

黄土高原功能导向型 林分结构调控

毕华兴 魏曦 等著



科学出版社

国家重点研发计划“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与
特色林产业技术及示范”

北京林业大学学术专著出版计划

资助出版

山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站

林果业生态环境功能提升协同创新中心

黄土高原功能导向型林分结构调控

毕华兴 魏 曦 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以晋西黄土区刺槐林、油松林和刺槐-油松混交林典型林分为研究对象,并以山杨-栎类次生林为对照,通过对林分结构(水平、垂直结构)和水土保持功能影响因子的解析,借助结构方程定量分析不同林分结构与水土保持功能的耦合关系,提出基于功能导向型的林分结构调控和优化措施配置,为黄土高原林分密度调控关键技术问题的解决,以及黄土高原林分结构改造和水土保持功能持续提高的协调管理提供参考依据。

本书可供生态学、林学、水土保持学等专业的研究、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

黄土高原功能导向型林分结构调控/毕华兴等著. —北京:科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061443-8

I. ①黄… II. ①毕… III. ①黄土高原—林分结构—调控
IV. ①S758.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第106662号

责任编辑:朱丽 万峰 / 责任校对:何艳萍
责任印制:吴兆东 / 封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:10 1/4

字数:240 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《黄土高原功能导向型林分结构调控》

本书作者名单(按姓氏汉语拼音排序):

毕华兴 崔艳红 侯贵荣 孔凌霄

李永芳 梁文俊 王 宁 魏 曦

杨宗儒 袁普金 云 雷 周巧稚

学术秘书: 魏 曦

前 言

美国航空航天管理局(NASA)的最新研究表明:过去 20 年,世界变得越来越“绿色”了。其中,仅中国的植被增加量就占到过去 17 年全球植被总增加量的至少 25%(Chi et al., 2019)。这一数据强有力地证明了中国在过去几十年来为世界人工林营造做出的巨大贡献。然而,森林多种功能与效益的充分发挥,必须建立在足够数量、优良质量、合理结构、均匀分布的森林体系之上(张德成, 2018),我国森林资源质量不高、结构失衡及效益低下的问题依然相当突出,加速提升森林资源的整体质量,是当今我国林业建设的重要任务。为此,国家林业局在组织实施六大林业生态工程的同时,又开始实施森林质量精准提升等一系列重要工程。在生态文明的大理念和背景下,如何进一步改善生态环境、控制土壤侵蚀,实现林业生态工程建设从数量增加到质量提升的跨越,是当今人们关注的焦点。

就黄土高原这一全球水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区(原翠萍等, 2010)而言,过去若干年来,气候影响以及人类活动使得黄土高原植被遭到严重的破坏,导致该区域水土流失严重、生态功能急剧下降、环境不断恶化、人民生活水平低下,上述问题严重制约着该地区的可持续发展。因此,自 1950 年以来针对黄土高原开展了大量和长期的水土保持和植被建设工程,使该区域生态环境得到逐渐恢复和改善(王力等, 2004)。但仍有大量研究结果指出:在黄土高原造林和植被恢复过程中,出现了人工林造林密度过大、树种选择不合理等造成的树木生长缓慢、土壤水分亏缺、深层土壤干化等生态问题(Sun et al., 2006; Wang et al., 2011),使得黄土高原处于“两难”的境地,一方面需尽快恢复增加森林植被,改善恶劣的生态环境;另一方面,盲目造林和简单增加森林植被可能会因过量耗水而激化林业生态用水与其他用水的矛盾,也可能造成土壤干化,进一步影响植被的稳定(王彦辉, 2006)。在此背景下,众多学者及相关政府部门开始广泛关注和高度重视大规模的森林植被建设对水资源和土壤资源的影响,特别是在水土流失严重、水资源匮乏、生态环境脆弱和社会经济落后的黄土高原。

林分结构决定着林分功能的发挥,同时也是林分稳定性的重要指标,一些学者基于水量平衡原理进行林分合理密度调控(张建军, 2007)和适宜林草植被覆盖率的研究(毕华兴, 2007),也有学者关注林木抚育经营后林分内植被、物种多样性、林分结构、土壤等环境变化(梁星云, 2013; 何友均, 2013; 郝建锋, 2014; 冯琦雅, 2018)。尽管目前关于林分结构和功能的研究较多,但现有研究在林分结构和功能关系解析上仍有很多问题没有得到解决,如什么样的林分结构具有较优的水土保持功能?怎样对林分结构与功能之间多对多复杂关系进行耦合分析?在林分结构和功能耦合解析的基础上,各林分结构因子怎样进行组合调控才能更有效地提高其功能?这些问题是制约林业生态工程建设的

关键技术瓶颈，严重影响着林业生态工程建设从数量增加到质量提升的成功跨越。其中，典型林分的林分结构与功能耦合机理是这些关键技术背后的核心科学问题。这一问题的解决，无疑对充分解析林分结构和功能之间多对多的复杂关系、实现基于功能导向型的林分结构精准调控具有强大的理论支撑，对林业生态工程建设和水土流失防治、转变林业发展方式、推进生态文明建设具有重要的现实意义。

毕华兴 魏 曦

2019年1月

目 录

前言

第 1 章 国内外研究进展	1
1.1 林分结构研究	1
1.1.1 林分结构的内涵	1
1.1.2 林分非空间结构	2
1.1.3 林分空间结构	3
1.2 水土保持功能研究	5
1.3 林分结构与水土保持功能的关系研究	9
1.4 结构方程模型研究	9
1.5 功能导向型林分结构调控研究进展	10
第 2 章 黄土高原地区概况	12
2.1 自然概况	12
2.2 社会经济状况	13
2.3 蔡家川流域基本概况	14
第 3 章 研究内容与方法	16
3.1 研究内容	16
3.1.1 研究目标	16
3.1.2 研究内容	16
3.2 研究方法	17
3.2.1 标准样地设置	17
3.2.2 资料收集	20
3.2.3 外业调查和数据预处理	20
3.2.4 室内实验和数据预处理	25
3.2.5 SEM 的建模方法	25
3.3 技术路线	27
第 4 章 植被林分结构分析	28
4.1 刺槐林林分结构	28
4.1.1 刺槐林林分结构特征	28
4.1.2 刺槐林林分结构综合分析	35
4.2 油松林林分结构	38
4.2.1 油松林林分结构特征	38
4.2.2 油松林林分结构综合分析	43
4.3 刺槐-油松混交林林分结构	46
4.3.1 混交林林分结构特征	46
4.3.2 刺槐-油松混交林林分结构综合分析	53

4.4	山杨-栎类次生林林分结构分析	56
4.4.1	山杨-栎类次生林林分结构特征	56
4.4.2	次生林林分结构综合分析	62
4.5	不同植被群落结构特征对比	65
4.5.1	胸径分布	65
4.5.2	冠幅分布	65
4.5.3	郁闭度	65
4.5.4	角尺度、大小比数和混交度	65
4.5.5	林分密度和林木竞争指数	66
4.5.6	树高分布	66
4.5.7	叶面积指数	66
4.5.8	林层指数	66
4.6	不同植被群落结构相似性和差异性	67
4.6.1	不同植被群落结构的相似性	67
4.6.2	不同植被群落结构差异性	67
4.7	小结	69
第5章	水土保持功能分析	70
5.1	刺槐林的水土保持功能	71
5.1.1	刺槐林的水土保持功能因子分析	71
5.1.2	刺槐林水土保持功能综合评价	74
5.2	油松林的水土保持功能	75
5.2.1	油松林的水土保持功能因子分析	75
5.2.2	油松林水土保持功能综合评价	78
5.3	刺槐-油松混交林的水土保持功能	79
5.3.1	刺槐-油松混交林的水土保持功能因子分析	79
5.3.2	刺槐-油松混交林水土保持功能综合评价	82
5.4	山杨-栎类次生林的水土保持功能	83
5.4.1	次生林的水土保持功能因子分析	83
5.4.2	次生林水土保持功能综合评价	86
5.5	不同植被水土保持功能对比	86
5.5.1	涵养水源功能对比分析	86
5.5.2	保育土壤功能对比分析	88
5.5.3	拦沙减沙功能对比分析	89
5.6	不同植被水土保持功能相似性和差异性	91
5.6.1	不同植被水土保持功能的相似性	91
5.6.2	不同植被水土保持功能的差异性	91
5.7	小结	92
第6章	林分结构与水土保持功能耦合	93
6.1	结构方程建模理论	93
6.1.1	结构方程理论模型构建	93
6.1.2	信度和效度分析	94

6.2 刺槐林林分结构与水土保持功能耦合	95
6.2.1 刺槐林建模数据信度检验和效度分析	95
6.2.2 刺槐林结构方程模型构建	97
6.2.3 刺槐林结构方程模型修正	99
6.2.4 刺槐林结构方程结果分析	101
6.3 油松林林分结构与水土保持功能耦合	106
6.3.1 油松林建模数据信度检验和效度分析	106
6.3.2 油松林结构方程模型构建	107
6.3.3 油松林结构方程模型修正	109
6.3.4 油松林结构方程结果分析	111
6.4 刺槐-油松混交林林分结构与水土保持功能耦合	116
6.4.1 刺槐-油松混交林建模数据信度和效度分析	116
6.4.2 刺槐-油松混交林结构方程模型构建	119
6.4.3 刺槐-油松混交林结构方程模型修正	121
6.4.4 刺槐-油松混交林结构方程结果分析	121
6.5 不同林分的结构与功能耦合结果对比	127
6.5.1 变量路径对比	128
6.5.2 观测变量的路径系数对比	129
6.6 小结	130
第 7 章 基于功能导向的水土保持林植被群落结构定向调控技术	131
7.1 刺槐林群落结构定向调控	131
7.2 油松林群落结构定向调控	133
7.3 刺槐-油松混交林群落结构定向调控	136
7.4 黄土高原典型水土保持林植被群落结构定向调控技术	137
7.5 小结	138
第 8 章 林分定向调控效果和展望	139
8.1 定向调控依据	139
8.2 调控效果	141
8.3 展望	141
参考文献	143

第1章 国内外研究进展

1.1 林分结构研究

1.1.1 林分结构的内涵

在林学和生态学领域，林分结构是研究中持续存在的热点和难点，开始研究的年代较早，许多研究者都为其下了定义，虽然指标各不相同，但内涵相似，目前林分结构的概念还未完全统一。林分结构屡次被定义为植物个体或群落在水平和垂直两个方向上的组成(Kimmins, 1996; 夏富才等, 2010; 李俊, 2012)，并且它们在两个方向的差异性影响林木生长、物种多样性、林内外动物栖息情况及林火特性等各个方面(Waltz et al., 2003; Youngblood et al., 2004; 刘韶辉, 2011)。李毅等(1994)、陈东来等(1994)、孟宪宇等(1995)和胡文力等(2003)分别用不同指标表示林分结构，指标主要包括树种组成、林木株数、林龄、胸径、树高、冠幅、林木大小值分布、形数、林层、材积、物种多样性等林分特征因子的变化，以及它们所呈现的结构规律性(林分结构规律)；这些林分结构因子所呈现的规律决定了森林的功能。安慧君等(2005)从生态学和测树学的角度对传统的林分结构加以描述，其参数也基本在上述因子范围内，具体包括年龄、直径、树高、树种组成、密度、种群内的分布形态等。贺姗姗(2009)和姚爱静(2014)、姚爱静等(2005)从空间分布规律角度研究林分结构，在以上因子之外增加了空间配置规律性的内容。

林分空间结构很好地扩充了林分结构的含义和范围。广义上，林分空间结构是森林中树木及其属性在空间的分布(Mason and Quine, 1995; Ferris and Humphrey, 1999; Pommerening, 2002; 汤孟平, 2010)，强调了树木空间位置。狭义上，它是林木空间分布格局、林木竞争程度(或林木大小空间排列)和树种混交程度(Aguirre et al., 2003; 汤孟平等, 2004)。惠刚盈等(2003)的研究认为，林分空间结构不但决定林木的竞争状态及其空间生态位，还影响林分稳定性、林分发展可能性和经营空间范围。因此，林分空间结构能够反映森林群落中各植被物种的空间位置关系，具有相关而又独立的特征规律及不同的生态稳定性。但是，目前林分空间结构的内涵存在研究范围相对狭窄、研究的对象由于概念不清而造成的模糊、局限于空间或非空间的概念，却忽略了时间等其他维度等问题，还需要进一步深入挖掘和研究，形成一致的公认概念并作为依据，以使整个行业林分结构研究的基石更加稳固。

林分非空间结构不需要树木位置坐标，如林分密度、胸径和树高分布等；空间结构包括水平结构和垂直结构，此观点目前被广泛接受，并投入大量的精力对其进行研究。其中，水平结构研究较为突出，树种的隔离程度的研究包括混交度、大小比数和角尺度等；林木的竞争主要由竞争指数来表达；林木分布格局的分析包括最近邻体分析、聚块样方方差分析及Ripley's $K(d)$ 函数分析等。对垂直结构的研究也不断深入，包括叶面积

指数(LAI)测定和分析、林层指数分析等。

1.1.2 林分非空间结构

1. 树种组成

树种组成决定了森林类型和生物多样性,林分的树种结构也是人工造林及其抚育经营和协调管理的有效依据。这一因子的研究主要集中于树种描述和生物多样性两个方面。其中,树种描述指在不同地区、不同位置和不同立地条件下林木种类的组成情况;生物多样性属于生态学范畴,其含义囊括了森林的物种组成,一般用生物多样性指数表示,常用的有 Shannon-Wiener 指数、Simpsons 多样性指数和均匀度等(Fisher et al., 1943)。另外,还有多种物种分类方法可以用于研究树种组成,据此判断优势树种和呈地带性分布的植被,将复杂物种组成分类,便于进一步分析(Pitkänen, 1997)。

2. 胸径分布

胸径分布以径阶的形式表达,能够反映林分特征和预测森林蓄积量。为准确地量化描述林分特征,学者提出林分直径结构模型来描述胸径的频率分布信息,受到广泛关注,主要理论包括分径阶直方图、Weibull 分布、 q 值理论等。①分径阶直方图能直观地反映出不同径阶的分布状况。Nishimura 等(2003)运用分径阶直方图研究区分出日本温带地区常绿阔叶林中优势树种和数量最多的树种,且优势树种的直径径阶呈双峰分布。②瑞典的 Weibull(1951)提出了 Weibull 分布函数,1973 年首次应用于描述胸径分布(Bailey, 1975)。该函数灵活性强、能适应不同形状和偏斜度,参数易求解且有明确的生物学含义,在林分结构研究中应用广泛。Mabvurira 等(2002)用 Weibull 分布研究同龄桉树(*Eucalyptus*)的胸径分布;Zhang 等(2001)、Liu 等(2002)、Zasada 和 Cieszewski(2005)、王顺忠等(2006)均运用 Weibull 分布,建立了各区域的林分胸径有限混合分布模型,拟合效果较好。③ q 值理论也应用广泛, q 值表示某径级与邻近大径级株数的比值,其序列和均值可用于表达林分的径级分布。其中值越小,直径分布曲线越平缓,反之则越陡峭(李俊, 2012)。其中,法国的 de Liocourt(1898)和 Meyer(1952)的研究表明,在天然异龄林中连续两个径阶间的林木株数比会逐渐逼近一个常数 q 。Goodburn 和 Lorimer(1998)指出应以接近平衡状态 q 值为目标来进行人工异龄林和天然老龄林的经营。亢新刚等(2003)、郝清玉和王立海(2006)认为,采用调整 q 值至预定值的方法能更好地管理天然林。

此外,陈学群(1995)采用 β 分布模型对比分析 30 年林龄的不同密度马尾松人工林的胸径分布规律。胡雪凡(2012)采用幂数指数方程对胸径分布规律进行了模拟研究。概率密度函数、理论生长方法、联立方程组法、最相似回归法(王香春, 2011)等模型可拟合胸径分布,适用于不同的林分类型或立地条件。

3. 树高分布

树高分布指不同林木树高的分布状态,用高阶表达。与胸径相似,它也能反映林分特征和蓄积、材积量(李俊, 2012)。研究方法主要为树高曲线、直方图及数学模型等方

法。Iwasa 等(1985)分析了树木的树高和冠幅竞争的结果。Holmgren 等(2003)利用机载激光扫描测量地块上的树高和树干体积,并进行了树高分布分析。Maltamo 等(2004)基于扫描激光测高和预期树木尺寸分布函数的木材容积和茎密度进行估算,其中应用了树高分布函数。这些都是树高曲线和模型的应用实例。

4. 林龄分布

林龄分布指林木株数按年龄分配的状况(又称“年龄结构”),表达林木更新的过程和速度(焦一杰,2009)。常用的估计方法有直方图法、Weibull 分布和 β 分布等数据函数。Gower 等(1996)利用年龄分布探究地上净初级生产量与年龄之间的关系,以及生产量下降的潜在原因。Racine 等(2014)运用采用 LiDAR 得出的预测因子来估算林分年龄并对林龄进行了分布分析。Shidiq 和 Ismail(2016)利用遥感数据对马来西亚吉达橡胶树地形空间分布建立分析模型,其中对林龄分布也进行了深入分析。

1.1.3 林分空间结构

近年来,国内外学者越发重视研究森林空间结构,因为它可以决定森林未来的发展(Pretzsch, 1997)。林分空间结构基于林木的相对坐标构建,能提供空间位置特征和物种空间关系的详细信息。北美洲国家以林分空间结构的理论研究见长,分析内容包括森林的生长和动态模拟(Antos et al., 2002; Béland et al., 2003);欧洲国家的空间结构应用研究更优,主要考虑用择伐等方法来调整森林的空间结构;其他世界各地也都在定量分析林分空间结构方面不懈努力,对各类林分结构因子的关注热度不减,这一领域已经成为当前森林结构研究的热点问题和整个林业研究的重点方向。

空间结构研究现已细分为水平结构和垂直结构;零维、一维、二维和三维结构等。林木在水平空间和垂直空间的配置状况或分布状态受林木个体之间内部相互作用和外部环境共同影响。目前,除了基础的分布分析以外,还有多种定量的森林空间结构指数分析(Pommerening, 2002; Kint et al., 2003)。

1. 林木空间分布格局指数

林木空间分布格局反映森林发生、发展和消亡过程,研究方法如下:①调查实验样地的所有林木株数及其分布(样方法);②量测每木到其最近邻林木两点之间的最短距离(距离法);③定位每木的坐标位置(角度法)(龚直文等,2009)。

林木空间分布格局指数有方差均值比。Biondi 等(1994)运用方差均值比研究天然森林的长期变化;徐化成等(1994)采用 Greig-Smith 聚块样方方差分析方法分析不同年龄结构的落叶松空间格局;Kuuluvainen 等(2002)也用该指数分析林分中林木大小之间的方差图。距离法最常用的有最近邻体分析法和空间统计法。聚集指数(R)就是最近邻体分析法的重要指标之一(Clark, 1954; Petreere, 1985); $R>1$ 时林木均匀分布, $R=1$ 时林木随机分布, $R<1$ 时林木聚集分布(贺姗姗等,2008)。游水生等(1995)将这一指数应用到米楮(*Castanopsis carlesii*)的空间分布格局研究中。而空间统计法分为点格局分析法和表面格局分析法或地统计学法(李俊,2012)。日本学者Kubota 等(2007)、侯向阳和进轩(1997)、

张金屯(1998)、Li(2003)、吕林昭等(2008)用 Kipley's 点格局分析法对各自区域内的林木空间分布格局做了相应的研究; 汤孟平等(2003)深入探讨了该函数的边缘矫正问题, 并应用于分析天目山常绿阔叶林空间结构(汤孟平等, 2006)。与传统的格局分析法(如方差均值比、负二项参数 K 值、丛生指标、扩散型指数 I_8 等)相比, 点格局分析法与传统样方法具有明显优势, 因此被广泛采用(龚直文, 2009)。

2. 竞争指数

林木竞争指同一立地条件下两株及以上的林木由于资源有限而不能充分生长。一般采用距离因子来衡量, 主要有 3 类(Holmes and Reed, 1991): ①影响圈竞争指数根据林木冠幅伸展区域及其重叠面积确定; ②生长空间指数指竞争树木连线垂直平分后生成的 Voronoi 多边形面积(Brown, 1965); ③大小比数指林木之间的大小比值(Bella, 1971; Hegyi, 1974)。国内外学者在竞争指数方面的应用研究也颇多。Béland 等(2003)运用 Hegyi 竞争指数表达了加拿大短叶松纯林及其与杨桦混交林的种内和种间竞争关系。汤孟平等(2007)改进了 Hegyi 竞争指数, 提出用 Voronoi 图确定竞争木的新方法。Rozas(2015)应用该竞争指数来研究树木树龄、规模和树间竞争的相对重要性。González de Andrés 等(2018)利用 Hegyi 竞争指数研究了欧洲山毛榉-苏格兰松混交林的关系, 其中树与树之间的竞争对其生长有不同影响, 而水的利用效率主要取决于立地条件。赵中华等(2014)应用大小比数表达林分空间优势度, 同时也用角尺度来判断林分空间格局(赵中华等, 2016)。

3. 混交度

混交度是采用最早且最简便表达树种空间隔离程度的方法, 其表达林分中某一种林木所占的比例。这一指标的起源是 Pielou(1961)提出两个树种之间进行比较的分隔指数, 而 von Gadow 和 Hui(2002)在此基础上提出混交度。其目前应用已比较广泛。Aguirre 等(2003)用 50m×50m 的固定样地研究了天然林的混交度; Bettinger 和 Tang(2015)基于物种混交度指数研究了结构导向的森林经营中树木的收获优化; Nouri 等(2017)将混交度应用到决定森林空间结构的最佳地理面积的研究中; Ghalandarayeshi 等(2017)应用混交度表征了丹麦的半自然森林树种的空间格局和林分结构, 使得森林管理与保护生物多样性目标一致。我国引入混交度概念(Gadow and Bredenkamp, 1992), 也取得了较大的研究进展(安慧君, 2003)。汤孟平等(2012)比较分析了不同混交度指数, 赵春燕等(2015)主要考虑 K 阶邻近林木的混交度。

4. 角尺度

角尺度描述相邻树木围绕参照树的均匀性, 其分布的特征值(即均值)可以反映林分的整体分布情况(惠刚盈, 1999)。角尺度应用非常普遍, 林分的林木分布格局及其相应的角尺度分布和双相关函数(Stoyan and Penttinen et al., 2000; Penttinen et al., 1992)是林分分布特征的重要体现, 通常和混交度、大小比一起应用。von Gadow 和 Hui(2002)用混交度、角尺度和变异性一起表达森林的空间结构和多样性。Pommerening(2006)通过

颠倒森林结构分析来评估角尺度等结构指数, 并且进行了边缘修正(Pommerening and Stoyan, 2006)。Corral-Rivas 等(2010)在比较分析了几种方法的性能后, 发现角尺度的分析灵敏度能与 Ripley's L 检验比肩。Ozdemir 和 Karnieli(2011)将角尺度用于以色列旱地森林中使用多光谱图像预测森林结构参数的研究中。王宏翔(2017)、王宏翔等(2014)剖析了角尺度在表达林分结构中的地位, 并将其应用于天然林林分空间结构的二阶特征分析中。

5. 林层指数

林层比能反映复层林垂直分布格局, 但不能反映空间结构单元中林层结构的多样性(吕勇等, 2012)。林层指数改进了林层比的概念, 其定义为空间结构单元中表征林层多样性的指标与林层比的乘积, 是目前森林的垂直空间结构的重要表达指标。对林层的持续研究为林层指数的形成起到了重要的积极作用。Qian 等(1997)研究了位于加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华市的 40 年生老龄林的林下植被多样性。Ramovs 和 Roberts(2003)研究了林下植被和环境对森林的恢复植被和环境的响应。这些研究都是林层指数应用的基础。

近年来垂直结构的研究也更加成熟和深入。关于林层指数的研究较多, 吕勇等(2012)对青桐混交林林层结构进行了研究。曹小玉等(2015b)运用林层指数分析了杉木林及其林下灌木的空间结构物种多样性。叶面积指数作为林分经营管理的重要指标, 研究也比较广泛。贾小容等(2011)运用叶面积指数分析了 3 种人工林林分的冠层结构与林下光照条件之间的关系。赵安玖等(2014)将遥感和地面调查数据结合, 估测了区域森林有效叶面积指数(effective leaf area index, LAIe), 对林分冠层结构做了充分分析。明曙东等(2016)探讨了毛竹天然混交林的林分空间结构特征, 认为毛竹混交林的叶面积、叶面积指数均大于纯竹林。此外, 水平结构和垂直结构相结合的研究也不断涌现。从林分结构的维度分, 零维单木特征指标主要有单木活力、干形、损伤情况、病虫害、树冠生长; 一维指传统林分特征, 包括胸径、树高、冠幅的分布、林分密度、郁闭度等; 二维指基于林木位置坐标的特征, 包括角尺度、大小比数、混交度、林木竞争指数、林层指数等水平结构或垂直结构; 三维指立体空间体系(柴宗政, 2016)。

1.2 水土保持功能研究

水土保持功能指在水土保持过程中采用保护和改良人类及其社会赖以生存的自然环境条件的各项措施, 并促进区域经济社会发展的综合效用(余新晓等, 2008; 柳仲秋, 2010; 冯磊等, 2012)。水土保持功能具体包括生物多样性保护功能、涵养水源功能、土壤保持功能(保育土壤功能)、防风固沙功能、蓄水保水功能、防灾减灾功能和农田防护功能等, 表征水土保持功能的因子有很多。在黄土高原地区, 水土保持功能主要指生态服务功能(主要为生物多样性保护功能)、涵养水源功能、保育土壤功能和拦沙减沙功能(张超等, 2016)。

1. 生物多样性保护功能

由水土保持功能的内涵可知其重要功能之一就是生物多样性保护，同时水土保持和生态行业的学者也普遍认为水土保持林具有显著的生态服务功能。有关林分结构和生物多样性之间关系的研究非常多，在水土保持生态服务功能及生态环境科学研究方面占有重要地位。

生物多样性的基础指标主要为多度、密度、盖度、频度及重要值，而相关的指数更丰富，包括物种丰富度及 Gleason 丰富度指数、多样性指数、均匀度指数等，在科学研究中的应用也很多。Pitkänen (1997) 研究林分结构和地被物的生物多样性之间的关系，基于森林结构、植被的丰富度及其不同表示对森林进行分类。Derry 等 (1999) 提出 3 个北极土壤中微生物的功能多样性和群落结构由单一碳源利用决定，这与水土保持功能的关联性极强。Nagaike 等 (2003) 的研究表明林分结构对植物多样性的影响很大，主要影响不抗扰动森林的下层植物物种和抗扰动的树木物种。孟庆樊研究了人工林生物多样性的因素及保护人工林生物多样性的途径。黄耀 (2017) 也做了黄土高原的油松人工林生物多样性保护等多功能的评价研究，揭示油松人工林分结构和人工林下生物多样性保护功能的关系。Hemachandra 等 (2014) 提出生态园内的生物多样性指标，包括多样性指数和均匀度指数等，并且对物种丰富度和多样性指数进行对比，提出了其保护功能。潘声旺等 (2015) 探讨了绿化植物生活型构成对边坡植被物种多样性及护坡水土保持功能的影响。黄麟等 (2015) 分析了重点生态功能区生物多样性保护情况，并提出了相应的生态系统结构。可见生物多样性的各项指标能够表征生物多样性保护功能，该功能与林分结构有密切关系。

2. 涵养水源功能

涵养水源也是重要的水土保持功能之一，普遍存在于广泛的区域。森林水文研究起源于森林的降水截持和蒸发蒸腾，以及土壤表层蒸发的研究和测定，之后，日本、美国、俄国等国也相继开始关注水源涵养作用 (张宇, 2010)。Kittredge (1948) 关注了森林对气候、水和土壤的影响，并将研究结论应用于水源保护，以及洪水和土壤侵蚀的控制。Lowrance 等 (1997) 研究了切萨皮克湾流域河岸林缓冲区的水源涵养和水质保护功能。Calder (2007) 研究了森林和水之间的关系，结果表明森林对水源的保持大于消耗。Ferraz 等 (2013) 主要侧重对森林和种植园景观的管理进行研究，发现它们可以促进水源保护。Portillo-Quintero 等 (2015) 研究了热带干旱森林对新生物多样性、碳和水保护的作用，并提出了这一过程中可供吸取的经验教训和森林可持续管理的机遇。

近代以来，我国逐步加强了森林水文研究，目前也在林分水源涵养方面取得了显著成效。我国的研究主要集中在林冠层及林下植被截留、枯落物层及土壤层持水等方面。何斌等 (2003) 认为八角林能改善土壤结构、提高水源涵养功能；时忠杰等 (2006) 研究了单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性，发现较小降雨量时冠层结构是引起穿透降雨率空间变异的主要因素，而在降雨量较大时冠层结构的影响减弱；何常清等 (2006) 的研究表明华北落叶松枯落物覆盖减缓了地表径流流速；赖玫妃等 (2007) 应用灰色关联分析法确定了针阔混交林的水源涵养功能最强，其次是阔叶林和毛竹林，而灌木林、经济

林则最差；张复兴(2008)和巍强等(2008)分别对五台山和大青山不同林分类型开展了调查研究，确定了其水源涵养功能。张建华(2014)认为冀北山地华北落叶松具有很大的水文作用，研究得出其林冠截留率为10.2%，树干茎流率占大气降水量的3.7%，并计算了枯枝落叶层的截留率等。综合国内外的研究现状，林分的涵养水源功能集中体现在林冠截留、枯落物蓄水和表层土渗吸3个方面。

(1) 林冠截留

林冠截留从多个角度并以多种方式影响到达地表土壤的有效雨量，对降雨实施第一次阻截和再分配。林冠层的截留容量和附加截留量均较大，可以延缓降雨和产流，从而减缓土壤侵蚀(Bormann and Likens, 1979)。Horton(1919)把林冠吸附容量简化为常数，建立林冠截持降雨模型，适用于降雨量大于林冠截持容量的情形。Gash模型(Gash, 1979)进一步把林冠截持降雨区分为林冠吸附量、树干吸附量和蒸发引起的附加截留量，对各个分项求和即可估计总的树冠截持量，该模型得到了广泛的应用，且确定该模型中的参数也是研究的热点。Storck等(2002)研究了美国俄勒冈州山区的海洋气候中林冠对积雪的截留及对积雪和融化的影响。方书敏等(2013)对陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征进行了模拟，表明林冠截留占总降雨量的22.4%。芦新建等(2014)应用Gash模型对青海高寒区华北落叶松人工林林冠截留进行模拟，观测期间降雨量不小于1mm的25场降雨的林冠截留占总降雨量的23.34%。Attarod等(2015)研究了针叶树对干旱环境下的降雨截留和林冠存储能力的影响。魏曦等(2017)也基于Gash模型对华北落叶松和油松人工林冠层截留进行了模拟。此外，Whelan和Anderson(1996)模拟了样地尺度上穿透雨和林冠截留的空间分布格局，可见林冠截留空间分布也是一个研究焦点。

(2) 枯落物蓄水

森林植被枯枝落叶层是森林地表重要的覆盖面和保护层，不仅能为林木生长提供养分，还能增大地表有效糙率，加速吸收和阻滞地表径流并减小径流流速，增强土壤入渗和减少土壤蒸发的储水持水能力，防治溅蚀和增强抗冲能力，改善土壤理化性质及蓄水减沙等，是林分结构的重要组成部分。枯落物还能影响土壤中的水分和养分含量，具有保育水土的功能(Ogée and Brunet, 2002)；树木落叶的分布影响植被的组成和生物量(Loydi et al., 2014)。因此其水文效应和涵养林下水源的作用受到了广泛关注。臧廷亮和张金池(1999)确认了森林枯落物涵养水源、强化土壤抗蚀性状、保持水土等方面的功能。易文明等(2011)研究了6种林分的凋落物水文效应，表明凋落物蓄水功能较强。赵晓春(2011)进行相关研究后也认为森林凋落物水文效应明显。

(3) 表层土渗吸

表层土壤受森林结构的影响很大，是森林系统中土壤与林分关系最为密切的部分，其水分和养分含量对林木生长有极其重要的作用。表层土渗吸的特征是土壤中水分涵养的重要指标，渗吸能力越大，吸收和阻延的地表径流就越多，能有效减小地表径流平均流速，增加降水入渗，增大土壤的持水量，对于森林水分涵蓄具有重要意义。Dixon(1995)通过水分入渗测量试验，得出了空气-地球界面(AET)的概念，AET的微粗糙度和大孔隙度调节了表面水和被置换的土壤空气的交换条件，说明表层土渗吸对AET和涵养水源的

作用很大。李贵玉(2007)研究了黄土区不同土地利用类型的土壤入渗性能,以及入渗对降水的转化。邵方丽等(2012)研究了杨桦次生林表层土壤水分与枯落物的关系和差异,说明其对生态系统的水分循环有重要作用,也对林下的水土保持功能影响较大。Wang等(2016)研究了黄土高原坡地农业土壤对土壤水的渗透作用,也提出坡地表层土渗吸能增加土壤水分,起到水源涵养功能。

3. 保育土壤功能

林分的保育土壤功能是森林生态经营和管理的理论依据。保育土壤主要包括土壤水分和土壤肥力两个方面。国内外诸多学者也非常关注该功能的作用机制。

(1) 土壤水分

土壤水分指标主要有土壤含水量、土壤最大持水能力、孔隙度及储水性能、饱和导水率和容重等。纪福利(2008)研究塞罕坝的华北落叶松人工林土壤水分情况,发现各类林地的土壤水分不同,且都有严重旱化现象,其中无林地和皆伐迹地的土壤水分随着土层厚度的增大而上升;张彪等(2008)评估北京的森林水源涵养功能时,应用水量平衡法重点研究了土壤蓄水能力;韩春华等(2012)分析阿什河上游蒙古栎天然林、红松人工林、水曲柳天然林、落叶松人工林的土壤水分涵养能力。

(2) 土壤肥力

土壤肥力指标包括微团聚数量、黏粒含量、有机质、全氮、氨氮、硝氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH等。康文星和田大伦(2002)研究杉木人工林采伐后导致的各种效益损失,计算出杉木林每年的水源涵养、固土保肥效益,以及改良土壤效益的损失价值;余济云等(2002)探讨了马尾松-阔叶树混交林林分结构规律,并进一步研究其土壤肥力保育的效应;夏江宝(2004)采用机会成本法研究山地森林不同林分保育土壤的生态服务功能及经济价值;唐效蓉等(2005)认为施肥能提高马尾松天然次生林的土壤有机碳及有机质的含量,也能调节土壤pH,土壤保水保肥性能显著改善;李少宁等(2008)的研究表明北京浅石山区混交林、乔-灌-草结合的配置模式对保育土壤及土壤N、P、K和有机质都有明显的改善作用。

4. 拦沙减沙功能

拦沙减沙是黄土高原最重要的水土保持功能之一。田永宏等(1999)认为影响流域拦沙减沙作用的指标主要有降雨、径流和输沙模数等,也对拦沙减沙作用做了详细分析;胡传银等(2004)也证实了上述指标对蓄水拦沙效益的代表性;康玲玲等(2004)对坡面蓄水拦沙的指标进行了计算,并对指标体系做了评价;Shuai等(2017)对黄土高原边坡的径流和泥沙的减少效益,以及泥沙颗粒的分形特征进行了分析,说明土壤或泥沙颗粒大小对拦沙减沙作用有决定性作用;Nobusawa等(2010)在横滨港用沙盖层的底部沉积物进行实地观察测试,说明径流产沙和沉积物有密切关系;Bao(2011)研究了越南沿海红树林结构对波浪衰减的影响,表明良好的林分结构对径流泥沙的产生有抑制作用。