

黄土高原植被固土减蚀作用研究进展

肖培青¹, 姚文艺¹, 张海峰²

(1. 黄河水利科学研究院 水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003;

2. 中国海洋大学 信息学院海洋信息与技术教育部工程中心, 山东 青岛 266100)

摘要:植被是控制和减弱水土流失的有效措施,具有保持水土的作用,在黄土高原生态环境建设中具有不可替代的作用。在系统分析黄土高原植被减水减沙作用研究现状的基础上,概述了植被改善土壤特性、植被与土壤抗冲性、植被与土壤抗剪强度、植被减蚀作用的动力学机理等方面的最新研究进展,并针对目前存在的问题以及今后有待深入研究的问题进行了探讨。该研究对于揭示植被固土减蚀作用的机理,为生态修复工程建设提供科学依据,具有一定的意义。

关键词:植被; 水土流失; 黄土高原

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0282-05

Research Progress of the Role of Vegetation in Soil Conservtion and Soil Erosion Reduction on the Loess Plateau

XIAO Pei-qing¹, YAO Wen-yi¹, ZHANG Hai-feng²

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;

2. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Vegetation is an essential measure to control and reduce soil loss, and plays an important role in conserving soil and water, particularly in the eco-environment construction on Loess Plateau. On the basis of analyzing the effects of vegetation on conserving soil and water, recent research progresses of the effect of vegetation on improving soil texture, vegetation and soil anti-scourability, vegetation and anti-shear strength and the hydrodynamic mechanism of vegetation in reducing runoff and soil loss were reviewed. The exiting problems and the future research topics in these fields were also discussed. The objective of this review is essentially to understand the mechanism of vegetation influences on runoff and sediment yield and can provide scientific evidence for ecological restoration construction project.

Key words: vegetation; soil and water loss; the Loess Plateau

20 世纪 40 年代以来,植被保持水土及其控制水土流失效应的机理研究一直是土壤侵蚀研究的前沿领域。近年来,随着西部生态环境建设退耕还林还草工程的实施,植被变化与流域产流产沙的关系成为当前研究的热点,其研究成果对黄土高原水土保持和生态环境建设具有参考价值^[1]。坡面水力侵蚀的发生取决于坡面径流侵蚀营力与地面土壤自身抵抗侵蚀能力的对比关系,地面植被的存在改变了侵蚀营力在坡面上的空间分布,增强了地面土壤的抗侵蚀能力,使得侵蚀过程变得更为复杂,并引起了流域产流产沙

机制和水沙关系的变化。黄土地区作为水土流失的重要地区,许多学者通过模拟试验和定位观测对植被保土保水功效进行了大量研究,并且也给出了一些定性关系,但缺乏从力学角度揭示植被的保持水土作用^[2-3]。深入开展植被固土减蚀作用的机理研究对定量分析植被坡面侵蚀过程具有重要意义,也将为建立区域生态环境建设评价模型提供理论支撑。基于此,本文对关于植被固土减蚀作用的研究进展进行总结,研究结果对于黄土高原植被建设的宏观布局及流域水土保持措施配置具有重要的意义。

收稿日期:2011-12-30

修回日期:2012-05-30

资助项目:国家自然科学基金项目(41071191);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAB02B05);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(HKY-JBYW-2012-04)

作者简介:肖培青(1972—),女,河南卫辉人,高级工程师,博士,主要从事土壤侵蚀过程模拟研究。E-mail:peiqingxiao@163.com

1 植被改善土壤特性的作用

植被根系生长过程中在土壤中产生了较多空隙,增加了土壤的渗透能力和雨水入渗的时间,延缓了地表径流的流速和产流时间,减少了地表产流量。国外大量的研究表明^[4-6],植被可以改善土壤参数,如土壤紧实度、容重、水稳性团粒含量、有机质含量、渗透性等,并增强土壤抗侵蚀性能。Carrol等^[7]通过对植被恢复过程研究发现,在不同类型的土地上,植被对侵蚀的影响是占主导地位的,植被覆盖的存在可以保护土壤团聚体免遭降雨的破坏,减弱雨滴击溅侵蚀,避免土壤大空隙的堵塞。朱显谟^[8]认为,根系对土壤渗透力的作用主要是根系能将土壤单粒粘结起来,同时也能将板结密实的土体分散,并通过根系自身的腐解和转化合成腐殖质,使土壤有良好的团聚结构和孔隙状况。朱显谟^[5]研究了子洲径流站土地利用状况对入渗的影响,发现休闲地的入渗率最大,牧草地最小,农耕地的初渗率最大,入渗总量居休闲地和牧草地之间。蒋定生等^[9]对子午岭林区新垦林地土壤与非林地土壤的渗透试验表明,20~50 cm深度土层的渗透率差1.4~1.9倍。李勇等^[10]以油松林、沙棘林、百草和黄芩草为对象,对根系提高土壤水稳性团粒和土壤渗透力以及非孔隙度的增量与有效根密度的相关关系进行了深入的研究,建立了根系强化土壤渗透力有效性的数学模型:

$$k=a+bR_d \quad (1)$$

式中: k ——根系提高土壤渗透力的有效性系数; R_d ——有效根密度(个/100 cm²); a, b ——待定参数。试验表明,根系在提高土壤对降雨的渗透能力方面具有极其显著的作用,并提出可以根据该模型对不同植物根系削弱超渗产流、涵养水源的功能做出动态定量评价,从而确定水土保持林草措施配置的最佳方案。白红英等^[11]通过野外人工降雨试验,对坡度为22°~24°,雨强为1.56 mm/min的天然草地进行了三种下垫面条件处理,发现天然草地基本上不发生径流和土壤流失。天然草被破坏开垦后,土壤入渗量减少了50%~60%,产流量增加了20倍左右,产沙量增加了146 t/km²。唐克丽等^[12]在子午岭林区的研究也发现,当地表植被生长良好时,降雨、地形、坡度等因素对土壤侵蚀量的影响很小。肖培青等^[13]利用人工模拟降雨试验,定量研究了不同覆盖度和不同立地条件下的坡面入渗变化规律(图1—2),结果表明,随草地覆盖度的增加,草地入渗率呈下降并趋于稳定的趋势。由图2可见,裸地的下渗率比草地和灌木地的明显减小,且下渗过程波动性强。即植被能显著增加土

壤的入渗性,对洪水过程具有消波调控作用。

植被改善土壤特性的研究取得了不少成果,为定量和从动力学角度研究植被固土作用奠定了基础,但是,不同植被枯落物分解程度不同,坡面流运动状态也不同,枯落物改善土壤特性及其减蚀作用的水力学机理还有待于深入研究。

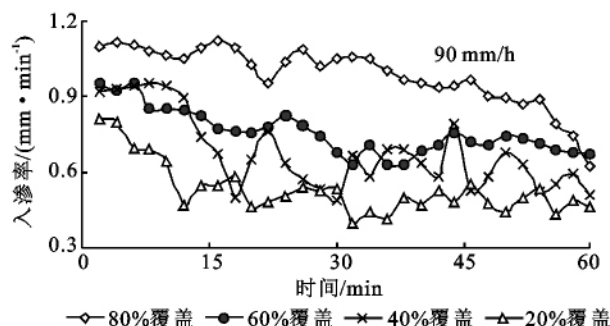


图1 不同覆盖度草地入渗率变化过程

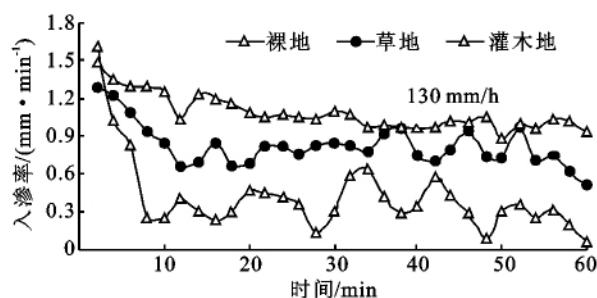


图2 不同立地条件下坡面入渗率变化过程

2 植被与土壤抗冲性

朱显谟^[14]在20世纪50年代就提出土壤抗冲性、抗蚀性的概念,在70年代开始了这方面的研究,并认为,黄土与黄土区土壤的渗透性强和抗冲性弱的特征,完全与黄土沉降方式中形成的黄土颗粒的“点棱接触侧斜支架式多孔结构”有关,黄土堆积以后由于植被的生长,尤其是一定数量根系的上下串联缠绕固结作用,才使得黄土的这种支架接触式多孔结构得以保存和巩固,这种作用使土体有较高的抗蚀强度,从而大大提高了土壤的抗冲、抗蚀性。关于植被地下部分根系强化土壤入渗作用的定量研究方面,不少学者开展了广泛的研究,其中以李勇、刘国彬的研究最具有代表性。

李勇等^[15]通过对黄土高原地区乔灌草根系与土壤物理性质的关系研究,发现植物根系强化土壤抗冲性的能力主要取决于有效根密度在土壤剖面中的分布盘绕状况,有效根密度的物理基础是100 cm²土壤截面上≤1 mm的须根的个数,并从定量描述不同土层深度处根系强化土壤抗冲性的特征及减沙效应入手,建立了植物根系对提高土壤抗冲性的有效性方程:

$$Y = \frac{K \cdot R_d^B}{A + R_d} \quad (2)$$

式中: Y ——根系减沙效应(%); R_d ——有效根密度(个/100cm²); K ——根系减沙效应所能达到的最大值(%),其值大小随 R_d 总量及其在土壤剖面中的分布规律而异。当 $Y = \frac{K}{2}$ 时, $A^{1/B} = R_d$, 故 $A^{1/B}$ 是根系减沙达到最大效应值一半时的有效根密度, 因此, $A^{1/B}$ 是根系提高土壤抗冲性能有效性的特征参数, 可以定量评价根系提高土壤抗冲性的强弱。

刘国彬等^[16]从根系减沙效应作用方面对该公式提出了改进, 并从生物力学角度对根系的抗拉力进行了研究, 结果表明: 当坡面发生侵蚀时, 被根系缠绕串联的土壤的流失不是由于毛根的断裂, 而是由于根—土分离造成的。刘国彬等^[17]还以黄土丘陵区处于不同恢复阶段的草地为对象, 采用野外测定与人工模拟试验相结合的方法, 首次系统地研究了植被恢复过程中土壤抗冲性的时空动态特征以及植物根系、化学元素积累和影响因素, 以及抗冲性土体构型的诸因素在植被演替过程中的变化, 并对比分析了天然草地和人工草地强化抗冲性的不同机制。在对根系生物力学特征进行系统分析的基础上, 指出植物毛根强化土壤抗冲性的 3 种作用方式: 网络串联作用, 根土粘结作用及根系生物化学作用, 并建立了相应的机制模型。查小春等^[18]对开垦前后林地土壤的抗冲性进行了研究, 发现随着侵蚀年限的增长, 土壤的抗蚀性呈减弱趋势。

到目前为止, 大多数研究人员所采用的根系指标, 一般是用单位截面积上根系的个数来进行描述, 而且在径流的冲刷过程中, 根系对土壤抗冲性的提高作用是与根系在整个坡面土体中的分布状况有关, 因而, 采用何种指标对根系进行合理有效的描述, 以反映根系在土体中的分布状况等都有待于今后逐步开展。

3 植被与土壤抗剪强度

土的抗剪强度是指土在外力作用下, 滑动时所具有的抵抗剪切的极限强度。一般将土的抗剪强度分为两部分, 即凝聚力和内摩擦力, 前者与垂直压力无关, 而后者则随垂直压力而变化, 与垂直压力成正比。一般采用库伦公式表示土壤抗剪强度与凝聚力和内摩擦力之间的关系:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (3)$$

式中: τ ——抗剪强度(kPa); σ ——垂直压力(kPa); φ ——内摩擦角(°); C ——凝聚力(kPa)。土体的稳定性与土壤的粘着力、内摩擦力有很大关系, 因而抗剪强度是一个能反映土体抗蚀、崩塌、滑坡的重要指标。

国外土壤侵蚀力学研究者认为, 土壤抗剪强度与土壤侵蚀力学过程紧密相关, Torri^[19]认为土壤表层土壤抗剪强度可以作为评价抗侵蚀性的指标。Wal-dron^[20]等通过试验认为, 植物影响土壤剪切强度的主要因素是植物根系的形态和根系在土体中的几何分布。Gray^[21]等也都认为, 有根系的土壤比没有根系的土壤在达到土体破坏前, 能承受更大的剪切位移。

近年来, 国内一些学者用抗剪强度作为土壤抗侵蚀的指标。范兴科和蒋定生^[22]认为, 植物根系的存在能明显地改善土壤的物理性质, 因而, 在一定条件下, 可以把土壤抗剪强度的增加归结为植物根系存在的结果。解明曙^[23]建立了根系提高坡面土体抗剪强度增量的计算方法, 当根系刚松动而未动的时刻土壤抗剪强度最大值为 $\tau_{\max} = C + \sigma \tan \varphi_1$, 整个剪切面贯通时瞬间土壤抗剪强度的最小值为 $\tau_{\min} = C + \sigma \tan \varphi_2$, 根系增加的土体抗剪强度为 $\Delta \tau = \tau_{\max} - \tau_{\min} = \sigma (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$, 研究结果表明, 林龄 6~10 a 的白榆根系提高土体抗剪强度为 0.04 kg/cm², 10~19, 20~29, 30~40, >40 a 的白榆根系提高土体抗剪强度分别为 0.08, 0.13, 0.15, 0.18 kg/cm²。

以上研究成果揭示了植被对土壤抗剪强度的影响。进一步深入分析植被与根系提高土壤抗剪强度之间的关系, 建立二者之间的关系模型, 将有助于推动植被覆盖下土壤侵蚀力学的研究进展。

4 植被减蚀作用的动力学机理研究

大量研究表明, 植被覆盖度与土壤流失量密切相关。侯喜禄和曹清玉^[24]利用野外径流小区资料分别建立了植被盖度与侵蚀量的回归关系。熊运阜等^[25]通过对绥德、延安、离石等河龙区间黄土丘陵区野外径流小区实测资料的系统分析, 得出土壤流失率随着草地覆盖度的减少呈指数增加趋势, 尤其是平水年较丰水年和枯水年的增加趋势更为显著。白志刚^[26]通过分析绥德 80 a 一遇日降雨量(120 mm)条件下草地、农耕地的侵蚀模数, 发现草地与坡耕地相比, 可以减少侵蚀 70%~90%, 减蚀效果非常明显。刘斌等^[27]分析了 1954—2004 年南小河沟流域林地、草地径流场观测数据源, 将人工草地径流场发生的 328 场次产流降雨, 按照草地覆盖度的大小进行分组统计, 结果发现, 人工草地植被覆盖度以 40%~60% 分界明显, 当覆盖度大于 60% 时, 削减土壤侵蚀的作用减轻, 而在覆盖度小于 40% 时, 减弱土壤侵蚀的作用不稳定, 因此, 黄土高原沟壑区人工林地和草地建设的有效植被覆盖度应不小于 60% 和 50% (表 1)。肖培青^[28]的研究结果表明, 在 45, 87 和 127 mm/h 降雨

强度下,草地坡面土壤的平均入渗率是裸地坡面入渗率的2.1~4.2倍;与裸地相比,草地径流流速减少77.3%~79.8%,径流量减少51.9%~99.1%,产沙量减少93.6%~99.2%(表2)。

表 1 人工草地径流量及侵蚀量与植被覆盖度关系

覆盖度 分级/%	产流次数	产流降雨量/ mm	单位面积径流量/ (m ³ ·km ⁻²)	单位面积侵蚀量/ (t·km ⁻²)	平均 覆盖度/%
100~80	20	36.51	226.90	0.54	91.90
80~60	65	32.11	584.37	3.22	67.46
60~40	38	24.10	541.68	14.85	49.74
40~20	33	24.61	3440.39	97.23	26.36
20~0	57	29.12	3708.47	407.61	6.33
其他	115	31.8	1516.92	16.78	未标示值

表 2 不同降雨强度下草地和裸地入渗率、径流流速、径流量及产沙量特征

试验区	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	入渗率/ (mm·min ⁻¹)	径流流速/ (cm·s ⁻¹)	径流量/ L	产沙量/ kg	草地减流减沙效益/%	
						径流量	侵蚀量
裸地	45	0.15	12.8	238.4	218.2		
	87	0.23	33.8	661.6	547.7		
	127	0.39	37.2	756.1	567.8		
	45	0.64	2.9	2.2	1.7	99.1	99.2
草地	87	0.76	6.8	159.7	5.4	75.9	99.1
	127	0.82	8.1	363.6	36.1	51.9	93.6

近年来,不少学者从不同角度尝试揭示植被减蚀作用的动力学机理。肖培青^[29]从能量角度研究植被林冠对降雨动能的影响,张洪江^[30]从植被地表糙率分析了地被物对径流流速的阻延作用,郭忠升^[31]建立了描述有林地和无林地的坡面霍顿地表径流侵蚀数学物理模型,评价林木对土壤侵蚀的控制作用。王兆印^[32]对植被—侵蚀动力学进行了初步探索和应用,研究了流域植被与侵蚀在人类活动影响下的演变规律,模拟了黄土高原安家沟流域的植被侵蚀演变过程。李勉等^[33-34]通过室内放水冲刷试验研究了黄土丘陵沟壑区坡沟系统坡面不同草被覆盖对坡面流流速变化过程及阻延坡面流作用的研究。杨春霞等^[35-36]利用放水冲刷试验研究了草被措施作用下的坡面侵蚀产沙过程。潘成忠^[37]以多年生黑麦草为对象,通过室内模拟降雨试验,在人为控制条件下研究了牧草植被盖度控制侵蚀的作用机理。肖培青等^[28]利用人工模拟降雨试验对草地固土作用的力学机制进行了探讨,通过分析草被坡面土壤颗粒的受力情况,推导出了草被坡面产沙量概念模型:

$$M=k(\tau-\tau_0)At \tag{4}$$

式中: M ——坡面产沙量; k ——与降雨强度、坡面糙度和土粒间的粘结力等有关的参数; τ_0 ——土粒被分散的临界径流切应力; A ——试验区面积; t ——降雨时间。由模型可知,土壤颗粒被分离的临界径流切应力越大,坡面产沙量越小,因而,土壤颗粒被分离的临界径流切应力大小可以反应植被固土作用的强弱。

植被对降雨和径流的再分配过程改变了坡面水

力特性以及侵蚀产沙的发生发展过程,植被减蚀作用的动力学机理是当前研究的热点。由于植被坡面不同于裸地坡面的径流入渗过程,有必要深入揭示植被作用下坡面流体力学机理,并从植被根系影响土壤力学性质的角度揭示植被的固土作用机制。

5 问题与展望

综上所述,植被改变土壤特性结构及其控制水土流失作用的研究方面取得了明显进展。目前,植被与坡面产沙的关系研究多侧重于植被对侵蚀的调控机理方面,一般是通过不同植被坡面的野外径流小区资料,研究不同植被类型、坡度和盖度等条件下的水土保持效应。在国外,草地拦蓄泥沙的模拟试验主要集中在缓坡;在国内,从植被作用下土壤理化性质改善方面阐明了植被增强土壤抗蚀性的机理,关于植被增强土壤抗冲性和土壤抗剪强度的研究也取得了初步的成果。目前,一些学者利用模拟降雨试验和径流冲刷试验研究了植被坡面水力学参数的变化^[38-39]。所有这些研究结果揭示了植被固土减蚀作用机理,为深入研究植被的水土保持功效提供了研究思路。

鉴于目前的研究手段和测定方法的限制,关于植被作用下土壤抗蚀性特征及其表述指标等方面进行大量的经验统计分析研究工作,但是从力学的角度表征土壤抗蚀性参数的研究还不多,从力学的角度揭示植被固土作用及其增强土壤抵抗径流搬运能力的研究还很薄弱。今后的研究工作应深入研究植被措施作用下坡面侵蚀动力和抗侵蚀力的差异,揭示植被

增强土壤抗蚀性的力学作用和植被减蚀作用的力学驱动机制,从而为建立黄土高原土壤侵蚀区域生态环境模型提供理论基础,同时为黄土高原植被建设及流域水土保持措施配置提供科学依据。

参考文献:

- [1] 何永涛,郎海玲.植被建设在黄土高原水土保持中的意义及其对策[J].水土保持研究,2009,16(4):30-38.
- [2] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [3] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J].水利学报,2010,41(7):870-875.
- [4] Poudel D, Midmore D J, West L T. Erosion and productivity of vegetable systems on sloping volcanic ash-derived philippine[J]. Soil Science Society of America Journal,1999,63(5):1366-1376.
- [5] Moir W H, Ludwig J A, Scholes R T. Soil erosion and vegetation in grasslands of the Peloncillo Mountains, New Mexico[J]. Soil Science Society of America Journal,2000,64(3):1055-1067.
- [6] Olson K R, Gennadiyev A N, Jones R L, et al. Erosion patterns on cultivated and reforested hillslopes in Moscow Region, Russia[J]. Soil Science Society of America Journal,2002,66(1):193-201.
- [7] Carroll C, Halpin M, Burger P, et al. The effect of crop type, crop rotation, and tillage practice on runoff and soil loss on a Vertisol in central Qweenland[J]. Soil Research,1997,35(4):925-939.
- [8] 朱显谟.黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960,8(2):110-120.
- [9] 蒋定生.黄土抗蚀性的研究[J].土壤通报,1978(4):20-23.
- [10] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等.黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J].科学通报,1992,37(4):366-369.
- [11] 白红英,唐克丽,张科利,等.草地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1993,17:87-93.
- [12] 唐克丽,王斌科,郑粉莉,等.黄土高原人类活动对土壤侵蚀的影响[J].人民黄河,1994,17(2):13-16.
- [13] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):50-53.
- [14] 朱显谟,田积莹.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J].水土保持学报,1993,7(3):1210.
- [15] 李勇,朱显谟,田积莹.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J].科学通报,1991,36(12):935-938.
- [16] 刘国彬,蒋定生,朱显谟.黄土区草地根系生物力学特性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,10(3):21-28.
- [17] 刘国彬.黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,12(1):93-96.
- [18] 查小春,唐克丽.黄土丘陵林区开垦地土壤抗冲性的时间变化研究[J].水土保持通报,2001,21(2):8-11.
- [19] Torri D A. Theoretical study of soil detachability[J]. Catena(S),1987,10:15-20.
- [20] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science,1981,132(6):427-435.
- [21] Gray D H. Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soil and Stabilizing Slopes[C]//Proceedings of Symposium on Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques. Sydney, Australia,1978:253-306.
- [22] 范兴科,蒋定生.黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,11(4):69-75.
- [23] 解明曙.林木根系固坡力学机制研究[J].水土保持学报,1990,4(3):7-14.
- [24] 侯喜禄,曹清玉.陕北黄土丘陵沟壑区植被减水减沙效益研究[J].水土保持通报,1990,10(2):33-40.
- [25] 熊运阜,王宏兴,白志刚,等.梯田、林地、草地减水减沙效益指标初探[J].中国水土保持,1996(8):10-14.
- [26] 白志刚.从无定河流域“94·8·4”暴雨洪水看林草措施的减蚀作用[J].中国水土保持,1997(7):17-19.
- [27] 刘斌,罗全华,常文哲,等.不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J].中国水土保持科学,2008,6(6):68-73.
- [28] 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.
- [29] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.植被影响下坡面侵蚀临界水流量试验研究[J].水科学进展,2011,22(2):229-234.
- [30] 张洪江.晋西不同林地状况对糙率系数 n 值影响的研究[J].水土保持通报,1995,15(2):10-21.
- [31] 郭忠升.水土保持植被建设中的三个盖度:潜势盖度、临界盖度和有效盖度[J].中国水土保持,2000(4):30-31.
- [32] 王兆印,王光谦,李昌志,等.植被—侵蚀动力学的初步探索和应用[J].中国科学:D辑,2003,33(10):1013-1023.
- [33] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖下坡面一沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J].水利学报,2007,38(1):112-119.
- [34] 李勉,姚文艺,杨剑锋,等.草被覆盖阻延坡面流作用试验研究[J].水土保持学报,2007,21(1):30-34.
- [35] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J].中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.
- [36] 杨春霞,王丹,王玲玲,等.草被覆盖度对坡面流水动力学参数的影响分析[J].中国水土保持,2008(9):36-38.
- [37] 潘成忠,上官周平.不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J].水科学进展,2007,18(4):490-495.
- [38] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2):232-237.
- [39] 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.