

森林土壤研究集成

INTEGRATION ON FOREST SOIL RESEARCH ACHIEVEMENTS

罗承德 李贤伟 张健 宫渊波 等 著



科学出版社

森林土壤研究集成

罗承德 李贤伟 张 健 宫渊波 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书就森林土壤当前研究领域中将有可能成为发展趋势的一些热点问题,集长时期科研教学以及在德国哥廷根大学土壤与林木营养研究所研修积累的点滴而成。全书分四篇,共8章,着重介绍了森林植被恢复与水土保持、森林土壤酸化及其生态修复和林木细根及其周转的基本概念、研究方法与研究成果;系统总结了森林凋落物的积累与分解速率和森林土壤有机质组分的研究;深入讨论了森林生态系统碳储量与排放、森林土壤湿度与温度状况和森林土壤养分状况研究方法的研究。

本书适合土壤学、林学、环境科学等领域的研究人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生以及林业生产一线从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

森林土壤研究集成 / 罗承德等著. —北京: 科学出版社, 2013.3

ISBN 978-7-03-036849-2

I. ① 森… II. ① 罗… III. ① 森林土-研究 IV. ① S714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 039943 号

责任编辑: 杨 岭 冯 铂 / 封面设计: 陈思思

责任校对: 余少力 / 责任印制: 邱志强

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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第 一 版 开本: 787*1092 1/16

2013年3月第一次印刷 印张: 15.25

字数: 350千字

定价: 60.00元

序

罗承德教授的著作《森林土壤研究集成》即将付梓，这不仅是他个人及其研究团队的学术成果，也是中国森林土壤学科发展过程中的一个里程碑。罗教授在政务繁忙的同时，几十年如一日坚持对森林土壤的执著探索——发现问题并解决问题，这种精神实属难能可贵。其间难为人道的艰辛和排除干扰的勇气令人叹服、佩服！

本书既包括理论性探讨成果，又有密切联系林业生产的课题。这些亦为当今国内外森林土壤学者所重视的研究内容。作者在研究手段方面注重创新，所用仪器、设备亦为高端产品。

本书内容反映出作者深厚的学术素养和完整的森林土壤学识。罗承德教授毕业于师资力量雄厚的四川农业大学（原四川大学农学院），业务上受到彭家元先生和侯光炯院士领军的团队的栽培。大学毕业后，他到川藏高原人烟稀少的雅江讲授中学英语和化学多年；1977年全国恢复高考后，报考原东北林学院（现为东北林业大学）森林土壤研究生。在校3年学习期间，他学习成绩好。毕业后东北林业大学拟让他留校，但他本人愿回川农报效。他在川农工作出色，长期担任系、院领导，同时从事研究生培养工作。罗承德教授也是一名“海归”，他曾赴德国哥廷根大学（世界森林土壤学先驱）做访问学者。像他这样具有完整的森林土壤学识的人才，在中国森林土壤学界尚不多见。

我离休后即赴美，漂泊在外多年，几年回国一次，对国内学术界的情况一知半解。罗承德教授嘱我为此书作序，自当从命，但写成后只能算是读书初报。

林伯群

东北林业大学离休教授

写于2012年7月美国旅途中

前 言

森林土壤学是研究森林土壤的形成、发育、性质、利用和改良的学科。一般说来，大凡与森林生态环境和林业生产有关的土壤问题，就是森林土壤研究的对象与范畴。因此，森林土壤学既是土壤学中的新兴边缘学科，又是林学与土壤学之间的交叉学科。20 世纪 60 年代，宋达泉先生、朱济凡先生等正式确立了我国森林土壤学科的学术地位，并在他们的学术领导下，以林伯群先生、阳含熙先生等为代表的中国第一代森林土壤学科领军学者几多艰辛，几多收获。森林土壤学科走过了 20 世纪六七十年代的草创、发展期，谱写了 20 世纪八九十年代的拓展、繁荣期，已彪炳于中国土壤学、中国林学研究的史册。

进入 21 世纪，知识积累总量成几何级数增长，科研成果转化成生产力的周期大大缩短。但是，从 2005 年在浙江召开的“第八届全国森林土壤学术会议”和 2008 年在北京召开的“中国土壤第十一届全国会员代表大会”两次会议的出席人数以及提交论文数量来看，森林土壤学科显得萎缩了。这可能是因为人们对获益甚微的森林土壤研究缺乏兴趣，以致从事森林土壤研究的人员减少。

现代科学技术发展的一个显著特点是在高度分化基础上的高度综合，并以高度综合为主要趋势。不过，任何学科的形成与发展都有自身赖以支撑的学科体系与基础，离不开本学科所研究和服务的对象。交叉融合，合而不同，才能展示五彩缤纷的科学大观园。昔日，老一辈森林土壤学家为正式确立我国森林土壤的学术地位，为森林土壤学科的崛起，直至跻身于国际森林土壤学科行列，作出了杰出贡献。眼下，他们之中有的已谢幕人生，有的已届耄耋之年，因而我辈身负承上启下的重任。1978 年，国家恢复招收研究生制度，笔者考入原东北林学院（现为东北林业大学），师从林伯群先生。从 20 世纪 80 年代初至今，从事森林土壤的教学与科研工作，其间 15 年主要从事教学管理工作。在笔者所从事的人才培养、科学研究和教学管理工作中，无一不打上林伯群先生的学术思想、教育观念和科学思维方法与工作方法的烙印。她“不唯书、不唯上，只唯实”、执著追求的科学精神，“无曰已是，无曰遂真”、勇于探索的忘我精神，无时无刻不在鞭策着笔者。为巩固与加强森林土壤学科的学术地位，期盼更多的青年才俊能加入森林土壤研究队伍中来，再创辉煌，笔者总觉得应该做点什么。

森林生态系统是陆地生态系统的主体，森林土壤又是森林生态系统的重要基础，是生态系统中物质与能量交换的载体或场所。可见，森林土壤研究的领域很宽，研究的内容太复杂，以致难于囊括在一本书中。因此，本书没有系统论述森林土壤研究的理论与方法，而是仅仅就森林土壤研究中应该受到关注，并将成为今后发展趋势的一些热点课题，进行分析和探讨，并与各位同行和读者朋友分享笔者在长期从事教学、科研过程中的体会，以及在德国哥廷根大学土壤与林木营养研究所研修积累的点滴。全书分为四篇，由相对独立的 8 章组成。第一篇包含第 1、2 章。第 1 章针对全球瞩目的水土流失问题，

介绍森林植被恢复对水土流失过程的影响,以及对土壤改良效应和土壤微生物、酶活性的影响等研究成果。第2章论述森林土壤酸化的过程、特征、成因以及负面效应,介绍外源钙、磷、氮对铝胁迫下杉木幼苗生长影响的调控作用和杉木人工混交林对铝毒的缓解作用。第二篇包含第3、4章。第3章归纳森林凋落物研究方法,介绍巨桉人工林凋落物及其分解动态研究成果,以及如何预测森林土壤的有机质水平。第4章在综述森林土壤有机质组分的基础上,介绍人工云杉林间伐后土壤有机质组分响应的研究成果。第三篇包含第5章,阐述细根及其生态意义,总结细根的研究方法,介绍细根生长及养分分配、细根空间分布格局、细根养分动态及其与土壤养分有效性之间的关系,细根周转与养分归还等研究成果。第四篇包含第6~8章。关于应对或减缓全球气候变化的重大课题的研究非常活跃,但大多属于重复性、跟踪性的研究。因此,第6章首先总结森林生物量与森林土壤碳储量的研究方法,然后阐述土壤呼吸的内涵与定义,介绍几种相对简单、又能基本满足研究需要的分离测定土壤呼吸的方法。第7章概括森林土壤湿度测定方法,着重从土壤水能量讨论土壤水的移动性能,简介采用纽扣式土壤温/湿度记录器测定土壤的温度与湿度,应用数理统计方法,探讨土壤空气相对湿度与土壤湿度之间的相关关系。第8章从土壤养分的供应容量与供应强度切入,评介在养分状况研究中的研究法。在以上问题的讨论中,内容包括与此有关的基本概念、研究方法,以及根据森林土壤学自身基础理论对其所作的述评,并阐明编者的见解与观点,以期能与同行或者从事同类研究的科研人员取得共识。

本书得以顺利出版,首先要感谢笔者的同事们在森林土壤教学与科研工作中长期给予的倾力支持与紧密合作;本书还得益于国家“十二五”科技支撑计划项目“长江上游低山丘陵区生态综合整治技术与示范”(2011BAC09B05)、国家“十一五”科技支撑项目“长江中上游西南山区退化生态系统综合整治技术与模式”(2006BAC01A11)、国家“十五”重大科技攻关项目“四川盆周低山丘陵区水土流失综合治理技术与示范”(2001BA606A-06)、国家自然科学基金“林草复合模式细根特性及对土壤碳储量和营养循环的调控机制(30771717)”、国家自然科学基金“巨桉人工林生态系统生物多样性形成过程”(30872014)、四川省科技支撑计划重点项目“川中丘陵区柏木低产林分改造技术与示范”(2010NZ0049)以及四川农业大学“211工程”“双支计划”等项目的资助。这里需要特别提及的是龚伟博士、刘洋博士、刘彬博士、雷波硕士等,他们撰写了书稿部分内容,刘彬博士、刘运科硕士、雷波硕士还完成了书稿文字录入与整理工作,在此对他们付出的劳动表示最诚挚的感谢。

笔者自知才疏学浅,书中疏漏及错误之处恳请各位专家和广大读者不吝赐教。

罗承德

2012年10月

目 录

序 前言

第一篇 退化森林土壤的生态修复

第 1 章 森林植被恢复与水土保持	3
1.1 森林植被恢复对降雨再分配的影响	4
1.1.1 林冠层截流对降雨的影响	4
1.1.2 森林凋落物对降雨的拦蓄	5
1.1.3 林地土壤水分的再分配	5
1.2 森林植被恢复对水土流失过程的影响	8
1.2.1 降雨与坡面径流出现率	8
1.2.2 植被覆盖类型与坡面径流滞后时间	9
1.2.3 植被恢复与坡面径流量	11
1.2.4 植被恢复与坡面产沙	16
1.3 森林植被恢复对小流域产流、产沙的影响	16
1.3.1 降雨与小流域产流	17
1.3.2 次降雨与小流域产流	20
1.3.3 植被恢复对坡面与沟道径流及产沙关系的影响	23
1.3.4 不同植被恢复阶段小流域产流、产沙情况	26
1.4 森林植被恢复对土壤养分流失的影响	28
1.4.1 植被恢复对土壤坡面养分流失的影响	28
1.4.2 植被恢复对小流域沟道养分流失的影响	32
1.4.3 小流域沟道泥沙养分流失特征	35
1.4.4 径流和泥沙中的养分流失比较	37
1.4.5 坡面沟道养分流失的比较	37
1.5 森林植被恢复的土壤改良效应	38
1.5.1 植被恢复对土壤容重、孔隙度及水分状况的影响	39
1.5.2 植被恢复对土壤养分状况的影响	41
1.5.3 植被恢复对土壤微生物的影响	44
1.5.4 植被恢复对土壤酶活性的影响	48
第 2 章 森林土壤酸化及其生态修复	56
2.1 森林土壤酸化	56
2.1.1 酸化过程和脱酸过程	56

2.1.2	森林土壤的酸化过程	58
2.1.3	森林土壤酸化的特征	59
2.2	森林土壤酸化原因	59
2.2.1	酸沉降对土壤酸化的影响	60
2.2.2	森林生态系统潜在的酸化过程	60
2.2.3	氮周转测定	64
2.3	森林土壤酸化负面效应	69
2.3.1	森林生长衰退和铝毒害阈值	69
2.3.2	铝对林木正常代谢与生长发育的影响	73
2.4	森林土壤酸化生态修复	77
2.4.1	外源钙、磷、氮对铝胁迫下杉木幼苗生长影响的调控研究	77
2.4.2	杉木人工混交林对铝毒害的缓解作用	83

第二篇 森林凋落物及土壤有机质

第3章	森林凋落物的积累与分解速率	93
3.1	森林凋落物及其生态意义	93
3.2	森林凋落物研究方法	93
3.2.1	凋落量的研究方法	94
3.2.2	凋落物分解的研究方法	95
3.3	巨桉人工林凋落物及其分解动态	96
3.3.1	凋落物产量和养分归还量	97
3.3.2	凋落物的分解	100
3.4	森林土壤有机质水平	105
3.4.1	森林土壤有机物质的氧化速率	105
3.4.2	森林土壤有机质水平估计	106
第4章	森林土壤有机质组分	109
4.1	土壤有机质组分划分	109
4.1.1	可溶性有机质	109
4.1.2	微生物量有机质	112
4.1.3	活性有机质	114
4.1.4	腐殖质	115
4.1.5	轻组有机质	115
4.1.6	颗粒有机质	117
4.2	不同间伐强度人工云杉林土壤有机质组分响应	118
4.2.1	不同间伐强度对人工云杉林土壤有机质含量的影响	119
4.2.2	不同间伐强度对人工云杉林土壤可溶性有机质含量的影响	120
4.2.3	不同间伐强度对人工云杉林土壤微生物生物量碳的影响	123
4.2.5	不同间伐强度对人工云杉林土壤颗粒有机质含量的影响	126
4.2.6	不同间伐强度对人工云杉林土壤轻组有机碳含量的影响	129

第三篇 林木根系研究

第 5 章 林木细根及其周转	139
5.1 林木细根及其生态意义	139
5.1.1 林木细根的界定	139
5.1.2 细根的生态功能	141
5.1.3 林木细根研究现状	142
5.2 细根研究方法	143
5.2.1 细根采集方法	143
5.2.2 细根测定方法	144
5.2.3 细根分解研究方法	147
5.3 细根分枝特性与垂直分布特征	148
5.3.1 细根分枝特性	149
5.3.2 细根特征值垂直分布	150
5.3.3 细根特征值垂直分布模拟方程	152
5.4 细根生物量及其空间分布格局	153
5.4.1 细根和草根生物量动态	153
5.4.2 细根生物量垂直分布	154
5.4.3 细根水平分布动态	156
5.4.4 细根和草根的空间分布格局	157
5.5 细根养分动态及其与土壤养分有效性的关系	159
5.5.1 细根 N 动态与土壤速效 N 的相关性	159
5.5.2 细根 K 动态与土壤速效 K 的相关性	160
5.5.3 细根 P 动态与土壤有效 P 的相关性	161
5.5.4 细根 Ca 动态与土壤交换性 Ca 的相关性	162
5.6 细根衰老过程中养分内循环及其对施肥的响应	164
5.6.1 细根衰老过程中 N 浓度变化	164
5.6.2 细根衰老过程中 P 浓度变化	165
5.6.3 细根衰老过程中 K 浓度变化	166
5.6.4 细根衰老过程中 Ca 浓度变化	167
5.6.5 施肥对细根养分状况的影响	168
5.6.6 细根衰老过程中的养分内循环	169
5.7 细根分解及其养分释放	170
5.7.1 细根(草根)分解速率	170
5.7.2 影响细根(草根)分解的质量指标	171
5.7.3 细根(草根)分解过程中物质含量变化	173
5.7.4 细根(草根)分解过程中养分释放	176
5.7.5 细根分解过程中土壤养分的变化	177
5.8 细根周转及养分归还	181

5.8.1 细根现存量及月动态	181
5.8.2 细根生产量和周转	184
5.8.3 细根分解养分归还量估计	185

第四篇 森林土壤研究法研究

第6章 森林生态系统碳储量与排放	193
6.1 自然界的碳循环	193
6.2 森林生态系统碳储量	194
6.2.1 森林生物量碳库	195
6.2.2 森林土壤有机碳库	198
6.3 土壤呼吸及其测定方法	201
6.3.1 土壤呼吸	201
6.3.2 土壤呼吸组分测定方法	202
6.3.3 土壤呼吸的影响因素	204
第7章 森林土壤的湿度和温度状况	208
7.1 森林土壤湿度状况	208
7.1.1 森林土壤湿度测定方法	208
7.1.2 土壤湿度重复测定次数	209
7.1.3 土壤水能量及其移动性能	210
7.1.4 土壤水势与土壤湿度的相关关系	213
7.2 森林土壤的温度状况	215
7.2.1 土壤温/湿度记录器简介与安装	215
7.2.2 土壤温度动态数据收集与处理	216
7.2.3 川西高山云杉林土壤的湿度与温度	217
7.2.4 土壤空气相对湿度与土壤湿度的相关关系	220
第8章 森林土壤养分状况研究法	224
8.1 土壤中养分的保蓄方式	224
8.2 土壤养分的供应容量与供应强度	225
8.2.1 养分的供应容量	225
8.2.2 养分的供应强度	225
8.3 土壤溶液	226
8.3.1 负压渗漏计的构造	226
8.3.2 负压渗漏计的洗涤与野外安装	229
8.3.3 土壤溶液样品采集与贮存	230
8.4 平衡土壤溶液	231
8.4.1 方法原理	231
8.4.2 制备方法	232

第一篇 退化森林土壤的 生态修复

第 1 章 森林植被恢复与水土保持

森林作为陆地生态系统的主体和重要的可再生资源，在人类发展历史中起着极其重要的作用。然而，由于人类活动干扰或自然灾害作用，抑或双重作用的叠加效应，森林遭到大量破坏，森林生态系统不断退化消失，全球性生态环境持续恶化。于是，森林问题已成为当今生态环境的核心问题，恢复和重建退化森林生态系统被看做是缓解环境危机，实现经济、社会以及环境协调发展的根本措施。我国森林生态系统的退化现象十分严重，而且还在进一步加剧。因此，保护我国现有的原始森林生态系统，恢复和重建退化森林生态系统，提高生态系统的服务功能，是改善我国生态环境状况的关键所在。

退化森林土壤生态系统的主要特征之一就是森林植被破坏导致水土流失严重，水源枯竭，土地贫瘠，形成沙漠化；更为严重者，岩层裸露，形成石漠化。对退化森林土壤生态系统进行水土流失综合治理，就是通过人为措施，减少和避免人类活动对生态脆弱区、水土流失区的干扰，恢复与提高土壤肥力，充分发挥生态系统的自我繁衍和修复功能，加快植被恢复过程，从而大面积、快速地防治水土流失，实现土壤发育。

近年来，结合国家“十五”科技攻关计划，我们在四川盆周低山区的广元、天全、洪雅等市县对退化森林土壤生态系统进行植被恢复的实验研究，以严重退化地和农耕地为对照，探讨植被恢复对水土流失、养分流失、土壤理化性质的影响及土壤改良效应，为退化森林土壤的生态修复提供理论及技术依据。

广元研究区设在四川省广元市城北 4 km 的工农镇碗厂沟，隶属于广元市中区工农镇，东经 $105^{\circ}54'24''\sim 105^{\circ}58'48''$ ，北纬 $32^{\circ}27'51''\sim 32^{\circ}31'39''$ ，海拔 515~835 m，地处四川盆地北缘，米仓山南麓，属于秦巴山余脉低山暴雨区。本区受秦岭和大巴三山的影响，属北亚热带湿润季风气候，多年平均气温 16.1°C ，7 月极端高温 38.9°C ，1 月极端低温 -8°C ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 5065.4°C ，平均无霜期 264 d，年日照时数为 1383 h，四季分明，适宜多种生物繁衍。年降雨量多年平均 1081 mm，降雨年际差异大，最高年雨量 1518.1 mm(1961 年)，最低年雨量 580.9 mm(1975 年)；年内降雨分配不均，主要集中在 6~9 月，占全年降雨量的 72.5 %；年平均出现暴雨 3.3 d，大暴雨 0.6 d，雨量占年降雨量的 40 % 以上。由于降雨集中，常出现冬干、春旱、初夏旱、盛夏暴雨等自然灾害。广元市基带土壤为黄壤。因受地貌和气候影响，土壤类型较多，具有垂直分异现象，依次分布有黄壤、黄棕壤、棕壤、暗棕壤、草甸土等，且有较大面积的紫色土分布。由于受暴雨侵蚀作用，土层多浅薄。

洪雅研究区位于川西低山区洪雅县柳江镇。该区属亚热带湿润季风气候，平均日照约 1000 h，年均温 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ ，无霜期 352~360 d，境内空气湿度大，20 年(1980~2000)平均降雨量 1489.8 mm，月平均降雨量 124.2 mm。地带性土壤为黄壤，兼有冲积土、紫色土。该区土壤侵蚀较为严重。据洪雅县土壤调查结果，强度侵蚀土地占全县土地面积的 7.2 %，中强度侵蚀占 68.2 %，轻度侵蚀占 24.6 %。由于该区毁林开垦后长期耕作，

土壤理化性质已经发生了巨大变化。基于这种现状,该区于2000年启动退耕还林工程。

天全县研究区地处四川盆地西缘,是长江上游生态环境综合治理和实施退耕还林(草)的重要区域。全区属于亚热带湿润气候区,夏天暖和多雨、气候湿润,冬天寒冷干燥,四季分明。年平均降雨量1735.6 mm,年平均蒸发量922.6 mm,降雨时数累计年平均236 d;年平均气温15.1℃,1月平均气温5.1℃,7月平均气温24.1℃。春末夏初时有干旱发生,夏秋季节常低温阴雨,间有大风、冰雹,暴雨季节常出现洪涝、泥石流等自然灾害,并有暴涨暴落的特点。地貌属龙门山地区低山丘陵区,系黄土、紫色土分布区域,农耕地土壤以紫色土类、黄壤和水稻土为主,多种植水稻、油菜、蔬菜等农作物。农耕地土层较薄,保水保肥能力较差,坡度多在25°左右,呈严重的坡面侵蚀。

1.1 森林植被恢复对降雨再分配的影响

森林植被一般可以分为三个层次,即林冠层、地被物(枯落物)层和根系-土壤层,它们是保持水土的主要作用层,也是植被保持水土,调节水土流失过程的机理所在。植被主要通过林冠层截持降雨、地被物拦截径流等方式影响水土流失过程。

1.1.1 林冠层截流对降雨的影响

森林对降雨的调节作用,主要表现为林冠对降雨的截留、树干径流、树冠截留饱和后滴落降雨。滴落量、干流量、穿透雨量三者之和称为林内雨量。

林冠截留量和林冠截留率按照下式计算:

$$\text{林冠截留量} = \text{大气降雨量} - \text{林内穿透雨量} - \text{径流量}$$

$$\text{林冠截留率}(\%) = \text{林冠截留量} / \text{大气降雨量} \times 100\%$$

大多研究表明,林冠层对降雨的截流率与降雨量存在显著负相关,即降雨量越大,林冠层的截流率越低。

根据四川省广元市低山丘陵暴雨区湿地松林的定位观测数据(2004年),林冠层对降雨截留率的影响如图1.1所示。

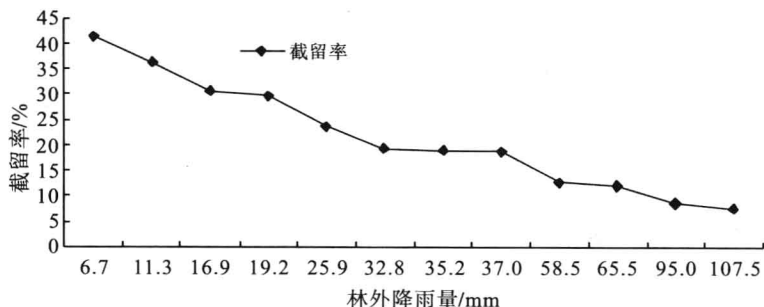


图 1.1 林冠层对降雨截留率的影响

从图1.1可见,由于林冠层枝叶对降雨的拦截以及枝叶、树干对雨水的吸收、吸附,湿地松林林内降雨强度、降雨量小于林外。湿地松林林冠对降雨的截留率与降雨量呈反比关系,也就是降雨量越大林冠截留率越小,如降雨量为6.7 mm时,截留率为41.5%;

当降雨量增大到 107.5 mm 时,截留率下降到 7.7%。

林冠层的截留作用使林内的降雨量、降雨强度和降雨时间发生了改变,减轻了雨水对地表面的直接冲击,减缓了地表径流的形成,对林地土壤层起着间接保护作用。可见,森林植被恢复后,森林生态系统对降雨的再分配效果十分明显,从而影响了流域的水文过程,在水土保持、调节洪峰、净化水质、水源涵养等方面发挥着重要作用。

1.1.2 森林凋落物对降雨的拦蓄

森林凋落物层吸持水能力与森林流域产流机制密切相关,并受枯落物组成、树种及林型、林龄、枯落物干燥度及分解和累积状况、前期水分状况、降雨特征、坡度等因素的影响。

森林凋落物层的持水能力可通过最大持水率(量)与最大拦蓄率(量)反映,但不能反映对实际降雨的拦蓄情况。因为最大持水率(量)是凋落物试样浸水 24 h 后的测定结果,而在自然条件下,山地森林的坡面上一般不会出现较长时间的浸水条件,降落到凋落物层上的雨水,一部分被其拦蓄,一部分通过孔隙很快入渗到土壤中去,而剩余部分作为地表径流流出。根据雷瑞德等(1984)的研究,当降雨量达到 20~30 mm 后,不论哪种植被类型凋落物层,实际持水率约为最大持水率的 85%。所以,用最大持水率估算的凋落物层对降雨的拦蓄能力偏高,不符合它对降雨的实际拦蓄效果,而一般用有效拦蓄量(modified interception)估算凋落物层对降雨的实际拦蓄量。2004 年在广元低山暴雨区 5 种林分地表凋落物的研究,均能在 2 h 内达到或接近 24 h 最大持水量的 85%。5 种林分有效拦蓄率的变化范围是 169.87%~307.08%,有效拦蓄量 283~2759 t/km²(表 1.1),各林分地表凋落物有效拦蓄率平均 223.68%,有效拦蓄量平均 1253.4 t/km²,其有效拦蓄量的大小为:火烧迹地灌丛>刺槐林>刺槐+湿地松混交林>麻栎林>湿地松纯林。这表明植被恢复后,林地凋落物层在调蓄降雨,减少径流方面有重要作用,特别是在调蓄较小雨量降雨时的功能是其其他层次不可替代的。

表 1.1 不同林分凋落物最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量

林分	枯落物储量 (t/hm ²)	自然含水量/%	最大持水率/%	最大持水量/(t/hm ²)	最大拦蓄率/%	最大拦蓄量/(t/hm ²)	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t/hm ²)
火烧迹地灌丛	12.85	8.78	361.27	33.60	352.49	32.46	307.08	2759
刺槐林	9.76	9.42	275.53	19.90	266.11	18.98	234.2	1613
刺槐+湿地松	9.52	7.89	220.92	11.50	213.03	10.75	187.78	914
湿地松纯林	3.76	9.76	198.67	3.70	188.91	3.33	169.87	283
麻栎林	6.01	8.14	258.24	8.70	250.10	8.21	219.50	698

1.1.3 林地土壤水分的再分配

1.1.3.1 土壤入渗性能

林地土壤水分入渗性能影响到降雨产流量及对土壤水分的补给,是评价林地水分调节能力的重要指标之一,对森林流域径流形成具有十分重要的意义。土壤入渗理论上属

于二维运动，即垂直入渗和侧向入渗，野外观测一般指垂直入渗。水分向土壤中的入渗速率和入渗量取决于供水速度、供水时间和土壤对水分的渗吸能力。供水速度由降雨强度决定，而渗吸能力和入渗速度主要取决于土壤自身的理化性质，如机械组成、团聚程度，特别是水稳性团聚状况，以及各土粒和团聚体的垒结和排列状况。土壤水分入渗能力直接决定地面径流量的大小，同时也对土壤水分和地下水的增长，以及壤中流和地下径流的产生形成影响。

林地土壤水分入渗性能大多采用土壤水分初渗率(当水分施加于土壤表面后入渗至表层土壤含水量达到最大值时的入渗率)和土壤水分稳渗率(土壤含水量接近饱和或饱和时的入渗率)表示。研究区 5 种植被恢复模式的土壤水分初渗率和稳渗率如表 1.2 所示。

表 1.2 表明，研究区 5 种恢复模式土壤的初始渗透率除刺槐林表层外均明显高于对照。稳定入渗率表层则无明显差异。对土壤入渗性能(初始入渗率、稳定入渗率)进行双因素(森林类型、土壤层次)分析，结果表明：不同森林植被下不同层次土壤入渗性能差异显著(初渗率： $F=11.46$ ， $Sig=0.0202$ ；稳渗率： $F=11.58$ ， $Sig=0.0195$)，表层土壤渗透能力比底层强。研究区几种植被类型与对照裸地相比，土壤初渗率和稳渗率均有较程度的增加，进一步说明了植被对增加水源涵养具有十分重要的作用。

表 1.2 土壤水分渗透指标

模式名称	灌丛		刺槐林		刺槐+湿地松		湿地松林		麻栎林		对照裸地	
层次/cm	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40
初渗率/(mm/min)	42.53	10.73	21.35	4.69	40.32	6.22	32.50	5.08	36.17	6.82	25.56	3.09
稳渗率/(mm/min)	3.94	1.14	2.42	1.71	3.28	2.96	3.74	2.28	2.02	0.7	3.69	1.07

1.1.3.2 土壤贮水能力

林地土壤贮水能力是评价森林水源涵养作用的一个重要指标，对流域径流量和产沙量也具有重要影响。水分渗入土壤后通常以两种形式贮存，即吸持贮存和滞留贮存。森林土壤由于其自身特性，滞留贮存水量较大，能有效控制地表径流，使土壤水不断补充地下水或形成壤中流，从而减少土壤冲蚀。不同森林类型涵养水源的能力，与土壤物理性质和枯落物状况有关，而贮水量则主要取决于森林土壤的非毛管孔隙率。目前，国内一般使用林地土壤非毛管孔隙饱和含水量计算。计算公式为：

$$S = 10000 \times h \times P$$

式中， S 为土壤贮水能力(t/hm^2)； h 为土层厚度(cm)； P 为土壤非毛管孔隙度(%)。

表 1.3 表明，5 种植被模式下，土壤表层(0~15 cm)非毛管贮水能力较对照裸地高，分别是对照裸地贮水量的 1.86、1.05、1.02、2.24 和 3.57 倍。

表 1.3 不同林分土壤容重、孔隙度与贮水量情况分析

林分	容重 /(g/cm ³)	总孔隙度 /(容积%)	贮水量 /(t/hm ²)	毛管孔隙度 /(容积%)	贮水量 /(t/hm ²)	非毛管孔隙度 /(容积%)	贮水量 /(t/hm ²)
灌丛	1.42	55.65	1113.00	50.07	1001.40	5.58	111.60
刺槐林	1.62	44.84	896.80	41.70	834.00	3.15	63.00

续表

林分	容重 /(g/cm ³)	总孔隙度 /(容积%)	贮水量 /(t/hm ²)	毛管孔隙度 /(容积%)	贮水量 /(t/hm ²)	非毛管孔隙度 /(容积%)	贮水量 /(t/hm ²)
刺+湿	1.48	50.48	1009.60	47.60	952.00	3.08	61.60
湿地松	1.46	38.83	776.60	32.12	642.40	6.71	134.20
麻栎林	1.51	43.46	869.20	32.77	655.40	10.70	214.00
对照	1.65	40.35	807.00	37.35	747.00	3.00	60.00

林地土壤水分的下渗能力是影响土壤水源涵养能力,减少地表径流的重要因素,与土壤非毛管孔隙度关系较大。不同模式下非毛管孔隙度不同,土壤贮水能力不同。有林地比无林地贮水能力强,而灌丛、针阔混交林地比阔叶纯林地或针叶纯林地的涵养水源效果好。

应当指出,林地土壤贮水量是通过土壤非毛管孔隙充水实现的。这种水受到重力作用,不断向土壤深层渗透,也就是说森林土壤的贮水能力是动态变化的。表1.3中计算的贮水量是指该土壤在水分饱和的情况下的短时间的贮水量,并不表明每次降雨都能达到饱和时的贮水量,而只能说明该土壤具有的潜在能力。另外,土壤中能较长时间保持水分的能力与毛管孔隙的持水能力关系极大。周择福(1997)研究认为用非毛管孔隙饱和和持水量评价干旱地区土壤蓄水性能不全面,应以非毛管孔隙和毛管孔隙蓄水量(即饱和蓄水量)评价该区的土壤蓄水性能。从表1.3亦可以看出,5种植被类型中土壤孔隙度除火烧迹地灌丛和刺槐+湿地松林外均偏低,且比例亦不合理,降低了林地土壤的水源涵养能力。因此,如何通过林草植被恢复和经营管理措施提高土壤孔隙的数量和质量,是退化生态系统进行人工植被恢复时应重点研究的内容。

降雨终止后,土壤表面入渗现象消失,但沿土壤剖面的水分入渗运动并未结束。水分的运动,引起土壤含水率沿纵向的变化,称为水分的再分布(王治国等,2000)。当土壤没有外来水分补给或损耗时,水分的再分布只是水分在土壤内部的运动与再分配,垂直方向上各点的含水量有所增减,总量并无变化。但土壤水分的再分布过程,对于后期降雨的入渗、产流及地表土壤蒸发过程具有明显影响。

研究区5种林分与农耕地比较研究结果表明,不同森林植被条件下,土壤物理性质具有一定的差异,因而森林植被类型也在一定程度上影响着土壤水分的再分配(图1.2)。

从图1.2可见,不同植被类型(或农耕地)条件下,在降雨停止后,各层土壤的水分随着时间推移,在土壤各层次内部进行着重新分配。不同土层之间在不同时间处于不同的吸、释水状态,如农耕地,在降雨后1~3h表层土壤处于吸水状态,土壤含水量增加,但3h以后土壤含水量开始回落,土壤处于释水状态。其他各样地内情况相似。这主要是由土壤水分下渗过程的滞后性造成的。在降雨过程中,处于不饱和状态的土壤吸收水分,逐渐趋向饱和,土壤水分含量提高,但降雨停止后,随着时间推移,表层土壤水分下渗或蒸散发,呈现回落,而下层土壤水分含量由于上层水分的补给而呈现升高趋势。