

# 植被保持水土有效性研究进展

李 鹏, 李占斌, 郑良勇

(中国科学院  
教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨陵 712100)

**摘 要:** 植被是防止水土流失的积极因素, 也是土壤侵蚀预报研究中的重要因子。系统分析了国内外有关植被的冠层对降雨的截流作用以及对降雨侵蚀动力的影响, 地表枯枝落叶层的水土保持作用、植被覆盖度与水土流失之间的关系和地下根系提高土壤抗冲性等方面的研究。旨在综合已有研究经验和成果, 促进今后相关研究的发展。

**关键词:** 植被; 冠层; 枯枝落叶层; 植被覆盖度; 根系; 水土流失

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2002)01-0076-05

## Advances in Researches of the Effectiveness for Vegetation Conserving Soil and Water

LI Peng, LI Zhan-bin, ZHENG Liang-yong

(Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological and Environment, the Chinese Academy of Sciences,  
the Education Ministry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Vegetation is a positive factor to prevent soil and water loss, and also is an important factor for soil erosion prediction. Aiming at promoting relative studies in future on the basis of synthesizing existed results and achievement, some relevant studies are systematically analyzed, such as canopy interception and its effect on the rainfall erosivity, effect of litter layer on conserving soil and water, the relationship between vegetation coverage and soil loss and water runoff, and the improvement of root system on soil anti-scourability.

**Key words:** vegetation; canopy; litter layer; vegetation coverage; root system; soil and water loss

植被是人类的朋友, 它不仅庇护和养育着人类从远古走向文明, 而且保护着人类赖以生存的环境。但是随着人类的繁衍和扩张, 大量的林地和草地变成了耕地, 由于当时社会发展水平和人类认识水平的限制, 人们并不能很好的保护和利用土地资源, 使原先水草肥美的地方在自然力量的作用下退化成为不毛之地。其中由于缺乏植被保护而引起的水土流失是造成土地退化的主要原因之一。同时由水土流失引起的灾害性连锁反应已经成为地区可持续发展的主要限制因素, 水土流失问题已经成为全球关注的头号环境问题。

### 1 植被对水土流失的影响

众所周知, 植被是防止水土流失的积极因素, 破坏地表植被, 必将导致水土流失的进一步加强。<sup>[13]</sup> 植被覆盖层减小了雨滴对地面的打击, 并由于增加地面糙率而减小了流速, 气流或者水流的作用力被分散在覆盖物之间, 地表的覆盖因素完全承受了原来作用于地表土粒上的力, 并且植被覆盖物腐烂后可以增加土壤有机质的含量, 进一步改善了土壤的理化性质<sup>[5, 8, 30]</sup>。

收稿日期: 2001-11-20

基金项目: 中国科学院知识创新重大项目, KZCX1-10-04。

作者简介: 李鹏, (1974-), 在读博士, 主要从事植被与土壤侵蚀等方面研究。

自从土壤侵蚀研究开始, 人们就认识到植被对于防止土壤侵蚀的重要作用<sup>[14]</sup>, 1877年, 德国土壤学家Wolly利用植被及其覆盖建立了第一个防止侵蚀的实验小区, 该方法迅速传到欧美及世界其他国家, 成为人们研究土壤侵蚀的有效方法和手段之一。1947年, 美国学者Musgrave G W首次提出了植被作用系数, 并引入了美国东部和中部土壤流失方程中。1954年, 经过D. D Smith等人的努力, 通用土壤流失方程式问世, 其中, 作物等植被的作用系数更加系统而明确。随着USLE的不断修改和完善, 该方程的应用范围不断扩大, 植被因子一直是影响土壤侵蚀的重要因子而受到科研人员的重视。认为在任何土壤侵蚀的研究中, 清楚的了解植被覆盖对于地面的作用是理解各种侵蚀的关键。有研究认为: 当地表植被的覆盖达到70%以上时<sup>[16]</sup>, 能起到明显防止土壤侵蚀的作用, 在植被覆盖达到临界覆盖度之前, 随着植被覆盖度的减少, 侵蚀作用急剧增加, 大概地表覆盖度低于35%时, 侵蚀作用更加剧烈。Hudson在津巴布韦地区的研究表明植被密度对于土壤侵蚀也具有明显的作用, 在植被密度不足的地方, 土壤侵蚀作用也会明显增加。

随着人类社会的发展进步和科学技术的进步, 人们对水土流失问题以及由此引发的灾害性连锁反映有了更加深刻的认识, 并且采取相关措施对水土流失严重地区进行治理和恢复。生物措施、耕作措施和工程措施是人们进行水土流失治理的三大主要措施, 其中以生物措施最为有效。植被的地上和地下部分以及在地表形成的枯枝落叶层均对防止水土流失起到了积极的作用。朱显谟院士<sup>[33]</sup>指出, 草灌类植被在西北干旱地区的生态恢复与建设中占有十分重要的地位, 研究证实<sup>[4, 11, 12, 22]</sup>, 草灌植被的繁生, 可以强化土壤抗冲性与土壤通透性和蓄水容量, 增加入渗, 消减超渗径流, 防止冲刷, 尤为重要是灌草植被可以分散或消除上方袭来的股流, 增加坡面径流运动阻力, 削弱径流侵蚀能力, 进而减少当地的水土流失。因此, 灌草植被在西北干旱半干旱地区的非森林适生区植被建设中具有不可替代的作用。

国外学者从恢复生态学的观点和原理出发, 对植被恢复过程中, 植被的水沙效应和水文效应等方面的问题进行了大量研究, 并证实灌草植被的存在, 可以增加入渗, 减少地表水土流失。A. cerda<sup>[1]</sup>通过对退化土地生态系统恢复的研究提出, 土壤的侵蚀特征和水动力学特征不仅可以作为生态系统退化程度的指标, 而且可以作为土地生产力的重要参数。通过对不同演替阶段不同植被类型覆盖下坡地水土流

失特征的研究发现, 随着植被恢复阶段的发展, 其对地表的防护功能、土壤的持水性能和渗透性能得到不断加强。C. carrol<sup>[4]</sup>等人通过对矿区土壤与弃土上的植被恢复过程的研究发现, 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, 避免土壤大孔隙的堵塞, 防止地表结皮的形成, 减少地表径流形成造成的水土流失。对自然恢复与人为干涉恢复的比较发现, 加强人为因素在土地管理中的作用, 对于防止植被恢复初期坡地的水土流失有积极作用; 通过耕作等措施可以打破地表已形成的结皮, 恢复土壤水分入渗能力, 减少地表径流和土壤流失。这些研究<sup>[5, 10, 11, 13, 28]</sup>揭示了植被恢复过程中, 植被对地表径流和侵蚀产沙特征的动态作用过程, 为评价林草植被的水土保持效应提供了科学依据。

据植被的空间分布, 可以将其划分为冠层、干层、地表及枯枝落叶层、地下根系分布层。大气降水进入植被生态系统, 首先接触冠层, 植被冠层除了对降水具有截留作用外, 还对降落在冠层上的降水在向下移动过程中产生再分配的作用。其中一部分水沿着植被的干层流到地面形成干流; 地表的枯枝落叶层具有很大的持水能力, 可以有效的吸持降落到地表的水分, 延缓地表径流的流速, 增加入渗时间; 而地下根系层除了能够有效增加入渗外, 还可以有效的提高土壤的抗冲性。长期以来, 研究人员对植被冠层对降雨动力机制的作用、冠层及冠层以下降雨的重新分配(这方面的研究较多, 在此不再赘述)、地表枯枝落叶层的水土保持效益以及植被覆盖条件下土壤水分、养分、物理化学特性的动态变化等方面的问题进行了大量深入细致的研究<sup>[2, 3, 7, 8, 10, 13, 23, 26, 28]</sup>, 取得了丰富的成果, 使得人们对于植被在生态系统中的重要作用有了更加深刻的认识。

## 2 地表枯落物的水土保持作用

在森林生态系统中, 地表枯落物层对于水源涵养, 养分供应、促进生物活动、加快能量转化、物质循环水量平衡和保持土壤等方面具有重要作用。汪有科等人在研究中指出<sup>[26]</sup>, 地表枯落物的最大截持量是自身重量的1.7~3.5倍, 同时还可以有效的消减能量, 增加土壤入渗, 增强土壤的抗蚀能力及土壤的抗冲性。对于油松林和山杨林而言, 当地表存在大于1 cm的枯落物时, 就可以减少土壤冲失量的90%和83%。

不同生长状况的林下枯落物,对于改善森林水文过程及防止地表冲刷,有不同程度的积极作用,在降雨过程中,除林冠的覆盖及树干截留与森林对水文过程改善外,更主要的是林地地表积累与处于不同转化阶段的枯枝落叶,对地面状况直接影响所起的作用,腐烂的枯枝落叶可以增加土体有机质含量,并促使土壤生物和微生物种类及数量的增加,活力增强,这些都有利于促进土壤团粒结构的形成,进而影响到土壤透水性能增大地表径流的产流量减少<sup>[23]</sup>。半分解和未分解的枯落物则直接增大地表的粗糙程度<sup>[31]</sup>(通常用曼宁公式中的粗糙系数 $n$ 来表示),由此影响到地表径流流速的降低,直接减少了径流对地表土壤的冲刷能力。张洪江等人通过对山西地区人工林、次生林、灌木林、农田以及裸露地上枯落物的粗糙率系数进行研究后的结果表明,枯落物的数量与曼宁系数之间存在着正相关的关系,并且在相同条件下,乔木林与禾本科枯草的枯落物对粗糙率系数的影响也不尽相同,一般禾本科枯草的粗糙率系数大于乔木林;对乔木林而言,阔叶树种的粗糙率系数大于针叶树种。在流量和坡度一定的情况下,枯落物对粗糙系数的影响存在一个上限值。吴钦孝等人通过对油松原状林和林地去枯枝落叶层径流小区的连续观测发现<sup>[28]</sup>,林地去掉枯枝落叶层后,其径流量和土壤侵蚀量均较原状林有较大增加,分别是5.2倍和27.9倍,可以有效的蓄水减沙。此外,李德生等人在研究中指出<sup>[18]</sup>,就林下土壤的物理性状而言,侧柏林地的物理性状最好,刺槐和油松林地的要差一些,原因是侧柏的地上部分结构合理,枯落物的数量大;刺槐林由于人为破坏作用较大,几乎不存在枯落物;而油松林则是因为枯落物较少,而且针叶分解后易形成酸性,进一步恶化土壤的物理性状。

### 3 植被覆盖度与水土流失的关系研究

在大量关于植被水土保持效益的研究中,研究人员对植被覆盖度与水土保持效益之间的关系进行了大量的研究。对植被的水土保持作用而言,起关键作用的是植被的有效覆盖度<sup>[15, 17]</sup>(焦菊英, 2000)。长期以来由于研究人员研究角度和对象的不同,对有效覆盖度概念的理解也存在着较大的差异,张光辉等人在研究中指出<sup>[30]</sup>,有效覆盖度指在一定区域内,草地或者林地保持土壤并且使土壤侵蚀量降低到土壤最大允许侵蚀量以内所应该达到的植被覆盖度。大量的研究证实,只有当林草对地面覆盖达到一

定程度的时候,才能起到防止土壤侵蚀的作用,令人满意的水土保持措施是其土壤侵蚀量小于该地土壤流失的允许值。在不同的坡度条件下,对不同降雨、不同植被而言,其有效覆盖度应该是不一样的。有效覆盖度应该是降雨因子、地形因子、土壤因子和植被因子的函数。对于给定的草地或者林地而言,有效覆盖度是介于临界覆盖度和1之间的数字。

沈冰等人重点研究了植被覆盖条件下的降雨漫流中影响有效糙率的因素<sup>[25]</sup>,尽管由于实验条件的限制,所得的结果表明植被度与有效糙率之间的相关性较差,但是作者指出,由于植被度是一个可以直接观测的量,应用这一指标深入研究植被对降雨侵蚀动力以及水土流失的影响,有助于推动植被覆盖下土壤侵蚀研究从定性描述向定量计算发展。张光辉等人通过模拟降雨实验<sup>[30]</sup>,研究了人工草地的产沙产流过程,结果表明:土壤侵蚀量随着草地植被的覆盖度的增大呈指数下降趋势,并分析认为,70%的植被覆盖度可以作为实验条件下的有效植被覆盖度。王秋生通过对观测资料的分析<sup>[27]</sup>,从定量角度探讨了植被控制土壤侵蚀的规律,运用指数回归分析,建立了不同类型区的侵蚀模数与植被覆盖度的关系方程:

$$M = ae^{-bF} \quad (1)$$

式中: $M$ ——侵蚀模数( $t/km^2 \cdot a$ ); $e$ ——自然对数的底; $a$ 、 $b$ ——回归系数; $F$ ——植被覆盖度。

在此基础上,进一步建立了植被控制土壤侵蚀的一般方程,并用有关结果进行了验证,证明该方程具有较好的适用性,对于定量研究植被控制土壤侵蚀的作用具有重大意义。侯喜禄等人在研究森林保持水土效益的研究中<sup>[16]</sup>,对森林覆盖度与土壤侵蚀量之间的关系也进行了研究,发现土壤侵蚀量与林分覆盖度负相关,当林分覆盖度达到60%时,林地减少土壤侵蚀量的效益最显著。汪有科<sup>[26]</sup>等人通过对黄土高原有森林覆盖的10个流域的森林覆盖率与土壤侵蚀模数之间的关系的,建立了土壤侵蚀模数与林率之间的线形关系,认为当森林覆盖率高于95%时,土壤侵蚀量也接近于零。

植被控制水土流失的效益是明显的,但是由于植被生长发育等状况的不同以及人为等因素的不同影响,不同植被的冠层、地表层以及地下根系分布层等都出现较大差异,因此其水土保持效益也就有所不同。上述研究通过对径流泥沙过程和植被覆盖度的观测而建立的经验关系,定性说明了植被冠层与植被水土保持效益之间的关系,但是无法从本质上说明这种效益产生的原因。从根本上说,在黄土高原

地区, 植被, 尤其是草类植被减少水土流失的主要原因在于削减了径流的侵蚀动力, 提高了土壤的抗冲性能。因此进一步深入分析植被覆盖度与根系提高土壤抗冲性之间的关系, 建立二者之间的关系模型, 对于推动植被覆盖下土壤侵蚀的研究向定量发展。

#### 4 植被根系提高土壤抗冲性的研究

土壤侵蚀是自然因素与人为因素综合作用的结果。植被的繁生, 尤其是植被根系的缠绕、固结、巩固和提高了黄土及其发育的土壤渗透性。黄土及其发育的土壤没有根系盘绕、固结, 抗冲性很差, 是导致黄土高原水土流失特别严重, 生态环境恶化的重要原因<sup>[19, 33]</sup>。土壤抗冲性成因的研究是该地区土壤侵蚀预报及水土保持综合治理中一项特别重要的应用基础研究工作。大量的研究表明, 许多因素如土壤紧实度、容重、水稳性团粒含量、渗透性、水分状况以及有机质含量的动态变化等, 均对提高土壤的径流冲刷能力有重要影响, 而这些因素的变化强烈的受制于覆盖于其上的植被类型, 特别是植被根系的分布特征。在水土保持人工植被建造中, 植物根系固土保水机制是其重要依据, 因此, 综合定量研究黄土高原土壤抗冲性的成因与根系提高土壤抗冲性的动力机制, 无论对于推动我国土壤抗侵蚀性机制研究及其提高途径理论研究的深入, 还是对黄土高原及其他地区确定水土保持生物措施最佳配置方案, 都有重要的学术价值和实际意义。

朱显谟院士早在 50 年代就提出土壤抗冲性、抗蚀性的概念, 并指出土壤抗冲性与土壤结构有关, 黄土特殊的堆积成土方式形成了黄土颗粒的“点棱接触侧斜支架式多孔结构”, 黄土的这一结构造成抗冲性较弱, 正是由于植被的繁生, 尤其是植物根系串联、缠绕土体, 才使得黄土所固有的支架接触式多孔结构得以保存和巩固, 疏松和通透的性能得以发挥。随着黄土高原土壤侵蚀研究的不断深入, 人们对于植被提高土壤抗冲性有了更加深刻的认识。研究发现, 由于植被的存在, 改变了土壤的理化性质, 使得土壤容重减小, 孔隙度增加, 团聚体含量提高, 从而使土壤的渗透性能和抗冲性能得到提高。进一步研究证明<sup>[9-12, 20, 22]</sup>, 植物根系的盘绕固结作用及植物本身对水流的抵抗作用, 增加了水流运动的阻力, 减缓了水流的流速, 同时阻止地表结皮的形成, 增加了入渗, 减弱了水流对地表的冲刷作用。根系提高土壤抗冲性的研究在近年来逐渐成为研究的热点<sup>[7, 19, 20, 21, 22, 24, 33]</sup>。李勇等通过对黄土高原地区乔灌

草根系与土壤物理性质关系的研究<sup>[19, 20]</sup>, 证实细根 ( $< 1\text{ mm}$ ) 对土壤结构的改善作用最大, 其稳定土层结构的范围与细根剖面中的分布特征一致, 并提出了关于植物根系提高土壤抗冲能力的有效性模式:

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

式中:  $y$ ——根系的减沙效应(%);  $R_d$ ——有效根密度(个/100 cm<sup>2</sup>);  $K$ ——根系减沙效应所能够达到的最大值(%)。

刘国彬<sup>[21, 27]</sup>等人从根系减沙效应作用方面对该公式提出了改进, 并从生物力学的角度对根系的抗拉力进行了研究, 证实当坡面发生侵蚀时, 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。这些研究成果揭示了植被(尤其是根系)提高土壤抗冲性的机理, 为进一步深入研究植被的水土保持功效提供了新的思路。

国外学者 Ghidry<sup>[7]</sup>等人研究了死根对土壤可蚀性的影响, 结论认为, 死根对径流没有太大的作用, 但是可以明显的影响土壤流失量和径流的含沙量; 随着死根生物量和死根长度的增加, 细沟间可蚀性参数随之降低, 二者之间存在着指数关系。此外死根对于土壤剪切力、团聚体和分散率及径流等都有显著影响。作者认为, 细沟间可蚀性与死根生物量和根系长度之间的关系可以应用于 WEPP 等土壤侵蚀预报模型中, 作为预报细沟间可蚀性的调整值。另外, 其他研究人员<sup>[2, 3, 6, 8, 29]</sup>分别研究了植被根系对于土壤有机质含量、水稳性团聚体的大小及稳定性等特征的影响。

但是到目前为止, 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, 这一指标无法反映根系在土壤中的实际状况, 而且在径流的冲刷过程中, 根系对土壤抗冲性的提高作用并不仅仅与某一剖面上根系的分布状况有关, 而是与根系在整个坡面土体中的分布状况有关。因此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, 仍有待于进一步研究。

#### 5 小 结

总之, 经过长期的研究, 研究人员对于植被保持水土的作用有了比较系统的认识。随着研究逐步深入, 特别是土壤侵蚀预报研究的发展, 研究人员逐渐倾向于对植被保持水土有效性的机理研究, 用定量性语言描述植被保持水土的有效性。随着国家西部

大开发战略的逐步实施,植被在西部生态环境恢复与建设中的地位和作用日益突出,进一步加强植被生态功能,特别是水土保持功能的定量化研究,对于

推动土壤侵蚀预报的发展和西部生态环境建设具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] A. cerda Soil erosion after land abandonment in a semiarid environment of southern Spain [J] *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1997, 11: 163- 176
- [2] Barthes B, A zontonde A, Boli BZ, Prat C, Roose E. Field scale run off and erosion in relating to top soil aggregate stability in three tropical regions soils in Cameroon , Mexico [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 485- 495
- [3] Brown LC, Norton LD. Surface residue effects on soil erosion from ridges of different soils and fomation [J] *Transaction of the A S A E*. 1994 37(5): 1 515- 1 524
- [4] C. Carroll, L. Merton, P. Burger. Impact of vegetation cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoilmaterials on central Queenlands coal mines [J] *Aust. J. Soil Res*, 2000, 38: 313- 327.
- [5] Carroll C, Halpin M, Burger P, Bell K, Sallaway MM, Yuel DF. The effect of crop type, crop rotation, and tillage practice on runoff and soil loss on a Vertisol in central Qweenland [J] *Aust. J. Soil Res*, 1997, 35: 925- 939
- [6] Cresswell HP, Kirkegaard JA. Subsoil amelioration by plant roots- the process and evident [J] *Aus. J. Soil Res*, 1995, 33: 221- 239
- [7] Ghidry F, Albers EE. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability [J] *Transaction of the A S A E*. 1997. 40(1): 129- 135
- [8] Gilly JE, Risse LM. Runoff and soil loss as affected by the application of manure [J] *Transaction of the A S A E*. 2000, 43(6): 1 583- 1 588
- [9] Hussein MH, Laflen JM. Effects of crop canopy and residue on rill and interrill soil erosion [J] *Transaction of the A S A E*. 1982, 1 310- 1 315
- [10] Mike Kirkby. Modeling the interactions between soil surface properties and water erosion [J] *Catena*, 2002, 46(2- 3): 89- 102
- [11] R. J. Loch, T. Espigares, A. Costantini, et al. Vegetative filter strips to control sediment in forest plantations: validation of a simple model using field data [J] *Aust. J. Soil Res*, 1999, 37: 929- 946
- [12] R. J. Loch. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulation rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland [J] *Aust. J. Soil Res*, 2000, 38: 299- 312
- [13] 查轩, 唐克丽, 张科利, 等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 52- 59
- [14] 陈奇伯, 费希亮. 土壤侵蚀预报研究的新进展[J]. *中国水土保持*, 21. 1996, 22(2): 20- 23
- [15] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖度及其确定方法的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(3): 67- 72
- [16] 侯喜禄, 白岗栓, 曹清玉. 黄土丘陵区森林保持水土效益及其机理的研究[J]. *水土保持研究*, 1996, 3(2): 98- 103
- [17] 焦菊英, 王万中, 李靖. 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
- [18] 李德生, 李桂林, 刘文彬, 等. 窝铺山区森林植被水土保持效益及资源植物开发利用途径的研究[J]. *水土保持学报*, 1994, 1(2): 96- 109
- [19] 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, 12: 935- 938
- [20] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [21] 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, 2(3): 21- 28
- [22] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(5): 91- 101.
- [23] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原油松人工林枯枝落叶层水文生态功能研究[J]. *水土保持学报*, 1991, 61. 5(4): 87- 91.
- [24] 卢义山, 张金池, 等. 海堤林带树木根系对堤防安全影响探讨[J]. *南京林业大学学报*, 1994, 18(1): 31- 36
- [25] 沈冰, 王文焰. 植被影响下的黄土坡地降雨漫流数学模型[J]. *水土保持学报*. 1993, 7(1): 23- 28
- [26] 汪有科, 吴钦孝, 赵鸿雁等. 林地枯落物抗冲机理研究[J]. *水土保持学报*, 1993, (7) 1: 75- 80
- [27] 王秋生. 植被控制土壤侵蚀的数学模型及其应用[J]. *水土保持学报*, 1991 5(4): 68- 72
- [28] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*. 1998, 4(2): 23- 28
- [29] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*. 1997, 3(1): 45- 49
- [30] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. *水土保持研究*. 1996, 3(2): 104- 110
- [31] 张洪江, 北原曜, 远藤泰造. 几种林木枯落物对粗糙率系数  $n$  值的影响[J]. *水土保持学报*. 1994, 8(4): 4- 10
- [32] 周佩华, 武春龙. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J]. *水土保持学报*, 1993, 7(1): 29- 34
- [33] 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): 1- 10