

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得安徽农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 陈世梅

时间： 2010 年 6 月 5 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解安徽农业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意安徽农业大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名： 陈世梅

时间： 2010 年 6 月 5 日

第一导师签名： 于芳

时间： 2010 年 6 月 5 日

摘要

在野外实测和室内分析的基础上,对皖东低丘陵麻栎薪炭林开展水土保持、水文效益研究,通过微观指标的分析,建立以综合指标土壤侵蚀模数为自变量,指示指标土壤抗冲系数、渗透系数和崩解系数为因变量的回归模型。具体阐述了林分三个层次水文效益,包括林冠层、地表枯落物层、根系土壤层,通过三个层次对大气降雨的重新分配,产生地表径流与土壤侵蚀进行系统研究,结果如下:

(1)本研究的 12 个林分林冠层截留降雨存在差异,而且季节降雨量不同导致林冠截留量的变化。天然林林冠截留最大,截留率为 63.40%,最小为 1a 麻栎,截留率为 0.36%,8 种不同类型的麻栎林分随着林龄和郁闭度的增加,林冠截留呈增长趋势。

(2)地表枯落物储量不同,分解有差异,导致林分地表层有效拦蓄水量和持水能力不同。在调查林分中,8 年生麻栎林拦蓄能力最强,有效拦蓄量达 $34.48\text{t}/\text{hm}^2$,相当于 3.44mm 水深,7a 生麻栎林有效拦蓄量已超过 14a 生马尾松林,8 年生其枯落物储量高于当地分布的主要植被。麻栎林具有良好的水源涵养和保持水土能力。

(3)通过分析植被根系和土壤的理化性质,二者影响土壤抗侵蚀性能,并建立它们之间的相关模型。 $\leq 1\text{mm}$ 根径的根长、 $\leq 1\text{mm}$ 根径的根量、 $\leq 1\text{mm}$ 根径的根密度三指标对土壤抗蚀性影响最大, $\leq 1\text{mm}$ 根径的细根具有显著改善土壤内环境,增强土壤抗冲、抗蚀能力,而 $> 1\text{mm}$ 的粗根径能够改善土壤孔隙容积,增加入渗水量。径流量的产生与土壤渗透速率大小、抗冲性强弱、抗蚀性能优越三者的关系显著,地表径流大则土壤侵蚀量大。

(4)在土地利用上,合理利用林粮间作模式,在一定程度上增加了土壤水稳性团聚体含量,从而加强了土壤结构的稳定性,该研究系统 1a 麻栎、3a 麻栎和坡耕地前期都套种农作物,大量腐烂的根系形成的土壤结构体,增加了土壤孔隙度和渗透性能,所以在减少地表径流,完善水土保持功能上作用显著。

(5)在水土保持综合功能评价中,麻栎纯林和松栎混交林抗蚀、保水、保土性能较当地其他林分显著。

(6)麻栎作为混交林主要组成树种,充分发挥了林木水文系统的优势,麻栎不但是经济树种,而且是良好的生态树种。

关键词:麻栎薪炭林 渗透性 抗冲性 抗蚀性 地表径流

Abstract

Based on the results from the laboratory experiment and the field-test measurement, the function of hydrologic information and water and soil conversation of *Quercus acutissima* Carruth, (Sawtooth Oak) firewood forest of the low hills in the east of Anhui is studied. Through the analysis of the microcosmic indexes ,the paper establishes the regression model by comprehensive index of soil erosion modulus as the dependent variable, the indicated index of the soil resistance coefficient, the permeability coefficient and the disintegration coefficient as the independent variables. And it studies in detail the hydrologic information of forest stand, including the canopy layers ,the litter layers and the root zone soil mixture ,and examines systematically the redistribution of rainfall, surface runoff and soil erosion, the results are as follows:

(1)There are differences among the 12 forest-stands as far as canopy interception of rainfall is concerned, and seasonal rainfall changed the interception of rainfall. The interception of rainfall for natural forest stands at its highest, with a maximum interception rate of 63.40 percent; while the interception of rainfall for one-year *Quercus acutissima* Carruth has an interception rate of 0.36 percent. The interception of rainfall of 8 different types of Sawtooth Oak increases with the age and crown density of the forest.

(2)As is the different in stocks capacity of litter layer and decomposer, so is water-holding capacity and interception capacity. In this survey, the eight years Sawtooth Oak in the forest interception capacity is strong, the effective interception capacity amounts to 34.48t/hm^2 , equivalent to a water depth of 3.44mm. The effective interception capacity for the seventh-year *Quercus acutissima* Carruth surpasses that of the fourteenth-year Masson, and its stocks capacity of litter for the eighth-year exceeds that of local main vegetation, it possesses better water conservation ability.

(3)Through the analysis of root-system and physical properties of soil, it is discovered that they affect soil erosion resistance ability, and the relative model between them is established. Three indices, i.e., root length, root volume, and root density of less than 1mm core diameter, influence greatly the soil antierodibility. Whereas thick core diameter of more than 1mm, however, can improve soil pore volume, and increase amount of infiltrating water. The generation of runoff bears directly on the rate of soil infiltration property, the strength of soil anti-scourability and the well-functioning of antierodibility. The greater the runoff, the greater the soil

erosion. The root system less than 1.0mm in diameter significantly increases internal environment, and enhances soil resistance, but the root system greater than 1.0mm in diameter improves soil water infiltration.

(4) In the utilization of land, the mode of interplanting of trees and crops increases the capacity of waterstable aggregate, thereby strengthening reunion content of soil structure stability. In this system, the lands of the first year and the third year *Quercus acutissima* Carruth, slop soil interplant crops, all the rotten interplanting roots system strengthen the soil structure, increase the porosity and permeability of soil, so the function of the soil and water conservation is outstanding.

(5) In the comprehensive evaluation of soil and water conservation function, the pure forest of *Quercus acutissima* Carruth and the mixed forest of *Quercus acutissima* Carruth and *Pinus elliottii*, the water and soil erosion resistance properties are better than other local plantations.

(6) As the main mixed forest, the Sawtooth Oak gives full play to its hydrologic benefits. *Quercus acutissima*, the primary sources of industrial tree, is not only one of the most important economic tree species, but also an important ecological species.

Key words: *Quercus acutissima* Carruth firewood forest, oil infiltration property, Soil anti-scourability, Soil antierodibility, Surface runoff.

目录

1 文献综述	1
1.1 水土流失的概况.....	1
1.1.1 国内外水土流失的现状	1
1.1.2 安徽省水土流失现状	1
1.1.3 水土流失的成因与危害	2
1.2 水土保持研究的进展和机理.....	2
1.2.1 土壤渗透性能研究	2
1.2.2 土壤抗冲性能研究	4
1.2.3 根系固土功能研究	5
1.2.4 水土保持机理研究	7
1.3 水文效益研究进展.....	7
1.3.1 森林水文学研究成果	7
1.3.2 林冠、枯枝落叶层研究成果	8
2 引言	9
3 研究区概况	9
3.1 植被特征	9
3.2 气候特征	10
3.3 土壤特征	10
4 研究方法	11
4.1 径流场的建设.....	11
4.1.1 径流场植被状况.....	11
4.2 林冠层、地表层、土壤层调查方法.....	12
4.2.1 乔木层生物量测定	12
4.2.2 枯落物吸水量测定	12
4.2.3 根系及土壤抗侵蚀指标测定	12
4.3 相关水文指标求算.....	13
4.4 树种拉丁学名.....	13
4.5 数据处理	13
4.6 技术路线	13
5 结果与分析	15
5.1 不同林地类型林冠层水文特性.....	15
5.1.1 研究区大气降雨特征	15
5.1.2 对大气降雨的再分配	15

5.1.3 五种林分水文分量的动态格局	16
5.2 不同林地类型地表枯落物水文特性研究.....	19
5.2.1 不同林分枯落物储量	19
5.2.2 枯落物水文特性	20
5.3 不同林地类型根系土壤层研究.....	23
5.3.1 不同林地根系剖面分布特征研究	23
5.3.2 不同径级根系分布特征	26
5.3.3 不同林地类型土壤渗透性研究	28
5.3.4 林地特征与土壤入渗的关系	30
5.3.5 土壤含水量对渗透性的影响	31
5.3.6 土壤的物理性状与入渗的关系	32
5.3.7 植被根系与土壤抗冲性研究	33
5.3.8 土壤抗冲指数与土壤根系的相关分析	33
5.3.9 植被根系固土与抗冲性能综合分析	33
5.3.10 不同植被类型土壤抗蚀性研究	35
5.3.11 土壤理化性质对土壤抗蚀性的影响	35
5.3.12 不同植被类型土壤抗蚀性能评价	36
5.4 不同森林类型地表径流与土壤侵蚀模数研究.....	37
5.4.1 观测时段内的产流数据	37
5.4.2 观测时段内的土壤侵蚀模数	39
5.4.3 径流量与土壤因子的关系	41
5.4.4 径流量与林分因子的关系	42
5.4.5 径流量与降雨量、降雨强度的关系	44
6 结论与讨论	45
6.1 林冠层水文效益.....	45
6.2 地表层水文效益.....	45
6.3 土壤层水文效益.....	45
6.4 讨论	46
7 参考文献	47
致谢	
个人简介	
在学期间发表的学术论文	

1 文献综述

1.1 水土流失的概况

1.1.1 国内外水土流失的现状

全世界水土流失主要发生在北纬40度与南纬40度之间，美国、中国、印度、菲律宾、澳大利亚、埃塞俄比亚及非洲各国的水土流失都比较严重。全世界土壤侵蚀面积已达2500万 km^2 ，占全球陆地总面积的18.5%，全球土壤年侵蚀量约为600亿T，每年因土壤侵蚀而退化的土地面积为5~7万 km^2 ，美国936万 km^2 的土地上，遭强烈水蚀或风蚀的有114万 km^2 ，占全国土地总面积的12.2%，部分遭到破坏或受到侵蚀威胁的有313万 km^2 ，占33.4%，平均年土壤侵蚀产生的泥沙总量达40亿T，由于泥沙危害，每年要损失大约5亿美元。据统计，我国水土流失面积达150万 km^2 ，每年流入江河的泥沙量为50亿T，相当于全国耕地被刮去1cm厚的土层，流失的氮、磷、钾相当于4000万T化肥^[1]。造成这种情况的主要原因是我国森林，植被遭到严重破坏，成为人民贫困和江河泥沙淤积的主要根源。印度约有250万 km^2 的土地易遭水害，175万 km^2 的土地因土壤侵蚀而退化，仅仅由于农业及耕作活动，每年土壤流失量约达53.33亿T。澳大利亚有260万 hm^2 受到侵蚀；菲律宾的1.39万 hm^2 耕地中有0.81万 hm^2 遭受水土流失；埃塞俄比亚每年流失表土10亿T以上。由于世界人口的增加，粮食需求量亦将成倍增长，这样，一方面耕地土壤在严重流失，一方面人口对粮食需求量急剧增加，形成十分棘手又必须解决的矛盾。联合国环境保护组织的有关研究断定，非洲35%的土地（赤道以北），近东地区60%的农田和印度51%的农业土地正在受到危害，并且面临着“如不迅速采取有效的水土保持措施，就一定发生土地退化的威胁”。

1.1.2 安徽省水土流失现状

安徽省跨长江、淮河、钱塘江三大流域，总面积13.96万 km^2 ，随着经济社会的快速发展及城镇化建设规模的不断扩大，尤其是局部地方不合理的生产方式，砍伐森林，地被遭到破坏，水土流失加剧，根据全国第二次水土流失遥感调查结果，我省水土流失面积为1.88万 km^2 ，占全省总面积的13.5%。山区是安徽省水土流失最为严重的地区，其中，大别山土壤流失面积达7449.3 km^2 ，占土地总面积的53.7%，年均土壤侵蚀量2054t/ km^2 。皖南山区的原徽州地区，土壤侵蚀面积为4179.3 km^2 ，占土地总面积的31.9%，其中强度侵蚀面积占受侵蚀面积的53.4%。土壤侵蚀危害严重^[2]。从各市水土流失分布来看，水土流失面积占当地总面积10%以上的市有8个，即黄山市占26%，铜陵市、池州市占25%，安庆市、宣州市占24%，六安市占20%，芜湖市占12%，滁州市占11%。从流失程度上看，中低山区以中、强度侵蚀为主；丘陵区以轻、中度侵蚀为主^[3]。

如今水土流失已成为全球性的公害，严重威胁着人类的生存与发展，已引起全世界的关注。保护现有土地资源免遭侵蚀是各国所面临的一大难题。

1.1.3 水土流失的成因与危害

水土流失，也叫土壤侵蚀，是指地球陆地表面的土壤及其母质、岩石等在受到水力、风力、冻融和重力作用下产生的侵蚀、搬运及堆积过程。根据自然界某一侵蚀外营力在一较大的区域里起主导作用的原则，全国划分为风力、水力、冻融侵蚀为主的三大水土类型区^[4]。水土流失是由各种自然因素和人为因素引起的。自然因素包括：地形、地质、植被、降雨、土壤等。人为因素包括：土地利用方式的不合理、毁林毁草、滥垦滥伐、顺坡耕种等等。从历史上看，在远古时候（五六千年前），人们主要在平地上种粮维持生存，山区、丘陵区到处都有茂密的森林和草原，基本上没有水土流失的现象发生，随着人口的急剧增加，粮食则成为人们生存的唯一理由，由此出现毁林开荒、顺坡耕种等不合理土地利用方式，造成重大的水土资源流失。土地越瘠薄，越耕种，生态环境日益恶化。黄土高原成为典型的例证。所以人为的经济活动则成为当前影响水土流失的核心要素。

由于植被的破坏，水土流失加剧化，土地沙化，砾石化，岩石裸露，形成荒漠景观，气候变差，空气相对湿度降低，雨量减少，灾害性天气增多，使得河道淤积，水利工程报废，严重影响农业生产。据科学观测，15~25度的坡耕地每年每公顷流失水量400~600m³，土壤流失30~150T；皖西大别山区每年流失2700万T土壤，约损失有机质40.5万T，氮素2.7万T，磷素0.14万T，钾素0.38万T^[2]。土壤中肥力的流失，造成土壤养分瘠薄，耕种环境恶化，其结果是农作物产量大幅度降低，群众生活贫困。黄土区，每年人均粮食收入250~300kg，灾年甚至颗粒无收，靠国家粮食救济。由于水土流失，泥沙淤积在河道，加上其他因素，国内很多河道缩短，如大别山区兴建的佛子岭、梅山、磨子潭、响洪甸、龙河口等五大水库，自建库近30年中，淤积泥沙1.15亿m³，占总库容的4.6%。其中佛子岭水库淤砂6000多m³，占库容量的16.7%，严重影响了水库灌溉、防洪、发电等效益^[2]。广东省内河航运里程，建国前有2万km，50年代减少为1.59万km，70年代减少为1.11万km。东北松花江流域，原有航运里程1500km，到90年代减少为580km。水土流失还造成大面积的洪涝灾害，直接经济损失无法估计。

1.2 水土保持研究的进展和机理

1.2.1 土壤渗透性能研究

土壤入渗是指降雨落到地面上的水从土壤表面渗入土壤形成土壤水的过程，土壤水分的入渗是自然界水循环中的关键一环，它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个重要环节。因此，土壤入渗是分析土壤侵蚀过程的重

要参数，而入渗又是一个十分复杂的动态过程，主要受到土壤理化性质、土壤初始含水量、降雨因子以及植被因素和人为因素的影响。入渗分为渗吸和渗透两个阶段，在非饱和土壤中，水分的下渗是在土壤的吸力梯度和重力梯度联合作用下进行的^[5]。

土壤的渗透性是土壤物理特征的重要参数，反映土壤地表水转为地下水性能的高低，也是土壤质地优劣的表征值。测定水分入渗的方法较多，例如双环法、环刀法、定水头渗透法、变水头渗透法、模拟降雨法、土柱法、钻孔法、稳定通量法、渗透桶法^[6]。

在处理土壤入渗时常用的四个指标为初渗率、平均渗透速率、稳渗率以及渗透总量，各指标处理方法为：初渗率=最初入渗时段内渗透量 / 入渗时间；平均渗透速率= 达稳渗时的渗透总量 / 达稳渗时的时间；稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定（即内环水头趋于稳定）时的渗透速率。

入渗速率可以直接影响地表产汇流过程，进而决定地表径流的冲刷能力和水蚀过程^[7]。多年来，世界各国科学家和学者对土壤水分入渗机制做了大量的研究，蒋太明^[6]将水分入渗分为三个过程：第一个过程是土表湿润阶段，开始时表土含水量小，入渗速率大，持续降雨，表土含水量增加，土表的入渗速率等于降雨强度，为通量控制阶段；土表饱和后进入第二阶段，入渗速率随时间增加而逐渐减小，表土开始积水，甚至产生径流；经过比较长时间后进入第三阶段，这时入渗速率趋于稳定，这一阶段为剖面控制阶段，渗透率由土壤性质决定。刘贤赵等^[22]等在陕西野外田间实地研究认为，土体内任一埋深度处土壤含水率的变化一般经历稳定不变、急剧上升、缓慢增大和再稳定阶段共4个阶段，每一阶段所经历的时间长短与土壤密度、初始含水率、入渗性能及距地面的深度相关。在均一质地的土壤剖面上，入渗结束时表土可能有一个不太厚的饱和层（有时没有）；饱和层下是一层近似饱和的延伸层（或过渡层）；延伸层下是厚度不大的湿润层，湿润层含水量迅速降低；湿润层的下缘是湿润锋。查轩认为，表土层渗透速率最高，林地高达12.5mm/min,草地次之（10.2mm/min），而耕地仅为2.88mm/min。随着土层深度的增加，入渗速率降低，林草地中表层的入渗速率是20~35cm土层的2.1倍，是100cm的14.4倍。这是由于随着土层的加深，植物（根系）对土壤理化性质影响减弱的缘故^[8]。蒋定生等对黄土高原地区研究^[9]，土壤入渗速率具有明显的地域性。高值区稳渗速率为5~12mm/min，分布于高原腹地的子午岭，黄龙山，崂山等森林植被条件较好的地区，其次是植被条件较好或土壤结构良好，肥力水平较好的黄麻土、黑麻土黑垆土等；稳渗率的地域性分布于森林植被分布区基本吻合。大量研究证明，有林地土壤渗透速率高于无林地或宜林地。卞相玲等^[11]在山东济南地区不同林分类型中小区为单元，用同心环法测

定了各林分土壤渗透性能,发现林地土壤渗透速率的大小顺序为刺槐林>侧柏林>黑松林,阔叶林地入渗速率大于针叶林地。张晓勉在处理8种林分类型的入渗速率中,发现茶园>灌木林>混交林>农田>松林>杉木林>竹林。

土壤入渗模型是土壤渗透性研究的重要内容。降雨入渗重要是非饱和土壤水分的运动过程,Darcy通过实验提出了描述饱和土壤水分运动的基本规律,由此开始了产流机制研究的土壤物理学途径。Richards达西定律进行修订后,认为其可以适用于非饱和条件,从而推动了非饱和土壤水分运动研究的发展。Green等与Smith等分别建立了一定条件下的入渗模型,推动了入渗研究的发展^[11]。目前较为常用的模型很多,有考斯加可夫(Koostakob)、霍顿(Horton)、Philip公式和通用经验公式。唐绍忠^[12]发现在入渗的瞬时阶段(0~10min)考斯加可夫公式与实验拟合最好,在入渗渐变阶段(10~20min),通用经验公式与霍顿公式拟合最好。朱冰冰等^[13]通过对长江中上游地区9个省(市)境内的37个县市土壤入渗双环测试,分析了长江中上游地区土壤入渗性能特征及其区域分异特征,发现蒋定生经验公式适用于我国长江流域的土壤入渗过程模拟。

土壤渗透性的测定方法各有差异,同心环法测定方便,尽管测定结果与实际情况有一定差距,但此法不需要太多的复杂仪器设备,操作简单易行;环刀法用于测定渗透试验,由于渗透面积较小,土壤容易受到挤压变形,改变了土壤原始特征,误差较大;人工模拟降雨法虽然测定数据可靠,但耗费的人力物力太大,而且不易操作和控制,需要现代化的仪器设备;田间试验法测定比较准确,但难以推广开来。

在入渗机制研究从初始的小区为主的功能与机理研究阶段到以流域及区域尺度研究经历了跨越式的发展,无论在理论还是实践上都丰富了土壤水分入渗机理。但目前对土壤入渗特性影响的因素研究主要集中在土壤理化性质方面,特别是土壤物理性质宏观表征指标对入渗特性影响的研究最多。

1.2.2 土壤抗冲性能研究

土壤结构的稳定性与土壤侵蚀之间的关系很早就受到国内外学者的普遍关注,并提出了不同的土壤抗侵蚀评价指标,很多学者引入土壤腐殖质含量、水稳性团聚体数量、根系密度以及非毛管孔隙度等指标作为表征土壤抗冲性的重要指标。土壤抗冲性是土壤抗侵蚀性能的重要方面,是指土壤抵抗径流和风等外营力机械破坏的能力,受土壤理化性状、土壤剖面构造及生物因素的影响。土壤抗冲性概念是由朱显谟在50年代提出^[14]。他将黄土区土壤受侵蚀和抵抗径流破坏的能力区分为抗冲性和抗蚀性两种特征性能。经过多年的研究性进展,土壤的抗冲性趋向多面化,包括抗冲性与植被的关系研究、与林分结构的研究、与土壤质地的研究,甚至与土壤根系的分布特性研究最为活跃,建立了一系列的多重指标与

土壤抗冲性的相关模型和回归方程。早在60年代,朱显谟先生就指出,生物措施是水土保持中最有效和最根本的方法。他认为土壤抗冲性的增强,主要取决于根系的缠绕和固结作用,这种作用使土体有较高的水稳结构和抗蚀强度,从而不易被径流带走。吴钦孝^[15],李勇采用保留和去掉茎叶两种处理方法,模拟测定了黄土高原几种常见的天然草本植物根系提高表层土壤抗冲刷的能力,定量研究了土壤冲刷过程中土壤冲刷量与冲刷历时的关系。土壤冲刷量与冲刷历时成幂函数的关系。蒋定生等^[16]根据大量的研究认为,黄土区土壤抗冲性存在自北向南和自西北向东南逐渐递增的趋势,并根据该区土壤抗冲性能的大小,划分为5个区域。张金池等^[5]在苏北海堤林带树木根系固土功能的研究中认为,同一地段,土壤的抗冲、抗蚀指数表土层大于底土层,并且树木根系,尤其是根径小于2mm的细根有较强的固持土壤功能,与土壤抗冲性相关性较大。李勇等^[18]利用索波列夫抗冲仪器,分别测定了33个小区4种土壤,多重指标与抗冲性的多元回归方程。张金池等^[5]对不同根径的根量、根长及土壤有机质含量与土壤抗冲指数间进行了直线、幂指数和对数等多种形式的单相关分析,发现 $\leq 2\text{mm}$ 根径的根量、根长和土壤有机质含量与土壤抗冲指数存在明显的直线回归关系。

在土壤抗冲性的测定中,根据各种土壤类型不尽相同,方法不同,大体上分为原状土冲刷法、静水崩解法、土壤理化性质分析法及野外小区放水法等。由于各种特性的土壤研究方法不同,处理指标各异,抗冲性评价指标目前有5种^[19]:一是用每升水冲走土样的克数(g/L)或每冲走1g土所需要的水量来描述,即L/g;二是在一定雨强下,冲走1g土所需时间;三是采用能量指标,用冲走1g土或其它物质所需水能表示。单位为J/g;四是用单位径流深所引起侵蚀模数来表示;五是从床底泥沙起动角度,用土壤抗冲能力表示,即土体承受水的流动所引起的一定切线应力的能力。

1.2.3根系固土功能研究

森林作为陆地生态系统的主体,在发挥生态功能的同时,更加注重物质的生产、维持生态系统的有序进程,其中森林-土壤作用体在90年代是国际土壤学家和生态学家研究的热点,但以往的研究更加注重地上部分,随着研究的深入,人们越来越关注森林整体的一部分,林木根系在实现固土、抗蚀作用中发挥的特定功能的研究。植物根系一方面构成土壤自肥的一部分,另一方面不同径级根系在土壤中穿插,构成根系土壤的特殊网络体,从而能够实现固沙固土的功能。国内开展了根系多方面的研究,力学的研究是始于20世纪80年代末,主要通过拔拉试验,原位剪切试验和根系抗拉试验完成。史敏华^[20]等1994年对林木根系抗拉试验满足幂函数关系 $Tr=AD^B$,林木对土壤固结力大小决定于根系分布特征、根径、根的抗拉等因素,认为根的抗拉力是衡量水土保持树种的一个重要指标。范兴科、

蒋定生1997年认为土壤抗剪强与土壤物理因素有关,土壤抗剪强度的增加归结为植物根系存在的结果。根系在土壤中穿插能明显增大土壤剪切强度,其中草本植物根系密度大,须根多,单位须根密度的剪切强度增加值是树木根系的2~3倍。代全厚^[21]等1998年试验表明牛毛草地抗剪强 0.163kg/cm^2 ,天然草地 0.119kg/cm^2 ,比农地 0.058kg/cm^2 高。植物根系除了能提高土壤的抗冲性,抗剪性,具有加筋作用外,还具有锚固力作用。杨亚川等1996年对节节草根土复合体研究表明,当复合体的体积密度含水量一定时,抗剪强度指标的 C 值与含根量正相关, Φ 与根量关系不大,原因是根含量增加时,根系的锚固力显著增大,根系锚固力是 C 值的重要组成部分。 C 是土粒与土粒,土粒与根系之间的凝聚力,以及由土的剪切应力传递给根系而引起的根系抗拔力之和($16\sim 60\text{kPa}$)。刘国彬^[22]1996年在研究草本植物根系固结土壤,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、根土黏结作用及根系生物化学作用。根系化学作用效应通过植物繁生改善土体构型来实现。黄绵土中其效应达51%,根土黏结作用是网络串连作用的2倍,二者都随有效根面积增加而增加。*Ferraiolo*^[22]概述了植被对斜坡稳定作用机制和机械力学机制,数学模型上根系加固土壤抗拉阻力转变成剪应力的增加值

$$\Delta S = Tr(Ar/A)(\cos\theta \tan\Phi + \sin\theta)$$

式中: Tr —根系平均抗拉强度; Ar/A —单位土壤横截面根系面积; Φ —内摩擦角; θ —倾角。

许多学者还做了关于根系微观的研究,在降水冲刷过程中,植物根系尤其是 $<1.0\text{mm}$ 的细根,缠绕、穿插、固结土体,抵制雨水的冲刷,增强了土壤抗冲性能,所以细根是影响土壤抗冲性的关键因子。张金池也在苏北海堤林带树木根系固土功能研究中提出:土壤抗冲性与林木根系,尤其是 $\leq 2\text{mm}$ 细根系的数量、长度及土壤有机质含量密切相关,单相关系数均大于 0.8 ^[16]。

在国外的研究中也有大量关于根系的研究报告,如柳树根系力学为 $9\sim 36\text{MPa}$,杨树 $5\sim 38\text{MPa}$,桉树 $4\sim 74\text{MPa}$,黄杉 $19\sim 6\text{MPa}$,银槭 $15\sim 30\text{MPa}$,西铁杉 27MPa ,越橘 10MPa ,大麦 $15\sim 37\text{MPa}$,地衣仅 $2\sim 7\text{MPa}$,禾草非禾本科草 $2\sim 20\text{MPa}$,香根草 $40\sim 180\text{MPa}$ 。但是由于树木根系统研究比较困难,这方面数据不容易获得^[23]。*Green Way*(1987)年总结植物根系对大多数斜坡有净稳定作用。*Green & Leiser*(1982)年认为在理想条件下垂直根伸展到滑动浅层的斜坡中起稳定作用。*Waldron*^[23], *Wu*(1977), *Brenner & James*(1977)年提出数学模型,考虑到可变情况,弹塑性及延伸性,根系对土壤抗剪强度增加值

$$\Delta S_r = Tr(Ar/A)(\cos\theta \tan\Phi + \sin\theta)$$

式中: Tr —植物根系平均抗拉强度; Ar/A —土壤横截面中根系面积比; Φ —内摩擦角; θ —拉动的剪切角。

综上所述,国内外学者通过多学科、多领域关于根系在实现固土、防沙、防止土壤侵蚀、防止土壤荒漠化,植物根系固土机制或模式问题的解决,有助于揭示植被措施防治水土流失关键问题的解决等等,都关系到生态环境的可持续发展战略。

1.2.4 水土保持机理研究

综合国内外有关森林保持水土功能研究成果,可以概括为三个主要方面^[25]:
①森林保持水土的功能与机理研究。依据森林结构,把其分为四个层次,即乔木层、灌木草本层、枯枝落叶层和根系-土壤层,研究不同层次的水土保持作用与机理。
②森林保持水土作用的应用研究,通过实测资料,研究不同植被类型、结构、尺度下林草地的径流量、土壤侵蚀量,分析流域乃至区域林草植被整体的减流减沙效益。
③森林保持水土功能的评价研究。确立森林水土保持功能的评价指标体系,建立评价指标体系与径流量、土壤侵蚀量的定量关系,达到评价森林保持水土效益的目的。

1.3 水文效益研究进展

1.3.1 森林水文学研究成果

世界森林水文研究始于德国的克纳茨奇(1862)对松林与气象要素的研究。虽然起步较晚,但是各国都开展了多方面的研究工作,尤其近年来发展较快。我国最早进行森林水文研究始于20世纪20年代,前金陵大学美籍学者罗德明博士和李德毅先生等在山东、山西等地观测研究了不同森林植被类型对雨季径流和水土保持效应的影响,拉开了我国近代森林水文研究的序幕,单向性地研究了森林对水分某个变量的影响、研究水量平衡和水分循环、研究典型区域的森林水文效应方面取得了大量的研究成果,但是以综合性原则为基础的多因子的森林水文效应定量分析少,以生态系统为中心,结合养分循环与水质方面的研究缺乏,按流域进行的综合研究分析还很薄弱。

森林水文学经历漫长的发展期,在森林水文研究中,存在着两大学派^[25]。一种学派认为,森林可以增加降水和河水流量;另一学派认为,森林不具备增加降水的作用,森林采伐后,河水的流量不是减少,反而增加。赞同第一种观点多数在前苏联和中国。西方国家普遍持第二种观点,美国学者认为,森林用水量很大,林区河水流量一般都小于其它植被类型和空旷地。因此,国内外森林水文工作者围绕着森林生态系统水量平衡、森林中降水分配过程以及森林对水质的影响展开积极研究。世界各国根据自己的森林水文研究成果各抒己见,争论的主要问题集中在3个方面:森林对降水的影响,森林对河川径流的影响和森林对洪水的影响。森林对水的影响主要表现在通过对林冠蒸散和对大气降水的重新再分配而影响到森林的水量平衡,从而对森林生态系统和流域的水分循环产生影响。包括

森林对降水分配格局的影响,森林对径流泥沙和水质的影响。我国的研究大多属于小尺度分析。马雪华认为在森林水分循环中,主要通过蒸发来影响径流。高人、张玲、朱劲伟等也从不同角度研究了森林植被的水分循环和水量平衡。在研究方法中,引入了水文模型,水文模型是对自然界中复杂水文现象的近似模拟,是水文科学研究的一种手段和方法。描述水文过程的模型,是一切与水文过程有关的过程模拟的基础,Freeze和Harlan于1969年首先提出了分布式水文模型的概念^[26]。著名的水文模型,如Stanford模型、SR-FCH模型、API模型、新安江模型、SSARR模型、ARNO模型、SCS模型、HEC-1模型等。由于研究方法的局限性、森林生态系统本身的复杂性以及研究区域的不可比性,导致了森林水文生态效应研究结果的差异性,各地的结论只能代表该地区的特点。

1.3.2林冠、枯枝落叶层研究成果

在几十年的研究里,我国森林水文研究在纵向深入和横向联合两方面取得令人瞩目的成就。由于计算机的普及和各项技术的突破,运用于现代森林水文界,推动了水文学的发展。森林与降水关系中,林冠截持降水是森林对降水第一次阻截,也是对降水的第一次分配。林冠截留率与降水量呈紧密的负相关,一般表现为负幂函数关系^[27]。树冠截留功能波动性大,稳定性小,其中以亚热带西部高山常绿针叶林最大,亚热带山地常绿落叶阔叶混交林最小^[28]。国外一般认为温带针叶林林冠截留率在20%~40%之间^[29-32]。我国主要森林生态系统的林冠截留率为11.4%~36.5%,变动系数为6.68~55.05。而Rutter和Gash解析模型较为完善的反映了林冠截留模型,而后Valente对这两个模型进行了修正并较好地模拟了稀疏林冠的降雨截流过程。加拿大M.K.Mahendrappa(1984)确定了计算穿透降水(y)的回归模型: $Y=bX-a$ (其中 Y 为降雨量, b 为斜率, a 为回归线升角)。美国J.W.Raich(1983)曾对哥斯达黎加的湿地成林和一片1年生演替林作过6个月观测,发现成林穿透降水占总降水52%,演替林占68%。西德J.Weihe(1983)通过测定两片密度不同的云杉林分提出,用系统布点方式测得稀疏林穿透降雨为77.6mm,郁闭林为38.7mm。森林干流量很小,通常占降水量5%以下,很少超过10%,在我国东部主要针阔叶树种中,栎类的干流量较大^[28]。

林下枯落物指覆盖在林地土壤表面的半分解和未分解的植物凋落物,它是森林植物地上各器官的枯死、脱落物总称^[33]。枯落物是森林生态系统的重要组成部分,除截留降水外,更有吸收和阻延地表径流,抑制土壤蒸发,改善土壤性质,增加降水下渗,防止土壤溅蚀,增强土壤抗冲能力等功能,在保持水土、涵养水源作用中发挥主导作用^[34]。许多学者在不同区域对多种森林凋落物水源涵养功能(持水量、持水率和吸水速率等)进行了研究,主要森林类型有马占相思、湿地松、松栎混交林、栓皮栎、马尾松、油松、侧柏、元宝枫、刺槐、杉木、尾叶

桉、火力楠、荷木、黎蒴、女贞、慈竹、柏木等^{【35, 36, 37, 38】}，这些研究表明不同森林类型由于其树种生物学特性与林分结构不同，水源涵养效应存在一定的差异。枯枝落叶层一般吸持水量可达自身干重的2~4倍，各种森林枯落物最大持水率平均为309.54%^{【39】}。枯枝落叶层吸持水能力的大小与森林流域产流机制密切相关，并受枯落物组成、林分类型、林龄、枯落物分解状况、累积状况、前期水分状况、降雨特点的影响^{【28】}。

2 引言

麻栎是皖东地区乡土树种，适应性强、生长良好，木材坚、硬、重，栎炭比重大、火力强、热值高，根系深、萌芽能力强，经济效益好，群众广为栽植，该区域历史上就有长期经营薪炭林的习惯，目前作为优良特色资源在皖东地区大力推广^{【40】}。

滁州市属皖东丘陵区，总面积为13468.18km²，随着经济开发建设，出现了不同程度上的水土流失，其中轻度侵蚀面积为1193.62km²，占该市总面积的8.86%，中度侵蚀面积为300.57km²，占该市总面积的2.23%，强度侵蚀面积为6.79km²，占该市总面积的0.05%，极强度侵蚀面积为1.06km²，占该市总面积的0.01%^{【31】}。作为我省水土流失严重区域，此前尚无一个水土保持试验站建立，因此该区域水土流失现状及规律的认识资料匮乏。

鉴于此，本研究结合《滁州植被恢复与特色资源高效培育与利用技术试验示范》课题，探索麻栎短轮伐期工业原料林经营技术，在研究的基础上结合水保试验站的建立，综合分析评价皖东低山丘陵区麻栎薪炭林水保、水文效益。主要研究内容包括：①短轮伐期麻栎薪炭林林冠层水文效益②短轮伐期麻栎薪炭林枯枝落叶层水文效益③根系土壤层水文效益④监测年降雨、径流、泥沙等数据，建立本研究系统地表径流与多因子的回归模型。对于进一步推动当地的可持续发展，加强皖东水源地的保护，为区域尺度水土流失模型的建立提供科学依据，为水土流失的综合治理提供决策支持。

3 研究区概况

3.1 植被特征

试验地位于皖东丘陵区滁州市南谯区红琊山林场，地理坐标为东经117°58′，北纬32°20′。森林植物种类甚多，林场总面积1000hm²，有林地面积967hm²，森林活立木蓄积4.5万m³，其中天然林400hm²，麻栎林467hm²，马尾松林33hm²，国外松林13hm²，国外松与麻栎混交林27hm²，国外松与枫香混交林约0.7hm²，枫

香与麻栎混交林 3.3hm^2 ，其次还有成片杜仲林、板栗林。短周期麻栎薪炭林是其主要经营目标，第一茬8-10年采伐，以后每5-6年萌芽更新一次，周而复始，可经营上百年。地带性植被为落叶阔叶林。

3.2 气候特征

本区属北亚热带向暖温带过渡性气候，其余大部分地带属北亚热带湿润性气候。全区气候的基本特征是：四季分明、季风明显、光照充足、雨热同步、雨量适中、梅雨明显、冬寒夏热、春秋温和、春温多变、秋高气爽。同时，由于冷暖气团交汇频繁，常有低温、大风、暴雨、冰雹、干旱、霜冻等灾害性天气交替出现。本地区气候温和，雨量充沛，年均气温 $14.8\sim 15.4^{\circ}\text{C}$ ，一月平均气温 $0.9\sim 1.9^{\circ}\text{C}$ ，七月平均气温 $27.6\sim 28.1^{\circ}\text{C}$ ，年平均降水量 $876\sim 1031\text{mm}$ 。但气温变化大，降水年内、年际分配不均；冬季寒冷，西伯利亚寒流长驱直入，平均极端最低气温 $-9\sim -11^{\circ}\text{C}$ ，而极端最低气温为 -20°C ，滁州达 -23.8°C （1955年1月6日），极端最高气温 41.2°C ；降水年内、年际分配，如滁州，夏季（6-8月）降水最多，占全年降水量的47%；春季（3-5月）次之，占25%；秋、冬季较少，分别占18%和10%。最多年降水量达 $1200\sim 1600\text{mm}$ ，最少年降水量只有 $500\sim 600\text{mm}$ ，两者之比为2.5~3倍。平均日照时数约为 $2079\sim 2269\text{h}$ ，平均霜期在 $144\sim 157\text{d}$ 之间。

3.3 土壤特征

基岩为石英角斑岩，地形属典型皖东丘陵岗地，坡度 $5\sim 25^{\circ}$ 不等，土壤多为普通黄棕壤，石砾含量较高，pH值6.2-6.8，土层厚20-40cm。有机质含量 1.53g/kg ，全氮、全磷、全钾含量分别为0.084%、0.04%和1.54%，速效磷 5.58mg/kg ，速效钾为 92.47mg/kg 。

4 研究方法

4.1径流场的建设

在试验区共建10块径流场，分别根据不同世代、不同坡度、不同林分类型、三种类型的径流场进行对照比较，来综合分析和评价水文效益。径流场的建设严格按照试验规范，宽×长（5m×20m,水平5m,与等高线垂直20m,水平面积100m²）规格设置，不同坡度要改算（10度20.3m，15度20.7m，20度21.3m），下建承水池容积为1m³。另外在试验站开阔地段设置一虹吸式自记雨量计和标准雨量桶。

4.1.1径流场植被状况

2007年共建10个径流场包括12个样地。表1为径流场植被基本状况。

表1 径流场基本状况
Tab.1 Basic condition of runoff plots

林分类型	密度(株/亩)	地点	树龄(年)	平均胸径(cm)	平均树高(m)	坡度	坡向	乔木层覆盖率	灌木层覆盖率	总盖度	主要林下植物
马尾松	120	红罗湖北山	14	7.9	6	12	西南	50%	90%	80%	花椒、盐肤木、朴树、樟树等
松栎混交	330	洪兴水库南山	5	6.8/2.5	3.2/3.0	13	东北	90%	22%	90%	君王子、野花椒、油茶、杉木等
天然林	330	竹园山	30	9.8	10	15	东北	50%	60%	85%	黄刺楸、檫木、朴树、野花椒、盐肤木、金银花等
麻栎	330	对门山顶	1	0	0.8		西南	20%	40%	50%	野花椒、盐肤木、朴树、柯刺、樟树等
麻栎	330	对门山顶	2	0.5	1.2		西南	60%	30%	65%	野花椒、柯刺等
麻栎	330	对门山顶	3	1.2	2.4	10/15/20	西南	30%	50%	50%	杉木、盐肤木、樟树等
麻栎	330	对门山顶	4	2.1	3.5		东北	60%	20%	75%	
麻栎	330	对门山顶	5	2.5	3.8		东南	70%	20%	80%	杉木、油茶、黄桷木等
麻栎	330	对门山顶	6	4	7.5		东	80%	10%	85%	
麻栎	330	对门山顶	7	4.5	8		西南	80%	10%	85%	
麻栎	330	对门山顶	8	5	8.5		西南	90%	10%	90%	
坡耕地	0	食堂东山	0	0	0	12	南	0	0	0	

4.2 林冠层、地表层、土壤层调查方法

4.2.1 乔木层生物量测定

乔木层生物量调查，地上部分生物量测定（采用Satoo的分层切割法）。在样地选择标准株，伐倒后，选标准枝，带回室内，取少量作为供试样品。将分装的枝、叶、干称鲜重并记录所测数据，然后再将样品浸入水槽里，持续时间为5min，将供试样品取出自然晾干后称重，放入预先设置好的烘箱烘干为止（6h/80⁰C），称取重量并记录数据，并推算林冠层截留量。

4.2.2 枯落物吸水量测定

枯落物调查：在不同林分坡面的上部、中部和下部各取水平面积50cm×50cm的3个有代表性的枯落物样方，现场测定其总厚度、未分解层和半分解层厚度，室内分别测定其含水率和干重。

枯落物持水量及持水、吸水速率测定：枯落物持水量、吸水试验采用室内浸泡法。不同林分各取未分解物和半分解物100g，分别放入尼龙网袋，此后将装有枯落物的网袋置入盛有清水的容器中，并用重物下压，使其充分浸泡。测定时段设为0.25h, 0.5h, 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 16h, 22h, 24h。测定时将装有枯落物网袋取出，静置5min左右，直至枯落物不滴水为止，迅速称枯落物的湿重。

4.2.3 根系及土壤抗侵蚀指标测定

(1) 土壤物理性质测定：物理性质采样环刀法和铝盒测定。

(2) 根长、根量调查：从上到下挖取长×宽×高分别为25×25×10cm的土柱，深至无根系，按照0~10、10~20、20~30、30~40、40~50cm的土层划分取土壤样品，用剪根夹将各不同径级鲜根剪下，将根系带回室内洗净、自然风干。按不同径级进行分类测量根长。对于<0.5mm的极细根，可用长度重量法。最后将土柱内不同径级的根系在85度恒温下烘至恒重，称量得各径级的干重。

(3) 土壤抗冲性测定^[5]：利用C.C.索波列夫抗冲仪进行抗冲实验，即在1个大气压下，以0.7mm直径水柱对土层冲击1min，使土壤产生水蚀穴，每10个水蚀穴的深与宽乘积的平均数的倒数，即为该层土壤的抗冲指数。

(4) 土壤渗透性测定^[6]：入渗试验仪器采用双环入渗仪。外环直径为60cm，内环直径为30cm。入渗开始后分别记录每下降1cm水柱持续时间并统计入渗水量；10至15min内，每2min观测一次并记录入渗水量；15至30min内，每3min观测一次并记录入渗水量；30min后，每10min观测一次并记录入渗水量。本实验一般采用60min作为结束时间，是根据样地相对稳定入渗条件所控制，即入渗率达到相对稳定时结束试验进程。

(5) 土壤抗蚀性测定^[5]：将风干土样进行筛分，选取6-10mm直径的土粒50

颗, 均匀放在孔径为5mm的金属网上, 然后置静水中进行观测。以一分钟为间隔, 分别记录下分散土粒的数量, 连续10min, 其总和即为10min内完全分散的土粒总数。最后计算土壤的水稳性指数。

4. 3相关水文指标求算

(1) 林冠截留的计算^[70]:

公式为: $I=P-T-S$

式中: I 为林冠截流量 (mm); P 为大气降水 (mm); T 为穿透雨量 (mm); S 为茎流 (mm)。

(2) 枯落物吸持水计算:

枯落物持水量 (t/hm^2) = [枯落物湿重 (kg/m^2) - 枯落物烘干重 (kg/m^2)] $\times 10$;

枯落物持水率 = (枯落物持水量/枯落物干重) $\times 100$;

枯落物吸水速率 ($g/kg \cdot h$) = 枯落物持水量 (g/kg) / 吸水时间 (h)。

(3) 枯落物有效拦蓄量的计算^[55]:

$W = (0.85R_m - R_o) \times M$

式中: W 为有效拦蓄量 (t/hm^2); R_m 为最大持水率 (%); R_o —平均自然含水率 (%); M 为枯落物储量 (t/hm^2)。

(4) 地表径流的计算:

地表径流量 (地表径流深mm) = 地表径流总量 (m^3) / 径流小区面积 (m^2) $\times 1000$; 径流系数 = 地表径流量 (mm) / 同期降雨量 (mm)。

4. 4树种拉丁学名

麻栎: (*Quercus acutissima* Carruth)

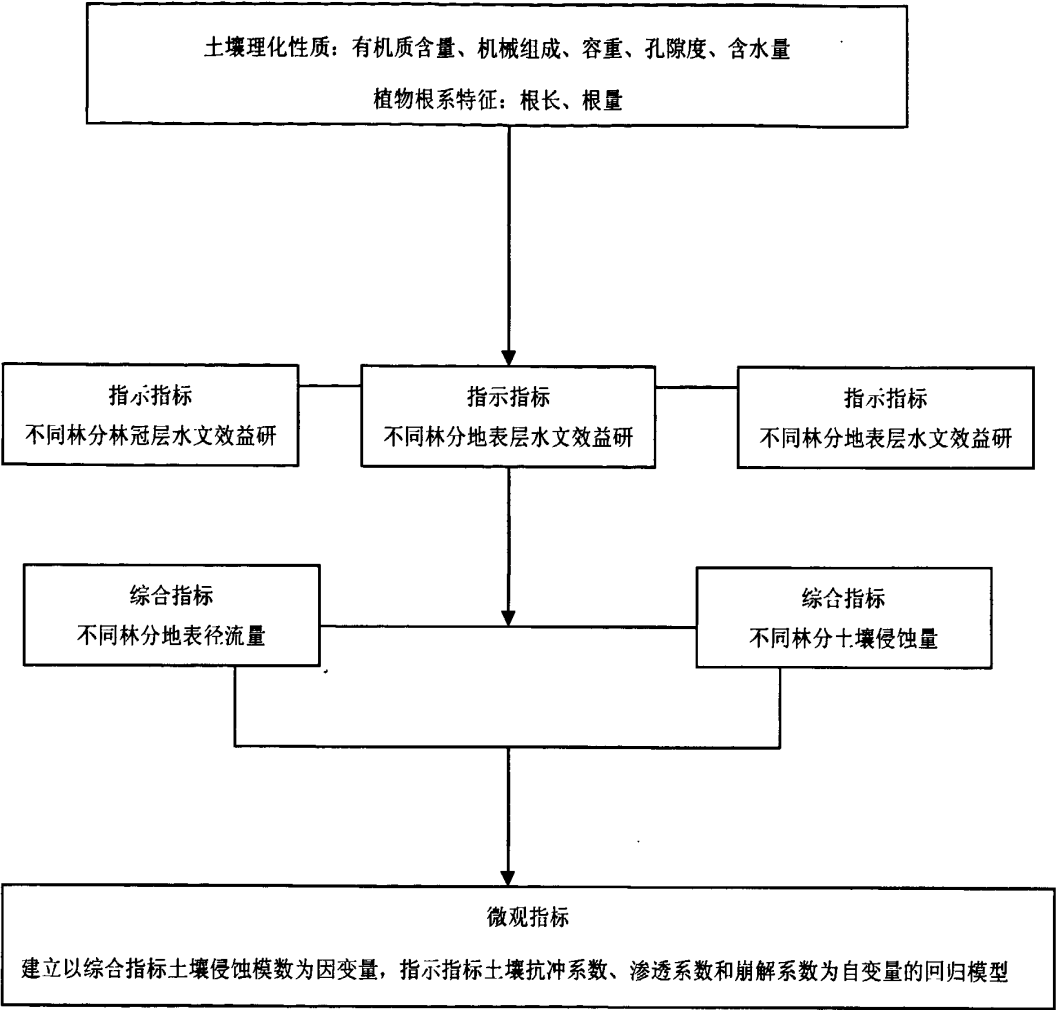
马尾松: (*Pinus massoniana*)

湿地松: (*Pinus elliottii* Engelm)

4. 5数据处理

实验数据处理采用Excel、SPSS、DPS等软件进行处理与分析。

4. 6技术路线



5 结果与分析

5.1不同林地类型林冠层水文特性

大气降水通过林冠时产生重新分配，一部分形成茎流，另一部分形成穿透雨（包括穿过林冠和不穿过林冠而直接进入林地的），还有一部分被林冠截留。其中干流和透流为降水到达林地的两个分量，可进一步分为地被物吸持量以及入渗量和地表径流量等。

5.1.1研究区大气降雨特征

表3 观测时段大气降雨分配
Tab.3 Distribution amount of precipitation in the experimental period

时间	降雨量（mm）	比率%	时间	降雨量（mm）	比率%
2009-01	18.4	2.2%	2009-07	84.8	10.22%
2009-02	63.3	7.63%	2009-08	48.15	5.80%
2009-03	59.9	7.22%	2009-09	87.45	10.54%
2009-04	22.8	2.75%	2009-10	13.2	1.59%
2009-05	81.6	9.83%	2009-11	127.6	15.37%
2009-06	174	20.96%	2009-12	48.8	5.88%
合计	420	50.60%	合计	410	49.40%

研究时段内各月份降雨量分配如表3所示。根据2009年近12个月的观测资料，共有69场降雨，该系统12个月的降雨总量为830mm，其中6月份降雨量最多，为174mm，占总降雨量的20.96%；雨量最小是在1月份仅为18.4mm；降雨主要集中在5、6、7、9、11月份，占全年降水量的66.92%。

5.1.2对大气降雨的再分配

表4 不同林分降雨量再分配
Tab.4 The redistribution of Precipitation in the different stands

林分	降雨量（mm）	林冠截留（mm）	林内雨量（mm）	截留率I/P (%)
马尾松(14a)	830	51.28	778.72	6.20%
松栎混交林(5a)	830	115.01	714.99	13.90%
天然林	830	526.15	303.85	63.40%
麻栎(1a)	830	2.96	827.04	0.36%
麻栎(2a)	830	8.08	821.92	0.97%
麻栎(3a)	830	36.67	793.33	4.40%
麻栎(4a)	830	63.14	766.86	7.60%
麻栎(5a)	830	73.79	756.21	8.90%
麻栎(6a)	830	104.47	725.53	12.60%
麻栎(7a)	830	111.37	718.63	13.40%
麻栎(8a)	830	242.23	587.77	29.20%

表4为林分12个月总林冠截留和林内雨量。由表可知：天然林截留量最大，庞大的枝叶完全伸展，可在短时降雨中承接较大雨量；成年麻栎（6a、7a、8a）截留降雨优势比较显著。1a~5a麻栎随着林龄的增长，其林冠截留量亦呈上升趋势；5a混交林截留量大于14a马尾松林仅次于天然林、8a麻栎，分别为天然林、8a麻栎截留量的21.92%、47.60%；林内雨量最大的是1a麻栎，6a、7a、8a麻栎林内雨量分别为1年生麻栎的87.73%、86.89%、71.07%；11种林分最大截留量与最小截留量比值为177，最大林内雨量与最小林内雨的比值为2.7；8种麻栎林分的最大截留量与最小截留量的比值为82，最大林内雨量与最小林内雨量的比值为1.4。综上所述，麻栎林冠截留量与林分的郁闭状况关系紧密，随着林分郁闭度增加林冠截留作用增强，林内雨量相应减少。5年生的混交林在截留降雨中效果显著，分别大于1a、2a、3a、4a、5a、6a、7a麻栎和14a马尾松林，所以在某种程度上混交林比纯林更能涵养水源。

5. 1. 3五种林分水文分量的动态格局

选取8a麻栎、马尾松、天然林、混交林4种典型林分作为该研究系统内降雨各水文分量的季节动态格局加以比较，如表5所示。

表5 五种林分各季度水文分量
Tab.5 Seasonal distribution of rainfall in 5 different stands

季度	林分类型	降雨量 (mm)	截留量 (mm)	林内雨量 (mm)	截留率 (%)
春季	8a麻栎	164.3	66.7	97.6	40.60%
	马尾松	164.3	14.1	150.2	8.60%
	天然林	164.3	144.9	19.4	88.10%
	松栎混交林	164.3	31.7	132.6	19.30%
夏季	8a麻栎	306.95	77.2	229.75	25.20%
	马尾松	306.95	16.3	290.65	5.30%
	天然林	306.95	167.8	139.15	54.70%
	松栎混交林	306.95	36.7	270.25	11.90%
秋季	8a麻栎	228.25	49.1	179.15	21.50%
	马尾松	228.25	10.4	217.85	4.60%
	天然林	228.25	106.7	121.55	46.70%
	松栎混交林	228.25	23.4	204.85	10.30%
冬季	8a麻栎	130.5	49.1	81.4	37.60%
	马尾松	130.5	10.4	120.1	7.90%
	天然林	130.5	106.7	23.8	81.70%
	松栎混交林	130.5	23.4	107.1	17.90%

由上表可以看出：①不同季节林外降水变化较大，春、冬两季降水量较小，夏秋两季降水较多，所以雨量较大。其中冬季最小，为130.5mm，夏季最大，为306.95mm；②春冬两季雨水较少，所以五种林分截留率较高，夏秋两季林内雨量较大，因为夏秋两季雨水较多，且极易出现强暴雨和持续降雨，当林冠截留达到饱和后，截留的降水所占的比例较小，新形成的雨滴重新汇集为雨滴从林冠中降落，增加了林内雨量。

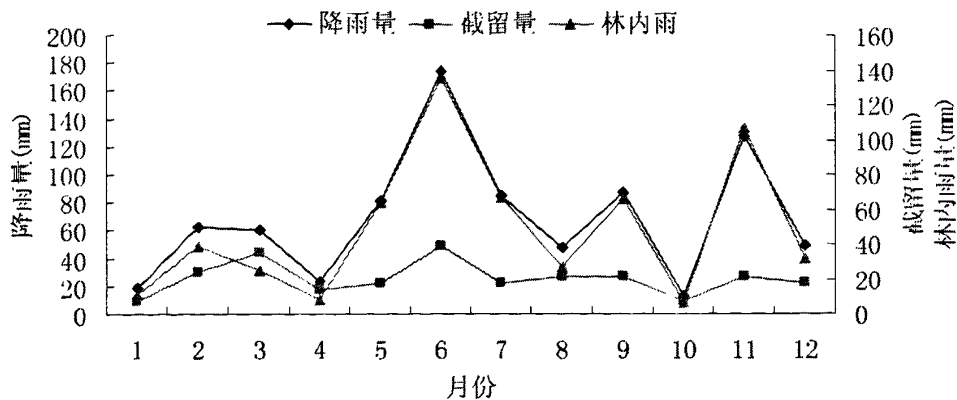


图1 8a麻栎降雨量的分配
Fig.1 The rainfall distribution of 8a *Quercus acutissima* Carr forest

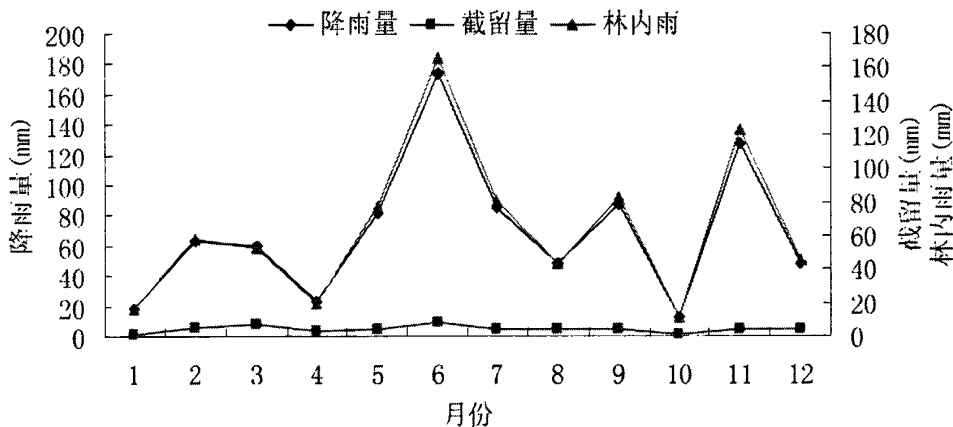


图2 马尾松林降雨量的分配
Fig.2 The rainfall distribution of *Pinus massoniana* forest

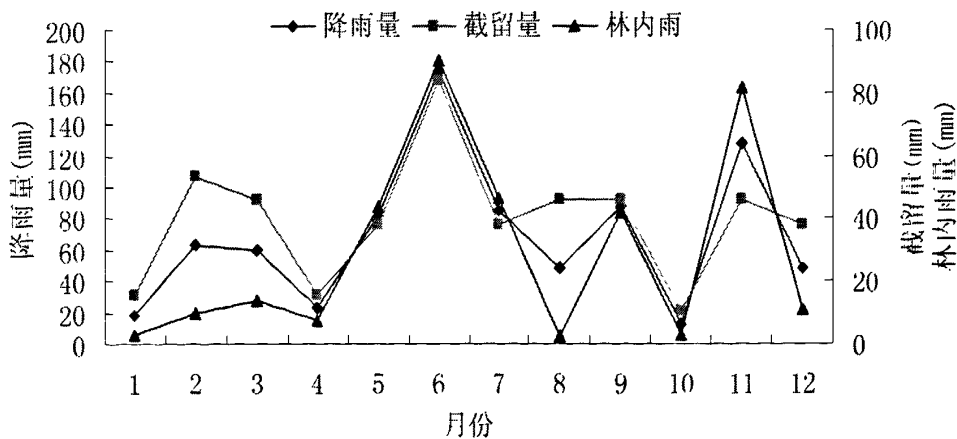


图3 天然林降雨量的分配
Fig.3 The rainfall distribution of the natural forest

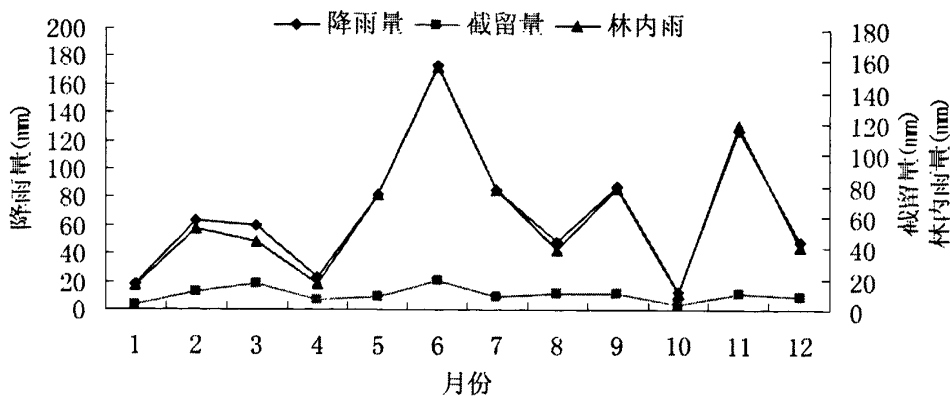


图4 松栎混交林降雨量的分配

Fig.4 The rainfall distribution of the mixed forest of *Pinus massoniana* and *Quercus acutissima* Carr

图1~图4为四种林分降雨量、截留量和林内雨量三个变量的相互对照值。从图1~4中可以看出，在将近一年的观测期内，月降水量最大的是2009年的6月份，为174mm，09年的11月份的深秋雨比较充足，仅次于6月雨量，最小的是1月份只有18.4mm，与最大降雨月份差值为155.6mm；降雨截留率最高值出现在8月份的天然林为95%、4月份的8a麻栎为61.6%、4月份的混交林为29.3%、3月份的马尾松林为12.4%。综上所述，麻栎纯林在截留降雨中优于当地其它树种。

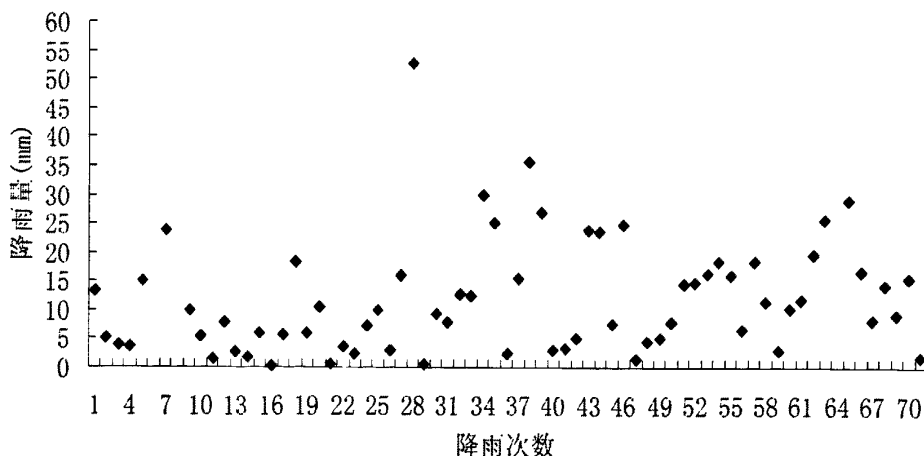


图5 年降雨分配情况

Fig.5 The distribution of annual rainfall

图5为观测期内一年降雨分布图，最大一次降雨最为52.8mm，最小为0.3mm，大部分雨量集中在20mm范围内，其中69场降雨就有56场雨量小于20mm，总雨量为484.7mm，占总雨量的58.4%。

对69次降雨观测资料进行统计分析的结果表明：所选四种典型林分水源涵养林冠截留量(I)与降雨量(P)之间呈对数相关关系，林内雨量($T+S$)与降雨量(P)

之间呈线性关系。

8a麻栎林内雨量与降雨量、林冠截留量与降雨量之间的回归关系如下:

$$P=0.8546(T+S)-10.124, R=0.99 (n=69); I=9.1418\ln(P)-16.339, R=0.75 (n=69)。$$

马尾松林内雨量与降雨量、林冠截留量与降雨量之间的回归关系如下:

$$P=0.9692(T+S)-2.1466, R=0.99 (n=69); I=1.9339\ln(P)-3.4524, R=0.75 (n=69)。$$

天然林内雨量与降雨量、林冠截留量与降雨量之间的回归关系如下:

$$P=0.6318(T+S)-14.213, R=0.95 (n=69); I=22.437\ln(P)-49.961, R=0.88 (n=69)。$$

松栎混交林内雨量与降雨量、林冠截留量与降雨量之间的回归关系如下:

$$P=0.9309(T+S)-4.8052, R=0.99 (n=69); I=4.3418\ln(P)-7.7633, R=0.75 (n=69)。$$

上述四个回归方程回归效果理想,说明林内雨量、林冠截留量受到降雨量的影响,降雨量大则林内雨量大,而林冠截留量与降雨量之间的回归系数小于林内雨量与降雨量的相关系数,表明降雨量增大到一定值林冠截留量不会再增大。

综上所述,林冠截留量除了受林冠本身特性影响外,还与降雨特性及一些气象要素有关^[47],因此不同的雨量级(降雨持续时间、一次降雨强度、一次降雨量等),林冠的截留量与降水量的曲线也发生变化。

5.2不同林地类型地表枯落物水文特性研究

枯落物是森林生态系统的重要组成部分,除截留降水外,更有吸收和阻延地表径流,抑制土壤蒸发,改善土壤性质,增加降水下渗,防止土壤溅蚀,增强土壤抗冲能力等功能,在保持水土、涵养水源作用中发挥主导作用^[48]。

5.2.1不同林分枯落物储量

不同森林类型由于树种组成、结构、林龄、密度等因子不同,导致单位面积枯落物贮量存在较大的差异。由表6可知,不同林分枯落物厚度依次为:≥60mm以上林分有8a麻栎林、7a麻栎林,50-60mm林分有6a麻栎林、5a麻栎林、4a麻栎林、5a松栎混交林、14a马尾松林,40-50mm林分有天然林,30mm以下有3a麻栎林,而1-2a麻栎林枯落物积累约为0mm。半分解层厚度大于天然林有8a麻栎林、7a麻栎林、6a麻栎林、14a马尾松林、5a松栎混交林、5a麻栎林、4a麻栎林。枯落物储量依次为8a麻栎林>14a马尾松林>7a麻栎林>天然林>松栎混交林>6a麻栎林>5a麻栎林>4a麻栎林>3a麻栎林>1-2a麻栎林。半分解层蓄积量高于天然林有8a麻栎林、25a国外松林、14a马尾松林,7a麻栎林与其相当。

阔叶树枯落物明显高于针叶树,尤其是硬阔叶树麻栎,凋落物多、半分解层厚。从短周期麻栎薪炭林生长过程来看,造林前三年枯落物较少,第四年枯落物有明显增加,并形成半分解层,其水源涵养、水土保持能力有较大幅度提高。针阔混交林,林内凋落物增加明显,高于同龄针、阔叶树。

表6 不同林分枯落物蓄积量
Tab.6 Stocks capacity of litter in diferent stands

林分 类型	总厚度 (mm)	未分解层厚 度 mm	半分解层厚 度 mm	未分解层蓄 积量 t/hm ²	半分解层蓄 积量 t/hm ²	枯落物 蓄积量 t/hm ²
马尾松(14a)	50	30	20	4.95	10.56	15.51
松栎混交(5a)	51	33	18	4.20	5.50	9.70
天然林	40	28	12	3.82	8.63	12.45
麻栎(1a)	0	0	0	0.07	0	0.07
麻栎(2a)	0	0	0	0.07	0	0.07
麻栎(3a)	10	10	0	1.39	0	1.39
麻栎(4a)	53	37	16	3.72	2.71	6.43
麻栎(5a)	57	42	15	3.50	3.50	7.00
麻栎(6a)	57	37	20	4.94	4.70	9.64
麻栎(7a)	63	40	23	4.61	8.61	13.22
麻栎(8a)	62	35	27	4.93	16.60	21.53

5. 2. 2枯落物水文持性

表7 不同林分枯落物持水量和持水率
Tab.7 Water-holding capacity and specific retentionof litter in diferent stands

林分 类型	最大持水量 (t/hm ²)			最大持水率 (%)		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
马尾松(14a)	7.38	19.32	26.70	149	183	166
松栎混交(5a)	7.35	13.86	21.21	175	252	214
天然林	12.03	19.42	31.45	315	225	270
麻栎(1a)	0.17	0	0.17	249	0	249
麻栎(2a)	0.17	0	0.17	249	0	249
麻栎(3a)	3.46	0	3.46	249	0	249
麻栎(4a)	9.26	6.02	15.28	249	220	236
麻栎(5a)	8.71	7.77	16.48	249	220	236
麻栎(6a)	12.30	10.43	22.73	249	220	236
麻栎(7a)	11.48	19.11	30.59	249	220	236
麻栎(8a)	12.27	36.85	49.12	249	220	236

由表7、表8、表9可知，几种林分枯落物的持水量有较大差异，天然林枯落物未分解层干重24h持水量最大3.150g/kg，麻栎2.490g/kg，松栎混交1.750g/kg，马尾松1.490g/kg，最大持水率依次为：天然林>麻栎林>松栎混交林>马尾松林；枯落物半分解层24h持水量松栎混交林2.523g/kg，天然林2.250g/kg，麻栎林2.220g/kg，马尾松林1.830g/kg，最大持水率依次为松栎混交林>阔叶树林>针叶树林，阔叶树枯落物未分解最大持水率高于半分解层，针叶树枯落物半分解层最大持水率高于未分解层。从林分最大持水量来看，8a麻栎林最大，为49.12t/hm²，其次为天然林、14a马尾松林；5a松栎混交林最大持水量为21.21t/hm²，高于5a麻栎林。短周期麻栎薪炭林，前三年因林分枯落物储量少持水量也较少，第四年最大持水量提高幅度较大，7a最大持水量接近天然林，更新当年枯落最大持水量仍高于6a麻栎林。

表8 不同林分枯落物未分解层持水量
Tab.8 Water-holding capacity of litter in diferent forest types

林分类型	浸泡时间 (h) /持水量 (g/kg)												
	0.25	0.5	1	2	3	4	6	8	10	12	16	22	24
马尾松	669	889	1020	1150	1240	1320	1350	1380	1410	1430	1460	1490	1490
天然林	1991	2345	2510	2610	2670	2720	2805	2890	2975	3056	3110	3150	3150
松栎混交	850	1053	1336	1600	1660	1690	1704	1715	1723	1730	1740	1750	1750
麻栎	1584	1824	1903	2050	2182	2230	2300	2340	2375	2402	2450	2490	2490

表9 不同林分枯落物半分解层持水量
Tab.9 Water-holding capacity of semi-decomposed litter layer in diferent forest types

林分类型	浸泡时间 (h) /持水量 (g/kg)												
	0.25	0.5	1	2	3	4	6	8	10	12	16	22	24
马尾松	1153	1379	1479	1540	1590	1635	1725	1760	1789	1800	1814	1830	1830
天然林	1333	1420	1540	1640	1720	1790	1880	1950	2020	2080	2200	2250	2250
松栎混交	1546	1670	1730	1820	1900	1970	2100	2220	2340	2450	2523	2523	2523
麻栎	1530	1603	1700	1845	1975	2100	2145	2180	2190	2200	2220	2220	2220

表10 枯落物持水量 (g/kg) 与浸泡时间 (h) 关系

Tab.10 Relationship between water-holding capacity of litter and soaking time			
林分	未分解层方程	未分解层方程	P
马尾松	$y=1005.2993x^{0.1457}$	$y=1435.5689x^{0.0779}$	<0.001
天然林	$y=2419.0517x^{0.0985}$	$y=1529.9795x^{0.1228}$	<0.001
松栎混交	$y=1303.1256x^{0.1059}$	$y=1737.5270x^{0.1225}$	<0.001
麻栎	$y=1916.6259x^{0.0990}$	$y=1760.0123x^{0.0790}$	<0.001

枯落物持水量与浸泡时间具有一定的相关性,由表8、表9可知,最初0.25~0.5h 枯落物持水量迅速增加,而后随着浸泡时间延长虽呈现不断增加的趋势,但增加速度明显放缓,浸泡10h枯落物持水量接近饱和。这一趋势与野外枯落物拦蓄地表径流规律相似,即降雨初期,枯落物因含水率低拦蓄地表径流功能较强,此后随着枯落物含水率的增加,吸持能力逐步降低^[57]。不同林分枯落物吸持过程存在一定差异,针叶树0.25~0.5h持水量及吸持趋势不如阔叶树,尤其是未分解层,可能与针叶和水的亲和力有关。

对0.25~24h不同林分枯落物各层持水量与浸泡时间的关系进行回归分析,拟合方程见表10,经检验差异均达极显著水平。

表11 不同林分枯落物未分解层吸水速率
Tab.11 Water absorption rate of undecomposed litter layer in diferent forest types

林分 类型	浸泡时间 (h) /吸水速率 (g/kg. h)												
	0.25	0.5	1	2	3	4	6	8	10	12	16	22	24
马尾松	2677	878.5	262.2	130	90	80	15	15	15	10	7.5	7.5	0
天然林	7964	1415	330.8	100	60	50	42.5	42.5	42.5	40.5	13.5	10	0
松栎混交	3400	810	565.9	264.5	60	30	6.9	5.6	4	3.5	2.5	2.5	0
麻栎	6334	961.8	158	147	131.5	48.5	35	20	17.5	13.5	12	10	0

表12 不同林分枯落物半分解层吸水速率
Tab. 12 Water absorption rate of semi-decomposed litter layer in diferent forest types

林分 类型	浸泡时间 (h) /吸水速率 (g/kg. h)												
	0.25	0.5	1	2	3	4	6	8	10	12	16	22	24
马尾松	4614	901.3	199.9	61.3	50	45	45	17.5	14.4	5.6	3.6	3.9	0
天然林	5332	348	240	100	80	70	45	35	35	30	30	13	0
松栎混交	6182	498	120	90	80	70	65	60	60	55	18	0	0
麻栎	6120	291.2	194.4	145	129.9	125.1	22.5	17.5	5	5	5	0	0

表13 枯落物吸水速率 (g/kg. h) 与浸泡时间(h) 关系
Tab.13 Relationship between water absorption rate of litter layer and soaking time

林 分	未分解层方程	半分解层方程	P
马尾松	$y=292.8332x^{-1.5865}$	$y=181.7224x^{-2.3328}$	<0.001
天然林	$y=263.4200x^{-2.4587}$	$y=27.1324x^{-3.8091}$	<0.001
松栎混交	$y=306.4919x^{-1.7287}$	$y=42.6600x^{3.5894}$	<0.001
麻栎	$y=150.8526x^{-2.6968}$	$y=15.7784x^{-4.2997}$	<0.001

林下枯落物未分解层、半分解层吸水速率与浸泡时间之间存在明显的相关关系。由表11、表12可知，枯落物浸入水中0.25h吸水速率最大，1h后吸水速率明显减缓，随着浸泡时间延长，几种枯落物吸水速率趋于一致。这主要是因为随着浸泡时间增加，不同种类枯落物接近最大持水量，其持水量增长速率也随之减缓【50】。不同林分枯落物浸水初期存在较大差异，阔叶树吸水能力强，吸水速率明显高于针阔混交林和针叶树。

对4种林分枯落物不同层次吸水速率与浸泡时间的关系采用一元非线性回归模型拟合，方程见表13，经检验差异均达极显著水平。

表14 不同林分枯落物有效拦蓄能力
Tab.14 Interception capacity of litter layer in diferent forest types

林分 类型	枯落物干重 (t/hm ²)		自然含水率 (%)		最大 拦蓄量 (t/hm ²)	有效 拦蓄量 (t/hm ²)	有效 拦蓄深度 (mm)
	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层			
马尾松 (14a)	4.95	10.56	11.6	19.4	24.08	20.07	2.01
松栎混交 (5a)	4.20	5.50	11.8	16.5	19.81	16.63	1.66
天然林	3.82	8.63	19.8	17	29.23	24.51	2.45
麻栎(1a)	0.07	0	8.7		0.17	0.14	0.01
麻栎(2a)	0.07	0	9.4		0.17	0.14	0.01
麻栎(3a)	1.39	0	11.8		3.30	2.78	0.28
麻栎(4a)	3.72	2.71	10.5	11.5	14.58	12.28	1.23
麻栎(5a)	3.50	3.50	8	12.1	15.78	13.31	1.33
麻栎(6a)	4.94	4.70	17.4	22.3	20.83	17.42	1.74
麻栎(7a)	4.61	8.61	9	35.4	27.13	22.54	2.25
麻栎(8a)	4.93	16.60	13	40	41.85	34.48	3.44

由表14可知：不同林分枯落物拦蓄能力不同，其大小与枯落物储量、最大持水量、自然含水率有关。从有效拦蓄量、有效拦蓄深度来看，麻栎(8a)>天然林>麻栎(7a)>马尾松(14a)>麻栎(6a)>松栎混交(5a)>麻栎(5a)>麻栎(4a)>麻栎(3a)>麻栎(2a)>麻栎(1a)，阔叶树、针阔混交林拦蓄能力明显高于针叶树，5年生针阔混交林拦蓄量略高于阔叶树。在调查林分中，8年生麻栎林拦蓄能力最强，有效拦蓄量达34.48t/hm²，相当于拦蓄3.44mm降雨。从短周期麻栎薪炭林培育过程看，造林后前三年林分枯落物储量少，拦蓄能力低，每公顷有效拦蓄量不足3t，有效拦蓄深度不足0.3mm，尤其是第一年；4a后麻栎林拦蓄量有大幅度提高，每公顷有效拦蓄量超过12t，有效拦蓄深度超1mm，7a生麻栎林有效拦蓄量已超过14a生马尾松林，8a生麻栎林有效拦蓄能力最大，超过天然林，可见短周期麻栎薪炭林具有良好的水源涵养能力，可有效减少水土流失。

5.3不同林地类型根系土壤层研究

从不同林地根系分布特征、土壤抗冲性研究、土壤渗透性研究、土壤抗蚀性研究四个方面综合分析研究区内特定土壤的侵蚀环境。

5.3.1不同林地根系剖面分布特征研究

测定结果表15为根系的长度值和百分比，表16为根系生物量及所占百分比。

表15 不同植被类型根系长度值
Tab.15 The root length of different vegetation types

植被类型	土层深度 (cm)	根径分类 (mm) / 长度 (cm) / 占百分比								小计
		<0.5		0.5~1.0		1.0~2.0		2.0~5.0		
1a麻栎	0~20	121.6	82%	0	0%	27.5	28%	0	0%	149.1
	20~50	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
2a麻栎	0~20	280.23	57.6%	77.35	15.9%	64.3	13.2%	64.9	13.3%	486.78
	20~50	122.3	58%	27.7	13.1%	25.8	12.2%	34.9	16.6%	210.7
3a麻栎	0~20	171.65	64.1%	84.45	31.6%	5.5	2.1%	6.05	2.3%	267.65
	20~50	206	55.6%	62.35	16.8%	54.55	14.7%	47.8	12.9%	370.7
4a麻栎	0~20	270	33.6%	269.55	33.5%	166.15	20.7%	98.46	12.2%	804.16
	20~50	270.91	36.3%	143.45	19.2%	209.5	28.1%	122.35	16.4%	746.21
5a麻栎	0~20	917.96	51.1%	429.1	23.9%	311.5	17.3%	138.05	7.7%	1796.61
	20~50	190.52	62.1%	12.9	4.2%	56.4	18.4%	46.8	15.3%	306.62
6a麻栎	0~20	963.81	41.7%	595.7	25.8%	419.95	18.2%	329.95	14.3%	2309.41
	20~50	298.66	34.7%	249.3	28.9%	209.1	24.3%	104	12.1%	861.06
7a麻栎	0~20	1463.2	61.5%	464.3	19.5%	356.7	15%	93.15	3.9%	2377.35
	20~50	188.8	53.8%	96.35	27.5%	44	12.5%	21.75	6.2%	350.9
8a麻栎	0~20	3042.4	65.4%	843.85	18.1%	551.95	11.9%	215.5	4.6%	4653.7
	20~50	567.2	47.4%	286.65	23.9%	191.8	16%	151.3	12.7%	1196.95
坡耕地	0~20	409.2	78.6%	0	0%	92.2	17.7%	19.1	3.7%	520.5
	20~50	68.2	54.3%	57.3	45.7%	0	0%	0	0%	125.5
马尾松林	0~20	993.2	56.5%	294.7	16.8%	315.9	17.9%	155.3	8.8%	1759.1
	20~50	187.9	41.7%	102.2	22.7%	85.2	18.8%	75.7	16.8%	451
松栎混交林	0~20	1177.95	59.1%	345.3	17.3%	335.35	16.9%	133.65	6.7%	1992.25
	20~50	88.9	49.8%	13.3	7.5%	41.05	22.9%	35.4	19.8%	178.65

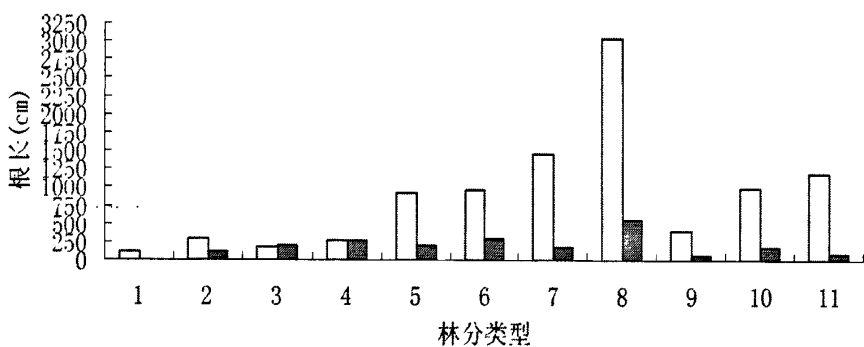
表16 不同植被类型根系重量值
Tab.16 The root weight of different vegetation types

植被类型	土层厚度 (cm)	根径分类 (mm) / 重量 (g) / 占百分比								小计
		<0.5		0.5~1.0		1.0~2.0		2.0~5.0		
1a麻栎	0~20	0.1	40%	0	0%	0.15	60%	0	0%	0.25
	20~50	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
2a麻栎	0~20	0.21	9.17%	0.13	5.68%	0.33	14.41%	1.62	70.74%	2.29
	20~50	0.06	2.52%	0.06	2.52%	0.8	33.61%	1.46	61.34%	2.38
3a麻栎	0~20	0.13	22.8%	0.2	35.09%	0.15	26.32%	0.09	15.79%	0.57
	20~50	0.16	5.28%	0.14	4.62%	0.28	9.24%	2.45	80.86%	3.03
4a麻栎	0~20	0.48	6.44%	0.64	8.59%	0.88	11.81%	5.45	73.15%	7.45
	20~50	0.48	9.36%	0.3	5.85%	1.2	23.39%	3.15	61.40%	5.13
5a麻栎	0~20	2.226	16.91%	1.789	13.59%	3.545	26.94%	5.601	42.56%	13.161
	20~50	0.462	15.74%	0.062	2.11%	0.512	17.44%	1.899	64.70%	2.935
6a麻栎	0~20	2.13	16.76%	2.31	18.17%	2.79	21.95%	5.48	43.12%	12.71
	20~50	0.66	10.28%	0.79	12.31%	1.54	23.99%	3.43	53.43%	6.42
7a麻栎	0~20	2	17.68%	1.93	17.06%	3.21	28.38%	4.17	36.87%	11.31
	20~50	0.26	19.85%	0.19	14.50%	0.36	27.48%	0.5	38.17%	1.31
8a麻栎	0~20	6.084	26.93%	3.054	13.52%	4.777	21.14%	8.68	38.42%	22.595
	20~50	1.135	13.40%	1.034	12.21%	1.722	20.33%	4.578	54.06%	8.469
坡耕地	0~20	0.225	52.94%	0	0%	0	0%	0.2	47.06%	0.425
	20~50	0.038	33.63%	0.075	66.37%	0	0%	0	0%	0.113
马尾松林	0~20	1.159	10.33%	1.083	9.66%	4.193	37.39%	4.78	42.62%	11.215
	20~50	0.219	4.13%	0.3	5.66%	1.71	32.24%	3.075	57.98%	5.304
松栎混交林	0~20	1.847	21.24%	0.881	10.13%	2.264	26.04%	3.703	42.59%	8.695
	20~50	0.139	6.61%	0.055	2.62%	0.459	21.83%	1.45	68.95%	2.103

由上表可知，不同植被根系总长度排列顺序为：8a麻栎>6a麻栎>7a麻栎>马尾松林>松栎混交林>5a麻栎>4a麻栎>2a麻栎>坡耕地>3a麻栎>1a麻栎；从土壤的坡面看，根系主要分布在0~20cm厚度的表土层内，无论是总长度还是质量值所占比率均较大，虽然不同树种的根系分布深浅不一，但总的趋势是细根生物量随土层深度的增加而减少，细根长度也呈现相同的趋势；0~20cm土层内根系总长度占全部根系长度的77%，0~20cm土层内干物质质量占总根质量的66%；八个麻栎林分随着林龄的增长，不同麻栎林分根系生物量和长度逐级增长，符合植物生长的规律。

5.3.2不同径级根系分布特征

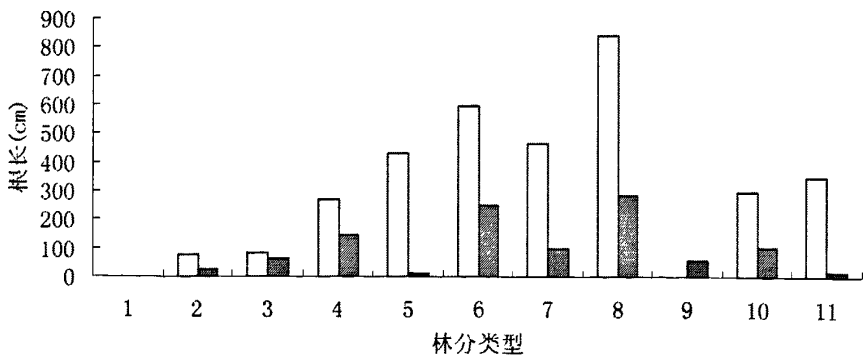
比较各样地不同植被根系长度和质量垂直分布特征，现将表15中各样地植被根系按<0.5mm、0.5~1.0mm、1.0~2.0mm、2.0~5.0mm的根径做图详细比较，如图下：



□ 0-20cm土层根长 (cm) ■ 20-50cm土层根长 (cm)

图7 根径<0.5mm根系长度和质量垂直分布特征

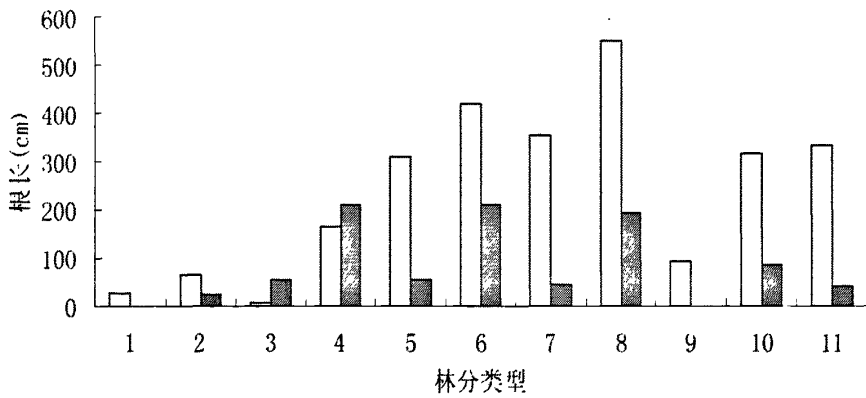
Fig.7 Vertical distribution character of root length and quality less than 0.5 mm in diameter (1.1a麻栎2. 2a麻栎3. 3a麻栎4. 4a麻栎5. 5a麻栎6. 6a麻栎7. 7a麻栎8. 8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)



□ 0-20cm土层根长 (cm) ■ 20-50cm土层根长 (cm)

图8 根径0.5~1.0mm根系长度垂直分布特征

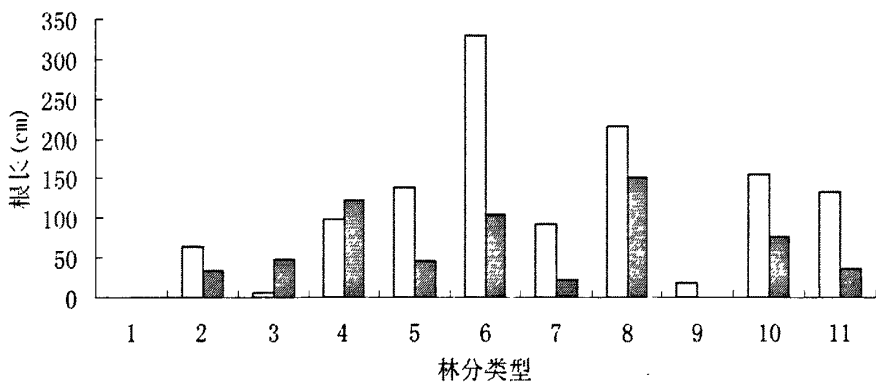
Fig.8 Vertical distribution character of root length between 0.5 mm to 1 mm in diameter (1.1a麻栎2. 2a麻栎3. 3a麻栎4. 4a麻栎5. 5a麻栎6. 6a麻栎7. 7a麻栎8. 8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)



□ 0-20cm 土层根长 (cm) ■ 20-50cm 土层根长 (cm)

图9 根径1.0~2.0mm根系长度垂直分布特征

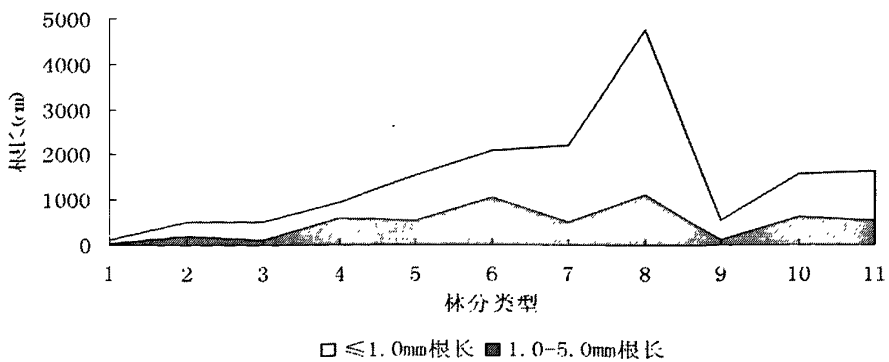
Fig.9 Vertical distribution character of root length between 1.0 mm to 2 mm in diameter
(1.1a麻栎2.2a麻栎3.3a麻栎4.4a麻栎5.5a麻栎6.6a麻栎7.7a麻栎8.8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)



□ 0-20cm 土层根长 (cm) ■ 20-50cm 土层根长 (cm)

图10 根径2.0~5.0mm根系长度垂直分布特征

Fig.10 Vertical distribution character of root length between 2.0 mm to 5 mm in diameter
(1.1a麻栎2.2a麻栎3.3a麻栎4.4a麻栎5.5a麻栎6.6a麻栎7.7a麻栎8.8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)



□ ≤1.0mm 根长 ■ 1.0-5.0mm 根长

图11 细根径与粗根径根系长度面积图

Fig.11 Compared parameter between thin root and thick root system in diameter
(1.1a麻栎2.2a麻栎3.3a麻栎4.4a麻栎5.5a麻栎6.6a麻栎7.7a麻栎8.8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)

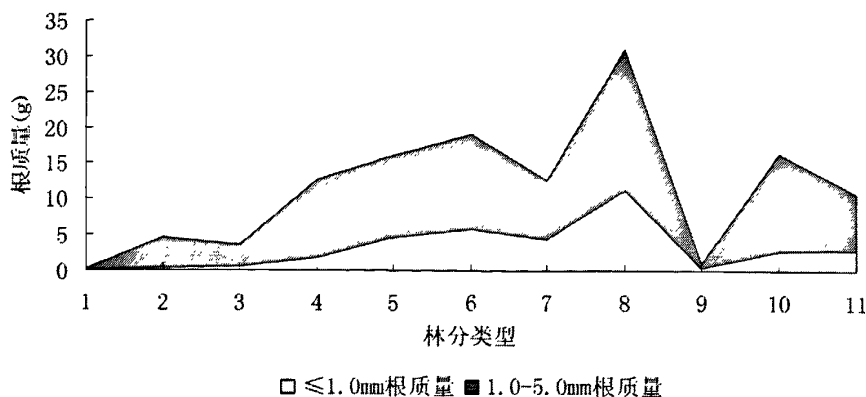


图12 细根径与粗根径根系质量对照值

Fig.12 Compared parameter between thin root and thick root system in quality

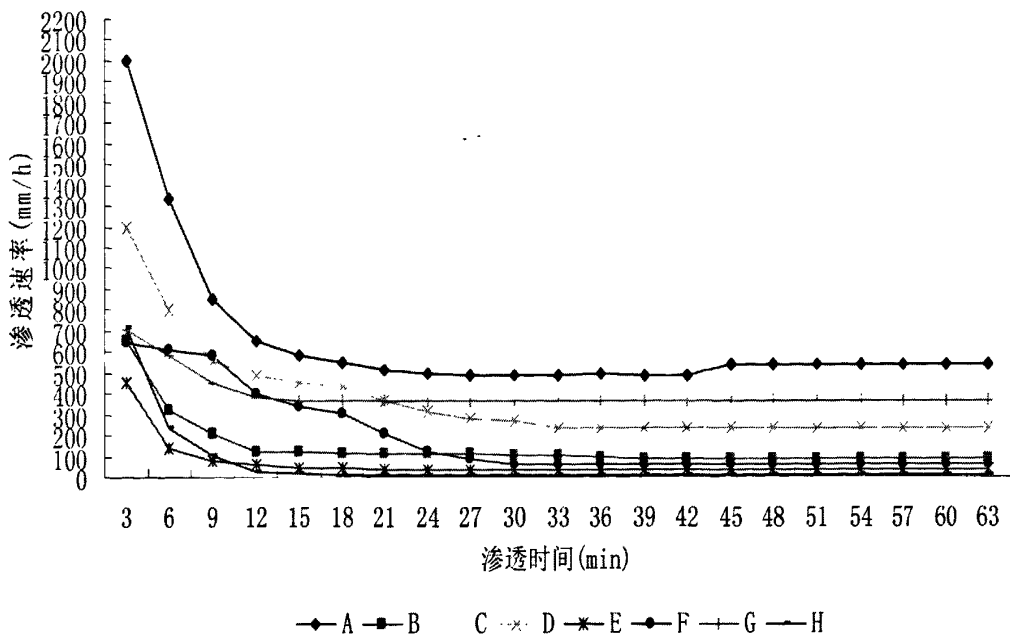
(1.1a麻栎2. 2a麻栎3. 3a麻栎4. 4a麻栎5. 5a麻栎6. 6a麻栎7. 7a麻栎8. 8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)

由图7~10得出:1a~8a麻栎根系按<0.5mm、0.5~1.0mm、1.0~2.0mm、2.0~5.0mm四个径级比较:①在0~20cm的表土层,随着麻栎林龄的增加,其根系长度和生物量也呈现增长趋势,20~50cm深度的土层也表现相同的趋势;②图7中根径<0.5mm的8年生麻栎,其根长达到最值为3042.4cm,图8、图9次之,图10中2.0~5.0mm根径长度最小,其值为215.5cm,二者比值达到14:1。综上所述,高林龄麻栎根系长度、根系质量大于低林龄麻栎。③在坡耕地、马尾松林和松栎混交林中,松栎混交林表土层根系最长,为1177.95cm,坡耕地最短,仅为409.2cm,由于坡耕地长期处于闲置状态,其根系分布无论是长度还是深度上分布都不均匀,符合基本规律;④从坡耕地、马尾松以及混交林这三块样地植被根系的长度和垂直分布特征,可以看出,混交林最能改变土壤的物理性状,也比较容易生成根系土壤网络体;⑤图11、图12分别是细根长度和粗根长度以及质量的对照值。图11所示,根径为≤1.0mm根系总长度与1.0mm~5.0mm长度的比值达到3:1,而质量比值为1:3。可见根系主要分布在表层,而粗根系虽然总长度较小而生物量所占比较大。

5.3.3不同林地类型土壤渗透性研究

入渗分为渗吸和渗透两个阶段,与降水地表径流、表土结构、容重和土壤含水量等因素密切相关^[58]。

本研究引入8种类型样地,在研究土壤入渗时,采用的4个指标是初渗率、平均渗透率、稳渗率和每秒钟渗透量。入渗规律见图13。



(A: 松栎混交; B: 马尾松; C: 1a麻栎; D: 3a麻栎; E: 4a麻栎; F: 5a麻栎; G: 天然林; H: 坡耕地)

图13 8种样地土壤入渗过程
Fig.13 The process of soil infiltration of 8 plots

通过分析不同林分类型入渗过程曲线8块样地的土壤入渗速率排列为:松栎混交林>3a麻栎>5a麻栎>坡耕地>天然林>马尾松林>1a麻栎林>4a麻栎。各样地实测渗透速率结果表明:①林地由于下垫面性质与盖度、坡度、坡向以及土地利用方式的不同,土壤的渗透性有很大的差异。②坡耕地初渗期速率强于天然林、马尾松林、3a麻栎林,是由于坡耕地前期种植花生、玉米,这些须根系发达的植物,根系腐烂后,在土体里形成大孔隙。因此,土壤中的大孔隙结构对土壤入渗性能产生巨大的作用。而后,渗透速率急剧下滑,是由于土壤在渗透过程中水分很快达到饱和值,土地长期处于闲置状况,土壤团聚体含量较低,还有结皮层等因素的影响,即使腐烂的根系也没有根本上改变土壤的渗透性能。③在有林地,由于林冠,枯枝落叶层对大气降水的拦截作用,使得达到地表的雨水降低和延缓了雨量过程,从而延缓了从初渗到稳渗的梯度,有利于提高入渗速率,增加累积入渗量^[59]。由图13分析可知,阔叶林入渗性能强于针叶林,是由于阔叶林地表的枯落物蓄积量较好,从而引起土壤物理性状的差异,使得阔叶林地的土壤孔隙大于针叶林地,更有利于水分的入渗。④松栎混交林在本研究中渗透速率最快,由其林地下垫面性质决定。⑤3a麻栎渗透速率强于5a麻栎,是由于3a麻栎林样地在前中期种植花生,吸引蚯蚓等有益土壤生物形成土壤团聚体和大孔隙。⑥马尾松渗透速率大于4a麻栎,主要原因是马尾松林地被植物盖度大,4a地表枯落物残存量较少。可见,枯落物分解后在形成腐殖质或非腐殖质的过程中,对土壤性状的改善,形成微团聚体,在矿质土壤形成大孔隙中作用积极。

表17是8种样地渗透参数。本研究将通常采用的渗透总量指标换算成每秒钟土壤的渗透量,则更能反映研究地的渗透性状和土壤特性。从每秒钟渗透量去分析各样地,坡耕地渗透速率最小,其次是1a麻栎林,是符合理论实际的。其他样地由于植被类型、树种组成、群落结构、生态环境以及枯落物的分解程度和形状不同而有差异^[60]。按每秒钟渗透量指标,8块样地渗透速率排列为:松栎混交林>天然林>5a麻栎>3a麻栎>4a麻栎>马尾松林>1a麻栎林>坡耕地,与稳渗率和平均渗透率这两个指标情况一致,而初渗率不同是由各种因素的综合作用所致。

表17 8种样地土壤渗透特性
Tab.17 Soil infiltration property of 8 sample plots

植被类型	初渗率(mm/h)	稳渗率(mm/h)	平均渗透率(mm/h)	每秒钟渗透量 (ml/s.m ²)
松栎混交林(5年)	1800	540	648	11.3169
马尾松林(14年)	648	108	144	2.1623
1a麻栎林	468	36	72	0.8304
3a麻栎林	1080	252	396	6.3577
4a麻栎林	648	72	252	2.3077
5a麻栎林	900	324	432	7.5461
天然林	684	360	432	7.9234
坡耕地	720	15	72	0.3229

便于比较所选样地土壤入渗能力的强弱,按土壤每秒钟每平米渗透速率的大小,将8种样地入渗能力按等级分类。有林地划分为阔叶林和针叶林进行对比,坡耕地单列为一类,见表18。阔叶林土壤渗透速率强于针叶林,主要是因为枯枝落叶层较厚,有机质含量丰富,根系发达,土壤通透性好等因素的综合作用,总的来说,8种样地之间的渗透能力各有差异,但有林地渗透性能均强于坡耕地。

表18 8种样地土壤渗透能力等级
Tab.18 Soil infiltration grade of 8 sample plots

类别 Grade	样地类型 Forest type	渗透能力 Infiltration capacity
第一类 First	松栎混交林	极强 Very strong
第二类 Second	5a麻栎、天然林、3a麻栎	强 Strong
第三类 Third	马尾松林、4a麻栎	较强 Good
第四类 Fourth	1a麻栎林、坡耕地	弱 Poor

5.3.4林地特征与土壤入渗的关系

枯枝落叶层的存在以及分解转化是林地维持高入渗能力的重要原因之一^[61]。由表19可知,郁闭度、林龄和枯落物储量不同其水容量不同。①有枯枝落叶层的林分的土壤入渗速率强于坡耕地入渗速率。枯枝落叶腐烂分解后,形成微团聚体,改善土壤的性状,使土壤变得疏松透水,增加林地的土壤入渗量;②高林

龄的林分土壤渗透速率大于低林龄的林分土壤渗透速率，如5a麻栎强于3a麻栎、4a麻栎和萌发林土壤入渗速率，天然林土壤渗透速率强于马尾松林。

表19 8种样地基本状况
Tab.19 Basic conditions of 8 plots

林分类型	渗透量 (ml/s.m ²)	林龄	郁闭度	枯落物储量 (t/hm ²)			
				厚度 (mm)	半分解	未分解	水容量%
松栎混交林	11.3169	5	0.7	51.6	5.5	4.01	2.52
马尾松林	2.1623	14	0.6	50	10.558	4.95	1.74
麻栎林	0.8304	1	0	0	0	0	0
麻栎林	6.3577	3	0.4	0	0	0	0
麻栎林	2.3077	4	0.6	0	0	0	0
麻栎林	7.5461	5	0.8	56.7	3.49	3.5	2.16
天然林	7.9234	30	0.9	40	8.63	3.82	3.26
坡耕地	0.3229	0	0	0	0	0	0

由此可见，林分土壤入渗速率受到林内枯枝落叶蓄积量、林分郁闭度及林龄等因素的影响。枯枝落叶层越厚，土壤结构改善越好，其渗透速率越高；林龄高的林分渗透速率大于林龄低的林分。

5.3.5土壤含水量对渗透性的影响

土壤含水量是作为反映土壤入渗能力的重要指标之一，也是土壤重要物理性状之一。

表20 8种样地土壤含水量与入渗能力的关系
Tab.20 Relationship between water content and soil infiltration ability of 8 sample plots

样地类型	土壤含水量 (%)	渗透量(ml/s.m ²)
松栎混交林	14.30	11.3169
马尾松林	24.60	2.1623
1a麻栎林	27.70	0.8304
3a麻栎林	22.30	6.3577
4a麻栎林	23.90	2.3077
5a麻栎林	16.40	7.5461
天然林	15.30	7.9234
坡耕地	28.00	0.3229

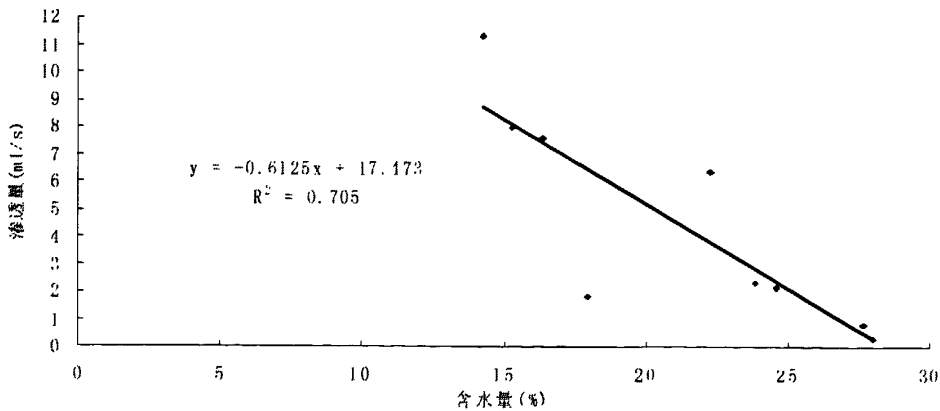


图14 含水量与渗透量的线性关系
Fig.14 The linear relationship between water content and infiltration

由表20可知：坡耕地的土壤含水量最高，其渗透量最低，松栎混交林的土壤含水量最低，而渗透量达到最大值。众所周知，决定入渗量大小的因素为土水势梯度和水力传导度。土壤含水量主要从入渗水流湿润区的平均势梯度方面影响土壤水分入渗能力。土壤含水量越高，水分入渗锋面的土水势越高，则水分入渗锋面与地表之间的平均势梯度越小，因此土壤的入渗通量越小，即土壤入渗能力越低，二者呈线性负相关（见图14），相关系数 $R^2=0.705$ 。所以土壤含水量越高，其入渗能力越低。

5.3.6 土壤的物理性状与入渗的关系

表21 渗透量与各影响因子的相关分析
Tab.21 Correlation analysis between soil infiltration and influential factors

项目	渗透量(ml/s.m ²)	容重(g/cm ³)	孔隙度(%)	含水量(%)
渗透量(ml/s)	1.000			
容重(g/cm ³)	-0.598**	1.000		
孔隙度(%)	0.473**	-0.778**	1.000	
含水量(%)	-0.839**	0.421**	-0.374*	1.000

(注：**表示 $P<0.01$ 水平具有显著相关；*表示 $P<0.05$ 水平具有显著相关)

表21是土壤渗透量与各影响因子的相关分析，每秒钟渗透量和土壤孔隙度呈显著正相关关系， $R=0.473$ ；与含水量因子的相关系数 $R=-0.839$ ，是因为土壤在初始渗透的时候，该因子对初渗速率的影响极大，土壤的水分在某种程度上阻塞了土体的毛管，导致水分下渗过程中速率的暂时延缓；与容重相关系数为 $R=-0.598$ 。

综上所述，土壤理化性质影响渗透性能，且麻栎纯林在改善土壤性状，水源涵养，增加土壤累积入渗量优于当地其它树种。

5.3.7植被根系与土壤抗冲性研究

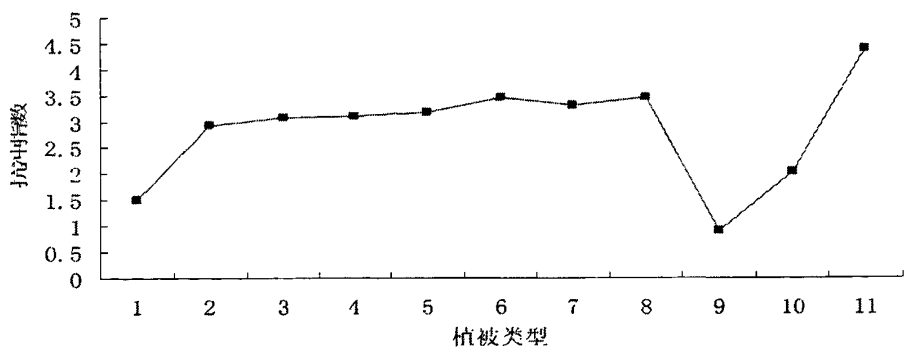


图15 不同林地土壤抗冲指数

Fig.15 The index of soil anti-scourability for different woodlands

(1.1a麻栎2. 2a麻栎3. 3a麻栎4. 4a麻栎5. 5a麻栎6. 6a麻栎7. 7a麻栎8. 8a麻栎9.坡耕地10.马尾松11.松栎混交)

图15是不同林地类型土壤抗冲指数变化曲线。从上图可以看出：①抗冲指数最大为混交林，最小值是坡耕地土壤；②麻栎林地随着林龄的增加其抗冲指数发生变化，1a~8a麻栎逐级增大(6a麻栎除外)，8a麻栎根系长度和生物量最大所以抗冲指数最大，可见植物根系具有显著提高土壤抗冲性的能力^[64]；③林地，由于受到土壤腐殖质含量、水稳性团聚体数量、根系密度以及非毛管孔隙度枯枝落叶和腐殖质层的影响，土壤抗冲性呈现无穷大趋势^[65]，但都强于坡耕地，所以11个林地抗冲指数各有差异，但麻栎根系具有显著提高抗冲性，增强固土功能的作用。

5.3.8土壤抗冲指数与土壤根系的相关分析

分别对11个植被类型以及8个麻栎林分土壤抗冲指数(Y)与标准地内不同径级根长和根质量分别进行多元线性逐步回归分析，得出如下结论：根径<1.0mm根系的根长、根质量与土壤抗冲指数存在明显的线性回归关系。

11个林分回归关系：

$$Y=-110.2191898+62.10665296X_1+0.25190208104X_2,R=0.90;$$

$$Y=-1.3903+1.5573X_3,R=0.47;$$

麻栎林分回归关系：

$$Y=-346.626687+170.07617728X_1+0.25543678398X_2,R=0.93;$$

$$Y=2.642424213+0.10117401546X_3,R=0.60;$$

式中 X_1 、 X_2 分别为样地内植被根径<0.5mm和<0.5~1.0mm根系的根长， X_3 为样地内植被根径<1.0mm根系的根质量。从两回归模型得知：麻栎林分根系长度和根质量与土壤抗冲相关系数大于11个林分与土壤抗冲相关系数，说明麻栎林分的根长和根量对提高土壤抗冲性有其他因素不可比拟的作用。

5.3.9植被根系固土与抗冲性能综合分析

对不同植被类型表层土壤(0~20)不同径级根系(<0.5、0.5~1.0、1.0~2.0、

2.0~5.0mm)根长 ($X_1\sim X_4$)、生物量 ($X_5\sim X_8$) 和土壤抗冲指数 (X_9) 共9项指标进行矩阵分析, 结果见表22, 主成分分析见表23。

表22 抗冲系数与植被根系相关矩阵

Tab.22 Matrix correlation analysis of the root system and coefficient of restitution

	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)	X(9)
X(1)	1	-0.237	0.5534	-0.4814	0.9061	-0.0667	0.0555	-0.1364	0.0788
X(2)	0.8716	1	0.6077	-0.3249	0.2763	0.8066	-0.4796	0.1632	0.3145
X(3)	0.8838	0.9539	1	0.6533	-0.4292	-0.2627	0.5997	-0.1601	-0.044
X(4)	0.5746	0.7855	0.8169	1	0.2714	0.2704	-0.3549	0.3808	0.0725
X(5)	0.9719	0.9088	0.8805	0.638	1	0.111	-0.103	0.272	-0.1164
X(6)	0.8594	0.9616	0.9442	0.7859	0.8969	1	0.4865	-0.2386	-0.2323
X(7)	0.8355	0.8473	0.9222	0.7008	0.812	0.8726	1	0.4758	-0.1575
X(8)	0.7491	0.8259	0.8351	0.788	0.794	0.8111	0.81	1	0.2858
X(9)	0.4115	0.5477	0.4927	0.5089	0.4546	0.4802	0.3525	0.563	1

表23 主成分分析

Tab.23 Principal component analysis

主成分	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)	X(9)	特征根	百分率%	累计百分率%
x(1)	0.3393	-0.2712	0.4306	0.0454	-0.1487	0.4282	-0.1259	0.5346	0.3416	7.15	79.47	79.47
x(2)	0.3637	-0.0155	0.0354	-0.3488	-0.0055	-0.4283	-0.2546	-0.3476	0.6128	0.80	8.95	88.42
x(3)	0.3647	-0.0817	-0.0998	-0.1236	0.2637	0.1921	-0.6877	-0.1088	-0.4939	0.48	5.36	93.78

表22分析为: 根径<0.5mm根长与0.5~1.0mm、1.0~2.0mm根长相关系数达到0.8716、0.8838; 根径0.5~1.0mm与1.0~2.0mm、2.0~5.0mm根长相关系数达到0.9539、0.7855; 根径1.0~2.0mm与2.0~5.0mm根长相关系数达到0.8169。说明根系分布具有很高的相似性, 而且具有相对独立性与特殊性。

表23分析为: 第一主成分贡献率为79.4729%, 第二主成分贡献率为8.9558%, 第三主成分贡献率为5.3609%, 前3个主成分累积贡献率为93.7896%; 在第一主成分中, X_1 、 X_3 、 X_4 、 X_6 、 X_8 为正值, 因而第一主成分反映各植被类型土壤中

根径0.5~5.0mm根长与生物量的综合特征量；在第二主成分中， X_1 、 X_3 、 X_9 为正值， X_2 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 为负值，所以第二主成分反映各植被类型土壤中根径<0.5mm根系的特征值，土壤抗冲指数与0.5~5.0mm根系的根长、根量的关系。

由上述分析可知，根系在土层中的缠绕、串联形成巨大的网络对土壤流失具有削减作用，从宏观上表现为提高土壤的抗冲性。根系对土壤抗冲性的影响主要通过众多的<1.0mm根径的细根、毛根对土壤的固结网络和保护阻挡作用。

5.3.10不同植被类型土壤抗蚀性研究

土壤抗蚀性（土壤的崩解速率）是最能体现土壤受侵蚀规律的指标之一。朱显谟先生将土壤的抗侵蚀能力区分为抗蚀和抗冲两种性能^{〔66〕}。土壤抗蚀性的强弱与土壤内在的物理和化学性质密切相关。

5.3.11土壤理化性质对土壤抗蚀性的影响

本研究选取了该系统内的几种典型林分作为研究对象，图16为各林分水稳系数。

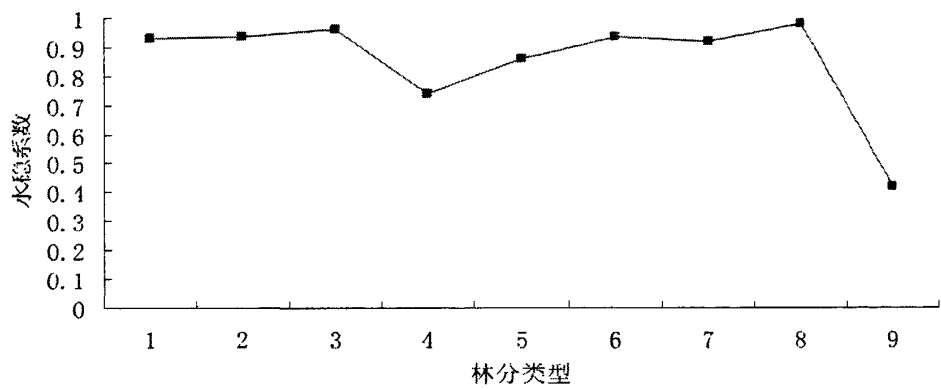


图16 不同林分土壤水稳性指数

Fig.16 The soil water stability index of different forest

(1. 天然林. 2. 马尾松林3. 松栎混交林4. 3a-10度麻栎5. 3a麻栎-15度麻栎6. 3a-20度麻栎7. 5a麻栎8. 8a麻栎9. 坡耕地)

由上图可知：除坡耕地，土壤水稳系数变化不大。在供试的土壤样品试验观测中，坡耕地土壤分散系数较高，崩解速率快，所以水稳系数较小，仅为0.415；8a麻栎林的水稳系数最高，为0.982，其次是松栎混交林为0.961；3a麻栎林分，随着坡度的增加，其水稳系数呈现上升趋势；天然林、马尾松林在抗蚀性的表现上略逊于麻栎成年林和混交林，从而表明麻栎林分在改善土壤的综合性能，增强土壤抗冲、抗蚀能力上表现出较强的优势。

衡量土壤抗蚀性的指标较多，选取水稳性指数(X_1)、 $\leq 1\text{mm}$ 细根长(X_2)、 $\leq 1\text{mm}$ 细根量(X_3)、 $\leq 1\text{mm}$ 细根密度(X_4)、土壤容重(X_5)、有机质含量(X_6)六个指标对土壤抗蚀性的影响因素进行分析。运用SAS软件进行主成分分析，见表24~表25。

表24 主成分贡献率
Tab.24 Contributing rate of the principal component

主成分	特征向量	贡献率	累积贡献率 (%)
1	3. 46097	57. 68283	57. 68283
2	1. 25836	20. 97261	78. 65544
3	0. 72387	12. 06453	90. 71996
4	0. 53157	8. 85956	99. 57952
5	0. 02523	0. 42048	1
6	0	0	1

表25 各成分特征向量
Tab.25 Characteristic vector of the principal component

变量	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6
x (1)	0. 52340	0. 07520	0. 22799	-0. 07566	-0. 40336	-0. 70711
x (2)	0. 52147	0. 08100	0. 20969	-0. 05769	0. 82110	-0. 00000
x (3)	0. 52340	0. 07520	0. 22799	-0. 07566	-0. 40336	0. 70711
x (4)	-0. 23417	-0. 50475	0. 79873	0. 22872	0. 01060	-0. 00000
x (5)	-0. 13760	0. 74224	0. 25592	0. 60379	-0. 00876	0. 00000
x (6)	0. 32621	-0. 42004	-0. 38549	0. 75389	-0. 01432	0. 00000

由表24可以看出前3主成分累积贡献率为90.72%，包含大部分信息。从表25可以看出并可得到研究区土壤抗蚀性的最佳4个指标为：≤1mm细根长(X₁)、≤1mm细根量(X₂)、≤1mm细根密度(X₃)、水稳性系数(X₆)。

5. 3. 12不同植被类型土壤抗蚀性能评价

利用DPS软件处理，由聚类分析可以看出，9种不同林分类型的抗蚀性能可以分为3类，见表26。

表26 9种样地土壤抗蚀能力分类
Tab.28 The soil anti-erosion ability of 9 sample plots

类别 Grade	样地类型 Forest type	渗透能力 Infiltration capacity
第一类 First	天然林、8a麻栎、马尾松、松栎混交林	极强 Very strong
第二类 Second	3a麻栎-10度、3a麻栎-15度、3a麻栎-20度、5a麻栎	较强 Strong
第三类 Third	坡耕地	弱 Poor

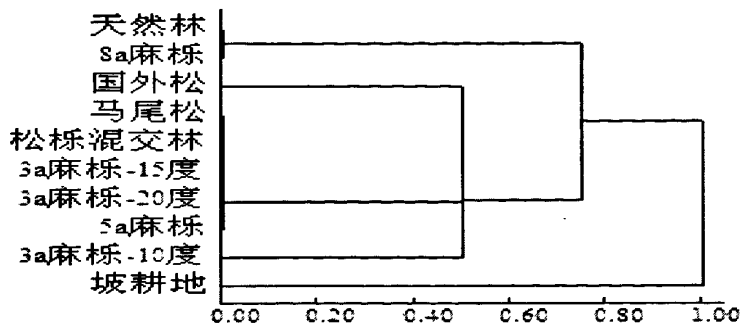


图17 DPS抗蚀能力聚类图
Fig.17 The clustering figure soil anti-erosion ability of DPS

图17评价结果可以解释为：8a麻栎林和松栎混交林其抗蚀性能与天然林、国外松林、马尾松林最强。可见麻栎根系在固土功能的表现上与高林龄的天然林、马尾松林和国外松林一致；其次是3a麻栎林（坡度10、坡度15、坡度20）、5a麻栎亦表现较强的抗蚀性能，土壤的水稳系数较高，是由于在3a麻栎林内采用辅助措施（套种农作物，人为施肥松土），增加有机质和团聚体含量，从而使其抗蚀性能得到增强；抗蚀性能表现最弱的是坡耕地，其土体内根系含量、团聚体含量、有机质含量都较低，导致其抗蚀性较差，符合土壤崩解现象的基本规律。

5. 4不同森林类型地表径流与土壤侵蚀模数研究

地表径流反映了样地植被、土壤、气候和其他一些综合水文特征，是衡量森林保持水土、涵养水分、减少洪峰等效益的一个基本指标。地表径流的形成与降雨（降雨量、降雨强度、降雨时间间隔等）、植被状况（林冠截留、地被物和枯枝落叶的持水量）以及土壤的物理性状（土壤前期含水量、孔隙度）等因子密切相关。

5. 4. 1观测时段内的产流数据

表27 产流时段降雨观测数据
Tab.27 The observation datum of runoff producing rain

观测日期	降雨量（mm）	平均降雨强度（mm/时）	降雨历时
4月8日	30.6	3.4	9小时0分
4月19日	32.7	5.03	6小时30分
5月28日	25.5	2.22	11小时30分
6月22日	56.1	3.30	17小时0分
7月2日	47.3	3.63	13小时0分
7月11日	61.9	13.76	4时30分
7月23日	42.5	7.08	6时00分
8月2日	315	13.13	24时00分

表28 样地水流失量
Tab.28 Water loss of sample plots

观测日期	林分类型/水流失量(m ³ /hm ²)													
	1a麻栎	2a麻栎	3a-10麻栎	3a-15麻栎	3a-20麻栎	4a麻栎	5a麻栎	6a麻栎	7a麻栎	8a麻栎	天然林	坡耕地	马尾松林	混交林
4.8	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0
4.19	40	33.5	21	35	20	32.8	28.65	17.5	9	8	0	18.5	0	0
5.28	3.25	4.2	6.5	6.8	8.2	3.3	2.55	0	0	0	0	8	0	0
6.22	68.5	58	40	21	71	43.5	21.5	16.7	11.05	0	0	75	58.5	0
7.2	100	76.7	35	32	35.5	37.5	20	7.5	0	0	0	112	0	0
7.11	119	80	38	96	98	37.5	28	16	7.5	0	0	135	77	0
7.23	67.5	64	34	89	108	20	25	18.5	6.25	0	0	118	5.5	0
8.2	670	440	391	479.8	496	190	140	82.5	39	32.75	130	675	382.9	250
总量	1068.3	756.4	578.5	759.6	836.7	364.6	265.7	158.7	72.8	40.75	130	1155.5	523.9	250

表27是该研究系统产流时段内的降雨因子。最大降雨量出现在8月2日，达到315mm，而最大降雨强度是在7月11日，为13.76mm/h。降雨量和降雨强度最小值都是在5月28日，分别是最大降雨量和降雨强度的1/12、1/6。表28是不同林分在产流时段内的水流失量数据，可以计算出相应时段内的地表径流，见表29。

表29 径流数据
Tab.29 The datum of surface runoff

林分类型	平均径流量(m ³ /s)	地表径流(mm)	径流模数(m ³ /s. hm ²)
天然林	0.000395	0.13	0.039466
马尾松	0.00159	0.5239	0.159047
松栎混交林	0.000759	0.25	0.075896
1a麻栎	0.003243	1.0683	0.324317
2a麻栎	0.002296	0.7564	0.22963
3a麻栎-10度	0.001756	0.5785	0.175622
3a麻栎-15度	0.002306	0.7596	0.230601
3a麻栎-20度	0.00254	0.8367	0.254007
4a麻栎	0.001107	0.3646	0.110686
5a麻栎	0.000807	0.2657	0.080662
6a麻栎	0.000482	0.1587	0.048179
7a麻栎	0.000221	0.0728	0.022101
8a麻栎	0.000124	0.04075	0.012371
坡耕地	0.003508	1.1555	0.350789

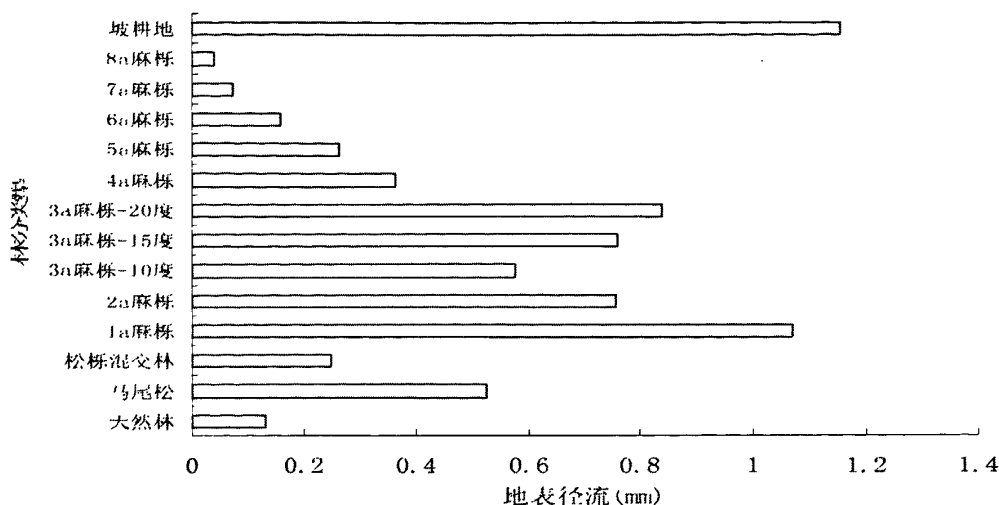


图18 地表径流分布图
Fig.18 The distribution figure of surface runoff

由图18可知，地表径流大小排列为：坡耕地>1a麻栎>3a-20度麻栎>3a-15度麻栎>2a麻栎>3a-10度麻栎>马尾松林>4a麻栎>5a麻栎>松栎混交林>6a麻栎>天然林>7a麻栎>8a麻栎。其对应的径流模数大小顺序相同。坡耕地地表径流最大，为1.1555mm，最小值为8a麻栎林，仅为0.04075mm。麻栎林分随着林龄的增加，其地表径流量逐次降低，符合林分的产流基本规律。

5. 4. 2观测时段内的土壤侵蚀模数

表30 样地每公顷土壤流失量
Tab.30 Soil loss of sample plots

观测日期	林分类型/土壤流失量(kg/m ²)										
	1a麻栎	2a麻栎	3a麻栎	4a麻栎	5a麻栎	6a麻栎	7a麻栎	8a麻栎	坡耕地	马尾松林	混交林
4.8	0	0	0	0	0	0	0	0	122.92	0	0
4.19	330.4	288.1	18.036	14.43	8.89	4.9	2.43	1.76	239.39	0	0
5.28	3.8025	33.096	6.475	23.86	1.046	0	0	0	54.4	0	0
6.22	493.2	60.9	301.44	55.68	28.17	14.98	6.851	0	112.05	87.75	0
7.2	225	204.789	136.5	55.88	37.2	8.1	0	0	48	0	0
7.11	1589.84	708	579.6	37.13	86.8	29.12	8.25	0	5141.04	138.6	0
7.23	173.475	217.6	843.75	22	35.75	36.63	25.313	0	6031.08	3.96	0
8.2	10586	14630	7256.25	1786	1442	610.5	635.7	287.873	50957.25	2553.94	0

表30所示为林地内几次较强降雨产生土壤侵蚀数据，由8次观测的数据可知：坡耕地由于没有植被的覆盖极易产生土壤流失，其流失量也达到最大值，占总土

壤流失量的57%；1a~8a麻栎，随着林龄的递增、林分逐渐达到郁闭以及植被根系在改善土壤方面的强大作用，其土壤流失量随林龄和根长以及根密度增加逐渐减少，呈负对数关系(图19、图20)，相关系数分别为 $R^2=0.836$ 、 $R^2=0.822$ ；马尾松林，由于表层土壤比较浅薄，土壤含石量较高，地表裂痕较多，水分下渗较快，也极易达到饱和状态，如果出现强降雨，地表易产生径流，所以在8次的观测记录中有4次土壤流失现象发生；松栎混交林虽然林龄为5年，而在8次的观测中都没有土壤流失现象的发生，是由于林分渗透速率较高，土壤抗冲、抗蚀性强等因素决定。混交林在改善林分环境，根系提高土壤抗侵蚀性等作用上效果甚著，因此，在营地造林上把麻栎作为混交树种，较其它单纯林更能改善土壤性状，减少土壤流失。

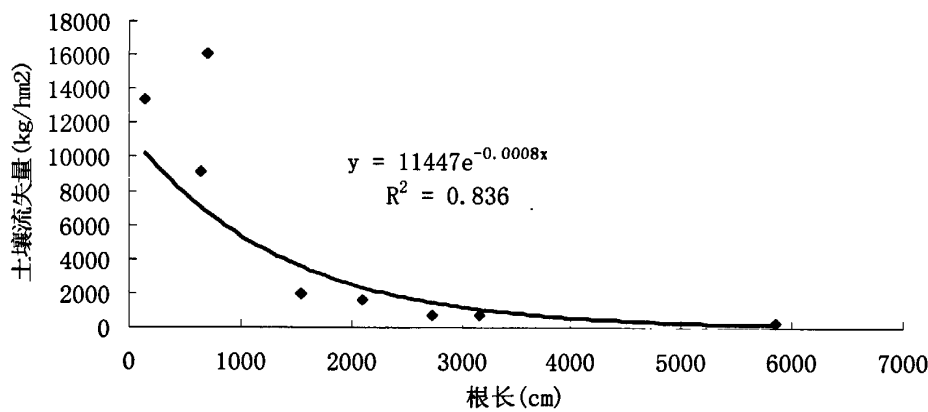


图19 根长与1~8a麻栎土壤流失量的相关性
Fig.18 The corrlative analysis between the length of root system and soil erosion

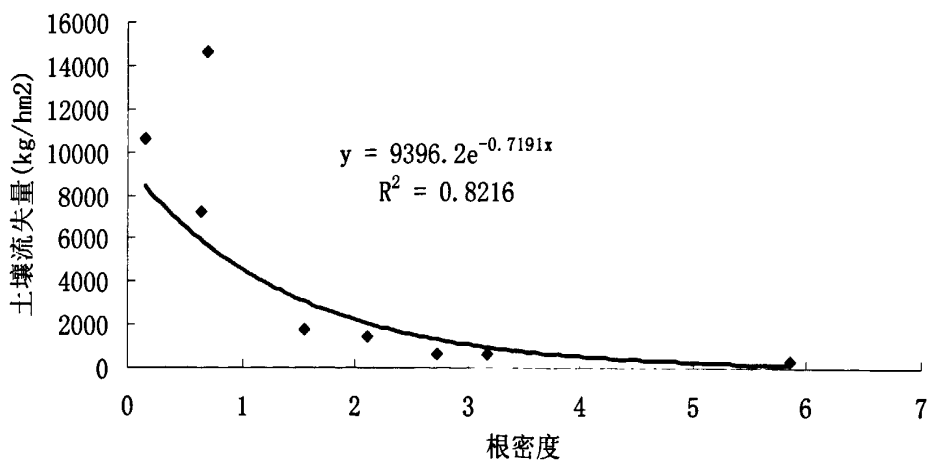


图20 根密度与1~8a麻栎土壤流失量的相关性
Fig.19 The corrlative analysis between the density of root system and soil erosion

将地表径流与土壤侵蚀量用SPSS软件进行相关分析，用Excel拟合相应方程如下。

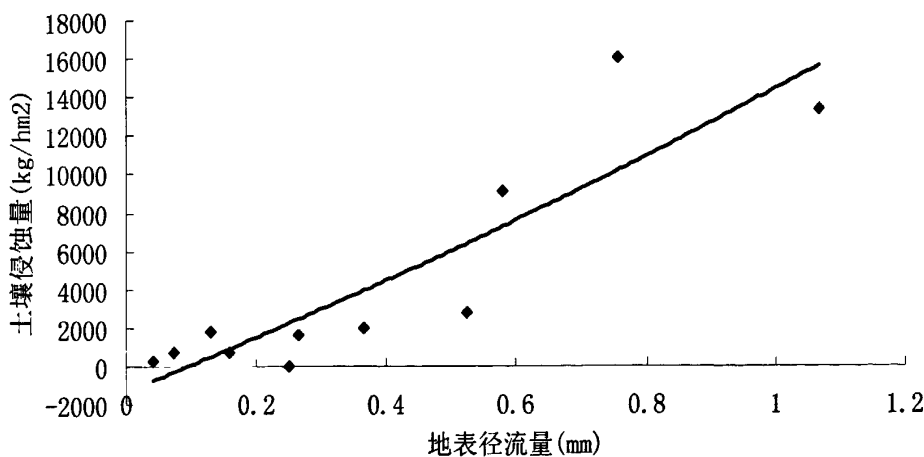


图21 地表径流与土壤侵蚀量相关分析
Fig.21 The corrlative analysis between the surface runoff and soil erosion

图21是地表径流量与土壤侵蚀量的相关分析。拟合方程 $Y=2099X^2+13650X-1312.6$, $R^2=0.79$; 相关系数高, 说明地表径流量在很大程度上决定土壤流失量。

Correlations

		VAR00001	VAR00002
VAR00001	Pearson Correlation		
	Sig. (2-tailed)		
	N		
VAR00002	Pearson Correlation	.908**	
	Sig. (2-tailed)	.002	
	N	8	

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

图22 麻栎林分地表径流与土壤侵蚀量相关分析
Fig.22 The corrlative analysis between the surface runoff and soil erosion of *Quercus acutissima* Carr

图22是麻栎林分地表径流与土壤侵蚀量的相关分析。从上图可知两者关系极显著, 相关系数为0.908。拟合方程为 $Y=-7E-09X^2+0.0002X+0.0098$ 。

综合上图分析可知, 地表径流量与土壤侵蚀量之间的关系显著, 径流量大则土壤侵蚀量亦大。而麻栎林地, 随着林分郁闭度和林龄的增加, 径流量和土壤侵蚀量急剧减小, 二者相关系数极显著。所以成年的麻栎林分与其他几个样地相比较, 有着更为稳定的土壤内环境。

5. 4. 3径流量与土壤因子的关系

利用DPS处理地表径流量与土壤因子主成分分析。地表径流量为 X_1 、根长为 X_2 、根密度 X_3 、根量 X_4 、土壤含水量 X_5 、土壤容重 X_6 、土壤孔隙度 X_7 、渗透率 X_8 , 见表31~32。

表31 各成分特征向量

Tab.31 Characteristic vector of the principal component

变量	因子1	因子2	因子3	因子4	因子5	因子6	因子7	因子8
x(1)	-0.35923	0.37683	0.15805	-0.26433	0.73056	0.15785	-0.27472	-0.00000
x(2)	0.39842	-0.14959	0.37281	-0.12443	-0.02782	0.18358	-0.36047	0.70711
x(3)	0.39842	-0.14959	0.37281	-0.12443	-0.02782	0.18358	-0.36047	-0.70711
x(4)	0.39817	-0.09580	0.33307	0.06899	0.48984	-0.20021	0.66073	-0.00000
x(5)	-0.34153	0.26138	0.58192	-0.14547	-0.41576	0.36648	0.38483	-0.00000
x(6)	-0.29093	-0.56518	0.03238	0.52074	0.22285	0.52324	0.01602	0.00000
x(7)	0.24692	0.62059	0.05979	0.72520	-0.01615	0.09288	-0.12456	0.00000
x(8)	0.36427	0.17657	-0.49280	-0.27596	0.04502	0.67147	0.25341	0.00000

表32 主成分贡献率

Tab.32 Contributing rate of the principal component

主成分	特征值	百分率%	累计百分率%
1	5.44715	68.08939	68.08939
2	1.32579	16.57236	84.66175
3	0.67052	8.38156	93.04330
4	0.29172	3.64647	96.68977
5	0.12462	1.55780	98.24757
6	0.10751	1.34392	99.59149
7	0.03268	0.40851	100.00000
8	-0.00000	-0.00000	100.00000

综合分析表32，前三主成分累积贡献率为93.04%，包含大部分信息。其中X₂、X₃、X₄、X₇、X₈为主要作用因子。这个五个变量对地表径流的影响较大。

5. 4. 4径流量与林分因子的关系

图23体现了不同世代麻栎林分(1a~8a)地表径流量随林龄的增加相应的变化状况。随着林龄增加其径流量显著减少。拟合方程为： $Y=-0.1431X+1.0597$ ， $R^2=0.93$ ，为负线性相关，相关系数高。

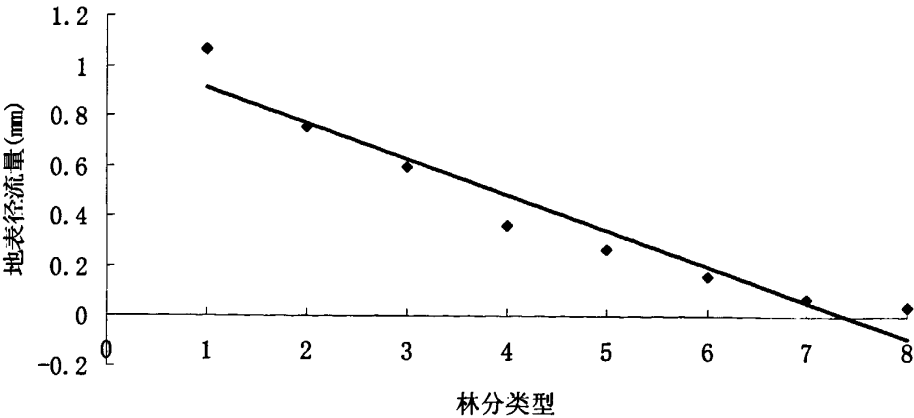


图23 不同世代麻栎林分径流量变化

Fig.23The surface runoff changes of different generation Quercus acutissima Carr forest (1.1a麻栎;2. 2a麻栎; 3.3a麻栎;4. 4a麻栎; 5.5a麻栎;6. 6a麻栎; 7.7a麻栎;8. 8a麻栎)

图体24现了不同坡度麻栎林分地表径流量随坡度的增加相应的变化状况。随着坡度的增加，其径流量显著增加。拟合方程为： $Y=0.1291X+0.4667$ ， $R^2=0.95$ ，为正线性相关，相关系数较高。

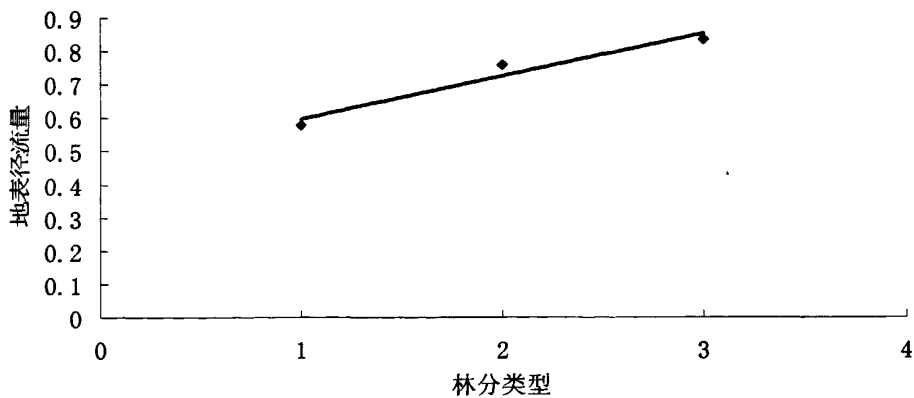


图24 不同坡度麻栎林分径流变化
Fig.24 The surface runoff changes of different gradient *Quercus acutissima* Carr forest
(1.1a麻栎坡度10度; 2. 2a麻栎坡度15度; 3.3a麻栎坡度20度)

用DPS软件拟合不同林分地表径流量随林冠截留量相应的变化状况，方程为： $Y=263.4509-311.8247X$ ，效果不太理想。图25为1a~8a麻栎地表径流量与树冠截留量拟合方程： $Y=151.7008-171.7420X$ ， $R=0.81$ ，拟合效果比较理想，呈线性负相关，说明麻栎林分地表径流量与林冠截留量相关性较其他林分高，呈现出一定的规律。

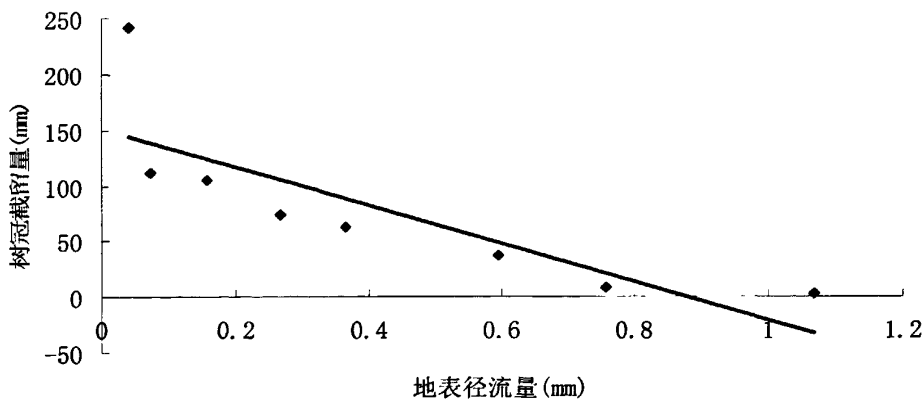


图25 不同麻栎林分地表径流量与树冠截留的相关性
Fig.25 The correlation between canopy interception and surface runoff
of the different generation *Quercus acutissima* Carr forest

图26体现了不同林分枯落物蓄积量与地表径流量相应的变化状况。拟合为负对数方程，效果较理想，相关系数高，方程为： $Y=-0.1388\ln(X)+0.5706$ ， $R^2=0.84$ 。

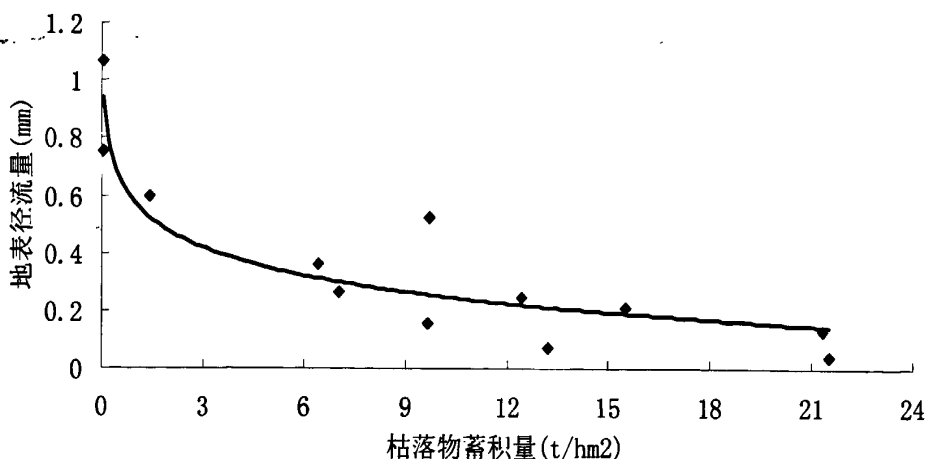


图26 不同林分地表径流量与枯落物蓄积量的相关性
Fig.26 The correlation between the stocks capacity of litter
and surface runoff of the diferent forest types

5. 4. 5径流量与降雨量、降雨强度的关系

利用DPS逐步回归不同林分径流量与降雨量和降雨强度的回归方程，如下所示：

坡耕地： $Y=6.91544936+1760.2676268X_1-0.09460103338X_2$, $R=0.83$;

天然林： $Y=-2.395084166-10738.788879X_1+0.18606065126X_2$, $R=0.78$;

马尾松： $Y=0.818489428-3329.992486X_1+0.11307148476X_2$, $R=0.68$;

松栎混交： $Y=-2.395084166-5583.724855X_1+0.18606065126X_2$, $R=0.78$;

3a-10麻栎： $Y=-4.42742463-9439.568510X_1+0.4177814112X_2$, $R=0.80$;

3a-15麻栎： $Y=6.45143464+2676.6517465X_1-0.10270696099X_2$, $R=0.83$;

3a-20麻栎： $Y=5.54478878+2138.1854079X_1-0.07852323451X_2$, $R=0.77$;

1a麻栎： $Y=7.18610122+2542.4358633X_1-0.14676736460X_2$, $R=0.75$;

2a麻栎： $Y=5.25818688+2208.9501584X_1-0.06880875817X_2$, $R=0.70$;

3a麻栎： $Y=7.60347078+7041.148070X_1-0.21464967110X_2$, $R=0.84$;

4a麻栎： $Y=4.138167+801.517855X_1+0.015412X_2$, $R=0.65$;

5a麻栎： $Y=4.25652530+4440.255632X_1-0.030927741612X_2$, $R=0.70$;

6a麻栎： $Y=4.16292632+5444.084675X_1-0.013755875058X_2$, $R=0.69$;

7a麻栎： $Y=4.210208+3345.036344X_1+0.015422X_2$, $R=0.65$;

8a麻栎： $Y=3.23437501-7923.497621X_1+0.05827789395X_2$, $R=0.68$;

上述公式中 X_1 为降雨量， X_2 为降雨强度，从回归模型分析，坡耕地地表径流量与降雨量、降雨强度拟合效果最理想，说明无林地地表径流量随着降雨量和降雨强度的增加而增加，符合产流基本规律，而其它林分由于植被的覆盖、降雨特征相异、树冠截留不同、地表枯落物蓄积量有分别以及土壤抗侵蚀强弱不同，导致相关系数发生变化。

6 结论与讨论

在研究红邳山林场短轮伐期麻栎薪炭林水保、水文效益方面,做了大量的野外工作的基础上,充分利用室内的研究去综合分析和评价森林水土保持功能。得出如下结论:

6.1 林冠层水文效益

林冠层是降雨分配的第一层次,对大气降雨的分配起到关键作用。本研究的12个林分林冠层截留降雨存在差异:四季雨量分配不均,夏秋两季雨量较多,而春冬两季虽然大气降雨较少,但是截留雨量较多;不同林分截留量和林内雨量不同,其中天然林林冠截留最大,达到526.15mm,截留率为63.40%,受其枝叶完全伸展,林分郁闭度高等因素作用,最小为1a麻栎,由于新造林尚未郁闭,其截留量仅为2.96mm,截留率为0.36%;8种不同类型的麻栎林分随着林龄的增加,林冠截留呈现增长的趋势,而且郁闭成林的麻栎在截留降雨中作用显著。

6.2 地表层水文效益

地表枯落物层,能够有效拦蓄降雨,延缓地表水形成径流。由于各个林分枯落物储量不同,其分解层性质各异,所以持水能力、拦蓄能力不同:枯落物贮量越大其林分持水能力越强,阔叶树枯落物持水能力大于针叶树林下枯落物持水能力,阔叶树、针阔混交林拦蓄能力明显高于针叶树;在调查林分中,8年生麻栎林拦蓄能力最强,有效拦蓄量达34.48t/hm²,相当于3.44mm水深;7a生麻栎林有效拦蓄量已超过14a生马尾松林,8年生其枯落物储量高于当地分布的主要植被,可见短周期麻栎薪炭林具有良好的水源涵养和保持水土能力。

6.3 土壤层水文效益

通过土壤三大物理实验和植被根系的分析,各林分在抵抗土壤受侵蚀能力上各异:土壤物理性状和有机质含量影响水分的入渗量,有林地土壤通透性好,渗透能力强,而坡耕地土壤紧实,耕作层较浅,地表有结皮现象,其渗透能力差,麻栎和松栎混交林地具有较高的渗透性能;提高土壤抗冲性方面,植物根系尤其是<1.0mm的细根,缠绕、穿插、固结土体,抵制雨水的冲刷,增强了土壤抗冲性能,麻栎纯林在改善土壤物理性状,增强土壤抗冲性作用高于马尾松林和坡耕地。松栎混交林也表现出较强的土壤抗冲性能优势,所以营地造林选择麻栎作为混交首选树种在改善土壤物理性状,减少土壤流失上作用显著;≤1mm细根长、≤1mm细根量、≤1mm细根密度三指标对土壤抗蚀性影响最大,天然林、马尾松林在抗蚀性的表现上弱于麻栎成年林和混交林,坡耕地土壤分散系数较高,崩解速率快,从而表明麻栎在改善土壤的综合性能,增强土壤抗冲、抗蚀能力上优于其它树种;径流量的产生与土壤渗透速率大小、抗冲性强弱、抗蚀性能优越三

者的关系显著，地表径流大则土壤侵蚀量大。

森林水土保持功能包括林冠的截留、树干的茎流、地表的渗透、土壤抗冲、抗蚀等多个方面的研究，综合分析，红瑯山林场不同林分水土保持功能存在差异性，但麻栎成熟林分在抗冲、抗蚀，减少林分地表径流方面表现出较强的优势，尤其是特色林分松栎混交林，更能改善土壤性状，增加水分渗透，是该研究系统的水土保持优势林分，应当加强麻栎作为混交林的建设。另外在土地的利用上，合理利用林粮间作模式，亦能增加土壤的水稳性团聚体含量，在一定程度上增加了土壤结构的稳定性，例如，该研究系统内1a麻栎、3a麻栎和坡耕地前期都套种农作物，大量腐烂的根系形成的土壤结构体，增加了土壤孔隙度和渗透性能，所以在减少地表径流，完善水土保持功能上作用显著。

综合分析，麻栎在皖东丘陵区作为薪炭林，经济价值不菲，同时在水源涵养、减少地表径流、改善林分内环境、增强土壤抗侵蚀性等生态作用上优于当地其它树种，所以麻栎又是一种良好的生态树种。

6.4讨论

本系统内经过林冠层、地表层、土壤层三个层次水文效益的研究，试验达到理想的效果，每个层次都发挥了水土保持的作用。

在研究林冠层中，用传统方法去推算林冠截留量误差较大。建议今后的研究应当在各林分中安置承雨器，科学计算林内雨量，树冠截留量、树干茎流量。

各类林分土壤特性的研究，包括土壤的渗透性、抗蚀性、抗冲性等几个指标，但是这几个指标仅仅揭示土壤某一方面的水土保持特性，难以综合反映各类林分抵御土壤侵蚀，增强水土保持的能力。本系统仅仅观测了一年的径流数据，应当加强多指标综合分析，建立以多年径流和土壤侵蚀数据的数学模型，方能更科学地去分析该区域地表径流与土壤侵蚀的关系。

7 参考文献

- [1] <http://hwcc.gov.cn>.
- [2] 于一苏, 吴中能, 孙民强. 安徽省山地水土流失现状及防治措施[J]. 林业科技开发, 2000, 14(6): 55~56.
- [3] 安徽省水土流失保持监测公报[J]. 安徽省水利厅, 2005~12.
- [4] 李景文 主编. 森林生态学[M]. 中国林业出版社, 1992~05.
- [5] 张金池, 康立新, 卢义山等. 苏北海堤林带树木根系固土功能研究. 水土保持学报, 1994, 8(2): 43~47.
- [6] 蒋太明. 降水入渗与土壤水分动态模型研究进展[J]. 贵州农业科学(百年院庆专刊), 2005, 33(增刊): 83~88.
- [7] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 83~88.
- [8] 张爱国, 李锐, 杨勤科, 等. 水蚀土壤因子野外测试问题探讨[J]. 人民黄河, 2002, 24(2): 28~29.
- [9] 查轩, 唐克丽, 白红英. 植被恢复对土壤抗侵蚀特性影响的研究. 中科院水利部西北水土保持研究所集刊. 1993, 17. 37~43.
- [10] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 山东林业科学, 2003, (6): 15~16.
- [11] 卞相玲, 仲崇谔等. 几种林分土壤入渗性能的研究, 1979, 4(2): 20~23.
- [12] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社. 1988.
- [13] 朱冰冰, 张平仓, 丁文峰, 等. 长江中上游地区土壤入渗规律研究. 水土保持通报, 2008, 28(4): 43~47.
- [14] 朱显谟. 我国十年水土保持工作的成就[J]. 土壤, 1959, (10).
- [15] 李勇, 吴钦孝. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究. 水土保持学报, 1990, 4(1): 11~16.
- [16] 蒋定生, 李新华, 等. 黄土高原水土流失危险程度预警研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1995, 35(5): 390~393.
- [17] 东北林学院主编. 森林生态学[M]. 中国林业出版社, 1981.
- [18] 李勇, 朱显谟, 等. 黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J]. 科学通报, 1990, 35(5): 390~393.
- [19] 张晓勉. 浙江省生态公益林主要林分类型土壤可蚀性研究[D]. 南京林业大学硕士论文, 2008.
- [20] 史敏华, 王棣, 李任敏. 石灰岩土主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技, 1994(1): 17~19.
- [21] 代全厚, 张力, 等. 嫩江大堤植物根系固土护坡功能研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(6): 8~11.
- [22] 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(3): 21~28.
- [23] Dr.Bing Fransesco, Ferraiolo. Application of inert materials in bioengineering[C]. Proceedings of the First Asia Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering Erosion Control and Slope Stabilization, 1999. 18~53.
- [24] Waldrom L.J. The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified[J]. Soil Science Society of American Proceedings. 1991. 843~849.

- [25] 吴钦孝 等著. 森林保持水土机理及功能调控技术[M]. 科学出版社, 2005~03.
- [26] 张建列, 李庆夏. 国外森林水文研究概述[J]. 世界林业研究, 1988(4): 41~47.
- [27] Mc Culloch J.G, Robinson M. History of forest hydrology[J]. Journal of Hydrology, 1993(150): 189~216.
- [28] 王德连, 雷瑞德, 韩创举. 国内外森林水文研究现状和进展[J]. 西北林学院学报. 2004, 19(2): 156~160.
- [29] Gash J.H.C comparative estimates of interception loss three conifers in Great Britain[J]. J. Hydrol. 1980, 48: 89~150.
- [30] Rutter A.J.A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine[J]. Agr. Met. 1971, 9: 367~384.
- [31] Teklehaimanot Z. Rainfall interception and boundary conductance in relation to tree spacing[J]. J. Hydrol. 1997, 123: 261~278.
- [32] Viville D. Interception on a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Voges, France)[J]. J. Hydrol. 1993, 144: 273~282.
- [33] 陈奇伯, 解明曙, 张洪江. 森林枯落物影响地表径流和土壤侵蚀研究动态[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(增刊3): 88~97.
- [34] 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.
- [35] 张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区 3 种林下枯落物储量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 55~58(123).
- [36] 刘欣, 陶建平, 黄茹, 等. 重庆石灰岩地区 3 种林分林下枯落物持水能力比较[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 712~717.
- [37] 彭耀强, 薛立, 曹鹤, 等. 三种阔叶林凋落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 189~200.
- [38] 宫渊波, 陈林武, 罗承德, 等. 嘉陵江上游严重退化地 5 种森林植被类型枯落物的持水能力功能比较[J]. 林业科学, 2007, 43(增刊1): 12~16.
- [39] 刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社. 1996.
- [40] 于一苏, 于光明, 李丛, 等. 皖东丘陵地区麻栎栽培模式及栽培技术[J]. 林业科技开发, 2009, 23(4): 81~84.
- [41] Freeze P.A, Harlan R.L. Blueprint for a physically-based digital simulated hydrologic response mode[J]. Hydro. Sci., Bull., 1969, 9: 237~258.
- [42] 王海亭, 何长敏. 麻栎及其栽培管理技术[J]. 农技服务, 2008, 25(11): 113~114.
- [43] Gash J.H.C. Comparative estimates of interception loss three conifers in Great Britain[J]. J. Hydrol. 1980, 48: 89~150.
- [44] Rutter A.J.A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine[J]. Agr. Met. 1971, 9: 367~384.
- [45] Teklehaimanot Z. Rainfall interception and boundary conductance in relation to tree spacing[J]. J. Hydrol. 1997, 123: 261~278.
- [46] Viville D. Interception on a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Voges, France)[J]. J. Hydrol. 1993, 144: 273~282.
- [47] 崔启武 等著. 森林生态系统林冠截留研究[J]. 林业科学, 1980, 16(2): 141~143.
- [48] 陈奇伯, 解明曙, 张洪江. 森林枯落物影响地表径流和土壤侵蚀研究动态[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(增刊3): 88~97.
- [49] 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.
- [50]张洪江, 程金花, 史玉虎, 等. 三峡库区3种林下枯落物储量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3) :55~58 (123) .
- [51]刘欣, 陶建平, 黄茹, 等. 重庆石灰岩地区3种林分林下枯落物持水能力比较[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16 (3) :712~717.
- [52]彭耀强, 薛立, 曹鹤, 等. 三种阔叶林凋落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2006, 20 (5) : 189~200.
- [53]陈素传, 于一苏, 肖正东. 施肥对麻栎幼树生长发育的影响[J]. 林业科技开发, 2008, 22 (5) :99~101.
- [54]宫渊波, 陈林武, 罗承德, 等. 嘉陵江上游严重退化地5种森林植被类型枯落物的持水能力功能比较[J]. 林业科学, 2007, 43 (增刊1) :12~16.
- [55]胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22 (1) :146~150.
- [56]饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27 (1) :33~37.
- [57]王忠科. 植被盖度及地面坡度影响降雨入渗过程的试验研究[J]. 河北水利水电技术, 1994, (4) :63~64.
- [58]Wang J-M, Wu Q-X, Han B, etc. 2004. Distribution law on infiltration of loess hilly region. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture, 20(4):288~290(in Chinese).
- [59]郭忠升, 吴钦孝, 任锁堂. 森林植被对土壤入渗速率的影响[J]. 陕西林业科技, 1996, (3) :27~31.
- [60]张永涛, 杨吉华, 夏江宝, 等. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 2(4) :87~91.
- [61]王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社, 1995.
- [62]杨吉华, 张永涛, 高祥伟, 等. 封山育林提高森林蓄水保土效益的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3) :2~5
- [63]罗汝英, 主编. 土壤学. 中国林业出版社, 1990, 10.
- [64]朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报, 1982, 3(1) :40~44.
- [65]庄家尧, 张金池, 林杰等. 安徽省大别山区上舍小流域植被根系与土壤抗冲性研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6) :15~20.
- [66]蒋定生. 黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究. 土壤通报, 1979, 4(2) :20~23.
- [67]朱显谟. 黄土地区植被因素对水土流失的影响. [J] 土壤学报, 1960, 8(2) :110~121.
- [68]姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2001.
- [69]赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原森林植被水土保持机理研究[J]. 林业科学, 2001, 37(5) :140~144.
- [70]曾晖. 森林水文研究方法评述[J]. 四川林勘设计, 2003, 6(2) :6~11.

致 谢

2010年艳阳初夏，我毕业了。

感谢恩师于一苏女士三年来对我生活和学习上的关照，恩师是个勤劳、务实的好老师，自从当选为全国人大代表，她更加克己奉公、以身作则，带领她的工作室友主持承接了许多项国家项目，严寒酷暑，她始终坚持工作在一线。我是个很幸运的人，得知有吴中能老师对我试验不辞辛苦，三年精心的指导，倍感荣幸。当然，还有一些“幕后的操作者”，也值得一并感谢，包括红琊山林场的张春祥技术员，安徽省林科院的刘俊龙，他们都是好大哥、好榜样，对我完成论文做出了巨大的贡献。他们都是专家，在他们的教育下，我首先学会了做人，然后才步入正轨的做实验。

漫漫求学路，从安庆望江的老家来到省城，弹指一挥间，过了八年，感觉岁月蹉跎，白驹过隙，从当初懵懂的学生即将成为建设祖国的青年，满含憧憬也颇多畏惧。读研三年，在安徽农业大学接触了很多方面的人才，其中很多人也成了我的好朋友，我需要这样的朋友，无论从品德，还是求实精神上他们都值得我去学习，并且终生受用。

毕业之际，我们的同学都有些茫然，读书三年，回报给我们的就是就业的压力，使得很多人都失去动力，没了上进心。可是毛主席说过：“自信人生两百年，会当水击三千里”。难道我们忘了他的自信和勇气吗？革命年代如此辛苦，诸多磨难，都能成就众多的人才，何况是和谐的新世纪。

最后，我想衷心的祝愿父母，身体健康，是他们给了我生命，给我经济上的帮助。还有一个人我一辈子都得对她好，就是跟我苦了几年的女朋友，无论生病、失落、失望，她给了我精神上最大的支持。

徐纯洁

二〇一〇年安徽农业大学

个人简介

徐纯洁, 男, 中共党员, 1984 年 7 月 21 日出生于安徽省望江县太慈镇。2005 年 9 月至 2010 年 7 月就读于安徽农业大学园林专业, 获得学士学位。2007 年至 2010 年在安徽省林业科学研究院做实验, 研究方向为园林植物生态。

在读期间发表论文

1. 徐纯洁, 吴中能, 于一苏, 刘俊龙, 张春祥. 红琊山林场主要林地类型土壤入渗特性研究. 林业科技开发, 2010 年, 第四期.
2. 吴中能, 刘俊龙, 于一苏, 蔡新玲, 徐纯洁, 张春祥. 皖东低丘主要森林类型枯落物水文特性. 林业科技开发, 2010 年, 第一期.

1