

The Theory and Practice of the
Low Efficiency Water Conservation Forests Renewal



低效水源涵养林更新的 理论与实践

秦富仓 姚云峰 高岗 盛艳 郭月峰◎著



科学出版社

低效水源涵养林更新的 理论与实践

秦富仓 姚云峰 高 岗 盛 艳 郭月峰 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以赤峰市敖汉旗大五家流域内水源涵养型人工林为研究对象,以健康的森林生态系统为目标,以拟自然林业理论为指导,进行水源涵养人工林的结构、功能、演替及物质和能量流动研究。对低效水源涵养功能的人工林进行更新改造,形成低水源涵养功能人工林培育与建设技术体系。

本书可供从事林业及水土保持等专业的研究、管理人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低效水源涵养林更新的理论与实践/秦富仓等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-046720-1

I. ①低… II. ①秦… III. ①水源涵养林—研究 IV. ①S727.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 303832 号

责任编辑:王 静 岳漫宇 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 伟 / 封面设计:刘新新

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 328 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

内蒙古自治区科技厅应用研究与开发计划
项目（20120249）资助

内蒙古自治区水土保持与荒漠化防治专业
综合改革试点项目资助

前言

森林是维持良好陆地生态环境的主体和最重要的生物生产基地之一。森林在自然界物质和能量交换过程中，在不断吸收 CO_2 、形成有机物质、制造氧气的同时，还影响空气的湿度和降水量，具有降低风速、保持水土、涵养水源、净化空气、消除噪音等功能。其中，森林水源涵养功能是森林生态系统生态功能的重要组成部分之一，主要体现在森林土壤层、枯枝落叶层、灌草层和乔木层对降水进行再分配的复杂过程。在外界环境条件一致的情况下，森林结构及其动态变化对这一功能具有决定性作用，早已为国内外有关专家学者的大量研究所证实。

中国是世界上人工林最多的国家，被誉为“世界最伟大的森林恢复者”，森林覆盖率由建国初期的 8.60% 上升到了 2013 年年底的 21.63%。我国现在的人工林中 90% 是纯林，形成南方以杉木、马尾松为主，西北、华北、东北平原以各种杨树为主，东北山地则以落叶松为主的建设格局。当前，我国生态建设正处于治理与破坏相持的关键阶段，森林的生态价值越来越受到重视，但趋向于人工化的森林严重降低了森林生态功能的发挥。由于人工林多为单一树种组成的同龄纯林，结构和功能单一，是个较为脆弱和不稳定的生态系统，抗灾害能力弱，生态防护效果不够显著。杨学云（2005）的研究表明，天然阔叶林和人工针阔混交林的水源涵养功能都强于人工针叶纯林，人工林的经济效益与生态防护功能都远远低于天然林。人工林的近自然经营改造是势在必行的，即森林经营回归自然，遵从自然法则，充分利用自然的综合生产力，最终目的就是要使现有的与自然相悖的人工林恢复为天然林，并逐渐符合自然的演替进程。

在我国林业史上，人工纯林进入中龄阶段后可能出现大面积病虫害灾害，造成巨大的损失。甚至一些树种纯林连植会导致林地生产力下降和地力衰退、生物多样性水平低的现象，对外界的干扰防范能力很差，如人工针叶纯林酸化土壤、林下灌木草本生长困难，这就难以形成乔灌草垂直空间配置的水源涵养型植被条件；同时森林地表覆盖物少，且多为酸性针叶及其分解物，土壤的透性差无法形成具有较强贮水能力的森林土壤，难以达到良好的生态防护效果，遇暴雨产生大量的地表径流，容易产生水土流失。德国等林业发达国家 20 世纪中叶就开始对人工林进行拟自然化的改造，特别是在人口稠密、工业化水平较高的地区，森林经营已经由以木材生产为主转向以生态防护和社会服务为主，人工林近自然化改造成为林业发展的必然趋势和客观要求。

位于内蒙古自治区东北部的赤峰市,历史上树木繁杂,森林及草原植被分布广泛,素来以“平原松林”和“草原牧区”驰名于世。据史志记载,古代的赤峰雨量充沛、气候湿润、森林茂密、草原肥沃、资源丰富。至辽代,赤峰境内仍是一片林海,北有大兴安岭原始森林,南有史称“平地松林八百里”的松洲。赤峰至林西、克什克腾旗,古木参天,是一望无际的森林,金、元各代均以盛产松木闻名。史书记载这里“地沃宜耕植,水草便畜牧”。宋代著名科学家沈括详细考察了沿途山川地貌,在《熙宁便虏图抄》中记载了赤峰“木植甚茂”、“地宜畜牧”的景观。人们对森林的大肆砍伐彻底改变了这一切,到1947年全市森林面积仅存600万亩*,森林覆盖率仅有5%。昔日绿茵沃土、木植甚茂的松洲变成千沟万壑、风沙茫茫的赤峰,水土流失、土地沙化日益严重,呈现出赤地千里的荒漠化景观,风沙、冰雹、洪水等自然灾害频繁。耕地和牧场长期遭受风沙侵袭,粮食产量低而不稳,畜牧业生产发展缓慢。当时,全市粮食年产量不足3亿kg,牧业年度牲畜存栏仅100万头。恶劣的生态环境不仅使全市经济发展举步维艰,而且直接威胁山、沙区群众的生存。据不完全统计,仅翁牛特旗、敖汉旗、巴林右旗和阿鲁科尔沁旗1958~1988年的30年间,流沙就埋没公路231km,房屋8691间,农田18万hm²,草场38万hm²,有600多户农牧民因流沙驱赶,被迫迁居他乡。新中国成立以来,赤峰市人民群众开展了长期不懈的防沙治沙生态建设工程,历经了50年代的艰难起步,六七十年代的全面铺开和改革开放30年来的快速发展三个阶段,截至2013年年底,全市森林面积已由建国初期的45.47万hm²增加到293万hm²。林木总蓄积量由421万m³增加到6027万m³,森林覆盖率由5%提高到34.61%。

赤峰市林业生态建设一直名列内蒙古自治区的前列。早在20世纪50年代初期就开始大面积的植树造林。其主要目的是防风固沙、水源涵养、改善生态环境。但由于造林树种选择不合理,立地条件差,再加上缺乏必要的抚育措施,造成这些早期栽植的树木虽然成活,但大多生长不良、主干不明显、枝叶横生,被形象地称为“小老树”,形成“有树不成林、有林不成材”的现象。因此,针对这些低功能水源涵养人工林分找出其成因,并进行合理的林分定向更新技术研究是目前该地区林业生产中急需解决的课题,也是社会经济可持续发展的基础。

本书以赤峰市森林覆盖率较高的敖汉旗境内的人工林为对象,在森林资源调查的基础上,重点选择敖汉旗大五家流域内水源涵养型人工林为研究对象,以健康的森林生态系统为目标,以拟自然林业理论为指导,进行水源涵养人工林的结构、功能、演替及物质和能量流动研究。通过相关的试验研究及技术成果推广应用,选择合理树种,建立稳定高效的人工林群落结构和空间配置格局,对低效水

* 1亩≈666.67m²,全书同。

源涵养功能的人工林进行更新改造，形成一套比较完备的低水源涵养功能人工林定向培育与建设技术体系，以期对于正在进行的林业生态工程建设具有一定的技术指导意义。

在本书的编著过程中，课题组通力合作，完成了全部调查、资料整理和分析工作。特别是要感谢赤峰市林业科学研究院、敖汉旗政府、水利局、林业局的同仁，他们为本课题的研究提供了极大的帮助。本书还参阅了大量参考文献，借此机会向这些文献的作者表示衷心的感谢！感谢科学出版社为本书的出版给予的大力支持。

秦富仓 姚云峰

2016年3月于呼和浩特

目 录

前言

1 森林植被涵养水源功能研究综述	1
1.1 森林水源涵养功能的机制研究	1
1.1.1 乔木冠层水文作用	1
1.1.2 灌木草本层水文作用	4
1.1.3 枯枝落叶层水分截持作用	5
1.1.4 林地土壤水分入渗及贮水效能	7
1.1.5 林地蒸发散	8
1.2 森林涵养水源功能的影响因素	9
1.2.1 林分结构对水源涵养功能影响研究	9
1.2.2 土壤结构对水源涵养功能影响研究	12
1.2.3 森林空间配置对水源涵养功能的影响	13
1.3 森林水源涵养功能评价研究	17
1.4 低功能人工林更新改造与森林植被空间对位配置研究	18
1.4.1 低功能人工林更新改造研究	18
1.4.2 森林植被空间对位配置研究	25
2 研究区与试验区概况	29
2.1 自然环境概况	29
2.1.1 地理位置	29
2.1.2 地形地貌	29
2.1.3 气候	30
2.1.4 土壤	30
2.1.5 植被	31
2.1.6 水文	32
2.2 社会经济概况	32
2.3 森林资源概况	33
2.4 试验区概况	34
2.4.1 自然环境概况	34
2.4.2 土地资源利用	36

2.4.3 森林资源分布	36
3 研究途径和研究方法	38
3.1 研究总体途径	38
3.2 研究方法	38
3.2.1 流域内森林状况及生长效应调查	39
3.2.2 流域内森林植被水源涵养功能研究方法	41
3.2.3 流域内植被类型水源涵养功能综合评价研究方法	42
3.2.4 低效水源涵养林评判标准研究方法	43
3.2.5 森林植被与土壤性质格局耦合关系研究方法	43
3.2.6 低效水源涵养林更新改造、定向恢复与重建技术	44
3.3 资料整理与数据处理	46
4 主要森林植被结构特征、树种生长过程及生物量研究	48
4.1 主要森林植被结构特征分析	48
4.1.1 小叶杨人工林结构特征研究	49
4.1.2 油松人工林结构特征研究	67
4.1.3 华北落叶松白榆混交人工林结构特征研究	76
4.1.4 灌木人工林结构特征研究	85
4.2 流域内主要树种生长过程及生物量研究	86
4.2.1 流域主要树种生长过程	88
4.2.2 流域主要林木及林分生物量	98
4.2.3 树种适宜性评价与选择	100
5 不同森林植被水源涵养功能与综合评价	111
5.1 不同森林植被类型水源涵养功能研究	111
5.1.1 流域内不同森林植被枯枝落叶层水源涵养功能特点	111
5.1.2 流域内森林植被土壤层水源涵养功能	118
5.1.3 流域不同森林植被林地蓄水量	125
5.2 流域森林植被水源涵养功能综合评价	127
5.2.1 流域森林植被水源涵养功能评价指标体系	127
5.2.2 流域森林植被水源涵养功能评价指标权重确定	128
5.2.3 流域森林植被水源涵养功能综合评价(主成分分析法)	130
5.3 森林植被类型涵蓄水功能与林分因子关系的探讨	132
5.3.1 林分因子与枯枝落叶层涵蓄水分功能的关系	133
5.3.2 林分因子与土壤层涵蓄水分功能的关系	135
5.3.3 林分因子与枯枝落叶层、土壤层综合涵蓄水分功能的关系	136

5.4 本章小结	137
6 低效水源涵养林评判标准	139
6.1 低功能林概念的提出	139
6.2 低效水源涵养林评判因子选择	140
6.3 低效水源涵养林的评判	141
6.3.1 杨树低效水源涵养林的评判	141
6.3.2 油松低效水源涵养林评判	156
6.3.3 华北落叶松低效水源涵养林评判	170
6.3.4 灌木林低效水源涵养林的评判	174
6.4 本章小结	176
7 森林植被与土壤性质格局耦合关系	178
7.1 流域防护林空间分布	178
7.1.1 流域土地利用格局	178
7.1.2 流域防护林空间格局	179
7.1.3 林地分布格局与地形因子的关系	181
7.2 小流域土壤理化性质空间格局	185
7.2.1 土壤理化性质水平空间格局	185
7.2.2 土壤理化性质与地形因子的关系	187
7.2.3 不同林地的土壤理化性质比较	190
7.3 不同立地条件下典型林地土壤质量评价	190
7.3.1 评价因子的确定	191
7.3.2 主成分分析法综合评价	191
7.3.3 流域内不同坡向林地土壤质量评价	191
7.3.4 流域内不同坡度林地土壤质量评价	194
7.3.5 流域内典型林地土壤质量评价	196
7.4 本章小结	197
8 低效水源涵养林更新改造技术	198
8.1 低水源涵养功能类型划分和采取的经营措施	198
8.2 低效水源涵养林的更新改造	199
8.2.1 树种结构的调整	200
8.2.2 目标林相的选择	204
8.2.3 以水源涵养为目标的区域森林覆被率确定	204
8.3 低效水源涵养林改造技术措施	206
8.3.1 杨树林分改造技术	206

8.3.2 油松林分改造技术	212
8.3.3 华北落叶松林分改造技术	217
8.3.4 灌木林分改造技术	218
8.4 低功能林更新的土壤水文效应研究	219
8.4.1 枯枝落叶层的水文生态效应	219
8.4.2 土壤层的水文效应	225
8.5 本章小结	239
参考文献	242

1 森林植被涵养水源功能研究综述

本文主要从森林水源涵养功能的机制、影响因素（林分结构、土壤结构、森林空间配置）、效益评价，以及低水源涵养功能人工林的更新改造理论、技术途径等方面进行国内外研究综述。

1.1 森林水源涵养功能的机制研究

森林水源涵养功能主要表现在对降雨的再分配上，而这种作用是通过森林植被、枯枝落叶和森林土壤 3 个作用层对降雨的拦蓄作用而实现的。一方面森林具有吸收器和缓冲器的作用，改变洪水流量的时空分布，称之为削洪功能；另一方面，通过森林土壤的非毛管孔隙暂时储存部分重力水，不断补给河流，增加枯水期流量，称之为调蓄功能。在不同的森林树种组成、林分结构、地质地貌、土壤类型、降雨条件及人为经营活动的相互作用下，对不同流域范围内水资源的时空分配产生深刻的影响。森林植被外在的水源涵养功能是其内部各个垂直层截留降雨、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，森林植被的各个垂直层对水源涵养功能的发挥各自起到重要的作用。

1.1.1 乔木冠层水文作用

森林林冠对大气降水的再分配是水分输入森林的第一个环节，其过程涉及森林生态、森林水文、森林气象及水土保持等诸多方面，是经典森林水文学的主要研究内容之一，对它的研究早在 20 世纪 40 年代森林水文成为一门独立学科之前就已开始了。林冠层对降水的截留，使林内降水量、降水强度和降水分布等发生显著变化，并对林地整个水文过程产生影响，截留后的降水被分为三个部分，即林冠截留量、穿透降水量和树干茎流量。林冠截留及截留降水的蒸发在森林生态系统水分循环和水量平衡中占有重要的位置，同时林冠截留量受风速、降雨特征、树种、林龄、郁闭度和林冠蒸发能力等多因素的影响。国外对林冠截留作用的研究开展较早且较系统。中野秀章（1983）的研究表明，林冠截留量主要受气象条件和森林条件的共同支配，其中树种、森林结构、林龄、蓄积、季节等是主要支配因素。张建列和李庆夏（1989）在综合国外研究后认为，在热带和亚热带地区，

林冠截留率一般在 9%~26%；在温带及寒温带地区，林冠截留率一般大于热带，其中针叶林的林冠截留率变化在 20%~40%，并具有明显的季节变化。树干茎流量一般只占降雨量的 0.3%~3.8%，在水量平衡中常被忽略不计。林内穿透降水与林分密度成反比，随着林冠截留量的增加而减小，随着距树干距离的增大而增加，在数量上等于降水减去林冠截留与树干茎流之和。国内在林冠截留方面的研究起步较晚，但发展迅速并取得了许多研究成果。陕西省水土保持局（1979）的研究认为，林冠截留量和截留率不仅与林木郁闭度、覆盖层、树冠的大小、形状和枝叶的吸水能力等有关，而且与降水特性、降水期间的风速、风向等有关，其中起主要作用的是郁闭度、覆盖层、降水量和降雨强度。从 20 世纪 80 年代起，对林冠截留的研究在区域和深度上得到了很大的发展。刘向东等（1989）的研究表明，枝叶的吸水性能不同对林冠截留量具有明显的影响，如辽东栎（*Quercus liaotungensis*）枝叶吸水率为 22.5%~28.8%，截留率为 23.7%；山杨（*Populus davidiana*）和白桦（*Betula platyphylla*）林的吸水率为 17.0%~23.4%，截留率为 16.2%~21.0%。刘文耀等（1991）对滇中地区山地森林的研究表明，其水文效应因森林类型不同而不同，常绿阔叶林的林冠截留率为 11.9%~28.8%，针叶林云南松（*Pinus yunnanensis*）为 10.3%~22.9%；树干茎流率则分别为 0.5%和 0.3%，说明在同一地区不同树种的林冠截留率有所不同。陈步锋等（1998）对热带雨林山地天然更新的研究表明，林冠截留具有年季变化的特征。林冠截留率的年变化幅度为 11.0%~17.6%，旱雨季变化分别在 14.4%~31.4%和 11.5%~19.4%；其中树干茎流率年均均为 7.1%，雨季月变化为 2.2%~12.4%。据刘世荣等（1996）的研究，我国主要森林生态系统的林冠年截留量变动为 134.0~626.7mm，变动系数为 14.27%~40.53%，截留率平均值为 11.4%~34.3%，说明我国不同森林生态系统的林冠截留功能存在较大的波动性。王佑民（2000a）在总结林冠对降水再分配作用时指出，我国不同地区林冠一般可截留全年降水的 15%~30%，林冠截留量随降水量的增加而增大，但趋近饱和截留量时增加很慢；截留与雨强的关系十分密切，雨强越大，截留量越小，截留率就越低，反之雨强越小，截留量愈大，截留率越高。

林冠层对降雨的阻挡，引起降雨动能的变化，降雨动能是产生土壤侵蚀的原动力。Mosley（1982）认为，林冠枝叶具有聚集雨滴的作用，使透过林冠层的降水形成新的雨滴谱，雨滴径级和质量通常比天然雨滴增大，在降落地表的过程中，可能被充分地加速到具有一定的能量，对土壤的破坏作用增大。Lee（1984）认为，林冠距地面 8m 以上，水滴落地时速率可以达到终点速率的 95%。但是，林冠也具有削减降雨动能的作用。余新晓（1988、1989）研究认为，乔木层对降雨动能的削弱由两部分组成，一是林冠截留作用削减的降雨侵蚀能量；二是林冠缓冲作用减弱的降雨侵蚀能量。黄土高原森林植被的林冠截留量占大气降雨量的 15%~

35%，树干茎流量占 2%~5%，这两部分降水的侵蚀能量都将因林冠的截留而被削减。根据余新晓的分析，林冠截留作用削减的降雨动能约占降雨总动能的 17%~40%；其他的林内降水在到达地表之前，由于林冠的缓冲作用，其降雨动能也将被削弱。雷瑞德（1988）则认为，林冠对降雨动能的增减效应随冠高而变化，当华山松（*Pinus armandi*）林冠下限高度超过 7m、降水量大于 5mm 时，林冠不能有效地降低降雨动能，此时，透过林冠层的降水，若林地无地被物保护，有可能引起更大的土壤侵蚀。因此，在造林时应尽可能建造结构复杂且矮小的乔木林分。周跃（1998）在西南高山峡谷区对云南松林叶滴溅蚀的研究表明，在高强度降水的雨季早期，由于林冠的缓冲作用，叶滴的溅蚀量较低；在集中降水的雨季中期，滴溅量最大；到雨季后期，雨量充分但强度减弱，截留率最高，滴溅量比早期多 32%。可见，林冠层对降雨的影响，以及林冠层与降水特征、林冠结构之间存在的关系等均有待进一步深入、系统的研究，逐步完善和丰富研究成果。

林冠截留功能具有时空异质性，部分学者建立了描述林冠截留的经验理论模型，并将其整合到流域水文模型中成为林冠截留研究的主要目标。国内外的学者在这方面做了大量的研究工作，根据影响林冠截留的各种因子与林冠截留量的数量关系推导出降水截留的经验理论模型。林冠截留模型是估算和预测林冠截留量的有效工具，主要包括经验、半理论和理论模型等，虽然三者各有利弊，但结合理论推导和经验参数的半理论模型更具实用性。半理论模型中，Calder（1986, 1996）的随机模型、Rutter 等（1971, 1975, 1977）的微气象模型，以及 Gash 等（1979, 1995）的解析模型运用广泛，热带很多地区都在各种森林类型实验的基础上对这些模型进行检验，Gash 模型及其改进模型与实际观测的结果拟合的较好，而 Rutter 的双层随机模型则更能贴切地描述热带天然林小时间尺度的林冠加湿过程。经验模型虽然有很大的局限性，不能反映截留过程，但它简单明了的表明了林冠截留量与降雨量之间的数量关系。曾庆波（1994）研究得出尖峰岭热带季雨林 101 次降雨中林冠截留 Y 与降雨量 X 的关系式为 $Y=0.2388X+0.9354$ ，两者的相关系数为 0.90。Dykes（1997）根据文莱沿海低地雨林 46 场降雨得出截留量 I 与降雨量 P 的回归方程为 $I=0.13P+0.93$ ，两者的相关系数为 0.71。Jackson（2000）用线性方程、二次方程和对数方程拟合东非热带森林的各级降雨量 P 与截留量 I 的情况，认为对数方程拟合更好，拟合方程为 $I=0.54191nP+0.85$ 。由降雨截留过程可知，对未使林冠达到饱和的降雨而言，线性方程拟合较好，其中的参数物理意义也更为明确。对雨量较大的降雨而言，则应尝试用非线性方程拟合可能结果较好。

综上所述，林冠对降水截留作用具有重要的水文意义，它影响林地的水分循环和水量平衡。但从水土保持的角度看它的作用是有限的，这一方面是由于林冠截留的降水中，非侵蚀性降水所占比例大，而对于造成严重水土流失的暴雨，它

所截留的降水所占的份额较小,若有前期降水则更微不足道;另一方面,林冠枝叶对雨滴的聚集作用,使透过林冠的降水形成的新雨滴谱还可能加重对林地的土壤侵蚀。因此,汪有科等(1994)表示,对于乔木林冠层的水土保持作用与其说在其对降水的截留,不如说在其能提供丰富的枯枝落叶。

1.1.2 灌木草本层水文作用

灌木草本层截留降雨作用的大小主要取决于自身的发育状况,即枝叶量的多少。林内灌木草本层的生长发育受林冠层的制约,在不同林分中其生长状况差异很大,因此它对降雨截留的变化幅度也很大。刘向东等(1994)在六盘山区对山杨林、白桦林、辽东栎林林下灌木草本层的测定表明,其截留率分别为 2.3%~12.6%、1.8%~12.6%、4.5%~16.0%。程积民(1987)在子午岭的测定表明,在天然乔木复层林内乔木层的林冠截留量可占总截留量的 50%~60%,灌木层占 20%~25%,草本植物层占 10%~15%。汪有科等(1994)在黄土丘陵区测定结果表明,当乔木层对大气降水的年截留率为 15%~35%时,灌木草本层的截留量可占 1.8%~16.0%。至于灌木纯林林冠对降水的截留,其效应非常显著。郭百平等(1996)利用人工降雨对天然沙棘(*Ippophae rhamnoides*)林冠截留作用研究表明,在降雨条件相同时,不同盖度沙棘林的初损值(从降雨开始到地面产流这段时间的降水量)不同,盖度越大,初损值也越大,盖度为 70%的沙棘林,其初损值是荒坡的 4.6 倍,平均林冠截留率为 15.9%,反映了同一灌木树种盖度不同其截留作用有差异。杨新民(2001)对黄土高原地区主要灌木树种小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)林经过 7 年的测定,得到年平均降水量为 542.3mm,林冠截留量和树干茎流量分别为 114.5mm 和 0.57mm,林冠年截留率和树干茎流率分别可达 21.1%和 0.1%。赵金荣等(1994)采用人工吸水法测定了 37 种灌木的冠层截留表明,有 21 种灌木最大截留降水量在 0.3mm 以上,并认为林下灌木层对减弱雨滴击溅地表动能、滞后地表径流发生起重要作用。刘向东等(1994)指出,灌木草本层对降雨动能的削减也可分为两部分,一部分是截留降水所减少的降雨动能,其数量可按截留率计算,约为大气降水总动能的 2.0%~15.0%,平均为 5.6%;另一部分为透过该层滴入地表土壤的降水减少的降雨动能,由于它滴落的高度较低,动能被大大削弱,其数量可按该层的覆盖率计算。黄土高原森林植被灌木草本层的覆盖率约为 20%~80%,按 50%计除去前一部分外约有 44.4%的降雨动能被削弱。

综上所述,林分中灌木草本层就截留降水而言,其截留量主要受乔木层郁闭度的影响,其变化幅度很大。它可以减少部分穿透降水,且由于高度较低,能明显减少降雨的能量,是森林水源涵养、保持水土的重要补充作用层。

1.1.3 枯枝落叶层水分截持作用

Folliott 等(1968)认为,枯枝落叶层是指土壤上方所有已死植物体,是森林生态系统的特有层,可为森林土壤提供机械保护作用,免除雨滴对土壤层的直接打击,降低冲蚀能力,增加土壤渗透率。Putuhena 和 Cordery (1996)认为,森林枯枝落叶层具有较大的水分截留能力,对土壤水分的补充和植物水分供给具有明显影响。我国的研究结果表明,枯枝落叶层吸持水量可达自身干重的 2~4 倍,各种森林枯枝落叶层的最大持水率平均为 309.54%。周晓峰和李庆夏(1994)在对蒙古栎(*Quercus mongolica*)林采伐后凋落物量和持水力的变化进行研究,疏伐对凋落物和最大持水量影响较小,蒙古栎林经疏伐郁闭度从 0.95 降低至 0.6 时,凋落物干质量从 6.79t/hm² 减少到 5.82t/hm²,最大持水量从 2.2mm 降低到 1.9mm,分别降低了 14.3%和 13.6%;在皆伐迹地,凋落物最大持水量和干重降低到 0.9mm 和 2.73t/hm²,分别降低了 59.8%和 59%。孙立达和朱金兆(1995)在黄土高原人工林枯落物层吸持水量的研究表明,其持水容量小于 191%。由于枯枝落叶层截持了大量的水分,从而提高了土壤抗冲性,减缓了水在土壤坡面上的流速,减小径流泥沙量,因此增加了水向土壤中入渗的机会。枯枝落叶层不仅具有较强的持水性,而且具有很强的透水性。由于枯枝落叶层具有比土壤更多更大的孔隙,其水分也就更容易蒸发,Kohler (1984)的研究表明,森林的枯枝落叶层吸持水分的蒸发量占林地总蒸发散的 3%~21%。森林枯枝落叶层吸持水分在给植物供应养分上也有重要作用,在 Tietema 等(1992)的研究中表明,不同类型的森林枯枝落叶层的氮化和矿化速率随其含水量的增加而提高。Richard (1984)指出,枯枝落叶层对降水截留量的大小与落叶种类、蓄积量、堆积状态、干湿状态、蓄水容量、分解程度、干燥速率、降雨性质等有关,其中湿润频率和干燥速率则与当地气候密切相关。枯枝落叶层的蓄积量及其持水特性是研究枯枝落叶层保持水土、涵蓄降水的基础。苏宁虎(1989)、吴钦孝等(1993)分别在六盘山区、黄龙山区、管涔山区、榆林沙区等地,对辽东栎、山杨、白桦、华北落叶松(*Larix principis-rapprectii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)林等枯枝落叶层的蓄积量变化、凋落过程、分解速率和持水特性进行了研究,建立了 6 种类型枯枝落叶层蓄积动态变化的数学模型,得出了黄土高原主要森林类型枯枝落叶层蓄积量为 8.0~18.0t/hm²,最大持水率为 178.4%~334.6%,相当于每公顷可截留降水 3.9~7.8mm;年凋落量为 2.61~3.60t/hm²,其中枯叶占的比例 70%~90%。马雪华等(1994)在江西分宜县研究表明,杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林凋落物储量分别为 15.86t/hm² 和 25.47t/hm²,最大持水量为 4.09mm 和

5.12mm。

枯枝落叶层的分解程度对其持水能力有很大影响。据刘伦辉等(1990)测定,滇中山地常绿针叶林未分解层、半分解层和全分解层在全部枯枝落叶层中所占的比例分别为 25.2%、38.8%和 36.0%,其蓄水量的比例相应为 18.8%、56.8%和 24.4%,说明半分解层的蓄水能力最高。刘向东等(1994)在黄龙山区测定表明,油松未分解枯叶平均最大持水能力为 190.1%,半分解叶为 266.1%,分解残片为 353.6%,枯枝为 202.2%~314.6%。枯枝落叶层具有截留降水的重要作用。魏天兴等(1998)在晋西黄土区采用槽形雨量器法测定结果表明,当林外降水量小于 10mm 时,沙棘枯枝落叶层的截留量为 2.1mm; 11~20mm 时为 2.1~5.7mm; 21~40mm 时为 2.2~6.3mm; 大于 40mm 时为 8.5~10.0mm; 其截留率的变化为,当林外降水量 0~20mm 时,截留率 23.0%~47.0%; 20mm 以上时 14.5%~19.3%。可见,枯枝落叶层截留量的大小还与降水量级有关,降水量级小截留量少、截留率大。王佑民和刘秉正(1994)观测表明,郁闭度 0.8 的人工刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林,当凋落物储量从 0.5kg/m² 增加到 1kg/m² 和 1.5kg/m² 时,其年截留降水量从 23.50kg/m² 分别增加到 36.51kg/m² 和 49.75kg/m², 仅增加 55.4%和 111.7%, 约相当于凋落物储量增加的一半,说明凋落物在截留过程中存在边蓄水边透水的特性。

粗糙度是反映坡面薄层水流在流动过程中受到的阻力。王佑民(2000b)指出,枯枝落叶层覆盖地表,具有增加阻力的作用。张洪江等(1994)通过室内实验分析了 4 种乔木树种枯枝落叶和禾本科枯草的粗糙度后得出,当枯枝落叶层数量为 0.2g/cm² 时,杨属(*Populus*)树种、刺槐、油松枯枝落叶和禾本科枯草的粗糙度分别为 0.200、0.178、0.130 和 0.099,并认为粗糙度与 4 种枯枝落叶数量均呈指数相关,但其增大对粗糙度的增加有一定限度。吴长文和王礼先(1995)的测定表明,在坡长 60m 的坡面上,天然次生林的汇流时间为 30~40min,人工林的汇流时间为 10~20min,而裸露荒坡的汇流时间仅为 5.9min,林地的汇流时间是荒坡的 1.8~7.7 倍,说明林分阻止延缓径流的作用十分明显。赵鸿雁等(1991)对油松和山杨林地枯枝落叶层阻延径流速率的实验表明,当径流深为 1mm、坡度为 30°时,无枯枝落叶层覆盖的坡面径流速率分别是覆盖 0.5cm 油松和山杨枯枝落叶层径流速率的 6 倍和 13 倍。枯枝落叶层对径流的阻滞作用,具有减小径流对地表的冲刷,延长径流汇集时间,削减洪峰流量的重要意义。

增加土壤的入渗能力也是枯枝落叶层保持水土功能的重要内容,其作用原理主要由两方面因素组成,一是枯枝落叶层的积累和分解为土壤提供了大量的有机质,从而改变了土壤结构,增加了土壤中的粗细孔隙;二是枯枝落叶层对地表的覆盖,减轻了雨滴的冲击,使土粒不被分散,孔隙不被堵塞。陈云明和陈永勤(2003)对黄土丘陵半干旱区人工沙棘林的研究表明,沙棘林地的土壤容重小于农地,其影响深度可达 50cm; 沙棘林地的土壤入渗速率在整个测定时段均高于荒坡,其差