

Study
of

Fine
Root
Ecology

in *Larix principis-rupprechtii* Forest

杨秀云 著

华北落叶松 细根生态学研究



中国林业出版社

华北落叶松细根生态学研究

Study of Fine Root Ecology in *Larix
principis-rupprechtii* Forest

杨秀云 著

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

华北落叶松细根生态学研究/杨秀云著. —北京:中国林业出版社,2013. 12
ISBN 978-7-5038-7317-1

I. ①华… II. ①杨… III. ①华北落叶松—植物生态学—研究
IV. ①S791. 229

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 308038 号

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同7号)
E-mail liuxr. good@163. com 电话 (010)83228353
网址 <http://lycb. forestry. gov. cn>
印刷 北京北林印刷厂
版次 2013 年 12 月第 1 版
印次 2013 年 12 月第 1 次
开本 720mm × 1000mm 1/16
印张 9
字数 160 千字
定价 48. 00 元

本书由山西省青年基金项目“华北落叶松细根构型与土壤有效氮营养的关联性研究(2010021028-6)”和“基于关键生态过程的湿地生态安全机理与评价方法研究(2010021027-4)”、山西农业大学学术骨干项目和山西农业大学博士科研启动基金项目共同资助。

前 言

林木根系是树木重要功能器官，根与共生真菌形成菌根，从土壤中吸收水分和养分，而根系死亡和分解则为土壤输送能量和物质，是森林碳、氮、水循环的主要驱动力。森林土壤资源和根系存在明显的空间异质性，它们相互联系、相互制约，林木根系通过形态、生理、菌根等的可塑性对异质性养分做出响应，它们共同构成了森林地下部分空间异质性的主体。

华北落叶松 (*Larix principis - rupprechtii*) 是华北山地针叶林的主要建群种之一，是华北重要用材林、水源涵养林、景观风景林等，具有较高的利用和保护价值，在生产和经营上均具有重要的战略意义。作者自 2003 年至今一直从事华北落叶松根系生态学方面的研究，在华北落叶松细根生物量的季节动态、细根生物量异质性、细根与土壤因子的关联性方面有了很好的积累；在华北落叶松细根生物量与林下灌丛细根生物量的竞争方面做了有益的尝试。

本研究的外业工作和内业工作都非常辛苦，在此感谢为本研究付出辛勤劳动的韩有志老师、武小钢老师和张芸香老师；感谢硕士研究生宁鹏、李雪芬、李乐、曹晔、郑丽君等。

研究团队在华北落叶松细根异质性及与环境因子之间的关系研究方面进行了较系统的研究，更深入的根系生物学研究，包括根系形态学、根系生理学、根系的分子生物学方面的研究正在探索中。研究成果的获得，为森林资源的保护和利用，提高森林生产力提供重要的理论依据。一些科学问题解释和分析方面存在不足，希望读者能够批评指正。

作者于山西农业大学

2013 年 10 月 4 日

作者简介

杨秀云，女，汉族，1976年11月生，副教授，博士，博士后经历，现任职山西农业大学林学院。长期从事森林生态学及林木生理学方面的研究，在《植物生态学报》、《生态学报》等核心期刊发表研究性论文20余篇，专著2部，教材1部，审定品种1个，获山西省科技进步3等奖1项，审定省级品种1个。



目 录

前 言

第 1 章 林木细根生态学研究进展	1
1 细根生态学研究进展	2
1.1 细根的生产与周转研究	3
1.2 根系形态研究	8
1.3 细根生理学研究	9
1.4 细根的研究方法	10
2 细根与土壤环境的关系	13
2.1 土壤有效氮对细根生产和周转的影响	13
2.2 细根的可塑性和土壤养分的空间异质性	14
3 研究的科学价值及拟解决的问题	18
第 2 章 华北落叶松人工林细根生物量季节动态和空间分布	20
1 研究区自然概况	21
2 研究方法	22
2.1 取样和样地调查	22
2.2 细根生物量的测定	23
2.3 试验统计方法	23
3 华北落叶松人工林细根生物量的季节动态	24
4 华北落叶松人工林细根生物量的空间分布特征	24
5 讨 论	28
5.1 细根生物量的季节动态变化	28
5.2 空间距离对细根生物量的影响	28
5.3 空间分布和季节动态对细根生物量的交互影响	29
6 结 论	30
第 3 章 关帝山亚高山华北落叶松林下植被根系生物量的时空变化	32
1 样地概况和研究方法	33
1.1 研究区自然概况	33

1.2 研究样地植被基本情况	33
1.3 取样方法	33
1.4 数据分析	34
2 林下植被根系生物量及季节动态变化	34
3 林下植被根系生物量的垂直分布及季节动态变化	35
4 林下植被根系生物量的水平分布及季节动态变化	35
5 结 论	37
第4章 华北落叶松细根生物量空间异质性	38
1 试验材料与方法	39
1.1 研究区概况	39
1.2 细根采集、分离及生物量测定	40
1.3 数据处理	41
2 细根生物量的空间变异	42
2.1 林分细根生物量的描述统计分析	42
2.2 林分细根生物量垂直分布特征	44
2.3 林分细根生物量的变异函数分析	45
3 讨 论	49
3.1 采伐对细根生物量及其垂直分布的影响	49
3.2 采伐对细根生物量空间异质性的影响	49
4 结 论	50
第5章 华北落叶松林下土壤水分、氮营养的空间异质性	51
1 土壤含水量的空间异质性	52
1.1 研究方法	52
1.2 土壤含水量的空间变异	53
1.3 讨 论	58
1.4 结 论	60
2 土壤 pH 值的空间异质性	61
2.1 研究方法	61
2.2 土壤 pH 值的空间变异	61
2.3 讨 论	65
2.4 结 论	66
3 土壤全氮含量的空间异质性	67
3.1 研究方法	67
3.2 土壤全氮含量的空间变异	67

3.3 讨 论	73
3.4 结 论	73
4 土壤硝态氮含量的空间异质性	74
4.1 研究方法	74
4.2 土壤硝态氮含量的空间变异	75
4.3 讨 论	79
4.4 结 论	81
5 土壤铵态氮含量的空间异质性	82
5.1 研究方法	82
5.2 土壤铵态氮含量的空间变异	82
5.3 讨 论	86
5.4 结 论	88
6 土壤水分、氮营养和 pH 值的关联性	88
6.1 研究方法	88
6.2 不同林分土壤水分、氮营养和 pH 值的相关性分析	89
6.3 讨 论	94
6.4 结 论	95
第 6 章 华北落叶松细根生物量对土壤水分、氮营养异质性的响应	97
1 材料和方法	98
1.1 研究地概况	98
1.2 数据统计分析	98
2 细根生物量与土壤水分、氮营养的关联性	99
2.1 细根生物量与土壤水分、氮营养的偏相关分析	99
2.2 细根生物量与土壤水分、氮营养的空间异质性关系	100
3 讨 论	102
3.1 细根生物量与土壤水分、氮营养变异的多元线性回归分析	102
3.2 土壤水分、氮营养、pH 值与细根生物量异质性的关联性	103
4 结 论	104
第 7 章 林下草本根系生物量与土壤异质性关系	106
1 自然概况及研究方法	106
1.1 自然概况及样地基本情况	106
1.2 根系生物量的测定	107
1.3 数据分析	107
2 林下草本根系生物量的空间异质性	107

3	草本根系生物量与土壤养分各因子空间异质性的关联性	109
3.1	草本根系生物量与土壤含水量空间异质性的关联性	109
3.2	草本根系生物量与土壤全氮空间异质性的关联性	110
3.3	草本根系生物量与土壤有效氮空间异质性的关联性	111
3.4	草本根系生物量与土壤 pH 值异质性的关联性	112
4	草本根系生物量与华北落叶松细根生物量异质性的关联性	113
5	结论与讨论	113
5.1	不同林分草本根系生物量垂直分布特征分异	113
5.2	草本根系生物量与土壤水分、养分的关联性	114
参考文献		116

第1章 林木细根生态学研究进展

陆地生态系统的功能在很大程度上依赖于碳(C)的分配格局与过程,以及伴随这个过程物质循环(Schlesinger, 1999; 贺金生等, 2004)。根系在发挥植物功能和陆地生态系统能量流动和物质循环中扮演重要角色(Gill & Jackson, 2000)。树木根系是森林地下C循环的重要组成部分,因为根系是植物重要的功能器官,它不但固定地上部分,为植物吸收养分和水分,而且通过呼吸和周转消耗光合产物并向土壤输入有机质(Vogt *et al.*, 1986; 王政权和郭大立, 2008)。森林地下根系的生物量大部分累积在粗根中(直径 > 2mm),但是每年用于生长的大部分则被分配到细根(fine root)中,细根具有很高的周转率,是提供植物养分和水分的“源”和消耗C的“汇”(Jackson *et al.*, 1997)。细根死亡又是有机质和养分元素向森林土壤归还的重要途径,每年通过枯死细根向土壤归还碳、养分和能量甚至超过地上部分枯落物(Santantini *et al.*, 1987)。根系尤其是细根研究已经成为森林生态系统生态学及全球变化研究中的热点问题之一(Morgan, 2002)。

森林土壤是森林生态系统的重要组成部分,也是陆地生态系统最大的有机碳库之一,在全球碳循环中扮演着源、汇、库的作用(Lal, 2005; 杨万勤, 2006)。森林土壤的有机碳储量约为 787 PgC (1Pg = 10^{15} g) 约占全球土壤有机碳储量的 39%, 大约为森林生态系统有机碳库的 2/3(Lal, 2005)。如果将森林土壤生态系统中根系的碳储量计算在内,森林土壤有机碳库储量将占全球土壤碳库的 50% 左右,其库容的微小变化,都会对大气 CO₂ 浓度及全球气候变化产生巨大的影响(杨万勤等, 2006)。

氮是植物体内许多重要有机化合物的组成元素。在自然状态下,土壤中的氮主要来源于植物—大气的固氮过程。在森林生态系统中,生物对氮的需求量往往大于土壤有机氮矿化速率,所以森林生态系统通常表现为氮缺乏型(Lal, 2005)。土壤碳氮比是土壤氮素矿化能力的主要标志,其比值低有利于微生物在有机质分解过程中的养分释放和土壤中的有效氮增加;而植物组织中的碳氮比决定了进入土壤中的枯落物的分解速率和分解量(胡启武等, 2006)。土壤是一个多相、多界面的复杂系统,土壤碳氮的变化涉及植被类

型、气候变化、土壤理化性状、凋落物分解和土壤呼吸等众多相互联系和相互影响的生物化学过程。在生态系统的物质循环中,土壤碳素和氮素被紧密地联系在一起。

空间异质性(spatial heterogeneity)是存在于所有尺度上的生态系统的普遍现象,它是生态学属性在空间上的不均匀性及复杂程度(邓小文和韩士杰,2007)。森林土壤资源具有高度的空间异质性。细根可能会随着CO₂浓度、温度、降水以及土壤氮素等在不同尺度上的变化而做出敏感反应(Nadelhoffer,2000)。鉴于这样的生态基础,借助有效的试验手段,探究林分土壤空间异质性与根系分布格局之间的空间关联性,能更好地认识森林生态系统中潜在的生态学格局和过程,为科学地进行森林生态系统经营和管理提供理论基础。

1 细根生态学研究进展

树木根系按它的分布秩序来分可分为主根、一级侧根、二级侧根等,侧根还可根据直径大小分为粗根及细根(单建平和陶大力,1992)。细根虽然仅占林分根系总生物量的3%~30%,但具有较大的吸收表面积、生理活性强,是树木吸收水分和养分的主要功能器官(Vogt *et al.*, 1998; Vogt *et al.*, 1996)。根系是一个功能性整体,具有复杂的空间结构,目前关于细根的分级还没有明确的定义,主要有直径法和根序法两种方法(卫星等,2008)。针对不同的研究对象和研究内容,划分细根(Fine root)的标准不统一(Usman *et al.*, 1999; 王向荣等,2005)。Marshall等(1985)将细根定义为没有次生增厚的根(Marshall *et al.*, 1985)。Fogel等定义为直径2~5mm的根为细根(Fogel, 1983),但多数定义为直径小于2mm的根为细根(Persson, 1978; Hendrick & Pregitzer, 1996)。而Pregitzer(2002)在对北美九个树种根系构型的研究中认为:以往主观地按尺寸分级的方式(如 $\leq 2\text{mm}$)不利于理解根系结构与功能之间的关系,认为细根最合理的尺寸等级应为所有直径小于0.5mm,或者在一些实例中用更小一些的尺寸等级(Pregitzer *et al.*, 2002)。直径分级方法中通常细根是指直径小于2~5mm的根(张小全和吴可红,2001)。根序法是按照河流水系分级将小于某一级别的根定义为细根(卫星等,2008),有些树种的细根主要包括前2个或3个根序(王向荣等,2005; Pregitzer *et al.*, 2002),根序法分级更有利于对细根功能和结构关系的研究。

国外大量的研究证实,森林生态系统中3%~84%的净初级生产用于细根

的生产(Hendrick & Pregitzer, 1996; Zogg & Zak; 1996; Chen *et al.*, 2002), 这主要与树木的种类、气候、土壤等环境因素有关。这部分细根的去向, 直接影响林分或整个生态系统的碳平衡和养分循环。Jackson 等研究表明, 仅直径小于2mm的细根如果每年周转一次, 就要消耗全球陆地生态系统 NPP 的33%左右, 有些生态系统消耗更多, 可以超过50%以上(Jackson *et al.*, 1997; Vogt *et al.*, 1986)。因此根系在发挥植物功能和陆地生态系统能量流动和物质循环中有重要的作用(王政权和郭大立, 2008; Gill & Jackson, 2000)。随着对细根在养分循环及能量流动中重要作用的认识, 近年来特别是近10年来, 树木根系生态学研究尤其是对细根的研究已成为林学、生态研究的热点问题, 并取得了一定进展(Copley, 2000; Morgan, 2002; Harris *et al.*, 1977; Persson, 1978; Fogel, 1979; Pregitzer *et al.*, 2000; 杨玉盛等, 2003)。从1968年至今, 已有十多次国际根系学术研讨会, 讨论的内容有根系的分类、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(Schlesinger, 1999; Vogt *et al.*, 1995; Agren *et al.*, 1980; Raich & Nadelhoffer, 1989)。国外有关细根的研究主要有: ①细根的生产与周转研究, 包括细根生物量的季节动态, 细根垂直分布, 活细根的生物量及细根的净生产力; 细根的周转, 包括细根的生命周期和年周转率; 细根的生命。②根系的结构和形态方面的研究。③影响细根生长和死亡的因素。④细根的分解研究。⑤树木细根生长、周转和分解对土壤养分、树木营养和生态系统碳平衡的影响(Ruess *et al.*, 1996; Vogt *et al.*, 1996; Steel *et al.*, 1997; Butter & Louschner, 1994; Saugier, 2001)。

国内对于细根的研究主要集中在农业领域, 在森林根系的研究方面起步较晚(张福锁和申建波, 1999; 马元喜等, 1994)。对林木细根的研究主要集中在细根研究方法的探讨; 细根生产与周转的研究; 细根的结构、形态与功能之间的关系研究; 细根生理研究; 根系对环境的适应性研究等方面(张小全, 2001; 常文静和郭大立, 2008; 卫星等, 2008; 师伟等, 2008; 宋森等, 2008; 杨秀云等, 2008; 唐罗忠等, 2008)。

1.1 细根的生产与周转研究

从20世纪70年代开始, 生态学家开始对细根生物量、季节动态、生产力和周转等方面进行研究(Harris, 1977; Persson, 1983)。细根的生产与周转受到多种环境因素的影响, 包括大气CO₂浓度、土壤温度、土壤水分和养分的

供应状况, 菌根共生及土壤草食性动物的作用等。且细根生长与周转迅速, 对树木碳分配和养分循环起着十分重要的作用(Arthur *et al.*, 1992; Jackson *et al.*, 1996)。

1.1.1 细根生物量季节动态与空间分布研究

细根生物量也称现存量(standing crop), 是指一定面积上某个时间存在的根系量值。根据全世界不同森林生态系统 100 多个细根生物量研究资料表明, 细根(直径 $< 2 \sim 5\text{mm}$) 生物量变化在 $46 \sim 2805\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 大部分在 $100 \sim 1000\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间(张小全, 2001)。细根生物量分别占地下部分总生物量和林分总生物量的 $1.1\% \sim 74.7\%$ 和 $0.1\% \sim 32.2\%$, 大多数为 $3\% \sim 30\%$ 和 $0.5\% \sim 10\%$ (Steel *et al.*, 1997; Bauhus & Bartsch, 1996; Ruess *et al.*, 1996; Vogt *et al.*, 1996; King *et al.*, 2002)。按不同典型气候森林类型平均, 细根生物量在 $216\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (北方常绿针叶林) 和 $1087\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (热带常绿阔叶林) 之间, 细根生物量分别占地下总生物量的 11.8% 和 1.7% 。尽管变异较大, 但从北方森林到寒温带到热带森林, 细根生物量呈增加趋势(张小全, 2001)。根系生物量与立地条件有很大的关系, Davis 等(2004)对不同海拔地区森林的细根动态研究发现, 海拔为 1001m 样地生物量高于海拔为 795m 的样地生物量(Davis *et al.*, 2004)。Tateno 等(2004)对寒温带落叶林的研究结果表明, 细根生物量沿上向坡而增加(Tateno *et al.*, 2004)。此外细根生物量在不同坡向也表现差异。李鹏等(2002)对渭北黄土高原区主要造林树种刺槐的根系研究表明, 阳坡立地上的根系生物量均小于阴坡立地(李鹏等, 2002)。物种的生理生态特性不同, 细根生物量也表现不同。如 Ruess 等(1996)研究表明阔叶林样地比针叶林样地有较高的活细根生物量, 死细根生物量占总细根生物量的比例较大。李凌浩和邢雪荣(1998)对 17~76 年生甜槠林(*Castanopsis eyrei*)研究表明, 细根生物量在 58 年生时最大。细根的生产与林分类型有很大关系。廖利平和杨跃军(1999)对杉木(*C. lanceolata*)、火力楠(*M. macclurei*)纯林和混交林细根生物量的研究表明, 混交林比纯林具有较高的生产力和良好的生态协调性。

许多研究表明, 细根生物量具有明显的季节节律。在温带森林生态系统中, 部分研究表明细根生物量表现为单峰型, 峰值出现在春季或夏季(单建平 and 陶大力, 1993; Burke & Raynal, 1994; Rytter & Hansson, 1996); 大部分研究为双峰型, 峰值分别出现在春季和秋季(Gholz *et al.*, 1986)。进一步研究还表明, 由于细根直径的区分不同, 同一树种同一区域不同径级细根表现不同的特点, 有的径级表现为单峰型, 有的表现为双峰型(杨秀云等, 2008)。

在热带多为单峰型,生物量高峰和低谷分别出现在雨季和旱季,且细根直径越小,季节变化越明显(Kavenagh & Kellmana, 1992; Khiewtam & Ramakrishnan, 1993; Sundarapandian & Swamy, 1996)。

细根生物量有明显的空间分布特征,以往的研究主要集中在细根的垂直分布研究方面,研究结果表明细根生物量随在土壤中的深度增加呈指数递减(Lawson, 1995)。树木根系的垂直分布与树种、年龄、土壤水分、养分、物理性质(通气、机械阻力等)和地下水位等有关(张小全, 2001)。Jackson 等(1996)综合分析了大量的研究数据,结果发现北方森林的根系分布最浅,而温带针叶林分布最深,它们在表层 30cm 以内的根系分别占 80%~90% 和 50%。廖兰玉等(1993)对鼎湖山生物群落的研究结果是 67.9% 的根系生物量分布于 0~20cm 土层。细根的垂直分布还与植物的演替阶段有关,早期演替阶段的林分根系分布较深,而后期演替阶段的林分根系分布较浅(Grier *et al.*, 1981);同一树种年龄较大的林分,细根更趋向于表层分布(Jorgensen *et al.*, 1980; Berish, 1982),原因可能是幼龄或早期演替阶段腐殖质层薄,土壤贫瘠,而随着林分的发展,大量的凋落物和腐殖质层的积累加厚,表层土壤养分增多,细根更趋向于在表层积聚。在混交林中,为适应对水分和养分的竞争,不但不同种类细根的空间分布不同,而且在生长、养分和水分吸收的时间上也有差异(Butter & Louschner, 1994)。树木细根垂直分布与耐旱性有关,受干旱胁迫症状最明显的树种在深土层的细根生物量最小(Fischer *et al.*, 1998)。

1.1.2 细根的周转研究

在所有生物群区中,热带生态系统的地下细根生物量和生产力最高,平均寿命最短,周转速度最快,而北方或寒带生态系统细根生物量和生产力最小,平均寿命相对较长,细根的周转较慢(Schlesinger, 1999; Saugier *et al.*, 2001)。根据 100 多个森林生态系统的研究结果,细根年净生产量为 $20 \sim 1317 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 占林分总净初级生产量的 3%~84%, 大部分在 10%~60% 之间,森林生态系统细根年周转率(细根生产/活细根生物量)因不同气候和森林类型而异,变化较大,年周转率 4.3%~273.2% (张小全, 2001)。一般认为在温暖气候条件下,细根的周转要快得多,特别是在潮湿热带森林中,细根的周转率更高,甚至每年细根可能会发生数次周转(Khiewtam & Ramakrishnan, 1993)。近几年的研究结果表明,细根的周转率可能更高,如 Schoettle 等(1994)综合世界各地松树细根研究结果表明,细根周转率在 $0.2 \sim 5.0 \text{ a}^{-1}$ 之

间, Rytter 等 (1997) 计算的杨树人工林细根周转率高达 $4.9 \sim 5.8 \text{ a}^{-1}$ (Schoettle & Fahey, 1994; Rytter & Hansson, 1996)。同一树种不同径级细根的年周转率随径级的减小而增大, 林下植被细根的周转率均大于各自的乔木层细根, 这与随径级减少细根的木质化程度低、分解快有关 (杨玉盛等, 2001)。

研究表明细根周转与 CO_2 浓度有正相关关系, CO_2 浓度升高时, 细根周转会加快 (Pregitzer *et al.*, 2000; Delucia *et al.*, 1999; Tingey *et al.*, 2000)。Delucia 等 (1999) 对北卡 15 年生火炬松 (*P. taeda*) 研究表明, CO_2 浓度升高, 细根周转增加 26%, 而相对周转率较正常周转率下降; Tingey 等 (2000) 研究表明针叶树在 CO_2 浓度升高时, 绝对根周转提高, 但相对根周转率先增加后下降。在土壤养分和水分得以保证的前提下, 随着土壤温度的上升, 细根生产和死亡速度加快, 寿命降低, 致使周转加快 (Pregitzer *et al.*, 2000; Steel *et al.*, 1997); 温度较低的环境中生长的植物, 一般来说寿命较长 (Essenstat & Yanai, 1997)。此外, 由于全球温度的上升, 土壤养分的矿化速率增加, 加之不断增加的大气 N 沉降, 致使细根动态也发生变化。当 N 素供应增加时, 森林生态系统的细根现存量下降, 总产量和周转加快 (Nadelhoffer *et al.*, 1985; Majdi, 2001)。此外, 菌根共生和土壤草食性动物对细根动态具有重要影响 (Essenstat & Yanai, 1997)。

细根的生产 and 周转还具有明显的季节性。如在温带针叶林中, 细根的生长峰值出现在春季或夏季, 细根死亡在冬季最低, 夏季或秋季最高, 取决于树种和当地的气候条件 (Steel *et al.*, 1997; 单建平和陶大力, 1993)。细根周转的季节变化可能与土壤温度有关, 随土壤温度的上升, 周转加快 (Marshall & Waring, 1985; Burke & Raynal, 1994)。

根系周转在今后很长一段时期内仍然是根系生态学研究的重点。陈光水等 (2008) 在研究细根生物量的基础上重点研究了不同林龄的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 地下根系碳分配和利用格局, 结果表明中龄林和近成熟林的地下碳分配显著高于幼龄林和成熟林, 而老龄林更低。今后还需要在大尺度上采用多种方法同时对不同生态系统细根周转格局与重要因子如气候、土壤、物种类型、树龄和共生真菌类型等关系的探讨, 以更好地解释陆地生态系统细根周转的规律。

1.1.3 细根的分解研究

林木细根数量庞大, 养分浓度高, 周转迅速, 通过细根分解归还到土壤的 C 是地上凋落物的 4~5 倍, 细根分解是陆地生态系统 C 和养分输入的重要

途径(Pregitzer *et al.*, 2002; Silver & Miya, 2001), 尤其是深层土壤有机质的重要来源(Steinaker & Wilson, 2005)。细根分解在释放养分、形成结构复杂腐殖质的同时, 释放大量的 CO_2 , 细根分解所产生的 CO_2 占土壤释放到大气总量 CO_2 的一半以上(Schuur, 2001)。与细根分解有关 CO_2 的动态是全球 C 循环的重要组成部分(Silver & Miya, 2001)。Chapin 等(2002)提出细根分解主要包括淋溶、破碎等物理过程和生物作用为主的化学过程。这三个过程并不是截然分开的, 在淋溶、破碎的过程中, 也有利于微生物和土壤动物的分解活动, 而后期被微生物分解的半分解产物也会被淋溶掉(彭少麟和刘强, 2002)。

细根分解受内在因素和外界环境的综合制约, 内在因素指细根自身的物理和化学性质(Silver & Miya, 2001), 外界环境可划分为生物和非生物因素两类(Chen *et al.*, 2002)。研究表明, 不同树种的根系分解速率存在很大的差异, 主要是根系的化学成分不同造成的, 如细根分解速率与 N 浓度、P 浓度呈正相关, 与 Ca^{2+} 浓度呈正相关, 还与 C/N、木质素浓度, 木质素/N 呈显著负相关(Hartmann, 1999)。利用埋袋法研究表明, 随着直径的增粗, 根系的分解速率减缓(温达志等, 1999; Ludovici & Kress, 2006)。宋森等(2008)采用微根管技术研究了水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和落叶松(*Larix gmelinii*)细根的自然分解过程, 研究结果表明, 生长在末端的根有较高的分解速率。其次, 非生物因素(温度、湿度和养分)对细根的分解也有很大的关系, Silver 和 Miya (2001)总结全球细根分解数据发现, 年平均温度与细根分解速率呈线性正相关。且根系分解随土层深度的增加而减慢(宋森等, 2008; Gill & Burke, 2002)。

1.1.4 细根的寿命与死亡

细根寿命指根系从出生到死亡的这段时间, 是细根重要的生理生态特性。树木细根寿命具有较大的变异性, 树木细根生命周期短至数天或数周, 长至数月或1年至几年, 且不同树种的寿命有较大的差异, 生长在不同立地条件下的同一树种的细根寿命有较大的差异, 甚至不同季节长出的细根寿命也不相同(张小全, 2001; Eissenstat *et al.*, 2000)。根系周转研究目前所面临的关键问题是哪些根寿命短? 哪些根寿命长? 哪些因子控制细根寿命和周转? 找到细根周转(或死亡)的单元。不同树种快速周转的根的使用寿命是否大致相同?

细根的寿命与光合产物的分配、细根的直径大小和分枝方式, 土壤 N 和水分的有效性、土壤温度、根际微生物及研究方法等因素都有关系(梅莉等, 2004)。一些研究证明, 细根吸收养分和水分越多, 分配到细根的 C 也就越