245-257.
- [41] 刘钦. 纸坊沟流域暴雨侵蚀与坡面人工降雨产流产沙试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [42] 温永福, 高鹏, 穆兴民, 等. 野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 23-29.