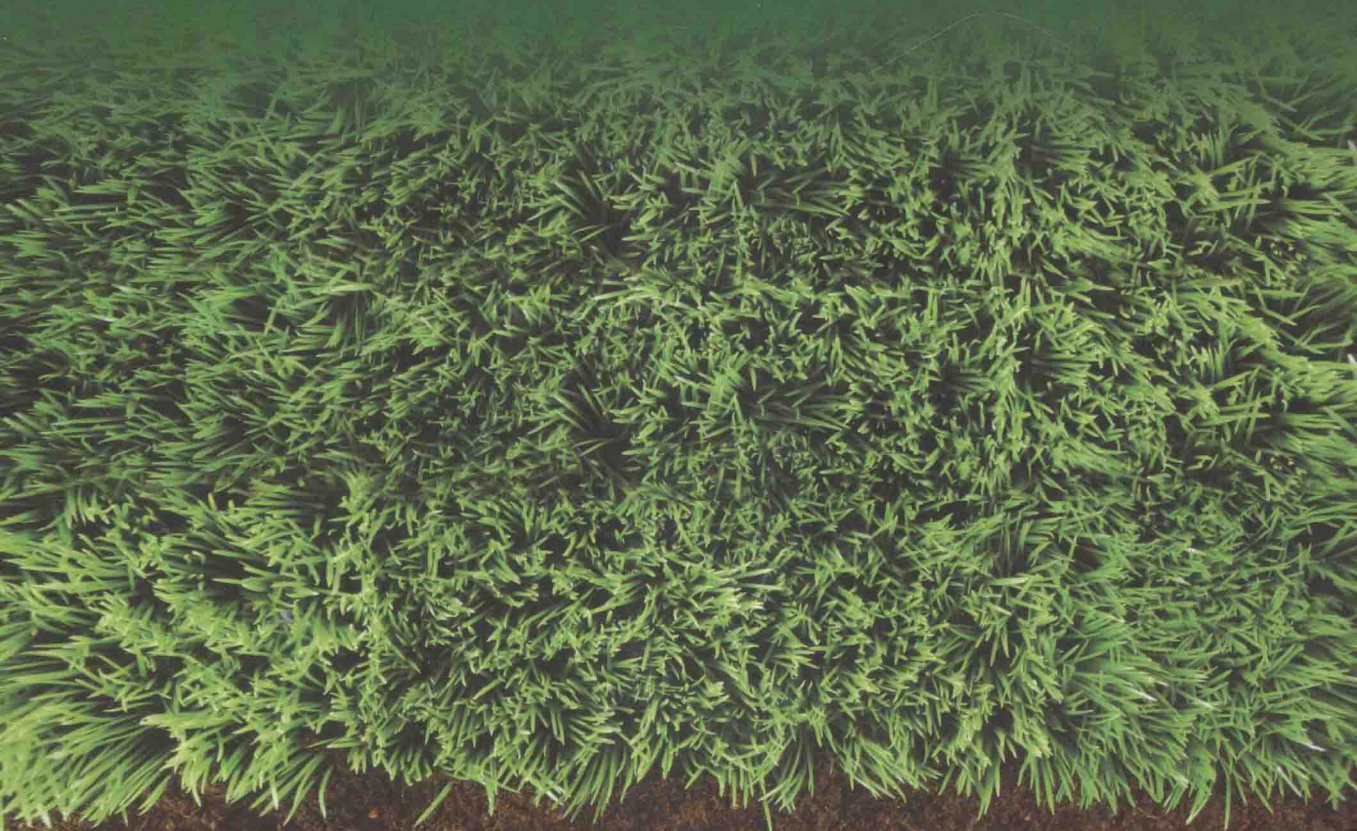


土壤水分植被承载力的 理论与实践

郭忠升 著



科学出版社

土壤水分植被承载力的理论与实践

郭忠升 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

在水资源紧缺地区多年生高产高效人工林草地出现的以土壤旱化为主要特征的大面积土壤退化和植被衰败,严重危及国家生态安全体系的高效、持续和稳定,引起科技界的高度关注。土壤水资源利用限度、植物水关系调控起始和土壤水分植被承载力不仅是解决水资源紧缺地区土壤退化和植被衰败的理论基础,而且是土壤水资源可持续利用,森林植被可持续管理的应用基础。本书系统地介绍了土壤水资源利用限度,植物水关系调控起始期和土壤水分植被承载力,植物需水量、人工林适宜初植密度确定方法,人工林生长新模型,土壤水分动态变化模型及其预报模型,平茬效应;介绍了土壤水资源利用限度和土壤水分植被承载力在水资源紧缺地区人工林种群密度调控,植被恢复限度或目标确定、森林植被固碳能力估算,森林可持续经营指标和标准确定等方面的应用。

本书可供自然地理、森林生态、森林水文、水土保持、环境保护和环境水利等领域有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤水分植被承载力的理论与实践/孙忠升著. —北京:科学出版社, 2014.4

ISBN 978-7-03-040468-8

I. ①土… II. ②孙… III. ①土壤含水分-植被-承载力-研究 IV. ①S152.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第079777号

责任编辑:朱海燕 李秋艳 孙增英 / 责任校对:郑金红

责任印制:赵德静 / 封面设计:铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年4月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年4月第一次印刷 印张:16

字数:380 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

黄土高原是地处华北平原、内蒙古草原和蒙新沙漠戈壁之间一个广阔的过渡高原。在地形上处于我国东部河谷平原向西部青藏高原过渡，气候上处于暖温带湿润气候向温带干旱气候过渡，植被区划上处于湿润森林向荒漠草原过渡地带，气候变化剧烈，地形复杂，自然条件十分脆弱。黄土高原无论从地学发育形成过程还是其区域的特殊气候、土壤、生物条件、生态脆弱性以及其在古代中华民族的兴起和我国现代社会经济发展的重要性来看，都是被世界所关注的区域。由于它的气候、环境趋于干旱的历史变迁，导致发生中华文明发展由黄河流域向长江流域的历史转移。近千年来的人为活动一直加剧着黄土高原的环境恶化和生态脆弱性。自 20 世纪 80 年代以后，国家要立志改变我国西部地区生态环境和经济落后、人民贫困面貌。随后，中央提出“再造一个山川秀美的西北地区”的伟大号召。1999 年 8 月提出并开始开展了“退耕还林（草）工程”，大力修复、重建森林植被，保护恢复草场、发展人工草地。从此黄土高原绿色盎然，生态环境有了极大改善。然而，生物或生态系统与环境之间的任何生态过程都是双向的，相互反馈，互为因果的。在植被充分发展以后，虽然地方气候有所改善，水土流失减少，黄河上中游泥沙量减少，但是，土壤干旱化趋于严重，形成土壤干层，进而又将促使植被的退化、衰亡，从而形成了植被—土壤间相互关系的一个生态怪圈，由此突出了干旱半干旱区植被—土壤间相互关系的平衡理论问题。

该书作者郭忠升不失时机地，于 2000 年创新性地提出了“土壤水分植被承载力”，随后，又提出了“植物水关系调控起始期”和“土壤水资源利用限度”等有关土壤水分的土壤学新概念、新术语。这些术语的理论涵义和应用，不仅构成了加深认识水资源紧缺地区土壤退化和植被衰败问题的理论基础，而且成为水资源紧缺地区土壤水资源可持续利用，森林植被可持续管理的应用基础。

该书以上述水资源紧缺地区有关土壤水生态学新的理论概念为基础，加之作者自己多年来在黄土丘陵半干旱区典型人工植被进行定位观测，系统研究了植物生长和土壤水分相互关系，定义了土壤水分植被承载力并构建量化模型，提出了土壤水资源利用限度，确定了土壤水分植被承载力等。该书是作者近年创新性研究工作的总结。该书全面系统介绍了土壤水资源利用限度和土壤水分植被承载力，植物需水量、人工林适宜初植密度确定方法，人工

林生长新模型，土壤水分动态变化模型及其预报模型，平茬效应，而且介绍了土壤水资源利用限度和土壤水分植被承载力在水资源紧缺地区人工林种群密度调控，植被恢复限度或目标确定、森林植被固碳能力估算，森林可持续经营指标和标准确定等方面的应用，使本书具备了重要的理论和应用实践的价值。同时，希望有关的专业研究的同仁们能对水资源紧缺地区的土壤植被间水生态的理论与实践的发展共同努力完善和提高。

我与作者虽然接触不多，但是我对作者所在单位中国科学院水利部水土保持研究所和作者的导师邵安明有深刻的了解。我相信，在这样的科学研究与学术环境培养出来的，造就而成的成果《土壤水分植被承载力的理论与实践》值得一读，相信对关注西北干旱半干旱区生态环境建设、从事西部地区土壤学、植被学理论与实践问题的同事们，会有裨益的。

在此出版之际，特此为序。



2013年11月26日

前 言

在中国很早就出现由砍伐森林引起的环境问题。在水资源紧缺的黄土高原地区随着人口增加、原生植被破坏加剧,使该区沦为我国乃至世界上水土流失最严重的地区之一。为了保持水土,改善生态环境,1950年以来,该区开展了大规模的森林植被恢复和建设,特别值得一提的是1978年开启的,持续到现在规模宏大的“三北”防护林体系工程,1999年开启的退耕还林还草工程,有力地推动了该区大规模森林植被恢复,迅速地提高了森林植被覆盖率,生态环境明显改善。目前黄河流域年均输沙量由20世纪70年代的16亿吨锐减到近十年的3.1亿t,年径流量也减少近50%。但是由于黄土高原大部分地区为水资源紧缺地区,雨水资源缺乏,而多年生高产高效人工植被生长迅速、耗水量大,以至于在多年生人工林草地出现了土壤旱化,实为超载的土壤退化现象,人工植被衰败,甚至死亡现象。急需形成新理论,以便科学地指导水资源紧缺地区森林植被恢复,为土壤水资源可持续利用,森林植被资源可持续管理和生态文明建设、实现区域经济社会可持续发展服务。

水资源紧缺地区森林植被生态系统是系统生态研究的热点和焦点。植物生长与环境是一个相互影响和相互制约的复杂过程。一方面,生态环境条件限制植物生长,另一方面,植物生长过程又影响近地表附近微气候和土壤水循环过程,对此还缺乏长期系统地研究,特别在气候、地形独特的黄土高原地区。2000年,笔者开始系统地研究自然资源承载植被能力,提出了土壤水分植被承载力概念。此后在黄土丘陵半干旱区典型人工植被进行多年定位观测,系统研究植物生长和土壤水分相互关系,定义土壤水分植被承载力并构建量化模型,提出了植物水关系调控起始期和土壤水资源利用限度,确定土壤水分植被承载力等。本书是近年研究工作的总结。

本书在编写、审定和出版过程中得到了中国科学院水利部水土保持研究所内、所外同事的大力支持,在这里向他们表示衷心的感谢。特别感谢我的博士生导师邵明安研究员,是他的关心和支持,使我有机会研究土壤水资源承载植被的能力,另外,感谢我的研究生李耀林、赵龙、王振风、宁婷、白冬妹、张文文、张小萍、严正升,是他们的积极参与,在完成或即将完成学位论文的同时,迅速完成大量野外观测资料的观测、整理和分析。本研究得到国家自然科学基金项目(41071193)和(41271539)和中国科学院水利部水土保持研究所知识创新领域前沿的资助,在此深表衷心感谢。

本书从申报、审查、编写、签订出版合同到最后定稿时间较短。受时间和作者水平所限,书中难免出现缺点和错误,恳请读者批评指正。

郭忠升

2013年8月

Stillwater, USA

目 录

序

前言

第 1 章	水资源紧缺地区生态环境问题与森林植被恢复	1
1.1	水资源紧缺地区水土流失与生态环境问题	1
1.1.1	水资源紧缺地区概况	1
1.1.2	原生植被破坏	1
1.1.3	水土流失等生态环境问题	2
1.2	森林植被改善生态环境功能	3
1.2.1	林冠层拦截降雨和地表风速	3
1.2.2	增加入渗与减少地表径流	4
1.2.3	根系和枯落物增强土壤抗蚀性	5
1.2.4	森林吸尘和净化空气作用	7
1.3	水资源紧缺地区大规模的植被恢复	8
1.3.1	提高森林植被覆盖率	8
1.3.2	生态环境改善	9
1.4	水资源紧缺地区森林植被恢复过程中存在的问题及对策	10
1.4.1	以土壤旱化为主要特征的土壤退化问题及其危害	10
1.4.2	土壤旱化和土壤退化防治	14
1.4.3	土壤水资源可持续利用与森林植被可持续管理	16
	参考文献	17
第 2 章	自然资源	22
2.1	自然资源与环境	22
2.1.1	资源的概念、内涵与分类	22
2.1.2	环境与环境问题	30
2.2	水资源	34
2.2.1	全球水资源	35
2.2.2	中国水资源	36
2.2.3	水资源特征	37
2.2.4	水体污染及其危害	39
2.2.5	经济社会发展对水资源管理提出的挑战	40
2.3	土壤水资源	42
2.3.1	土壤水资源概念	42
2.3.2	土壤水资源定义	43

2.4 土壤水资源利用限度	45
2.4.1 人工林草地土壤干层及其危害	45
2.4.2 林草地土壤干层划分标准	47
2.4.3 林草地土壤水分累积入渗深度	50
2.4.4 土壤水资源利用限度	57
2.4.5 影响土壤水资源利用限度的因素	58
2.4.6 土壤水资源利用限度的识别与表示	58
2.4.7 土壤水资源利用限度应用	60
参考文献	61
第3章 土壤水分植被承载力	66
3.1 承载力	66
3.1.1 承载力概念	66
3.1.2 承载力与可持续发展	67
3.2 土壤水分植被承载力	68
3.2.1 水资源紧缺地区人工植被建设的需要	68
3.2.2 土壤水分植被承载力概念	70
3.2.3 土壤水分植被承载力定义	72
3.3 土壤水分植被承载力的量化尺度	72
3.3.1 尺度的概念	72
3.3.2 量化土壤水分植被承载力的尺度	73
3.3.3 初始含水量及其对土壤水分植被承载力的影响	75
3.4 土壤水分植被承载力的量化模型	77
3.4.1 经典模型	78
3.4.2 种群模型	79
3.4.3 密度-土壤水分模型	80
3.4.4 过程模型	85
3.5 土壤水分植被承载力基本规律	85
3.5.1 土壤水分植被承载力是指示植物的函数	86
3.5.2 土壤水分植被承载力是时间的函数	86
3.5.3 土壤水分植被承载力是地理位置的函数	94
3.6 土壤水分植被承载力研究存在的问题	96
3.7 影响土壤水分植被承载力因素	97
3.7.1 地理位置	97
3.7.2 海拔高度	98
3.7.3 坡向与坡位	98
3.7.4 生物因素	100
3.7.5 时间因素	100
参考文献	101
第4章 土壤水分补给与人工林生长	105

4.1	降水动态分布特征	105
4.1.1	降水年际变化	105
4.1.2	降水的季节变化	106
4.2	人工林生长	107
4.2.1	研究现状	107
4.2.2	建模方法	115
4.2.3	改进模型的建立	121
4.2.4	密度、环境因素与柠条林生长	129
4.2.5	高密度柠条成林的连年生长模型	133
4.2.6	柠条幼林的生长区间分析	139
4.3	人工林地土壤水分补给	144
4.3.1	人工林冠层截留	144
4.3.2	人工林草地地表径流	145
4.3.3	人工林草地降水入渗特征	146
4.4	人工林地剖面土壤水分动态变化	150
4.4.1	人工柠条林地土壤水分垂直变化规律	150
4.4.2	降雨、柠条生长等对土壤水分垂直变化的影响	161
4.4.3	人工林地剖面土壤水分动态变化模拟	169
	参考文献.....	173
第5章	人工林地土壤旱化防治	181
5.1	人工林地土壤水分消耗与土壤旱化	181
5.1.1	初植密度研究现状	181
5.1.2	适宜初植密度确定方法	182
5.2	人工林地土壤旱化防治措施	184
5.2.1	土壤旱化防治策略	184
5.2.2	不同旱化防治措施效果比较	186
5.3	平茬效应	188
5.3.1	平茬对植物生长的影响	189
5.3.2	平茬对林地土壤水分的影响	198
5.4	植物水关系调控起始期	205
5.4.1	撂荒地土壤水资源动态变化	206
5.4.2	不同密度柠条林对土壤水分的影响	206
5.4.3	植物水关系调控起始期确定	208
5.4.4	人工林地土壤水分承载力与植物水关系调控	210
	参考文献.....	211
第6章	土壤水分植被承载力在实践中的应用	216
6.1	土壤水资源利用限度和土壤水分植被承载力是人工林种群密度调控的 依据	216
6.1.1	人工林种群密度调控起始期	216

第1章 水资源紧缺地区生态环境问题 与森林植被恢复

1.1 水资源紧缺地区水土流失与生态环境问题

1.1.1 水资源紧缺地区概况

水资源紧缺地区是生态脆弱区的重要组成部分。在我国，水资源紧缺地区基本上为秦岭以北的干旱少雨的地区，是西部大开发的主战场。水资源紧缺地区地形复杂，干旱少雨，植被稀疏，气候变化剧烈，自然灾害频繁，自然条件十分脆弱，雨水资源和土壤水资源缺乏。受地形地貌和海拔影响，除了黄河岸边等地下水位较高的湿地，新疆的天山、跨青海和甘肃的祁连山、跨甘肃和宁夏的六盘山、甘肃和陕西交界的子午岭等高海拔地区的“湿岛”和“绿岛”，新疆吐鲁番、内蒙古和宁夏沿黄灌溉区等地外，大部分地区水资源紧缺，土壤水分是影响和限制植物生长和植被恢复的主要因素。现以典型的水资源紧缺地区——黄土高原为例，说明水资源紧缺地区生态环境、植被恢复存在的问题与对策。

黄土高原地区位于中国中部偏北。按照 20 世纪 80 年代黄土高原地区综合考察所界定的范围，黄土高原地区地理坐标处于北纬 $33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16'$ ，东经 $100^{\circ}52' \sim 114^{\circ}33'$ 的范围。南以秦岭山脉为界，北至阴山山脉，东以太行山为界，西到贺兰山、日月山。跨山西、陕西、甘肃、宁夏、河南、内蒙古等省区，面积约 64.2 万 km^2 ，其中水土流失面积 45.4 万 km^2 （水蚀面积 33.7 万 km^2 ，风蚀面积 11.7 万 km^2 ）。这里的大部分地区为水资源紧缺地区。黄土高原地处华北平原、内蒙古草原和蒙新沙漠戈壁之间一个广阔的过渡高原。在地形上处于我国东部河谷平原向西部青藏高原过渡，气候上处于暖温带湿润气候向温带干旱气候过渡，植被区划上处于湿润森林向荒漠草原过渡，地形复杂，气候变化剧烈，自然条件十分脆弱。水土流失和干旱并存是黄土高原生态建设和经济发展的主要制约因素。

1.1.2 原生植被破坏

从旧石器时代人类学会用火以后，砍伐林木作为燃料一直是人类活动的必需。随着经济社会的发展、人口的增加以及人们征服自然能力的增强，为了满足人们衣、食和薪材取暖需要，毁林开荒等人为活动范围逐渐扩大。据史料记载，西周至春秋时期，黄土高原植被受人为活动破坏轻微，基本保持着原始天然状态。公元 3000 年前的西周时期黄土高原森林面积为 32 万 km^2 ，森林覆盖率达 49.8%；秦汉时期森林面积已经不到

25 万 km^2 ，森林覆盖率 38.9%；到唐宋时期，黄土高原汾渭谷地等河谷平原，高原台原及黄土塬区已经没有天然森林。黄土丘陵地区天然植被已遭到了很大的破坏，但还没有达到毁灭性的程度。在黄土高原天然森林残存的石质和土石山地，森林面积下降到 20 万 km^2 ，森林覆盖率 31.1%；而到了明清时期，黄土高原地区森林已只剩下 8 万 km^2 ，森林覆盖率降至 12.5%。长期以来，随着人口的增加，过度采伐、开垦和破坏原生植被，致使黄土高原地区原始植被破坏殆尽。到 1949 年，黄土高原地区森林覆盖率降至 2%（吴钦孝和杨文治，1998）。近 50 年来黄土高原地区森林植被覆盖变化受人类活动的影响显著。由于经济贫困和人口压力，在进行治理生态环境的同时，又对自然植被进行破坏。例如，子午岭林区在 20 世纪 60 年代后期至 70 年代前期，因毁林开荒等人为破坏出现了大片农田和荒山，林区面积累计减少 1400 km^2 ，使子午岭地区的森林覆盖率减少到 19.9%。在 20 世纪 80 年代以前，陕北毁林垦荒种粮的现象十分普遍。在陕北米脂、绥德、清涧、子洲、子长等县，开垦指数高达 80% 左右（鲁渊平等，2005）。据统计，中华人民共和国成立后的 40 年间，黄土高原地区人口增加 5 000 万，人口密度达到 144 人/ km^2 ，而同一时期黄土高原地区有数百万公顷土地遭到开垦，仅在 1960~1962 年，陕、甘、晋三省就有约百万公顷的土地遭到开垦（中国科学院黄土高原综合科学考察队，1991）。

1.1.3 水土流失等生态环境问题

毁林毁草开垦后，土壤侵蚀模数比林地增长了 7000~8000 倍，造成了极为严重的水土流失。20 世纪 50 年代，黄河代表站年输沙量为 17.27 亿 t（胡春宏等，2010），是尼罗河的 30 倍、密西西比河的 90 倍（何永涛和郎海玲，2009）。根据 2003 全国水土保持监测公报，20 世纪 90 年代末全国水土流失总面积 356 万 km^2 ，占我国土地面积的 37%，其中，水蚀面积 165 万 km^2 。黄河流域黄土高原区每年进入黄河的泥沙多达 16 亿 t（刘霞，2004）。据最新遥感普查结果，现黄土高原每年流失的土壤相当于 36 万 hm^2 土地上 30cm 厚的耕作层，伴随着 4200 万 t 氮、磷、钾养分的流失，相当于 1989 年我国化肥使用量的 177%（许桂兰，2008）。日趋严重的水土流失不仅导致水土资源大量流失，造成洪水泛滥，干旱缺水，粮食低产和地区贫困等生态环境问题和社会经济难题，而且造成土地贫瘠化和沙漠化，危及人类的生存，成为区域可持续发展的主要限制因素。

近年来，随着经济的发展，人口的增加，人类活动范围的扩大，人们生活水平的提高，对资源和环境质量提出了更高的要求，但是近年来大范围的雾霾天气使空气能见度降低，多地高速公路、机场由于大雾和雾霾而封闭，导致道路不畅通。雾霾看似温和，里面却含有各种对人体有害的细颗粒、有毒物质，包括酸、碱、盐、胺、酚以及尘埃、花粉、螨虫、流感病毒、结核杆菌、肺炎球菌等，其含量是普通大气水滴的几十倍。现在，灰蒙蒙的大雾天气经常出现，如果不注意预防，雾霾中的污染物就会刺激呼吸道，诱发上呼吸道感染、哮喘、过敏性鼻炎、慢性支气管炎及心脑血管疾病。钟南山院士指出，雾霾污染会对人体呼吸系统、神经系统、心血管系统等产生威胁，特别是会导致肺癌。因此，这个问题非常值得重视（贾新光，2013）。沙尘暴天气是在特定地理环境

和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和天气系统所诱发的一种灾害性天气,它是一种跨地区,有时甚至越国境的环境问题。大面积、频繁发生的沙尘暴既是环境状况恶化的重要表现,又大大加快了土地沙漠化的进程,对我国工农业生产造成了严重的危害。近年来,沙尘暴和雾霾天气频繁发生,对当代人们的出行和生活产生了巨大的影响,尤其是与人们生存息息相关的航空、高速公路运输、空气质量、人体健康以及疾病发生等领域。而水资源紧缺的黄土高原地区干旱少雨,大范围干燥疏松的沙漠和土壤是形成强沙尘暴的一个必要条件。春季蒸发量大,降水稀少,地表裸露、疏松、干燥,植被稀疏,作物矮小,既是沙尘暴多发季节,也是形成沙尘暴的主要原因(徐国昌,2008)。

1.2 森林植被改善生态环境功能

作为陆地生态系统的主体,森林植被通过其林冠层、枯枝落叶层、根系层,从多个层次影响陆地(或坡面)生态系统的物质和能量状态,从而达到缓解乃至消除地表径流,沙尘暴和雾霾天气的重要功能。

1.2.1 林冠层拦截降雨和地表风速

在森林群落中,森林的覆盖层包括乔木层、灌木层、草本层和枯枝落叶层。森林通过林冠层和枯枝落叶层对降水和风速进行拦截和再分配。首先是乔木冠层对降水进行截留,其次是灌木层、草本层、地被层和枯枝落叶层的层层拦截。

林冠层对降雨的拦截一般用林冠截留量和截留率表示,降水量减去穿透降雨与树干径流量之和为林冠截留量,林冠截留率为截留量占降水量比率。森林通过树冠层和植被层截留一部分降水,达到削减甚至彻底消灭降水侵蚀的功能。林冠截留量的多少因降水的种类、强度和森林本身的特点、位置等因素而异,截留量可以从百分之几(次降水量远大于截留量)到80%(次降水量接近于截留量)以上。在中纬度条件下,一个基本郁闭的森林生态系统,林冠层大约可截留当年降水量的15%~30%(尹万珠,2002)。国外的研究显示林冠的截留率在20%~40%,国内的结果在11.4%~34.3%(王礼先和解明曙,1997;黄奕龙等,2003)。也有我国主要森林生态系统的林冠平均截留量变动在134.0~843.4mm,截留率平均值变动在11.4%~36.5%(温远光和刘世荣,1995)的报道。林冠截留率随降雨量的增加而减小,随林分密度和森林郁闭度的提高而增强,并呈现出一定的区域性差异,主要受降水特征、森林类型、林分特征及风速等因素影响(Gerrits,2010)。林冠截留降雨量的一般规律是:针叶林>阔叶林,落叶林>常绿林,复层异龄林>单层林(鲍文等,2004)。

具有浓密的树冠枝叶、丰富的灌木植被、枯枝落叶层的森林,能有效地削减侵蚀性降雨的雨滴动能,拦截、分散、滞缓雨滴对表土的侵蚀。例如,在我国海南省海南岛尖峰岭山地雨林每平方米林冠1年就减少降雨动能145803.9J。除林冠层外,林下的灌木、草本层和枯枝落叶层也能有效减少降水的雨滴动能。在陕西宜川县,森林的树冠、灌草层和枯枝落叶层累计可削减降雨动能总量的70%以上。森林减少降雨动能的大小

依次为枯枝落叶层、灌草层、林冠层（韩冰，1995）。由于林冠和枯枝落叶层对大气降水的拦截作用，降低和延缓了到达林地土壤表面的降雨量和降雨强度，延长了降水过程，有利于提高入渗速率，增加累积入渗量。其次，富有弹性的林冠和地被物的机械拦截显著地消散了雨滴打击力。森林植被通过对降雨的拦截和缓冲作用可降低天然降雨的势能和动能，避免雨滴直接溅击地表，有利于保护表土层原有的结构，使土壤入渗过程顺利进行，增加土壤入渗量。在江西省修水县的大坑流域，森林植被减弱降雨势能顺序为马尾松（*Pinus massoniana*）>杉木（*Cunninghamia lanceolata*）林>灌木林（余新晓，1988）。

防护林带和森林植被覆盖地表，保护土壤，降低了近地表风速，减弱了风沙侵袭，降低乃至消除风蚀。防护林带改变了近地表风速的分布，在林带背面形成了一个明显的弱风区（张春来等，2003）。根据 Wasson 和 Nanninga（1986）、Wasson 等（1986）和黄富祥等（2002）的研究，植被盖度增大，风蚀率迅速减少。防风林带结构一般包括稀疏、通风和紧密结构（封斌等，2005）。稀疏结构是有叶期，防护林带有一定透光孔隙且分布均匀，气流可以通过，透风系数为 0.3~0.5，防风距离为树高（H）的 35~37 倍，可降低风速 60%~75%。通风结构是树干部分有相当大的透光孔，气流遇到防护林后一部分从下部通过，另一部分从林冠上越过。一般情况下，防护林的防护距离与防护林带的高度成正比。根据张祥明等（2000）在淮北平原蒙城农业综合试验区多年观测，以黑杨为主体的东西向主林带和南北向副林带，配合侧柏（*Platycladus orientalis*）、紫穗槐（*Amorpha fruticosa*），林网内可降低风速 30%~40%，风速较高时则可降低风速 50%~60%，综合防风效能达 35%~40%。江汉平原水田林网内平均风速比旷野可低 20%~30%，在距林带 1~10H 范围内效果更为显著。在距林带 5H 处效果最显著。由池杉（*Taxodium ascendens*）、棕榈树（*Trachycarpus fortunei*）组成的林带，其 5H 处的风速只相当于空旷地风速的 61.3%（王学雷和吴宜进，1999）。在黄淮海平原农区由银杏（*Ginkgo biloba*）、杨树（*Populus*）混交生态经济型复合林带 4~6 月可使防护农田风速降低 18.9%；距林带 0.5H 处风速的降低率可达 30.0%左右；距林带 4H 处，农田中心的风速降低率为 1.8%~7.1%，动力速度可削弱 0.3%~31.7%，可减弱湍流交换强度 1.5%~29.9%，林带的有效防风距离至少可达 4H（张劲松等，2000）。

1.2.2 增加入渗与减少地表径流

枯枝落叶层能降低地表径流的流速。根据汪有科和刘国彬（2000）的试验，无枯落物的坡面径流流速是有 0.5cm 厚枯落物层的 6.8~13.5 倍。由于动能与速度的平方成正比，即使保持质量不变，无枯落物的坡面径流冲刷动能是有枯落物层坡面的 82~272 倍。有枯枝落叶层覆盖的地表径流流速仅是裸地的 1/6~1/8，最小的相当于裸地的 1/3（邵宗强和陈开圣，2010），这说明枯枝落叶层在降低径流冲刷能量方面具有极显著的作用。

森林枯枝落叶层起到过滤泥沙和海绵的作用。由于植被枯枝落叶层提高了地表粗糙度，增加了水流阻力，减小洪峰流量，降低径流流速，延长径流在坡面滞留的时间，从

而延长了下渗时间（陈腊娇等，2011）。枯枝落叶纵横交错，当集中的小股径流遇到枯枝时，径流沿叶的边缘移动，小股径流被分散和多次改变方向，曲折前进，这就大大降低了流速，延长了土壤的吸渗水时间（邵宗强和陈开圣，2010）。

枯枝落叶层可以增加土壤入渗。一定范围内土壤水分入渗速率较大即意味着较多降水转化为土壤水和地下水，延缓地表径流形成，降低洪水及其他灾害的威胁（王兵等，2006）。同时枯枝落叶层对土壤结构有改良作用，枯枝落叶层能保护和改良土壤结构，增加土壤的稳渗率，从而增加雨水下渗量，减少地表径流量和土壤流失量（韦红波等，2002）。枯枝落叶层能截留和增加雨水下渗，从而降低了地表径流量，减少了进入河流的地表径流量。在地形、土壤、植被相同的条件下，当雨季降水量为 479.6mm 时，去掉枯枝落叶层的林分比原林分增加土壤侵蚀量 8.1 倍（吴钦孝等，1992）。

根系对土壤渗透力的影响主要表现在根系能将土壤单粒黏结起来的同时，也能将板结密实的土体分散，并通过根系自身的腐解和转化合成腐殖质，使土壤有良好团聚结构和孔隙状况（朱显谟，1995），因此植被根系对土壤水分的渗透率有较大的影响。根据袁东等（2010）在闽北地区南平市顺昌县大历镇洋后浅层滑坡体的研究，植被能提高土壤的渗透能力。土壤入渗性能与植被类型有密切的关系，竹林、杉树、橘树这 3 种植被类型的土壤入渗率依次为：竹林>杉树>橘树。植物的生长能很好地提高土体的入渗性能。不同植被类型改土能力不同，因此土体初始入渗速率和稳定入渗率存在较大差异，荒地的初始入渗率和稳定入渗率均为最小。由于杉树林地区存在大量的枯枝落叶，腐殖层较厚，且有大量的昆虫、软体动物等栖息繁衍造成土壤疏松，因此杉树林地稳定入渗率最大（袁东等，2010）。在六盘山区，主要森林植被类型的土壤水分渗透能力（用稳渗速率表示）为乔木林地（11.1~22.1mm/min），灌木林地（5.8~14.4mm/min），草地（3.7~10.3mm/min），农地（2.9~5.9mm/min）（吴钦孝和杨文治，1998）。同时植物须根系（ $d < 1\text{mm}$ ）与土壤渗透性存在明显关系，显示了须根对土壤饱和渗透系数的影响是首要的。须根通过在土壤中的交错穿插作用和不断死亡分解所产生的有机质积累，促使土壤中大粒级水稳性团粒的增加，明显地改善了土壤的渗透性能。在密云水库集水区的流域水文监测数据表明，由于根系作用，林地土壤大孔隙增多，渗透量增多，有效吸持住雨水，有林地比无林地土壤含水量平均增加 1.9%（杨新兵等，2007）。

1.2.3 根系和枯落物增强土壤抗蚀性

根系可以改善土壤的物理性质。根系的枯死物对土壤的理化性质产生很大的影响，生长在土壤中的根系产生了各种大小不等的空气、水分和养分的通道，积累了许多有机和无机物质，为土壤微生物和土壤动物提供了生活和活动的场所（刘住舜，1988）。枯落物分解后形成腐殖质或非腐殖质，吸附黏粒或被吸收，形成微团聚体，使矿质土壤颗粒团聚成具有大量孔隙和不易被破坏的团粒结构，从而使土体变得疏松透水。根据朱显谟（1960）研究，林地土壤团粒含量为 46.2%~73%，远远大于农田。另据李勇等（1992）研究，黄土高原的刺槐（*Robinia pseudoscacia*）、油松（*Pinus tabulaeformis*）以及其他乔灌木的根系可提高土壤的水稳性团粒含量，增加非毛管空隙，降低土壤的紧实度和土壤容重，细根对土壤结构的改善作用最大，稳定土层结构的

范围与细根剖面中的分布特征一致。

根系和微生物分泌的有机酸,促进了土壤 CaCO_3 和其他盐类淋失,使土壤 pH 下降,酸度增加(蒋定生,1997),从而提高营养元素的生物有效性。在陕北黄土丘陵沟壑区,由于不同植物种类,其根系在剖面中的形态分布特征也不同,对土壤物理的改善效应有显著差异。在油松林地,土壤渗透水通量、非毛管孔隙度、 $>2\text{mm}$ 粒级的水稳性团粒和有机质含量的平均值比无根系土壤分别增加 $666\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 3.5% , 19.6% 和 0.5% ;在白草群落,分别增加 $236.2\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 2.9% , 19.6% 和 0.7% ,林草根系土壤的紧实度比无根系土壤分别降低 6.8% 和 6.9% (李勇等,2006)。根系对土壤的改良作用随着树种、土层深度和立地条件的不同而异,在荒山造林时,“灌木先行”可以加速土壤结构的优化(李任敏和常建国,1998)。

在土畔,森林植物的根系像网状般交织,固结土壤,防止滑落面的形成,加固斜坡和固定陡坡,极大地增强了土壤的抗蚀强度,减少了滑坡、泥石流和山洪的发生。更重要的是它还具有稳定斜坡控制重力侵蚀,主要是浅层滑坡和崩塌泄溜等作用,其中林木作用最为明显。根系的固土作用主要表现为3种方式:①网络作用:根系的交织穿插把较小结构的土块组成大的土块,在水流的冲击下不易被分散解体;②护挡作用:受水流的冲刷而导致部分根系、外露根系对上面冲来的土块起阻挡缓冲的作用;③牵拉:有些土粒紧密地附着在根系的四周,即使根系在水中飘动土粒也不易被冲走。根系的固土护坡作用主要表现在其对土壤抗剪强度的影响上(王治国等,2000)。解明曙(1990)采用全根系拉拔试验研究了白榆(*Ulmus pumila*)根系的固土能力,他认为根系固土的抗剪强度远高于无根系土,即使变形后的残余强度也高于无根系土。因此,根系土壤含水量饱和后往往能够保持土体不崩塌。影响根系固坡能力的因素主要有树种的生物学特性(包括根系特性,穿过剪切面的根量,树木的年龄和人为活动等)和环境因素(包括坡度、土壤性状等)(李鹏等,2002)。

森林植物根系和枯落物的分解增强土壤抗蚀性。根系的分割挤压,土壤微生物和动物的活动促使产生大量水稳性团聚体和粒径较大的微团粒,使土壤容重降低,形成良好的土壤结构,进而提高土体的抗蚀性和抗冲性。土壤抗冲性的增强,主要取决于根系的缠绕、固结和串连土体作用,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(朱显谟,1995)。植被对侵蚀过程的作用表现在对侵蚀动力和侵蚀物质都产生了深刻的影响。其中地上部分包括冠层、地表枯落物以及茎干等机械作用,有效地减弱了侵蚀动力对地表的冲刷,包括增加入渗减缓流速以及分散来自上方的股流。而根系则通过强化土壤的抗冲性、抗蚀性,有效地减少了土壤流失量,使植被覆盖条件下的地表侵蚀作用大大降低(李鹏等,2002)。李勇等(1998)提出了根系提高土壤抗冲性的“有效密度”和“有效深度”的概念。在有效根密度范围内,根系提高土壤抗冲性的强化值与根密度成正比。不同植物种类其提高土壤抗冲性的作用具有相对稳定的临界土壤深度或有效深度(油松为 60cm ,沙棘或者草类为 20cm)。如果植被遭到破坏,随着根系的逐渐腐烂,上部土壤的抗冲性很快降低,遇到暴雨冲刷极易发生沟蚀。胡建忠等(1998)利用主成分分析将人工沙棘林土壤抗蚀指标分为最佳指标、二级指标和三级指标3个等级,而 $>0.5\text{mm}$ 水稳性大团粒的含量是其土壤抗蚀性的最佳指标。在坡面发生侵蚀时,被根系缠绕串联的土壤流失,不是由于毛根的断裂,而是由于根与土分离造

成的被冲蚀土粒或土团成为没有根系的部分或者根系数量小于有效根密度的部分。同时,具有生理活性的根系可以通过分泌大量的高分子粘胶物质、多糖类物质将土粒粘接提高土壤的抗冲性(刘国彬等,1996;刘国彬,1997)。土壤抗冲性随着坡度的增加而减弱。在一定坡度下,随着林龄的增加,土壤抗冲性增强,去除枯落物的油松林地土壤抗冲性明显小于有枯落物的油松林地,土壤抗冲性随着枯落物厚度的增加而增强,林地土壤抗冲性随多样性指数的增大而增强(王丹丹等,2013)。

根据蔡崇法和丁树文(2000)在三峡库区库首湖北省秭归县王家桥小流域应用USLE模型与地理信息系统IDRISI的研究,当植被覆盖度大于78.3%时,地面基本上没有水土流失;而当植被覆盖度小于0.1%,植被失去水土保持作用。因为植被通过其冠层、地被物的覆盖效应,根系固土和改善土壤结构等方式能有效地消散雨滴动能、延滞地表径流、提高土壤水分入渗、减轻地表蒸发、提高土壤水库的调蓄能力、增强土体抗冲抗蚀性,从而达到防治土壤侵蚀,减少流域产沙量与河流泥沙含量,防止河道与水库淤积,降低风速,减轻沙尘暴危害。因此黄土高原地区的生态修复过程中,森林植被的恢复和重建是必然的选择。植被通过固土和改善土壤结构等方式延滞地表径流,提高土壤水分入渗,减轻地表蒸发,提高土壤水库的调蓄力,增强土体抗冲抗蚀性,从而达到改善生态环境,防止水患,控制水土流失之目的(郭忠升,1999)。

1.2.4 森林吸尘和净化空气作用

森林植被不仅具有防止水土流失的功能,还具有调节气候、吸收和利用大气中的CO₂(肖艳和张汉林,2013),吸收和调节各种污染物质等功能(Livesley et al., 2013),在维护区域乃至全球生态平衡中具有无可替代的重要作用。森林碳汇是指森林植物通过光合作用,吸收和利用大气中的CO₂,并将其固定在植被和土壤中,从而减少大气中CO₂浓度,达到净化空气,有效地缓解地球“温室效应”,维护生态平衡的目的。据科学测定,陆地生态系统碳的总贮存量约为5600亿~8300亿t,其中90%存储于森林之中。森林每生长1m³,约可吸收固定350kg的二氧化碳。全国森林平均每年净吸收碳高达250万~2800万t,每年全国大致可吸收能源中燃烧矿物燃料释放CO₂总量的16%。植物能吸收环境中的有毒物质,并能把这些物质储存在体内,森林还能有效地吸收和减缓大气污染物,每公顷森林对SO₂、NO₂、CO的年吸收量分别为748t、0.38t和2.2t(祝列克,1999)。植物能分解转化某些有毒物质,某些有毒物质进入体内后,储存在诸如木质部、细胞壁、液泡以及乳状胶汁中,不再参与代谢;有些金属元素进入植物体后,能立刻与体内的硫蛋白结合形成金属蛋白;有些污染物在植物体内在酶的作用下,通过氧化、还原、水解、脱烃、脱卤、芳环羟基化和异构化过程等,能使体内毒性减少等。伦敦人发现,诸如万年青等室内阔叶植物,都有较强的吸附有毒气体的功效,从而在一定程度上可帮助净化室内空气。在户外,努力植树造林,现在伦敦人均绿化面积已达24m²。此外城市外围还兴建了大型环形绿化带,面积达数千平方千米,几乎是城市面积的3倍。加上其他有效措施,今天的伦敦已成功地摘掉了“雾都”帽,雾霾天从100年前的每年约90天,减少为9天(唐若水,2013)。

1.3 水资源紧缺地区大规模的植被恢复

生物措施是水土保持中最有效和最根本的方法（朱显谟，1995），因此，水资源紧缺地区森林植被建设与保护在保持水土、改善生态环境中占据关键地位。只有恢复和重建黄土区森林植被才能从根本上控制水土流失（胡建忠和朱金兆，2005）。

1.3.1 提高森林植被覆盖率

新中国成立以来，我国在黄土高原地区开展大面积人工林建设，特别值得一提的是1978年开始的大规模的“三北”防护林工程（潘迎珍，2010）。为了遏制西部地区生态环境日益恶化的趋势，我国政府立足于生态—经济—社会可持续发展的立场，于1999年率先在陕西、四川和甘肃三个省开展试点，启动了退耕还林（草）工程，旨在改善西部地区生态环境，实现秀美山川。至2007年年底，退耕还林还草工程范围已扩展到25个省、市、自治区，涵盖范围约占全国面积一半以上。从退耕还林的规模来看，西部地区退耕规模远高于全国其他地区，黄土高原更是重点区域，成为我国植被生态修复建设的重中之重，也是人工影响区域生态环境的主要地区。随着降水量的恢复和国家退耕还林还草政策的大规模实施，黄土高原植被覆盖率进入第2次迅速提高期。自1999年底至2009年，累计退耕还林还草4.15亿亩（林业局，2010）。1949~1989年，在黄土高原水土流失区造林保存面积（含灌木林）约150万 hm^2 ，人工草地保存面积约50万 hm^2 ，使全区森林覆盖率由2%提高到7.8%。在已完成的治理面积中，造林种草面积占46%，封山育林面积占7%，二者共计53%（吴钦孝和杨文治，1998）。另据信忠保和许炯心（2007）通过分析国际广泛使用的GIMMS和SPOTVGT两种植被遥感数据，对1981~2006年黄土高原植被覆盖变化情况研究，在20世纪80年代黄土高原植被覆盖普遍提高，生态环境改善；90年代前期、中期植被覆盖以小幅波动为特征，末期的植被覆盖急剧下降。根据潘迎珍（2010）报道，通过“三北”防护林工程实施的30年间，森林覆盖率由5.05%增加到10.51%。中国科学院水利部水土保持研究所从2000年开始，结合西部行动项目和国家科技支撑项目，积极开展植被生态修复研究工作，根据“适地适树”的原则，在延安安塞县，在不同年限的退耕地上，补植乡土植物，取得了很好的效果（张文辉和刘国彬，2007）。根据2005年中国科学院、中国工程院和水利部组织了全国7大区域的“中国水土流失与生态安全综合科学考察”活动，西北黄土区考察组对黄土高原植被修复情况进行了全面的调查，对退耕还林、天然林保护、生态修复工程及其效果进行了全面评价，发现利用植被修复生态，效益突出，深受干部群众欢迎。

林草工程建设作为脆弱区域生态系统修复的主要方式和措施之一，是人类大规模影响区域生态系统演变的主要途径，而植被正是生态环境建设的主体。其恢复与建造决定于气候、地形、土壤和土地利用等因素，同时形成的植被规模、类型和时段也不断的影响和改造着环境。黄土高原的生态恢复就是植被恢复，因此，植被的恢复成效关乎黄土高原的山川秀美的最终目标。