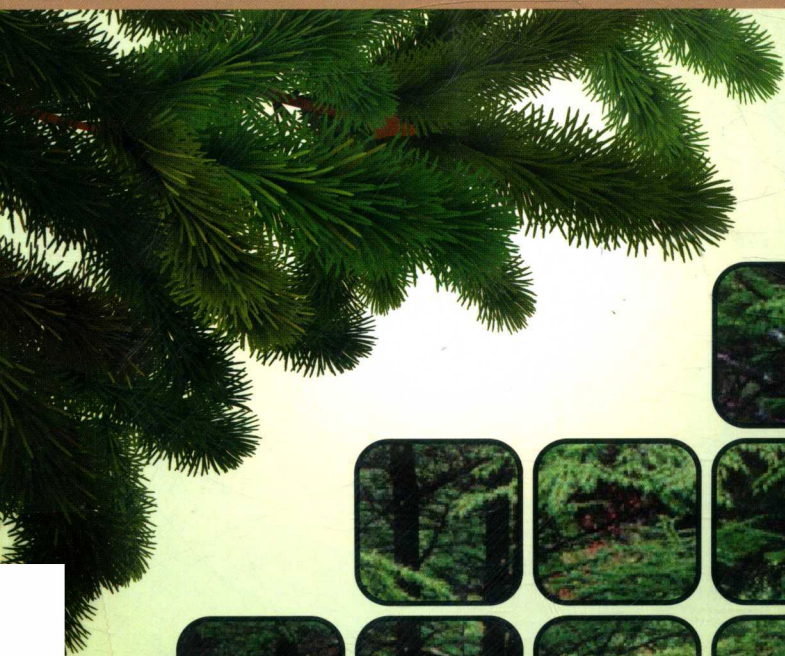


华北落叶松

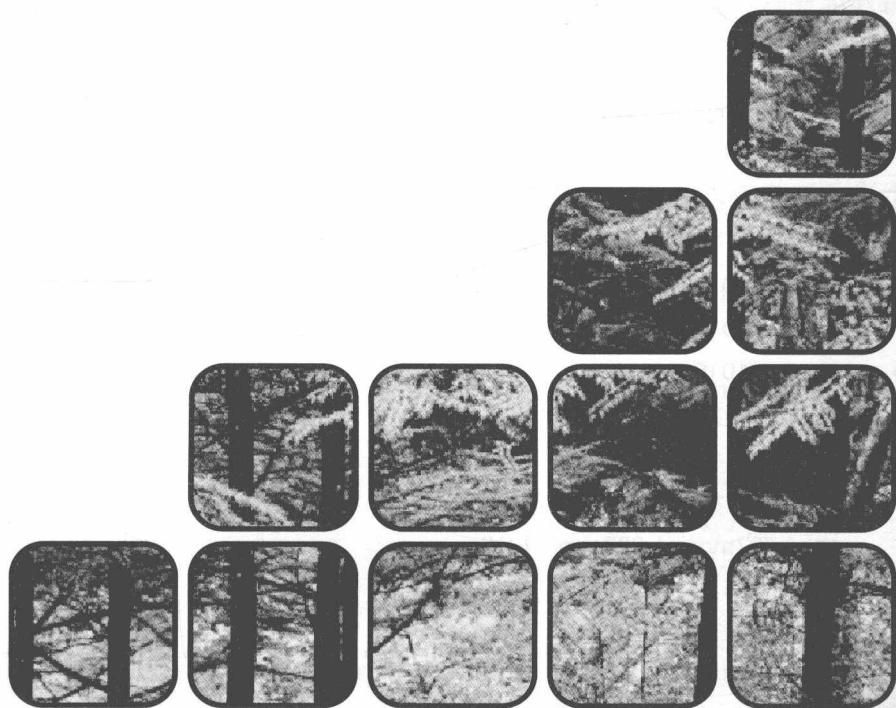
姚延桢 陈建中 胡建芳 著



中国农业科学技术出版社

华北落叶松

姚延桢 陈建中 胡建芳 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

华北落叶松 / 姚延椿, 陈建中, 胡建芳著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2013. 1

ISBN 978 - 7 - 5116 - 1102 - 4

I. ①华… II. ①姚…②陈…③胡… III. ①华北落叶松
IV. ①S791. 229

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 244192 号

责任编辑 张孝安 赵 赟

责任校对 贾晓红 郭苗苗

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82109708(编辑室) (010)82109702(发行部)

(010)82109709(读者服务部)

传 真 (010)82109708

网 址 <http://www.castp.cn>

经销者 新华书店北京发行所

印刷者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787mm × 1 092mm 1/16

印 张 14.5

字 数 300 千字

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价 50.00 元

▶▶▶ 版权所有 · 翻印必究 ▶▶▶

前 言

华北落叶松作为抗寒性强、适应范围广的速生丰产树种，是华北地区重要的用材林和防护林之一。新中国成立后，我国在华北落叶松天然分布区以外及低海拔地区，进行了大量的引种和栽培驯化，都取得了较好的造林效果。但目前，在华北落叶松营林实践中，缺乏系统指导的理论著作。与以往研究不同的是，本书旨在介绍华北落叶松造林管理的基础上，通过探讨华北落叶松的营养及抗性生理，以期深入研究影响华北落叶松生长分布的主要限制因子，如过低的空气相对湿度和土壤湿度以及过高的温度等，为提高华北落叶松造林成活率，提供科学依据和理论指导。

本书在编写过程中，得到了山西农业大学林学院肖杨教授、韩有志教授及森林培育室的许多同仁的无私支持和帮助，并采纳了他们提出的许多宝贵的建设性的意见；研究生李俊英、杨秀清、王学君、江萍、刘俊英、李靖等人也做了不少相关的工作。书稿付梓之际，在此谨向他们表示衷心的感谢。另外，本书在编写过程中，还查阅了大量相关的国内外研究专著及高水平刊物，引用了许多相关的资料和图片，为本书的编写提供了重要的理论参考，在书后的参考文献中都能体现出来，但仍不可能全部列出，在此，特向有关人士深表歉意并谨致谢意。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

于山西农业大学

2012年3月

目 录

第一章 华北落叶松研究进展	1
第一节 华北落叶松生物学特性和分布	1
一、华北落叶松特性	1
二、华北落叶松分布	5
三、华北落叶松林生境	7
第二节 华北落叶松根系生长发育研究进展	8
一、林木根系研究概况	8
二、华北落叶松根系研究进展	25
第三节 华北落叶松地上部分生长发育研究进展	28
一、林木地上部分研究概况	28
二、华北落叶松地上部分生长发育研究进展	32
第四节 华北落叶松营养及抗逆性研究进展	37
一、华北落叶松凋落物研究	37
二、华北落叶松体内营养元素含量及运转研究进展	43
三、华北落叶松抗逆性研究进展	45
第二章 华北落叶松生长与发育	56
第一节 华北落叶松育种	56
一、华北落叶松引种概况	56
二、华北落叶松母树林	57
三、华北落叶松种子园	60
四、华北落叶松采穗圃	64
第二节 华北落叶松种子生产	65
一、华北落叶松结实	65
二、华北落叶松种子采集	67
三、华北落叶松种实调制与贮藏	68
四、种子品质检验	69

第三节 华北落叶松苗木培育	71
一、苗圃地管理	71
二、播种苗培育	73
三、留床苗培育	77
四、容器苗培育	78
五、移植苗培育	79
六、扦插苗培育	80
七、病虫害防治	81
八、苗木出圃	83
九、苗木质量评价	85
第四节 华北落叶松林木生长发育	89
一、华北落叶松林木个体生长发育	90
二、华北落叶松林分生长发育	91
三、华北落叶松抚育采伐	93
四、华北落叶松人工整枝	94
第五节 华北落叶松材质特性	94
一、木材宏观构造特征	94
二、木材微观构造特征	96
三、物理力学、化学性质	97
四、加工性质	97
五、用途	98
第三章 华北落叶松营养元素及酶活性与抗逆性研究方法	99
第一节 研究区概况及材料处理	99
一、研究区概况	99
二、试验地确定	100
三、试验处理	100
第二节 研究方法	101
一、林分生物量与根系分布测定	101
二、铜、钼、锌等营养元素测定	101
三、保护酶活性测定	102
四、同工酶测定	105
五、丙二醛 (MDA) 含量及电导率测定	107

第四章 华北落叶松研究结果与讨论	108
第一节 华北落叶松人工林林木根系	108
第二节 华北落叶松人工林生物量	112
第三节 华北落叶松铜钼元素	117
一、华北落叶松人工林铜、钼元素含量与贮量情况	117
二、试验林分铜、钼元素的生物循环	118
三、试验林分各器官铜、钼元素的分布	118
四、华北落叶松苗木不同时期各器官营养元素含量变化规律	125
五、各器官铜、钼元素的聚类分析	163
第四节 华北落叶松酶活性分析	166
一、华北落叶松人工林林木体内酶活性	166
二、华北落叶松人工林铜钼元素与酶活性关系	172
三、华北落叶松苗木 SOD 酶活性	173
第五节 华北落叶松的其他研究	187
一、华北落叶松不同处理间各部位丙二醛含量的比较分析	187
二、华北落叶松不同处理间各部位的电导率比较分析	187
三、温度胁迫下华北落叶松叶细胞保护性酶的活力变化	189
四、同工酶分析	191
五、华北落叶松抗逆性研究前景	193
第六节 华北落叶松营养元素及酶活性与抗逆性研究结论	194
第五章 华北落叶松混交林	200
第一节 混交林概述	200
一、营造混交林的意义	200
二、树种混交基本理论	201
第二节 华北落叶松混交林	204
一、华北落叶松云杉混交林	204
二、华北落叶松杨桦混交林	205
三、华北落叶松油松混交林	206
参考文献	207

第一章 华北落叶松研究进展

第一节 华北落叶松生物学特性和分布

一、华北落叶松特性

华北落叶松，学名 *Larix principis-rupprechtii* Mayr，别名红杆（山西），黄杆（河北），松科（Pinaceae），落叶松属（*Larix*）。

（一）形态特性

华北落叶松树势雄伟，高达30m，胸径1m。顶芽无毛，与枝同色，直径约4mm，着生于树木主干和侧枝顶端，生于一年生枝者近光滑，生于短枝者密生长毛。侧芽着生于顶芽以下，为多数，邻近顶芽的4~6个侧芽，则形成规律性的抽生枝条。树干和枝条上均有潜伏芽，在一定条件下，可形成叶簇或抽枝，也可开花结实。叶披针形或线形，上面平，于1年生枝上螺旋状排列，短枝上则为簇生，叶长2~3cm，宽约1mm，先端尖或微钝，上面平，背面中脉隆起，叶两侧气孔线各4~5条。叶芽在1年生枝条上生于叶腋间，放叶较迟；叶芽复数，通常为5~6个，在多年生枝上着生于短枝。枝由侧芽、潜伏芽和叶芽演变而来。1年生枝淡褐色或淡黄褐色，幼时有毛，后脱落近无毛，有白粉；2~3年生枝黄褐色渐变为灰褐色或暗灰褐色。单性花，雌雄同株。7~8年幼林（人工林）进入开花结实期。雄球花生在2~5年长枝上，体积较小，有芽鳞50~80片，小孢子囊2个。雌球花生在2~5年生短枝上，体积较大，有55~60片线形叶、60~70片苞鳞和50~58枚大孢子叶。雌雄花期重合，花粉无气囊。花期5月。球果长卵形或卵圆形，果鳞无毛，上缘较窄，截形有细波状锯齿，果鳞30枚以上。球果成熟时淡褐色，有光泽，长2~4cm，球果径约2cm；先端截形倒凹形，背面光滑（图1-1）。苞鳞暗紫色，略短于种鳞或近等长，在球果基部常微露出。革质果鳞，每片果鳞2粒种子。种子倒卵状椭圆形，灰白色，具有不规则的褐色斑点，种子连翅长1.0~1.2cm。成熟时种子脱落，球果宿存。种子较小，种体

均长 3.84mm，均宽 2.4mm，种喙扁而突，种体腹面基部平整，种体直边种翅包被达种子厚度的 1/2，种翅与种子背面成平角。千粒重为 5.3~6.9g。苗径淡褐色，叶披针形，单生且螺旋状排列，2 年生苗有分枝，地径以下浅红色皮层。扦插苗地径处膨大，平茬苗在地径以上有短桩，苗径由侧芽形成，一般无分枝。

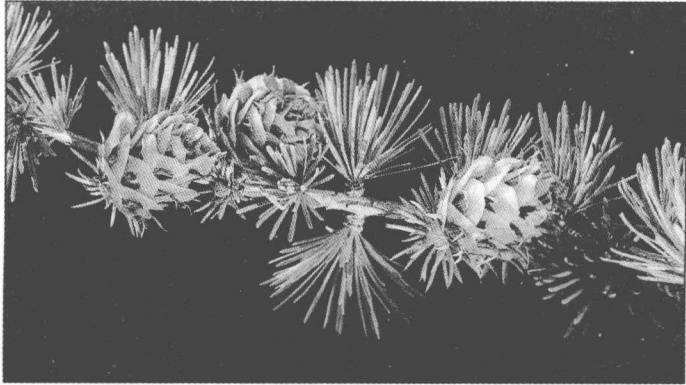


图 1-1 华北落叶松球果枝

(二) 生物学特性

华北落叶松喜光、喜湿润和温凉的气候条件，适生于高寒气候。在年平均气温 $-2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ，1 月份平均气温 -20°C 左右，气温 0°C 以上的天数为 80~90d 的气候条件下能正常生长。在冬季可耐 -39°C 的极端低温，夏季可耐 35°C 的高温。但对于幼苗来说，其生长条件较为苛刻，尤其是 1 年生幼苗，当地表温度达到 35°C 时，就会发生日灼害。华北落叶松喜光性强，在阳坡全光照条件下更新和人工更新均良，上方遮荫生长不起来，林下不能完成更新。华北落叶松的栽培不宜采用群状配置，群状配置时要求及时间苗、定苗，否则影响生长，若采用混交林，华北落叶松必须要作为第一林层。

华北落叶松喜生于湿润肥沃的土壤，根系属浅根性表层分布类型，主根不发达，侧根发育旺盛，对土壤的适应性较强，在山地棕壤及黄土母质上发育的淋溶褐色土和褐色土、淡栗钙土上都能生长，但在花岗岩、片麻岩、沙页岩等母岩上发育的肥沃深厚、通透性好、有好气性白色菌丝、呈微酸性的山地棕壤上生长最好。

华北落叶松速生，且速生时间长，单位面积上容纳的株数多，能积累很高的蓄积量。30~40 年生的中等林分材积连年生长量为 $12.15\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，华北落叶松人工林比天然林生长更快，20 年生的人工林，林分平均高达 12.15m，平均胸腔达 10cm。华北落叶松侧根发达，一年内高生长可持续达 100d 左右，叶子生长可

维持到8月份以后；旬降水量在70mm内，降水越多，生长越快；相对湿度以70%~80%最适宜，土壤含水量以16%~20%最佳；6~10℃开始生长，20~24℃生长最快。

华北落叶松14年左右开始结实，人工林6~10年开始结实。花粉无气囊，飞得不远，授粉条件不好，影响种子发芽率，种子发芽率可达65%左右，种子小，飞散距离远，结实周期一般3~5年。

(三) 群落特征

1. 天然华北落叶松林

天然华北落叶松下限与松栎林或桦木林相连，上接高山草甸，其纯林大多为I~IV龄级的同龄林。河北省的天然落叶松林分郁闭度多在0.6~0.9，年龄大多为60~70年，III龄林分平均树高15~23m，每公顷蓄积量150~450m³。华北落叶松混交林的混交树种有白杆(*Picea meyeri*)、青杆(*P. wilsonii*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、黑桦(*Betula dahurica*)、蒙古栎(*Quercus monjolica*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、枫桦(*Betula costata*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、色木槭(*Acer mona maxim*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。在所有的混交林中，华北落叶松与白杆、青杆组成的混交林相对来说比较稳定，华北落叶松为上层，云杉(*Picea aspeitata*)为下层，混交林的郁闭度较大，一般为0.6~0.9，但这种混交林最后会朝着云杉顶极群落发展。

华北落叶松林内的灌木组成稀少，普遍分布的有金花忍冬(*Lonicera chrysantha*)、北京花楸(*Sorbus discolor*)、刚毛忍冬(*L. hispida*)、六道木(*Abelia biflora*)、华北绣线菊(*Spiraea fritschiana*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、美蔷薇(*Rosa bella*)、二刺茶藨(楔叶茶藨)(*Ribes diacanthum*)、美丽茶藨(*R. pulchellum*)、兴安茶藨(*R. pauciflorum*)、大黄柳(*Salix raddeana*)、大叶小檗(黄芦木)(*Berberis amurensis*)、蓝靛果(*Lonicera*)、红瑞木(*Cornus alba*)等，盖度一般小于30%，疏林内的盖度可达40%。在河北的燕山山系雾灵山，除此之外，还有红丁香(*Syringa villosa*)、锦带花(*Weigela florida*)、东陵绣球(*Hydrangea bretschneideri*)等。在山西关帝山的常见灌木，除上述外，还有松栎林带内的下木，如甘肃山楂(*Crataegus kansuensis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides ssp. sinensis*)、茶条槭(*Acer ginnala*)、榛(*Corylus heterophylla*)、大花溲疏(*Deutzia grandiflora*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor turcz*)、修枝荚蒾(*Viburnum burejaticum*)等。

华北落叶松林内常见的草本层植物种类有：紫菀 (*Aster tataricus*)、老鹳草 (*Geranium wilfordii*)、林地猪殃殃 (*Galium paradoxum*)、东方草莓 (*Fragaria orientalis*)、歪头菜 (*Vicia unijuga*)、蓝花棘豆 (*Oxytropis coerulea*)、花锚 (*Halenia corniculata*)、花葱 (*Polemonium icum*)、蚊子草 (*Filipendula palmata*)、玉竹 (*Polygonatum odoratum*)、黄精 (*P. sibiricum*)、乌头 (*Aconitum sp.*)、铁线莲 (*Clematis sp.*)、唐松草 (*Thalictrum sp.*)、升麻 (*Cimicifuga sp.*)、野青茅 (*Deyeuxia sp.*)、糙苏 (*Phlomis sp.*)、地榆 (*Sanguisorba sp.*)、红花鹿蹄草 (*Pyrola incarnata*)、龙芽草 (*Agrimonia pilosa*)、藁本 (*Ligusticum sp.*)等。在少光潮湿的林冠下有三叶舞鹤草 (*Maianthemum dilosa*)、蕨等，在海拔较高地区还可见到金露梅 (*Potentilla fruticosa*)、矮茶藨 (*Ribes triste*)、虎耳草 (*Saxifraga sp.*)、大苞柴胡 (*Bupleurum euphorbioides*)等，在湿润的林窗内有山尖子 (*Calcilia hastata*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、波叶大黄 (*Rheum franzenbachii*)、蹄叶橐吾 (*Ligularia fischeri*)等。除此之外，在与云杉的混交林分内还有藓类。

华北落叶松林内的层外植物有属于地衣类的高岭石蕊 (*Cladonia alpestris*)、松萝 (*Usnea longissima*)等，附着在树干上的山羽藓 (*Abietinella abietina*)、牛毛藓 (*Ditrichum flexicaule* 或 *D. tortie*)。

在一些华北落叶松林内，仅生长着以菊科、禾本科、蔷薇科等1年或2年生的草本植物，灌木层很不明显，一些湿度较大地段的林分内以苔藓植物为主。除此外，有的林分内以苔草为主，禾本科植物和藓类极少，形成了较大的草根盘结度。华北落叶松和云杉混交林内，由于林冠稠密，不利于灌木和草本植物生长，灌木层和草本层不发达；高稠密林分内，灌木和草本盖度在10%以下，地面只呈现出黄色毡垫状的柔软落叶层。

2. 人工华北落叶松林

华北落叶松人工林群落较简单，由于多年来营造纯林较多，加之初植密度较大，形成同龄单层林相，林下植物稀少。华北落叶松混交林一般用行状混交为宜，主要混交树种有油松、栎类、山杨、桦木及云冷杉；人工林结构一般2 500 ~ 6 600株/hm²，行状配置。

华北落叶松人工林的灌木和草本植物种类与造林地上原有的灌木和草本植物相同。

二、华北落叶松分布

(一) 天然华北落叶松林分布

华北落叶松林是中国暖温带亚高山地区的代表性森林类型，主要分布于河流的发源地，在水源涵养和水土保持方面具有重要作用。华北落叶松适生于大陆性气候，是中国的特有树种。天然林多呈岛屿式分布在中国的内蒙古自治区、河北省、北京市、山西省的高海拔地带。分布范围南起 $36^{\circ}30'N$ 的山西太岳山区沁源县，北至 $42^{\circ}37'N$ 的孟滦林管局、河北省塞罕坝机械林场，最东分布界限是 $118^{\circ}30'E$ 、 $43^{\circ}40'N$ 的内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗旺业甸林场（图 1-2）。

在山西省境内，主要分布于五台山、管涔山、关帝山、恒山、馒头山、草垛山、太岳山，海拔 1 600 ~ 2 800m 的山地，自北向南较集中分布的有 4 片：海拔 1 500 ~ 2 100m 的恒山山系，属浑源、灵丘、广灵等县，约 1 738 hm^2 ；海拔 1 750 ~ 2 600m，山西西北管涔山的阳坡、半阴坡的小片天然华北落叶松林，属宁武、神池、五寨、静乐、原平等县（市），约 12 360 hm^2 ；海拔 1 600 ~ 2 800m，位于山西省东部的五台山林区，属五台、繁峙、代县等县，约 3 562 hm^2 ；海拔 1 850 ~ 2 600m，位于山西西部的关帝山林区，属交城、文水、汾阳、中阳、离石、方山、娄烦等县（市），约 5 906 hm^2 。此外，还有两个小面积的天然分布最南界的华北落叶松林区，分别是面积为 56 hm^2 的太岳林区好地方林场（属沁源县）和面积为 15 hm^2 的七里峪林场（属霍县）。

河北省残存的天然华北落叶松主要分布于小五台山、驼梁山、雾灵山、冀北山地等。海拔 2 000 ~ 2 600m 范围内，属恒山山系的小五台山，属蔚县和涿鹿县，约 6 276 hm^2 ；海拔 2 000m 以上的太行山北段的驼梁山，属阜平县，约 67 hm^2 ；海拔 1 500m 以上的冀北山地，属围场县和隆化县，约 67 hm^2 ；海拔 1 800m 以上，属燕山山系的雾灵山，约 10 hm^2 以上。

在内蒙古自治区，华北落叶松最北可分布到大兴安岭南端的黄岗梁，海拔 1 600 ~ 2 000m。在克什克腾旗的白音敖包，翁牛特旗的磨石沟及喀喇沁旗的旺业甸林区也有分布。

此外，在北京市百花山海拔 1 800m、东灵山海拔 1 800 ~ 1 900m 处也有散生的天然华北落叶松。

(二) 人工华北落叶松林分布

华北落叶松因其具有速生、丰产、优质、抗性强、适应范围广等优点，新中国成立后，我国广大地区进行了大量引种，经过多年的栽培与驯化，适应性已大



图 1-2 华北落叶松林相

大加强。在天然分布区以外，从 32°N 的川西高山区到 46°N 的黑龙江林口县，从 85°E 的新疆维吾尔自治区天山山地到 127°E 的长白山区，均营造了华北落叶松人工林。栽培实践表明，在海拔 1 200m 以上引种栽培的华北落叶松，生长良好。

1949年以来,在内蒙古自治区、河北省、山西省、北京市等地引种区,基本上都超过了原天然林的分布生境,引种了大量的华北落叶松。一是在天然分布区范围内向低海拔引种,二是向分布区外引种。截至1981年,保存了约5 000 hm²落叶松林。在海拔较低的松栎混交林层的阴坡、沟谷的深厚土壤上,人工造林都取得了广泛成功。河北省主要在围场县境内的赛罕坝机械林场营造了大量的华北落叶松人工林,除此之外,在丰宁、平泉、隆化、滦平、兴隆、承德、崇礼、蔚县、阜平、涞源等地也营造了不少华北落叶松林。山西省在恒山、管涔山、五台山、关帝山、太岳等地都人工营造了大面积的华北落叶松。

天然林区以外也进行了许多华北落叶松的引种,不少地区都取得了成功。1967年,在宁夏回族自治区泾源县内六盘山林管所二龙河林场,海拔2 150m处营造华北落叶松林,现引种范围已扩至属半干旱区的海源县南华山灵光专寺林区及同心县罗山林区和贺兰山林区。在陕西省的黄龙林区、桥山林区、秦岭等地,引种的华北落叶松大多栽植在海拔1 000~2 800m的地带,引种后大部分生长较好。黄龙林区主要引种地包括官庄、蔡家川、圪台、石堡及小寺庄等林场;桥山林区主要引种地包括腰坪、店头、双龙林场(属黄陵县);秦岭林区有长安县沔峪林场及宁陕县火地塘林场等。另外,在陕西西北部引种的华北落叶松生长较差,尤其是榆林地区因气候干燥多风,造林成活率很低。青海省从北面的祁连山至南部的黄河谷地,在海拔1 800~3 200m的范围内,所属西宁、民和、乐都、互助、大通、湟中、湟源、循化、化隆及海北、海南、黄南等地,包括天然林区、荒山及阶地上都引种了华北落叶松。甘肃省在曾经引种的6种落叶松中,只有华北落叶松获得了成功。现在华北落叶松在甘肃的引种范围已经扩大至全省的各天然林区,北到祁连山东段天祝县、肃南县,南到天水地区小陇山、康南等次生林区,西到祁连山西段黑河上游的寺大隆林场。除此之外,在子午岭林区也有少量引种。

三、华北落叶松林生境

华北落叶松天然林是山地森林垂直带谱的最高组成成分。该树种具有极强的耐寒性,分布可达树木线,上接亚高山草甸。在1 800m以上常与白杆、白桦、红桦形成混交林,在分布区南部较低山地常与油松、栎类形成混交林。分布区内年降水量600~800mm,主要集中在6月、7月、8月3个月。华北落叶松分布区的大气相对湿度与其他落叶松属种相比,相对湿度一般较低。

华北落叶松林分布在花岗岩、片麻岩、砂质岩以及风积沙土等母质发育的土

壤上。在自然分布区,大部分土壤为典型棕壤、生草棕壤、草甸棕壤等,也有少部分的黑土型沙土。天然华北落叶松能适应各种土壤条件,不论是在干旱瘠薄的土壤,还是冷湿的低洼地,都能生长,但其最佳适生土壤为肥沃湿润而排水良好的阴坡厚土和阳坡厚土。华北落叶松的人工引种在天然分布区以外,栽植于较温暖、干旱的气候条件时,只能在深厚肥沃的土壤上才能生长。过低的空气相对湿度和土壤湿度以及过高的温度是限制华北落叶松分布的生境因素。

第二节 华北落叶松根系生长发育研究进展

林木根系是林木生长发育的物质基础,根系的生长状况对保证林木的生长发育至关重要。它不仅机械固定、支撑着林木的生长,而且直接参与土壤中各物质及能量的交换过程,与林木地上部分的生长关系密切,是林木从土壤中吸收水分和养分、合成和转化多种物质的重要营养器官,也是氨基酸、激素等微量活性物质合成与转化的重要器官;同时,由于直接与土壤接触,林木根系对环境的变化最为敏感,它的反应对林木的生命活动有着非常重要的影响。近年来,林木根系作为森林生态系统的重要组成部分,其在土壤改良中对土壤肥力、土壤结构及抗蚀性的生态作用越来越引起人们的关注。从恢复生态学和全球生态学的角度,研究根系分布在森林演替中的生态作用以及林木根系在森林生态系统物质循环中的作用也成为了热点(杨喜田等,2009年)。因此,研究华北落叶松不同径阶根系在土壤中的伸展状况、根系生物量及其变化规律,对于营造和抚育华北落叶松人工林,具有重要的理论和实际意义。

一、林木根系研究概况

(一) 林木根系研究进展

人类对根系的研究始于18世纪,1764~1765年,Hales应用简单的挖掘技术,挖掘出栽培作物的根系,对根系开展比较系统的研究工作,观察了根系的形态学特征并测定了根长及根重量(薛文鹏,2003年)。之后的100多年,关于根系的重要文献记录便少之又少,直到19世纪后半叶,由于矿质肥料在农业上的施用,根系研究受到重视,由此开展了对农作物根系的挖掘和生理学方面的科学研究工作。此时,人们对根系的研究仍以挖掘法为主,并在一定程度上认识了根系的吸收作用。20世纪前半叶,研究人员通过建立专门的根系研究设施,运用生态学方法,比较深入的探讨了根的发生、生长、外界条件等关系。20世纪30

年代, J. E. weaver 较系统地研究了 10 多种作物根系的生长过程后, 认为只有全面地认识作物根系发育, 根群分布, 不同生育时期根系吸收水分养分活力以及不同环境下根系的变化, 才能科学地理解作物生产。1937 年, Bates 在土壤中钻若干个孔, 然后把玻璃管压入孔内, 再把绑有镜子和灯泡的杆插入管中, 利用反光镜观测根系, 结合素描记录图像, 实现根系观测, 并提出了微根管法观测微根系生长。1939 年, 根系数目在深度方向上的 Webull 分布规律被发现, 并随后开展了对根系固土作用的研究。20 世纪 50 年代和 60 年代, 许多研究人员对根系开展了大规模、全面深入、细致的研究, 并取得了显著的成绩, 50 年代末, 林木根系研究列入了森林土壤学“土壤生物”的基本内容(宋维峰等, 2007 年)。因此, 20 世纪 60 年代以前, 这个阶段被称为根系研究历史的第一阶段, 主要研究领域是根系的形态解剖学, 同时对根系赖以生长的外部生态条件如土壤、水分、空气、养分等也逐步开展研究。

20 世纪 60 年代以后, 根系研究发展迅速, 越来越趋于专业化, 研究领域包括木本植物根系的生长发育规律、土壤生态因子的影响与地上部分的生长关系等, 称为根系研究历史的第二阶段。70 年代末, 林木根系研究被正式列入土壤分析方法的基本内容, 主要研究领域是根系生态学、根系生理学和根系力学。此后, 随着研究的深入开展, 许多经验公式和根系土壤理论模型被陆续提出 (GRAY D H 等, 1981 年)。由于根系研究的重要性引起了各国的重视, 自 1968 年以来, 国际根系学术研讨会召开了十多次, 对根系的分类、根系结构、根系解剖和生理、根的结构和功能、树木根系及菌根、根系研究方法、根系生长与环境、根系与碳平衡、全球变化与根系等内容进行研究, 促进了林木根系研究的较大发展, 并推动根系研究方法达到了较高水平。1978 年, Sanders 在微根管使用光学照相机进行植物根系观测, 采用截线法测定图像中的根长。1983 年, Upehurch 等使用黑白摄影仪在微根管中进行地下根系观测, 观测到在地表 20cm 以下根长密度和实测结果相关性较好。2000 年, Patea George 等使用小型电脑系统开发低成本的观测软件, 观测花生根系发育情况来获得相关的根系参数信息。Carlos Costa 等采用扫描原理观测玉米的根系动态特征。吴长高等应用计算机视觉技术, 建立根系形态参数测定和根构型分析系统来研究根系形态。2001 年, Keith T. Ingram 等使用 RMS 软件, 根据数据图像全新、准确、快速的测量根系长度。2002 年, 周本智等利用微根管技术监测火炬松新根系生长动态, 观测结果表明施肥对新根生长没有明显的影响。2003 年, 胡秀娟等采用在植物根部埋设透明管, 通过 CCD 摄像系统进行图像采集和透明视窗拍摄根部图像, 以观测根

部的动态变化。2004年,罗锡文等采用XCT成像技术对植物根系原位形态构型的定性观察和定量测量。刘九庆采用透明管、CCD摄像系统和计算机,设计基于线阵CCD的便携式微根系微根管监测分析仪作为根系监测系统。2005年,白文明等利用微根窗监测技术研究植物根系的特点。2006年,史建伟等使用微根管技术观测水曲柳和落叶松细根周转过程的应用。向子云等使用多层螺旋CT机对植物根系进行扫描和三维成像来获得植物根系图像。张志山等用微根管法与土钻法观测柠条(*Caragana korshinskii*)根系生长动态。2007年,周本智等在阐述微根管技术的诞生和应用基础上,提出微根管技术是研究植物根系较为理想的工具。

近年来,特别是随着光学和微电子技术的发展,根系观测研究进入一个崭新阶段,采用快速准确根系研究仪器设备测量根系生长及分布状况,促进了根系研究的进一步发展,如ET-100根系生态监测系统、CI-600根系生长监测系统、微根管观测系统、Win/Mac RHIZO根系图像分析系统等。林木根系研究方法越来越趋向于专业化,研究内容涉及到以根及根皮的天然次生产物等开发利用为目的的植物根系化学、植物根系固土特点及坡面土体稳定性等根系力学,研究根系生长发育、水分生理和根渗出物为主的根系生理学,根系分布、分解、竞争、损伤及生态因子对根生长影响的根系生态学,根畸形、切根、根系在苗木质量和评价技术中的作用等营林问题的应用根系生态学,以根朽为主的根系病虫害研究,以根系研究过程中设备、测定、方法论、统计学等为研究内容的根系研究法等。

(二) 林木根系形态及分布研究

植物对土壤养分和水分的吸收能力很大程度上取决于根系的形态,其中根系的分布特征(包括水平分布和垂直分布)、密度、生物量、表面积和不同径级根系的比例最为重要,林木根系的形态特征和分布规律是由林木本身生物学特性及其生存环境条件共同决定的。

我国的根系形态研究以20世纪80年代向阳庆对北京地区主要造林树种的研究为代表,采用经典的根型研究和剖面研究法,得出林木根型主要分为水平根型、垂直根型、斜生根型、复合根型和变态根型5种,各树种根系的形态、分布特征随土层厚度而变化,并对各树种的根系类型和剖面须根的分布状况作出说明,为造林、森林生态、森林土壤学、森林立地等提供了基础材料。杨喜田等(2009年)和常文静等(2008年)研究了中国温带、亚热带和热带45个常见树种1~5级细根直径变异,结果表明,温带树种各个根序平均直径变异较小,亚热带和热带树种变异较大,其中温带树种1级根直径最细,其次是亚热带树种,