

森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理

张 颖^{1,2,3}, 牛健植^{1,*}, 谢宝元¹, 余新晓¹, 朱建刚¹, 李 维¹

(1. 北京林业大学水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京 100083;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国海洋大学环境科学与工程学院 266100)

摘要:水力侵蚀是目前世界上分布最广、危害也是最为普遍的一种土壤侵蚀类型。坡面土壤侵蚀主要是由雨滴击溅、坡面径流引起,而森林植被作为陆地上最重要的生态系统以其林冠层、林木茎秆、林地上富集的枯枝落叶层、根系层以及发育疏松而深厚的土壤层截持和蓄储大气降水,发挥着其特有的水文生态功能,从多个角度影响降雨和坡面流的水力特性,在防治土壤侵蚀方面有其不可缺少的意义,然而目前对森林植被防治坡面土壤水蚀机理系统的研究还较少。系统的总结了森林植被各个垂直层次对坡面水蚀作用的动力学机理以及不同学者在此领域所做出的研究成果及此项研究的研究现状,并从以下几个方面指出了林地坡面水蚀作用动力学机理研究中尚存在的问题及发展方向:林冠对降雨重新分配出现林冠截持和干流等现象,降雨雨滴的大小、分布、降落速度和动能等性质发生变化,林冠层通过改变雨滴特性来影响坡面流水力特性,进而改变坡面对坡面的侵蚀机理;森林植被茎干对径流的分散阻止作用,增大地表径流的阻力系数,茎干绕流现象对坡面土壤侵蚀的作用有正反两方面,林木在一定种植密度内,会使得泥沙起动流速减小,增加坡面侵蚀,因此应合理选择林木的种植密度才能起到减少坡面水蚀的作用;坡面流在枯落物层中流动并穿过枯落物层后下渗进入土壤的过程,类似于水流在多孔介质中的流动,枯落物的物理性质如分解程度、空隙度等的变化,引起水流流动的状态变化复杂,有必要应用渗流理论来深入研究以搞清其流动机理;根系层的存在能逐步改善土壤的内在特性,稳定表土层结构、提高土壤入渗性能使其抗侵蚀能力加强,植物根系层对坡面水蚀作用的研究是一个崭新的领域,需从土力学和植物根系影响土壤力学性质的角度研究土壤的抗侵蚀能力。

关键词:森林植被;降雨;水力侵蚀;坡面流;动力学

文章编号:1000-0933(2008)10-5084-11 中图分类号:Q948,S718.5 文献标识码:A

Dynamics mechanism of the effect of forest vegetation on hill-slope water erosion

ZHANG Ying^{1,2,3}, NIU Jian-Zhi^{1,*}, XIE Bao-Yuan¹, YU Xin-Xiao¹, ZHU Jian-Gang¹, LI Wei¹

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

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China

3 Environmental Science and Technology Institute, Ocean University of China, 266100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5084 ~ 5094.

Abstract: Water erosion is the most universally-distributed soil erosion type at present and does a lot of harm. Soil erosion is a chief cause of land degradation, which is also an important factor of eco-environment deterioration. The process of hill-slope water erosion depends on the interaction of rainfall, the erosion power of runoff and the ability of the soil to resist erosion. Forest vegetation participates in the soil erosion process, regulating and controlling water erosion with its peculiar hydro-ecological characteristics, changing the erosivity of rainfall and runoff to hill-slopes. Hydraulic characteristics of

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2002CB111502);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-120)

收稿日期:2007-01-17; 修订日期:2008-05-01

作者简介:张颖(1979~),女,山东胶州人,博士,主要从事流域治理,水土保持研究. E-mail: zhangyingqd@yahoo.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: niujianzhi@sohu.com

Foundation item: The project was financially supported by the State Key Project of Fundamental Research (973) (No. 2002CB111502); State Key Laboratory Foundation of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau (No. 10501-120)

Received date: 2007-01-17; **Accepted date:** 2008-05-01

Biography: ZHANG Ying, Master, mainly engaged in watershed management, soil and water conservation. E-mail: zyzbj @ sohu.com

overland flow, such as flow velocity, flow depth and friction coefficients, etc., and their relationships have been studied widely on overland flow. However, few studies have been done examining inter-rill flow in vegetation-covered plots under rainfall conditions. This paper illuminates dynamic mechanics of each vertical part of forest vegetation influencing hill-slope water erosion, summarizes the research achievements and research progress that different scholars have made, and points out the problems and developing directions in this field that currently exist; Forest vegetation canopy redistributes rainfall and changes the characteristics of rainfall such as the raindrop size distribution, rainfall velocity and raindrop kinetic energy. These have an influence on hydraulic characteristics of overland flow and can change the mechanism of soil erosion on hill-slope. Trunks prevent and disperse runoff and increase the surface runoff resistance coefficient. Runoff flowing around trunks has both positive and negative functions on hill-slope water erosion. Within a certain planting density, forest vegetation can decrease initial velocity of sediment and increase hill-slope water erosion, so reasonable planting density should be chosen to decrease water erosion. Runoff flows in and through the litter layer and infiltrates into the soil, similar to the flow in porous media. Litter has a different flow state for different degrees of decomposition, so it is necessary to do further research to get the flow mechanism by percolation theory. The forest vegetation root system gradually improves the inherent characteristics, structure stability and infiltration of the soil, and strengthens the anti-erosion ability. Research on the role of plant root system to the slope soil erosion is a new field. Anti-erosion ability of soil should be studied from the aspects of soil mechanics and plant roots influencing soil mechanic characteristics.

Key Words: forest vegetation; rainfall; water erosion; overland flow; dynamics

土壤水蚀是指在降雨雨滴击溅、地表径流冲刷和下渗水分作用下,土壤、土壤母质及其它地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的全部过程^[1]。在林地内,森林生态系统以其特有的水文生态功能参与了土壤侵蚀机理的有效调控,德国土壤学家 Wolly 在 1877 年至 1895 年间完成的第一个侵蚀科学实验研究中,用试验小区观测到了植被和地面覆盖物对防止降雨侵蚀和土壤结构恶化的影响,后来,Ellision^[2,3]认识到植被的保护作用是由于它使降落雨滴丧失了动能,这些试验研究为土壤侵蚀科学开辟出了一个新的领域。

我国对土壤侵蚀机理研究始于 20 世纪 40 年代初,主要是利用野外径流小区实验进行研究,后来发展到室内的实验研究,利用人工降雨开展单因素侵蚀相关研究。20 世纪 60 年代以后,土壤侵蚀机理研究主要集中在雨滴溅蚀、坡面单因素侵蚀动能及侵蚀产沙方面。70 年代后,我国开始注重土壤侵蚀研究,从降雨特征、雨滴动能、溅蚀及降雨径流侵蚀力、植被盖度、微地貌形态等因素与侵蚀量的关系进行定量研究,并建立了侵蚀方程式^[4-6]。但以往的研究大都只把植被当作影响侵蚀的一个因素来考虑,通常用植被盖度、郁闭度、不同树种等指标来代表植被对侵蚀的作用,而未从植被对侵蚀的作用机理方面来研究它们之间的关系。

土壤水蚀是水与土壤之间的相互作用,土壤本身的性质决定其抵抗侵蚀的能力,而坡面植被状况能够改善土壤的物理化学特性,能从各个方面影响坡面流的形成和发展,改变其水力特性,从而影响侵蚀的发生^[7]。研究森林植被防治坡面土壤水蚀机理应对林地坡面水蚀的动力学相关过程作深入了解。

1 森林植被冠层对坡面水蚀的作用机理

雨强和雨滴动能或动量对薄层水流水动力特性的影响最大,坡面击溅侵蚀的动力主要由降雨动能提供^[8],了解植被对降雨动能的影响机制和定量评价植被对降雨动能的影响,是研究森林植被防治坡面土壤侵蚀机理的重要部分,雨滴动能公式:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

其中

$$m = \frac{\pi}{6}d^3\rho; v^2 = 2ah \quad (1)$$

式中, ρ 是水的密度; a 是雨滴下落加速度; h 是雨滴降落高度。

从雨滴动能公式可看出质量 m 与直径 d 有关,雨滴降落速度是降落高度的函数,因此,雨滴动能与雨滴直径、降落高度、降落速度有直接关系。

1.1 森林冠层对降雨的再分配

植被覆盖可以改变降雨雨滴动能,和其它植被类型相比,森林的结构比较复杂,林冠是森林对降雨特征和雨滴动能产生影响的第一个作用层。降雨通过林冠层后,产生分流,产生直接穿透雨、林冠滴下雨滴和溅落雨滴,出现林冠截持和干流等现象,从而在降雨雨滴大小分布及降落速度、动能等性质上发生了变化。具有不同结构特征的分林在不同特点的降雨条件对降雨动能的改变规律,对于研究水土流失规律及不同结构森林的水土保持效益来说,都是必不可少的。但目前这方面的研究还比较少,而且所得结论差别较大,即对不同林分结构对不同特征降雨的雨滴动能的作用机理还没有搞清。

不同结构的林分有不同的林冠降雨。因此,研究降雨对林地的土壤侵蚀机理应该从雨滴物理性质和林冠结构两方面进行研究。

1.2 林冠层对降雨雨强与雨量的影响

在林地内,由于林冠的阻拦和截持,雨水通过林冠后,数量、雨滴大小、分布等都会发生明显的变化。在郁闭林冠下,可以认为直接穿透雨很少,林冠降雨几乎完全是由冠滴雨组成的。在未郁闭林冠下,穿透雨与冠滴雨同时存在。由于林冠的截留作用,林冠降雨量小于林外降雨量,而且由于林冠枝叶碰撞与聚集作用,雨滴分布不均匀;而穿透部分与林外雨量相同,因此林内降雨改变了实际降雨的雨强,一般符合下面的规律。且林外雨强比林内雨强分布均匀,林内降雨特性随树种、林分结构等的不同各异:

$$\begin{aligned} (I_c < c) \quad P < C \quad \text{林内 } I_{\text{内}} < \text{林外 } I_{\text{外}} \\ (I_c = c) \quad P > C \quad \text{林内 } I_{\text{内}} = \text{林外 } I_{\text{外}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, I_c 是林冠实际截留强度, c 是林冠截留能力, C 是林冠最大截留量, P 是林外降雨量。

1.3 林冠层对雨滴大小组成的影响

雨滴的大小组成称为雨谱,天然降雨的雨谱随雨型(如短阵型雨型和普通雨型)和雨强而变化。对于天然降雨雨滴大小国内外学者先后研究了雨滴大小与雨强的关系,得出中值粒径 $D50$ (在一次降雨中以该直径为界,大于这一直径的雨滴的总体积,等于小于这一直径的雨滴的总体积)与雨强的相关关系式^[9]。

Best^[10] 提出,雨滴的组成可以用下述分布函数表示:

$$F = 1 - \exp\left(-\left(\frac{10D}{a}\right)^n\right) \quad a = Ai^p \quad (3)$$

式中, D 为雨滴直径(mm), F 为直径 $\leq D$ 的雨滴累计体积所占总体积的比例,%; a 和 n 为随雨型和雨强(I , mm/min)而变化的雨谱分布参数; A 和 P 分别为系数和指数。

根据江忠善^[11]等的研究,黄土地区的降雨雨滴组成也符合贝斯特函数。

对于短历时阵雨型降雨有: $a = 3.58i^{0.25}$, $n = 2.44i^{-0.06}$

对普通型降雨有: $a = 2.96i^{0.26}$, $n = 2.54i^{-0.09}$ (4)

天然降雨雨滴特性与雨强雨型关系密切,而降雨经过林冠层后不同于天然降雨,有学者研究认为林冠降雨与雨强、雨型关系不大,在大小与雨谱分布上有其自身的特点,且与林外比较有相当比例的大雨滴、小雨滴的存在:雷瑞德^[12]的研究得出林内降雨雨滴直径变化幅度大,有一定数量的大雨滴,故雨滴的体积累计曲线向直径增大的方向倾斜,致使林内降雨的雨滴中数直径明显大于林外降雨;小高和则等通过实验测定,看到林内雨滴径分布情况是雨滴直径为 0.06 以下的约占 90%,并有大径雨滴的形成。它不随降雨强度而变化,而是呈现一种基本固定的倾向;王彦辉^[13]等对刺槐林冠降雨的雨谱参数与降雨类型和降雨强度关系的大量观测表明,林冠降雨的雨谱参数受降雨类型和降雨强度影响不大,而对郁闭林冠下林冠降雨特征的研究表明,林冠降雨谱也可采用同空旷地降雨谱一样的表达方式;周国逸^[14]采用正态分布函数描述降雨雨谱, Best 雨谱公式更有利于计算雨滴动能。

1.4 林冠层对雨滴终速的影响

天然降雨雨滴在降落过程中,受到重力与空气阻力的共同作用;当这两种力达到平衡时,雨滴以匀速降落,称作雨滴终速。在到达终速前,雨滴的降落速度则随高度而变化。雨滴终速决定于雨滴的大小和形状。雨滴降落速度反映了雨滴动能的大小,从而也反映了雨滴对土壤侵蚀作用的强弱。因此,许多研究者对天然降雨的雨滴终速进行了研究,并得出了各自的公式^[15~18],近来,王占礼等摆脱以往从雨滴个体出发以雨滴直径为变量测算雨滴速度的繁琐复杂性,建立了只含有降雨强度单一变量的降雨流平均终速物理模型^[19],是此项研究中一个崭新的观点。

在林地内由于树木高度有限,较大的林冠降雨雨滴在降落到林地上时可能还达不到其对应的终点速度。许多研究结果表明,林冠高度 > 8 ~ 9m 时,可达到雨滴终速;林冠高度 < 8 ~ 9m 时,达不到终速。准确计算不同降落高度时林冠降雨雨滴着地时的降落速度,对于计算和评价林冠影响降雨动能的功能是非常重要的,吴长文^[20]采用理论方法给出了雨滴降落速度与降落高度的关系式,王彦辉^[13]引入冠心高的概念,当假设林冠降雨雨滴的初速度为零时,可用下式计算不同高度降落的冠滴雨雨滴速度:

$$v = v_{\infty} \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2gH}{v_{\infty}^2}\right)} \quad (5)$$

1.5 林冠层对降雨动能的影响

降雨侵蚀,其侵蚀动能主要来源于雨滴对土壤表面的打击作用。侵蚀量的大小与雨滴的动能和土壤特性有关^[21],而降雨到达林冠层以后,林冠层能从根本上改变降雨的雨滴动能。

雷瑞德^[12]、余新晓^[22]等分别对林冠层对降雨动能的影响进行了研究,结果表明当华山松林冠层下限高度超过 7 米时,林内透过降雨具有较大的单位雨量动能;在中雨、大雨和暴雨情况下,林冠层不能有效降低降雨动能。王礼先、解明曙^[23]和周跃^[24]等的研究表明,小雨强时,林冠枝叶积聚雨滴作用表现突出,增大了林下雨滴动能或溅蚀明显,而在大雨强时,林冠的拦截作用减少了林下降雨动能。而且,林内单位毫米降雨的雨滴动能与雨强关系不密切;林外单位毫米降雨的雨滴动能与雨强关系密切,Wischmeier 和 Smith^[25]提出了一个描述一次暴雨动能的回归方程,被很多研究者引用:

$$E = 1.213 + 0.89 \log I \quad (6)$$

式中, E 为雨滴动能($(\text{kg} \cdot \text{m})/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$); I 为雨强(mm/h)。

实际上林冠降雨在整个过程是变化的,阔叶树种在降雨初期,叶片未充分湿润时,冠滴雨一部分被叶片截留,剩下部分也由于叶片表面绒毛的作用,产生表面张力作用,暂时滞留,附着在叶子表面,积聚成大雨滴而滴落到下一层叶子上;当树叶充分湿润后,叶片上有一层水膜,叶片的绒毛对雨滴已没有作用,因此,降落到叶片的雨滴很容易滑落,当雨强较大时,冠滴雨在冠层内层层滴落,直至穿透林冠到达地面。因此,冠滴雨与树种的叶片表面特性及林冠结构有直接关系。针叶树种由于林冠层的针叶多不胜数,雨滴与之撞击分散,或在针叶上汇聚成较大的水滴落下的机会很多,这就造成了林内降雨细小雨滴出现频率高,大雨滴在林地上分布均匀和雨滴中数直径较大的特点^[12]。到目前为止,对林冠影响降雨谱和雨滴动能的研究还很少,而且未充分地、把林冠作用和森林结构特征相联系起来,因此研究结果相互之间可比性较差^[13]。

1.6 林冠降雨对坡面流的作用机理

林冠层对坡面流的影响主要是通过改变雨滴特性来影响坡面流水力特性,进而改变坡面流对坡面的侵蚀机理。冠滴雨中尤其是相当数量的大直径雨滴的形成,其到达地面的动能足以破坏坡面土壤结构,扰乱坡面流流路,使坡面上出现大大小小的水坑,当水流流速较大,水深较深时,这些击溅坑在形成过程中边缘土壤就被水流剥蚀冲刷而走。因此冠滴雨的击溅作用,增加了水流侵蚀强度。

林冠的存在增大了降雨中较大雨滴的比例,有助于坡面流对坡面土壤的侵蚀,但同时由于林冠的截流损失部分降雨使雨强变小、林冠分流作用使部分降雨以茎流形式落到坡面,而且冠滴雨中增加了降雨雨谱中小雨滴的比例,这些因素又减小了降雨侵蚀力。

森林内高大乔木能否减弱林地坡面的土壤侵蚀,一直是个有争议的问题^[26],森林植被的地上部分及其地被物能够拦截降雨,避免雨滴直接打击地表,然而林冠是否可以起到消能的作用,决定于林冠的特性与高度;大量研究结果表明,在林冠截留未饱和时可以起到一定的消能作用;一般在高强度降雨时可以起到消能作用,在低强度降雨时作用有限;当林冠高度达到 8~9m 以上时,雨滴已达终速,失去消能作用,且由于形成相当数量的大雨滴反而易增加溅蚀强度^[12]。研究降雨条件下林冠层对坡面水蚀作用机理更复杂,需要考虑的影响因素更多。因此,水土保持林在配置时应选择复层结构,增大垂直郁闭度、降低林分高度,保护枯枝落叶层,尤以茂密的乔灌木混交林为最佳^[27,28]。

2 森林植被茎杆对坡面水蚀的作用机理

降雨引起的坡面流受到降雨和土壤入渗的影响,沿程不断有质量源和动量源的增加或减少,时空变化十分明显,因此流动十分复杂,是一种有典型自身特点的非恒定不均匀流动^[29]。就目前研究现状而言,坡面流水动力学特性主要包括坡面流流态的判别,水流流速问题以及坡面流阻力问题^[30~44]。由于坡面流水深很浅且无固定流路,因此流速测量技术一直是研究人员困扰的问题^[45]。

最早进行坡面浅层水流研究的学者是美国的 Horton^[46];后来 Yen^[47]等考虑到降雨对于坡面流的影响,根据动量原理,推导出了降雨情况下的一维坡面流运动方程;计算机技术的迅速发展使得一些复杂的微分方程可以用数值方法近似求解,因此,可以用一维浅水圣维南(Saint-Venant)方程组来模拟坡面水流运动^[48],但此公式仅适用于模拟坡度小于 3°的缓坡^[49]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} &= q \\ \frac{\partial u}{\partial t} + i \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} &= g(s_0 - s_f) - \frac{q}{h}u\end{aligned}\quad (7)$$

其中, q 表示降雨和入渗综合结果,即雨强与渗透率的差值:

$$q = p - i \quad (8)$$

式中, p (m/s) 为降雨强度, i (m/s) 为土壤入渗, i 的变化过程由土壤入渗模型提供。

吴长文^[50]推导出了既适用于缓坡又适用于陡坡,既适合于裸地又适合于覆盖有植被的坡面流微分方程;近年来,刘青泉等在分析前人经验和问题的基础上,发展了一种能更好地反映坡面流汇流过程的二维模拟方法^[51]。

森林对径流的影响,主要是由于林木对径流的分散阻止作用,增大地表径流的阻力系数。当雨滴落到坡面上以后,顺坡而下,流经植物茎干,植物茎干对坡面流产生阻滞作用,就象“桥墩”一样,出现流体绕物体的绕流运动^[52],坡面流作用于茎干的力,即绕流阻力,使不断顺坡流来的坡面流将部分压能转化为动能,改变原来的运动方向,沿着茎干两侧继续向前流动,流速增加,出现流线分歧现象。雷孝章^[52]等把乔木的地径作为圆形,取 $\beta = 1.73$,得出局部水头损失并积分得到径流沿程总水头损失 E :

$$h_j = \beta \sin \theta (D/b)^{4/3} \frac{S_0}{2g} [87h/\lambda]^2 \quad (9)$$

$$E = \int_0^L \beta \sin \theta \left(\frac{D}{b}\right)^{4/3} \frac{S_0}{2g} \left(\frac{87}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{i_e}{m \sqrt{S_0}} x\right) dx = \beta \sin \theta \left(\frac{D}{b}\right)^{4/3} \frac{87 \sqrt{S_0}}{2g\lambda} i_e L^2 \quad (10)$$

式中, D 为树木地径; b 为单宽上的树木间的平均株距; θ 为地面坡度。

坡面流的绕流运动,使坡面局部阻力增大,在茎干的迎水面和两侧很容易将周围的泥沙带起。在背水面,水流在这里汇聚,流速减小,被带起的泥沙会慢慢在这里沉积。

由公式(10)可看出,坡面流经过植被茎杆时,其所受阻力及损失的能量与树木地径和林木株距有关,地径越大株距越小坡面流损失的能量就越大,反之损失的能量越小。研究茎杆扰流规律对合理林木密度非常有益,由于林木密度的变化,局部冲积的形态以及每个局部形态相互干扰的情形也不相同。林木密度的变化对泥沙起动的作用并不成线性关系,因为林木之间的间距由大变小的过程中,水流局部所受的阻力不断增大,在

茎干的迎水面和两侧很容易将周围的泥沙带起,增大泥沙起动的机率。但当林木密度继续减小,小到使得水流流动受阻产生的涡流没有空间充分发展,他们互相干扰,消散能量,反而减小对沙粒起动的的影响,而且阻力增大,水深会不断的增加,水深的增加可能会使得周围的水流影响到床面沙粒的机会减小。对这一现象,卫海燕等用塑料管作覆盖对泥沙起动问题作过研究,实际上也反映了一种坡面流绕流运动现象,虽然试验用的塑料管与森林植被的茎干特性不同,但也有其相似性。

因此,茎干绕流现象对坡面土壤侵蚀的作用有正反两方面,林木在一定种植密度内,会使得泥沙起动流速减小,增加坡面侵蚀,因此,应合理选择林木的种植密度,才能起到减少坡面水蚀的作用^[54]。

3 枯落物层对坡面水蚀的作用机理

分析森林植被林冠层以及林木茎干对降雨及坡面径流的作用机理,可看出,森林的以上两部分以本身的特性对水蚀的作用,增加了水蚀机理的复杂性,并不只有有利的一面,需要人为的合理调节森林植被的各项指标。而森林植被枯落物的存在,缓解了森林对水蚀不利的一面,使林冠层及茎干增加水蚀能力的一面大大衰减。

森林植被枯枝落叶层防止水蚀的机理主要表现为3个方面,一是消除林冠降雨雨滴对坡面土壤及坡面流的击溅动能,从根本上消除击溅侵蚀发生;二是枯落物层的存在增大了地表有效糙率,使坡面流流动受阻,部分能量损耗,从而减少坡面侵蚀;三是其具有一定的贮水持水能力,可以有效延长径流历时和增加土壤入渗。

近数十年来,国外学者如 W. D. Ellison 等人^[2,3]通过大量实验,认为雨滴溅蚀是引起土壤侵蚀的重要因素,韩冰等^[53~55]对天然降雨下30年生山杨林及28年生油松人工林内溅蚀试验结果表明,当枯落物层具有一定厚度时溅蚀与其他因素无关,溅蚀主要发生在清除枯落物层的林下,随枯落物层厚度增加,溅蚀量剧减,山杨林地有0.5cm枯落物时,可减少溅蚀76.44%,有1cm枯落物时,可减少溅蚀97.5%;油松林地有1cm的枯落物可减少溅蚀量79.67%,1.5cm厚枯落物可减少溅蚀量94%。当有2cm厚的枯落物时,山杨和油松林下基本可消除溅蚀产生。

糙率的增大可以有效减小坡面径流动能,从而减小径流对坡面土壤的冲刷、搬运能力。由于糙率系数与谢才(Chezy)公式中的C值成反比,因此,糙率系数的大小将影响坡面流速和冲刷力的大小,以及坡面汇流时间的长短。沈冰等提出植被度Z(%)与糙率n的关系式^[56]为:

$$n = 0.008Z^{0.455} \quad (11)$$

对枯落物糙率增大对坡面流影响研究较多,赵鸿雁^[57]通过室内实验研究了枯枝落叶层对径流速度的延迟效应,结果表明流速随枯落物层厚度的增大成指数递增,回归方程为:

$$\Delta V = 17.2a^{0.365}q^{0.346/l^{0.05}} \quad (12)$$

式中, ΔV 为枯落物降低径流速度(cm/s); a 为坡度(°); q 为径流深(mm); l 为枯落物厚度(cm)。

张洪江等^[58]通过放水实验对油松、刺槐、杨属以及禾本科枯草的糙率进行了研究,并得到了相似的结论。吴长文等^[59]通过枯落物去留的对比来研究枯落物对土壤侵蚀的作用,并给出了枯落物最佳蓄积量与侵蚀速率的方程式,他们认为包括枯落物在内的地表覆盖,大大减少土壤流失量。吴钦孝^[60]等试验表明,土壤的冲刷量随枯落物厚度的增加而减小,1cm厚的枯落物层即可抵御2.7mm/min雨强的冲刷,比无覆盖的裸地减少冲刷量约80%;有2cm厚的枯落物覆盖,即可消除侵蚀产沙。张志强^[61]等针对野外自然坡面状态下通过实测流速与水深很难获取坡面地表径流的有效糙率的实际情况,根据实测流量过程线通过寻优计算获取了地表径流的有效糙率。

枯落物对林地入渗方面的作用,一般而言,森林土壤具有比其它土地利用类型高的入渗率,枯落物层及根系层的存在,减少径流总量和降低径流速度,降低土壤侵蚀发生。虽然,许多学者从不同的角度对枯落物的水文泥沙效应进行了比较客观的研究,枯落物在防治土壤侵蚀中的巨大作用也得到了普遍认可^[62,63],但是,枯落物的存在,坡面流如同流经一过滤层,含沙量与流速锐减;坡面流在枯落物层中流动并穿过枯落物层后下渗进入土壤的过程完全不同于在裸地坡面的流动与入渗,枯落物分解程度不同,流动状态也不同,类似于水流在

多孔介质中的流动,有必要应用渗流理论来深入研究以搞清其流动机理,枯落物防蚀机理的研究和应用仍是森林水文学研究的一个难点和重点。

4 森林植被根系层抵抗坡面水力侵蚀的动力学机理

土壤的抗侵蚀能力主要取决于土壤的内在特性,如土壤的容重、渗透性能、机械组成、孔隙状况、有机质含量、水稳性团聚体含量等指标,而根系层的存在能逐步改善土壤的内在特性,使其抗侵蚀能力加强。植物根系层抵抗坡面水力侵蚀的作用主要表现在根系层能稳定表土层结构、提高土壤入渗性能和抗剪强度、增强土壤抗冲性^[64,65]。

刘定辉,李勇^[66]等指出,根系提高土壤抗侵蚀性、改善土壤抗侵蚀环境的显著特点之一就是根系增加了水稳性团粒及有机质含量稳定土层尤其是表土层结构,创造抗冲性强的土体构型。刘国彬^[67]在对草地植被恢复不同阶段土壤抗冲性变化的研究中提出:根系缠绕、固结土壤强化抗冲性作用有3种方式:网络串连作用、根土粘结作用及根系生物化学作用。径流对土壤的侵蚀力主要取决于地面径流量,土壤渗透性是制约坡面径流、土壤侵蚀的重要因子,土壤的渗透性主要由土壤的物理性质决定,植物根系是通过影响土壤物理性质来影响土壤渗透性的,大量研究成果表明^[68~71],林地土壤具有较大的毛管和非毛管孔隙度,从而增大了林地土壤的入渗率和入渗量土壤入渗能力随着森林植被覆盖率的增加呈指数增加,林地内入渗率具有很大的空间变异性,距离树干越远,渗透能力越小。朱显谟^[72]认为根系对土壤渗透力的作用主要是根系能将土壤单颗粒粘结起来,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。王库^[73]认为植物根系对土壤水力学性质的影响主要是通过根系的穿插、缠绕及网络的固持作用,来影响土壤的物理性质,进而使土壤的抗冲性、渗透性、剪切强度等水力学性质得以改善。并得出直径小于1 mm的根系在提高土壤的水力学效应方面贡献最大。

植物根系层对坡面水蚀作用的研究是一个崭新的领域,需从土力学和植物根系影响土壤力学性质的角度研究土壤的抗侵蚀能力。

5 问题与展望

森林植被外在的防治坡面土壤水蚀功能是其内部各个垂直层次截留降雨、拦蓄径流从而削减降雨侵蚀动能和径流冲刷作用的综合体现。植被的各个垂直层次对其水土保持功能的发挥都各有重要的作用,雨滴击溅和径流冲刷是水土流失的动力,通过分析植被削减降雨和径流动能的过程,来揭示植被防治坡面土壤水蚀的内在机理。森林植被防治坡面水力侵蚀机理的研究涵盖水力学、森林水文学、土壤学、植物形态学等多学科的知识,需要多学科交叉才能解决。目前,已有许多学者致力于此领域的研究,并取得了许多研究成果,但离最终研究目标还有距离,还有许多问题需要解决。

(1) 针对森林生态系统内坡面的侵蚀机理研究

以往在坡面土壤水力侵蚀研究中,大多都把植被作为一个影响土壤侵蚀的因素简单的加以研究,而实质上森林生态系统各个层次对侵蚀的调控作用,完全改变了裸地坡面的侵蚀机理,如植物的高度、植物的形状、根系的构造、植物茎间密度等对降雨及坡面流的作用,这些研究将有助于我们认识植物的雨水拦截、叶面雨滴的形成、茎流的作用、植物对坡面水流的阻力,不同树种不同形态枯落物抵抗溅蚀能力,不同树种不同形态枯落物对薄层径流糙率系数的影响^[74],以及根系的固土作用,从根本上认识植物对土壤侵蚀控制的内在机制。以便确定最佳的水土保持植被类型及合理的群落结构、配置模式和营造方式,为大规模生态环境重建和植被恢复提供决策依据。

(2) 加强坡面水力侵蚀机理试验研究

雨滴增大水流阻力的机理,坡面流速分布规律,流态的确定和判别,坡面物理糙度的确定问题,以及坡面流运动方程的建立等问题无疑离不开试验的手段。试验研究对诸多关键理论问题的解决是非常必要的,应该加强坡面流的试验观测,尤其是室内模拟试验。坡面流水深小,加上降雨的存在,因此水深及沿水深量测坡面流速分布的技术,需要特殊的量测仪器和技术。设备力求结合激光和自动化技术,适时多断面测定坡而

流的流速;坡而流水深的直接测定技术需要有大的突破,必须解决水层特薄及含沙量较大的问题,坡面侵蚀微形态的变化摄影观测设备技术也需提高^[75]。

(3) 加强对林地坡面流二维问题的研究

坡面流是坡面土壤侵蚀的根本动力,是研究土壤侵蚀动力学过程的基础。虽然对一维问题进行了比较细致的研究,但二维问题的讨论很少涉及,因为有许多坡面问题不能简单地看成一维问题^[51]。实际坡面往往比较复杂,砾石和微地形突起,且林地坡面有植物的根茎、枯落物、土壤微团聚体,这些都会影响坡面流的流速分布,进而影响坡面产流过程和土壤侵蚀过程^[76]。而过去对这一问题的研究相对比较缺乏,目前对坡面流特性和规律的认识仍不充分,对于有植被覆盖的林地坡面研究就更少,因此尚需进一步的细致研究。

References:

- [1] Zhang H J, Principles of Soil Erosion, Key professional textbook towards 21st century, Beijing: Chinese Forestry Press, 2000. 22.
- [2] Ellision W D. Soil Erosion Study Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. *Aric. Eng.*, 1947, 28: 197—201.
- [3] Ellision W D. Soil Erosion Study-Part V: Soil transport in splash process, *Aric. Eng.*, 1947, 28: 349—353.
- [4] Cai Q G. Process-based soil erosion and sediment yield model in a small basin in the hilly loess region. *Acat Geographica Sinca*, 1996, 2: 108—116.
- [5] Guo Y W. Characteristics of Raindrop Erosion. *SWCC*, 1997, 4: 15—17.
- [6] Wang G P, Zeng B Q, Lu Z X, *et al.* Soil erosion and its prediction on slope surface in the gullied hilly loess region of western Shanxi Province. *SWCC*, 1992, (3): 16—20.
- [7] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetation cover and slope on runoff, erosion, and waterquality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queenlands coal mines. *Aust J Soil Res.*, 2000, 38: 313—327.
- [8] Wu P T, Zhou P H. The action of raindrop splash on sheet flow erosion. *Bulletin of Soil and water Conservation*, 1992 (4): 19—26.
- [9] Laws J O, Parson D A. Relation of raindrop size to intensity. *Trans Amer Geophy NION*, 1943, (24): 275—370.
- [10] Best A C. The size distribution of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950, 76: 16.
- [11] Jiang Z S, Song W J, Li X Y. Study on characteristics of natural rainfall drops. *SWCC*, 1983, (3): 32—36.
- [12] Lei R D. Influences of canopy of pine upon kinetic energy of precipitation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 2(2): 31—39.
- [13] Wang Y H. The rainfall characters under canopy of several tree species. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(4): 2—9.
- [14] Zhou G Y. Distribution of rainfall kinetic energy by canopies of artificial forest tree species, and its ecological effects. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(3): 250—259.
- [15] Mou J Z. Calculation formula of rain drop fall velocity. *SWCC*, 1983, (3): 40—41.
- [16] Lei A L, Zhang X D, Tang K L. Contrast of a Few calculating methods on fall velocity of water drops. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, 15(4): 43—47.
- [17] Laws J O. Measurement of fall Velocity of Water Drops and Rain Drops. *Transactions of the American Geophysical Union*, 1941, 22.
- [18] Yao W Y, Chen G X. Calculation formula of rain drop fall velocity. *Journal of Hohai University*. 1993, 21(3): 21—27.
- [19] Wang Z L, Sun Q M, Zheng F L, *et al.* Physically-based model of rainfall flow kinetic energy. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(11): 1280—1284.
- [20] Wu C W, Xu N J. The experiment on properties of rainfall-simulator of swayed sprinkler. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 1995, 17(1): 58—66.
- [21] Zhou P H, Dou B Z, Sun Q F, *et al.* preliminary report on experiment of rainfall energy. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1981, 1(3): 51—60.
- [22] Yu X X. Mathematical analysis on forest vegetation abating the erosive energy of rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 2(2): 24—30.
- [23] Wang L X, Xie M S. Eco-hydrological benefit of soil and water conservation and information system of protection forest in mountainous region. Beijing: Chinese Forest Press, 1997.
- [24] Zhou Y, Li H W, Xu Q. Effect of Yunnan pine forest canopy on soil erosion. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(4): 324—328.
- [25] Wischmeier W H, Smith D D. A universal soil loss equation to guide conservation farm playing. *Trans 7th International Cong. Soil Sci.*, 1960, 418—425.
- [26] Wang H S, Liu G B. Basic characteristic of forest vegetation preventing erosion—coverage near ground. *SWCC*, 2000, (3): 28—31.

- [27] Gao J. The Function of shrub on Maintaining the water and soil. *Journal of Emcc*, 2002, (3): 51—53.
- [28] Li S R, Zhao Y, Yan Z P, *et al.* Soil and water conservation forest optomic mode. *SWCC*, 2002, (7): 39.
- [29] Liu Q Q, Li J C, Chen L, *et al.* Dynamics of overland flow and erosion(I)-overland flow. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(3): 360—372.
- [30] M. J. Kirkby. *Hillslop Hydrology*. A Wiley-Interscience Publication, 1978.
- [31] Woolhiser D A, Liggett J A. Unsteady one-dimensional flow over a plan — the rising hydrograph. *Water Resource Res*, 1967, 3 (3): 753—771.
- [32] Shen H W, Li R M. Rainfall effects on sheet flow over smooth surface. *Transactions of the ASAE*, 1973, 99, (HY5), 771—792.
- [33] Sha J D, Jiang Y J. Attempt for Expounding basic dynamic characteristics of very shallow flow on preliminary eco-erosion slopes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4): 29—35.
- [34] Wu P T, Zhou P H. Research on the Laminar Flow type and Erosion Transportation Manners on the Slope Surface. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4): 29—35.
- [35] Chen G X, Yao W Y. Effect of rainfall on Shallow Flow resistance. *Advances in Water Science*, 1996, 7(1): 42—46.
- [36] Wu C W, Wang L X. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of forested slopeland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(2): 32—38.
- [37] Wu P T. The dynamics of water erosion experiment research. Xi'an: Shaanxi Science Technology Press, 1997.
- [38] Yao W Y. The calculation of overland flow velocity. *SWCC*, 1993, 3: 21—25.
- [39] Lei A L, Tang K L. Retrospect and Prospect for Soil Erosion Studies of Ridge-Hill-Gully Slope System. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(3): 37—43.
- [40] Xia W S, Lei T W, Zhao J, *et al.* Velocity measuring system for sheet flow. *Advances in Water Science*, 2003, 14(6): 781—784.
- [41] Xia W S, Lei T W, Liu C P, *et al.* Comparative analysis of measurement of velocity of solpe laminar flow. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2): 23—26.
- [42] Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow. *Advances in Water Science*, 2002, 13(2): 158—165.
- [43] Yao W Y. Experiment study on hydraulic resistance laws of overland sheet flow. *Journal of Sediment Research*, 1996, (1): 74—82.
- [44] Zhang L K. Study of flow resistance law in rill erosion on loess slope. *Yellow River*, 1998, 20(8): 13—15.
- [45] Xia W S, Lei T W, Wu J S, *et al.* Study on measuring overland flow velocity by elctrolyte with a pluse input. *Advance in Natural Science*, 2004, 14 (11): 1277—1281.
- [46] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins. *Hydrophysical approach to quantitative morphology*. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1945, 56: 275—370.
- [47] Yen B C, Wenzel H G. Dynamic equations for steady spatially varied flow. *Journal of the Hydraulics Division, ASAE*, Vo1. 96, HY3, Proc. 7179, Mar., 1970, 801—814.
- [48] Emmett W W. Overland flow. In: M. J. Kirkby. ed. *Hillslope Hydrology*. New York: John Wiley & Sons, 145—175.
- [49] Zhao R J. *Watershed Hydrology Simulation — Xinanjiang Model and Shanbei Model*. Beijing: Hydraulic Engineer Press, 1984.
- [50] Wu C W, Chen F Y. Development and situation of study of mechanism of soil erosion on slope land. *SWCC*, 1996, 11: 21—24.
- [51] Liua Q Q, Chena L, Lia J C, Singh V P. Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow, 2004, 291: 24—41.
- [52] Lei X Z, Yang Y P, Zhao W Q. The effect on overland flow by forest vegetation. *Sichuan Water Power*, 2001, 20: 51—53.
- [53] Han B, Wu Q X, Liu X D. The effect on splash erosion by withered branches and dead leaves in woodland. *Protection Forest Science and Technology*, 1994, (2): 7—10.
- [54] Han B, Wu Q X, Liu X D, *et al.* The effects of litter layer on splash erosion in *Populus davidiana* woodland. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1994, 3(4): 5—9.
- [55] Han B, Wu Q X, Liu X D, *et al.* Study on prevention of splash erosion by litter in Chinese pine woodland. *Research of Soil and Water Conservation*. 1994, 1(3): 14—18.
- [56] Shen B, Wang W Y. Effect of Sparse Vegetation on Runoff Formation Processes on Loess Slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 7(1): 23—28.
- [57] Zhao H Y, Liu X D, Wu Q X. A study on retardation of runoff velocity by litter. *Memoir of NISWC. Academia Sinca& Ministry of Water Conservancy*, 1991, (14): 64—70.
- [58] Cheng Q B, Zhang H J, Xie M S. Study on runoff velocity retardation by forest litter and moss. *Journal of Beijing Forestry University*, 1994, (1): 26—31.
- [59] Wu C W, Wang L X. Effect of withered branches and dead leaves in the forest for soil conservation. *SWCC*, 1993, 4(11): 28—30.
- [60] Wu Q X, Liu X D, Su N H, *et al.* The Amount of accumulated litter of secondary Mountain Poplar forest and Its hydrological functions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(1): 71—76.

- [61] Zhang Z Q, Wang L X, Yu X X, *et al.* Effective overland roughness coefficient calculation for forested infiltrating slope. *Scientia Silvae Sinicee*, 2000, 36 (5): 22—27.
- [62] David J Eldridge, Brian R Wilson and Ian Oliver. Regrowth and soil erosion in the semi-Arid woodlands of New South Wales. A report to the Native Vegetation Advisory Council,
- [63] Eldridge D J, Rothon J. Runoff and sediment removal on a semi-arid soil in eastern Australia. I. The effect of pasture type. *Rangeland Journal*, 1992, 14: 26—39.
- [64] Ghidry F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability. *Transaction of the ASAE*, 1997, 40 (1): 129—135
- [65] Gysels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Proc Landforms*, 2003, 28: 371—384.
- [66] Liu D H, Li Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (3): 34—37.
- [67] 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, (1): 93—96.
- [68] Blackhum W E. Factors influencing infiltration and sediment production of semi-arid rangelands of Nevada. *Water Resour. Res.*, 1975, 11: 929—937.
- [69] Thornes J B. The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes. In: Thornes J. B. ed. *Vegetation and erosion*, John Wiley&Sons Ltd, 1990. 41—53.
- [70] Dunne T, *et al.* Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resour. Res.*, 1991, 27(9): 2271—2285.
- [71] Box T W. Relationships between plants and soils of 4 ranges plant communities within south Texas. *Ecol.*, 1961, 42: 794—810.
- [72] Zhu X M. Road of poverty-lifted and prosperous-caused in Loess Plateau—the third restatement on Loess plateau territory rehabilitation. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, (4): 1—5.
- [73] Wang K. Effects of plant roots on soil anti-erosion. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(3): 250—252.
- [74] Wang Y M. Summary of Researches on water and soil conservative function of litter in forestland in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 108—113.
- [75] Hu S X, Jin C X. The recent development of experiment on hill-slope erosion processes. *Progress in Geography*, 1999, 18 (2): 103—111.
- [76] Xiang H, Liu Q Q, Li J C. Influences of slope surface conditions on the runoff generation. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(6): 774—782.

参考文献:

- [1] 张洪江, 主编. 土壤侵蚀原理, 面向 21 世纪课程教材. 北京: 中国林业出版社, 1999. 10.
- [4] 蔡强国. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型. *地理学报*, 1996, 2: 108—116.
- [5] 郭耀文. 雨滴侵蚀特征分析. *中国水土保持*, 1997, 4: 15—17.
- [6] 王贵平, 曾伯庆, 陆兆熊, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀及预报研究. *中国水土保持*, 1992, (3): 16—20.
- [8] 吴普特, 周佩华. 雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用. *水土保持通报*, 1992, (4): 19—26.
- [11] 江忠善, 宋文经, 李秀英. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究. *中国水土保持*, 1983, (3): 32—36.
- [12] 雷瑞德. 华山松林冠层对降雨动能的影响. *水土保持学报*, 1988, 2(2): 31—39.
- [13] 王彦辉. 几个树种的林冠降雨特征. *林业科学*, 2001, 37(4): 2—9.
- [14] 周国逸. 几种常用造林树种冠层对降水动能及其生态效应分析. *植物生态学报*, 1997, 21(3): 250—259.
- [15] 牟金泽. 雨滴速度计算公式. *中国水土保持*, 1983, (3): 40—41.
- [16] 雷阿林, 张学栋, 唐克丽. 几种计算水滴降落速度方法的比较. *水土保持通报*, 1995, 15(4): 43—47
- [18] 姚文艺, 陈国祥. 雨滴降落速度及终速公式. *河海大学学报*, 1993, 21(3): 21—27
- [19] 王占礼, 孙全敏, 郑莉莉, 等. 降雨流动能物理模型研究. *水利学报*, 2005, 36(11): 1280—1284.
- [20] 吴长文, 徐宁娟. 摆喷式人工降雨机的试验特性研究. *南昌大学学报*, 1995, (1): 58—66.
- [21] 周佩华, 窦葆璋, 孙清芳, 等. 降雨能量的试验研究初报. *水土保持通报*, 1981, 1(3): 51—60.
- [22] 余新晓. 森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析. *水土保持学报*, 1988, 2(2): 24—30.
- [23] 王礼先, 解明曙主编. 山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [24] 周跃, 李宏伟, 徐强. 云南松林的林冠对土壤侵蚀的影响. *山地学报*, 1999, 17(4): 324—328.
- [26] 王晗生, 刘国彬. 试论防蚀有效植被的基本特征——贴地面覆盖. *中国水土保持*, 2000, (3): 28—31.
- [27] 高俊. 试论灌草在水土保持林中的作用. *中国环境管理干部学院学报*, 2002, (3): 51—53.

- [28] 李树人,赵勇,阎志平等.水土保持林优化模式研究.中国水土保持,2002,(7):39.
- [29] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(I)——坡面流.力学进展,2004,34(3):360~372.
- [33] 沙际德,等.试论初生态侵蚀性坡面薄层水流的基本动力特性.水土保持学报,1995,9(4):29~35.
- [34] 吴普特,周佩华.坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究.水土保持学报,1992,6(1):16~24,39.
- [35] 陈国祥,姚文艺.降雨对浅层水流阻力的影响.水科学进展,1996,7(1):42~46.
- [36] 吴长文,等.林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究.水土保持学报,1995,9(2):32~38.
- [37] 吴普特.动力水蚀实验研究.西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [38] 姚文艺.坡面流流速计算的研究.中国水土保持,1993,3:21~25.
- [39] 雷阿林,唐克丽.坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望.水土保持通报,1997,17(3):37~43.
- [40] 夏卫生,雷廷武,赵军,等.薄层水流速度测量系统的研究.水科学进展,2003,14(6):781~784.
- [41] 夏卫生,雷廷武,刘春平,等.坡面薄层水流流速测量的比较研究.农业工程学报,2004,20(2):23~26.
- [42] 张光辉.坡面薄层流动力学特性的实验研究.水科学进展,2002,13(2):158~165.
- [43] 姚文艺.坡面流阻力规律试验研究.泥沙研究,1996,(1):74~82.
- [44] 张科利.黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究.人民黄河,1998,20(8):13~15.
- [45] 夏卫生,雷廷武,吴金水,等.电解质脉冲法测量薄层水流流速的实验研究.自然科学进展,2004,14(11):1277~1281.
- [49] 赵人俊.流域水文模拟——新安江模型与陕北模型.北京:水利出版社,1984.
- [50] 吴长文等.坡地土壤侵蚀机理研究进展与现状.中国水土保持,1996,11:21~24.
- [52] 雷孝章,杨玉坡,赵文谦.森林对坡面流的影响研究.四川水力发电,2001,20:51~53.
- [53] 韩冰,吴钦孝,刘向东.林地枯枝落叶层对溅蚀影响的研究.防护林科技,1994,(2):7~10.
- [54] 韩冰,吴钦孝,刘向东,等.山杨林地枯落物层对溅蚀的影响.植物资源与环境,1994,3(4):5~9.
- [55] 韩冰,吴钦孝,刘向东,等.油松林枯落物层防止溅蚀的研究.水土保持研究,1994,1(3):14~18.
- [56] 沈冰,王文焰.植被影响下的黄土坡地降雨漫流数学模型.水土保持学报,1993,7(1):23~28.
- [57] 赵鸿雁,刘向东,吴钦孝.枯枝落叶层阻延径流速度研究.中国科学院西北水土保持研究所集刊.14集,1991.64~70.
- [58] 陈奇伯,张洪江,谢明曙.森林枯落物及其苔藓层阻延径流速度研究.北京林业大学学报,1994,(1):26~31.
- [59] 吴长文等.水土保持林中枯落物的作用.中国水土保持,1993,(11):28~30.
- [60] 吴钦孝,刘向东,苏宁虎.山杨次生林枯枝落叶蓄积量及其水文作用.水土保持学报,1992,6(1):71~76.
- [61] 张志强,王礼先,余新晓.渗透坡面林地地表径流运动的有效糙率研究.林业科学,2000,36(5):22~27.
- [66] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究.水土保持学报,2003,17(3):34~37.
- [67] 刘国彬.黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究.水土保持学报,1998,(1):93~96.
- [72] 朱显谟.黄土高原脱贫致富之道——三论黄土高原的国土整治.水土保持学报,1998,(4):1~5.
- [73] 王库.植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响.土壤与环境,2001,10(3):250~252.
- [74] 王佑民.中国林地枯落物持水保土作用研究概况.水土保持学报,2000,14(4):108~113.
- [75] 胡世雄,靳长兴.坡面动力侵蚀过程的实验研究进展.地理科学进展,1999,18(2):103~111.
- [76] 向华,刘青泉,李家春.地表条件对坡面产流的影响.水动力学研究与进展,2004,19(6):774~782.