

网络出版时间:2014-04-25 15:48

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.035

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.035.html

亚热带常绿阔叶林 11 个树种的细根形态及 碳氮含量研究

蔡 飞^a, 邹 斌^a, 郑景明^a, 戴 伟^b

(北京林业大学 a 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, b 林学院, 北京 100083)

【摘 要】 **【目的】**研究江西大岗山常绿阔叶次生林中 11 个树种的细根形态、组织化学元素含量与根序之间的关系。**【方法】**以大岗山次生林内 6 个受外生菌根侵染的树种(刨花润楠、小叶青冈、拟赤杨、丝栗栲、榿木和梓木)和 5 个受内生菌根侵染的树种(山乌柏、深山含笑、杉木、木荷和油桐)为研究对象,采用根序分级法对根系进行分级后,测量并比较各树种前 5 级根之间根长、比根长及 C、N 含量的差异。**【结果】**在细根形态方面,11 个树种的根长均表现出随序级升高而增大的趋势,而比根长的表现则相反;在细根 C、N 含量方面,除 3 个树种(山乌柏、榿木和梓木)5 级根 C 含量小于 4 级根、1 个树种(油桐)2 级根 C 含量小于 1 级根外,其余 7 个树种根组织的 C 含量均表现为随序级升高而增加;11 个树种中除山乌柏外,其余 10 个树种根组织的 N 含量均表现为随序级升高而降低;在 C/N 上,有 9 个树种的 C/N 随序级升高而增加,其余 2 个树种(山乌柏和梓木)4 级根的 C/N 略高于 5 级根。在不同树种间,同一序级的细根在细根形态和 C、N 含量上差异明显。6 个受外生菌根侵染树种的根长和 C、N 含量均较 5 个内生菌根侵染树种大,而比根长以外生菌根侵染树种相对较小。**【结论】**11 个树种前 5 级根根长、比根长、C 含量、N 含量和 C/N 随着序级增加而表现出相似的变化规律,生长在根系先端的 1 级根根长、C 含量和 C/N 最小,比根长和 N 含量最大,随着序级的增加,根长、C 含量和 C/N 增加,而比根长和 N 含量降低。受外生菌根侵染的树种,其根长、C 含量和 N 含量均大于受内生菌根侵染的树种。11 个树种之间细根形态和 C、N 含量存在明显差异,表明不同树种对地下环境的适应策略及对土壤养分的利用效率存在差异。

【关键词】 细根;根序;细根形态;碳氮比;亚热带常绿阔叶林

【中图分类号】 S718.43

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)05-0045-10

Fine root morphology and carbon and nitrogen contents of 11 tree species in subtropical evergreen forest

CAI Fei^a, ZOU Bin^a, ZHENG Jing-ming^a, DAI Wei^b

(a Key Lab for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,

b College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: **【Objective】** Fine root morphology and relationship between chemical element contents and root orders of 11 tree species in evergreen secondary forest in Dagangshan, Jiangxi Province were studied. **【Method】** 5 species infected by arbuscular mycorrhizae (AM) (*Sapium discolor*, *Michelia maudiae*, *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba* and *Vernicia fordii*) and 6 species infected by ectomycorrhizae (EM) (*Machilus pauhoi*, *Cyclobalanopsis myrsiniifolia*, *Alniphyllum fortunei*, *Castanopsis fargesii*, *Loropetalum chinense* and *Catalpa ovata*) in the secondary forest in Dagangshan were studied. Each indi-

【收稿日期】 2013-10-26

【基金项目】 “973”国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403201)

【作者简介】 蔡 飞(1987—),男,湖北咸宁人,在读硕士,主要从事地下生态学研究。E-mail: xicaifei@21cn.com

【通信作者】 郑景明(1971—),男,黑龙江鸡西人,副教授,硕士生导师,主要从事入侵生态与森林生态研究。

E-mail: zhengjm@bjfu.edu.cn

vidual root was graded by branching order method. Root length, specific root length, and C and N contents of first five roots of each tree species were determined and compared. 【Result】 Length of fine roots increased as the increase of root order for all species, while specific root length decreased as the increase of root order. Except that carbon contents in the 5th roots of three species (*Sapium discolor*, *Loropetalum chinense* and *Catalpa ovate*) were less than those of the 4th roots and carbon contents of the 2nd root of *Vernicia fordii* was less than that of the first root, carbon contents of the rest 7 species increased as the increase of root order. Nitrogen contents of 10 out of the 11 species (except *Sapium discolor*) decreased with the increase of root order. C/N of 9 species increased as the increase of root order, while C/N in the 4th roots of *Sapium discolor* and *Catalpa ovate* were slightly higher than those of the 5th roots. Fine root morphology and C and N contents in the same order roots had significant differences. Root lengths, and C and N contents of the 6 species infected by ectomycorrhizae were larger than those of the 5 species infected by arbuscular mycorrhizae, while the specific root lengths of the 6 species colonized by ectomycorrhizae were smaller. 【Conclusion】 Root lengths, specific root lengths, C and N contents and C/N of the first five roots of all species had similar trend. The first roots (in the distal end of a root system) had the lowest root lengths, C contents and C/N, and the largest root lengths and N contents. With the increase of root order, root lengths, C contents and C/N increased, but the root lengths and N contents decreased. Root lengths, and C and N contents of species infected by ectomycorrhizae were larger than those of the species infected by arbuscular mycorrhizae. The obvious differences in fine root morphology and contents of C and N of 11 species indicated that different species had different adaptive strategies to underground environment and use efficiencies of soil nutrient.

Key words: fine root; morphology; branch order; C/N; subtropical evergreen forest

细根(Fine root)是森林群落的重要组成部分,是根系统中最活跃和最敏感的部分^[1-2],是植物获得水分和养分的主要器官。细根具有巨大的吸收表面积,其生长、死亡、分解和周转在森林生态系统的养分循环中起着十分重要的作用^[3]。长期以来,研究者简单地将根系分为细根(直径 $<2\text{ mm}$)和粗根(直径 $\geq 2\text{ mm}$)2部分^[4],认为直径小于 2 mm 的根具有相同的生理功能^[5]。但研究表明,根系是由不同的分支等级(即根序)构成的,即使细根直径同在 2 mm 范围内,其形态和生理功能也存在显著差异^[6]。师伟等^[6]研究发现,许多树种前3个序级的根系可能都包含直径小于 0.5 mm 的细根;Pregitzer等^[5]研究发现,位于根系先端的低级根具有直径小、C浓度低和N浓度高的特点,而高级根则相反。因此,按直径大小定义细根或粗根的方法,忽略了单个根在根系中的位置及其功能重要性,研究细根的特征及其在生态系统养分循环中的作用,应按根序分级的方式进行。

森林生态系统具有丰富的物种多样性,在一个林分中同时生长着多个树种。有研究表明,每个树种在生活史、生境、物候及生态功能方面差异明显^[7]。我国亚热带森林带的结构和生态系统都有区

别于其他森林类型的独特特征,其典型植被主要为常绿阔叶林。亚热带常绿阔叶林由于受第四纪冰川的影响较小,保存了丰富的孑遗物种,形成了特有的群落类型,约有占全国种子植物属数 $2/3$ 以上($2\ 674$ 属/ $3\ 980$ 属(全国))和种数 $1/2$ ($14\ 600$ 种)的植物种,成为全球亚热带生物多样性的中心^[8-9],但是目前对亚热带常绿阔叶林森林生态系统地下根系的研究较少^[10-12],尚不清楚该生态系统内不同树种细根形态及细根化学元素含量与根序之间的关系是否存在某种一致的规律。为此,本试验以江西大岗山亚热带天然次生林生态系统中的11个树种为研究对象,对其1~5级细根的形态参数(根长和比根长)及组织C、N含量进行了测定,旨在明确这11个树种1~5级根的形态和根组织中C、N含量的变化规律,以及分别受内生菌根(AM)和外生菌根(EM)侵染树种的1~5级根形态及其组织C、N含量的差异。

1 研究方法

1.1 研究地自然概况

研究地点位于江西大岗山国家级森林生态站年珠实验林场($27^{\circ}30' \sim 27^{\circ}50' \text{ N}$, $114^{\circ}30' \sim$

114°45'E)。该林场气候属亚热带温暖湿润气候区,年均温 16.8℃,极端日最高温 39.9℃,极端日最低温-8.3℃,年积温 5 355℃;年均降水量 1 591 mm,年均蒸发量 1 503 mm;年均日照 1 657 h;太阳辐射年总量约 487 kJ/cm²;年均相对湿度 80%;无霜期 270 d。本区属地带性低山丘陵红壤、黄壤类型及其亚类的分布区,黄壤分布最广,分布海拔为 300~700 m,红壤多分布于海拔 200 m 以下的低山丘陵^[13]。天然常绿阔叶混交林是本地区的地带性植被,但由于长期遭受人为破坏,天然次生常绿阔叶林、杉木人工林及毛竹林为现有的主要植被类型。

1.2 研究林分 and 树种

研究林分选择在海拔 300 m 的天然常绿阔叶次

表 1 亚热带常绿阔叶林 11 个供试树种的科属类型、生活型和菌根侵染类型

Table 1 Species family, genus, life form and mycorrhizal infection type of the 11 species tested in subtropical evergreen forest

序号 No.	树种 Species	科名 Family	生活型 Life form	菌根类型 Type of mycorrhizal	取样株数 Sample number
1	山乌柏 <i>Sapium discolor</i>	Euphorbiaceae	落叶乔木 Deciduous tree	内生菌根 AM ^[14]	5
2	刨花润楠 <i>Machilus pauhoi</i>	Lauraceae	常绿乔木 Indeciduous tree	外生菌根 EM ^[15]	4
3	小叶青冈 <i>Cyclobalanopsis myrsini folia</i>	Fagaceae	常绿乔木 Indeciduous tree	外生菌根 EM ^[16]	3
4	深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	Magnoliaceae	常绿乔木 Indeciduous tree	内生菌根 AM ^[16]	5
5	拟赤杨 <i>Alniphyllum fortunei</i>	Styracaceae	落叶乔木 Deciduous tree	外生菌根 EM ^[15]	6
6	丝栗栲 <i>Castanopsis fargesii</i>	Fagaceae	常绿乔木 Indeciduous tree	外生菌根 EM ^[15]	4
7	欏木 <i>Loropetalum chinense</i>	Hamamelidaceae	常绿灌木或亚乔木 Indeciduous shrub/sub-tree	外生菌根 EM ^[14]	6
8	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	Taxodiaceae	常绿乔木 Indeciduous tree	内生菌根 AM ^[14]	4
9	木荷 <i>Schima superba</i>	Theaceae	常绿乔木 Indeciduous tree	内生菌根 AM ^[14]	8
10	梓木 <i>Catalpa ovata</i>	Bignoniaceae	落叶乔木 Deciduous tree	外生菌根 EM ^[15]	6
11	油桐 <i>Vernicia fordii</i>	Euphorbiaceae	落叶乔木 Deciduous tree	内生菌根 AM ^[14]	6

1.3 根系取样及测定

在 2013-06 下旬进行根系取样,取样时间为 2 d。在样地中确定树种后,根据直径大小在树干基部 0.3~0.5 m 用铁锹将整株幼树取出,小心去除根系周围的土屑至可辨认出根系分枝结构为止,然后放入冰盒中以保持其活性,带回实验室后用去离子水清洗干净,装入已标记的自封袋中于 0℃保存。按照 Pregitzer 等^[5]的方法进行根系分级:最远端的具根尖的根定为 1 级根,其母根定为 2 级,2 级根的母根定为 3 级,以此类推至区分到 5 级根。

根系分级完成后,用游标卡尺测量各个细根的长度,然后放入 75℃烘箱中烘干至恒质量,称量各个细根的干质量。根长(mm)用总长度除以细根数量计算得到;比根长(m/g)用根长除以干质量得到。称质量后将相同序级的细根混合在一起进行粉碎处理,然后分别取适量样品测量各根序的 C、N 含量,C 含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,N 含量利用凯氏定氮仪(KDY-9830)测定。各级细根化学元素

生林内。由于大树的数量少而取样破坏性大,本研究仅对幼树取样,选择生长状况良好的幼树,树龄为 3~5 年(根据直径大小和高度判断)。供试树种为:山乌柏(*Sapium discolor*)、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)、小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsini folia*)、深山含笑(*Michelia maudiae*)、拟赤杨(*Alniphyllum fortune*)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)、欏木(*Loropetalum chinense*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、木荷(*Schima superba*)、梓木(*Catalpa ovate*)和油桐(*Vernicia fordii*)。这 11 个树种分属 9 个科中的 11 个属,具体信息详见表 1。

含量均重复测定 3 次取平均值。

1.4 数据处理

在取样的 11 个树种中,测算每个树种不同根序的根长、比根长、C 含量、N 含量和 C/N 及相应的标准误差。对每个指标利用 R (Version 3.0.1) 进行方差分析,然后采用 LSD 方法检验各个序级之间的差异;相关图表采用 Originlab 8.0 完成。

2 结果与分析

2.1 11 个树种的根系形态

2.1.1 根 长 图 1 表明,11 个树种根系长度的变化具有明显规律性。在种内,1 级根最短(平均 7.99 mm),5 级根最长(平均 183.41 mm),根长随序级的升高而增加;有 8 个树种(山乌柏、小叶青冈、拟赤杨、丝栗栲、杉木、木荷、梓木和油桐)的前 2 级根显著($P<0.05$)小于后 3 级根。在种间,不同树种同序级间根长存在显著差异($P<0.05$)。在 1 级根中,木荷根长最短(2.35 mm),杉木最长(15.02

mm),拟赤杨和杉木的根长与其他树种均有显著差异($P<0.05$);2 级根中仅刨花润楠的根长与其他树种有显著差异($P<0.05$);而在 3 级根和 4 级根中,小叶青冈、丝栗栲和杉木 3 个树种的根长与其他树种存在显著差异($P<0.05$)。刨花润楠、小叶青冈、

深山含笑、拟赤杨、丝栗栲、欆木、杉木、木荷和油桐等 9 个树种的 1~2 级根之间根长差异不显著($P>0.05$),深山含笑和欆木 2 个树种的 1~3 级根之间根长差异不显著($P>0.05$),山乌柏和梓木 2 个树种的 1~5 级根之间根长均有显著差异($P<0.05$)。

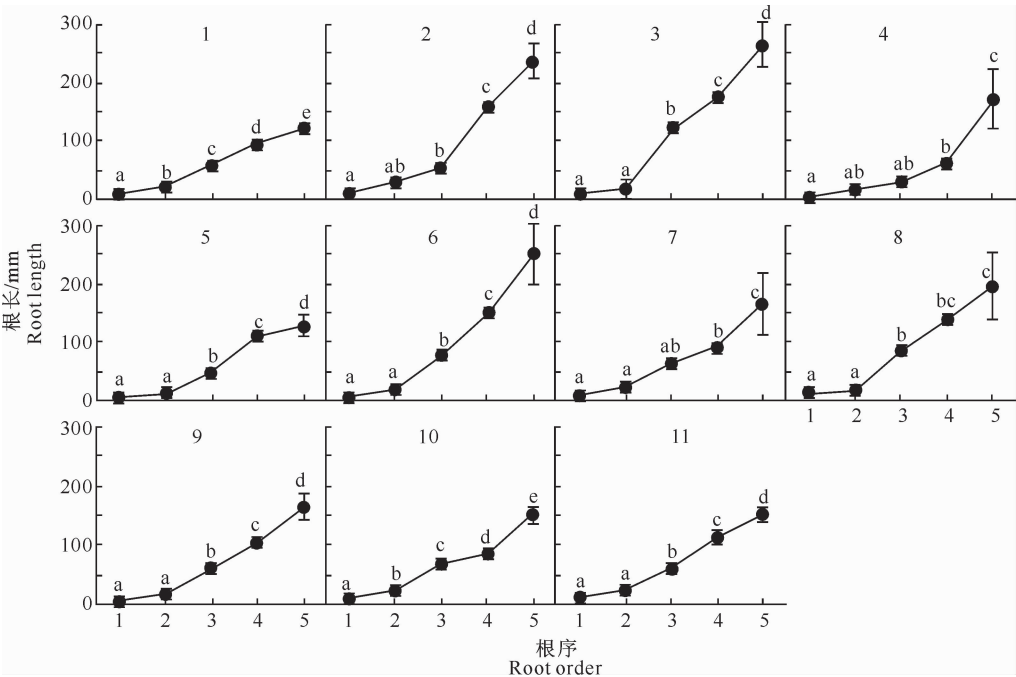


图 1 亚热带常绿阔叶林 11 个树种前 5 级根的根长

每个树种各序级根上标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);1~11. 树种序号(同表 1)。下同

Fig. 1 Root lengths for the first five roots of eleven tree species in subtropical evergreen forest

Lowercase letters within a species indicate significant difference ($P<0.05$) among roots with different orders;

1—11. Species numbers (listed in Table 1). The same as below

2.1.2 比根长 由图 2 可知,各树种比根长均随着序级的升高而显著减小($P<0.05$),在 11 个树种中,1~5 级根的平均比根长分别为 48.21,21.40,6.66,2.43 和 0.58 m/g。在种内,1 级根比根长最高,5 级根最低。11 个树种前 2 级根比根长明显大于后 3 级根,且有 6 个树种(山乌柏、刨花润楠、拟赤杨、欆木、杉木和油桐)前 3 级根的比根长明显大于后 2 级根。在种间,不同序级根长存在显著差异($P<0.05$),木荷 1 级根的比根长最高(116.83 m/g),杉木 1 级根比根长最低(13.24 m/g);在 1 级根和 4 级根中,深山含笑和木荷的比根长与其他树种均存在显著差异($P<0.05$),1 级根中拟赤杨的比根长也与其他树种的比根长差异显著($P<0.05$);在 3 级根中,油桐的比根长与其他树种的比根长差异显著($P<0.05$)。11 个树种前 3 级根的比根长均差异显著($P<0.05$),后 2 级根比根长差异均不显著($P>0.05$),且丝栗栲后 3 级根之间比根长差异不显著($P>0.05$)。

由表 2 可知,不同类型菌根侵染对树种平均根长和比根长也有重要影响,6 个外生菌根侵染树种的平均根长较 5 个内生菌根侵染树种长,而外生菌根侵染树种的比根长却较内生菌根侵染树种小。

2.2 11 个树种细根组织的 C、N 含量

2.2.1 C 含量 图 3 显示,在 11 个树种中,根组织 C 含量基本表现出随序级升高而增加的趋势,但是在山乌柏、欆木和梓木 3 个树种中,其 5 级根 C 含量小于 4 级根,而油桐 2 级根 C 含量小于 1 级根。根组织平均 C 含量从 1 级根的 350.51 g/kg 上升到 5 级根的 458.42 g/kg。在种间,1 级根中以杉木的 C 含量最低(303.11 g/kg),梓木的 C 含量最高(410.96 g/kg);在 3 级根中,木荷根组织 C 含量仅与山乌柏存在显著差异,与其他 9 个树种均无明显差异($P>0.05$),但山乌柏仅与杉木无显著差异($P>0.05$),与其他 9 个树种均差异显著($P<0.05$);在 5 级根中,欆木和杉木根组织 C 含量与其他树种均差异显著($P<0.05$)。有 5 个树种,即山

乌桕、刨花润楠、木荷、梓木和油桐前 2 级根之间 C 含量差异不显著($P>0.05$),而山乌桕、刨花润楠、

小叶青冈、拟赤杨、丝栗栲、杉木、木荷和梓木等 8 个树种后 2 级根之间 C 含量差异不显著($P>0.05$)。

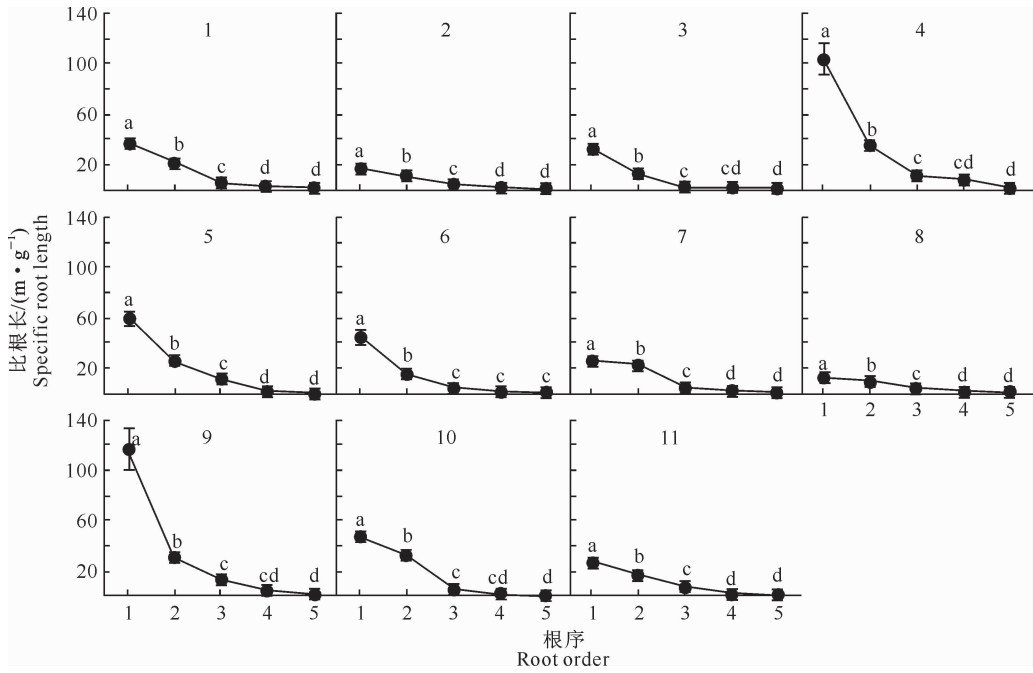


图 2 亚热带常绿阔叶林 11 个树种前 5 级根的比根长

Fig. 2 Specific root lengths for the first five roots of eleven tree species in subtropical evergreen forest

表 2 亚热带常绿阔叶林内生菌根与外生菌根感染树种的平均根长和比根长

Table 2 Mean root lengths and specific root lengths of the five species infected by arbuscular mycorrhizae (AM) and the six species infected by ectomycorrhizae (EM) in subtropical evergreen forest

根序 Root order	平均根长/mm Mean length		比根长/($\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$) Specific root length	
	内生菌根树种 AM	外生菌根树种 EM	内生菌根树种 AM	外生菌根树种 EM
1	7.70±2.38	8.23±0.51	59.91±20.99	38.45±6.67
2	19.97±1.15	22.38±1.20	22.81±4.57	20.24±3.37
3	58.93±9.24	72.64±10.95	8.18±1.88	5.40±1.23
4	101.76±13.27	129.78±15.54	3.53±1.32	1.52±0.13
5	162.13±12.30	201.15±23.58	0.75±0.18	0.44±0.10

2.2.2 N 含量 从图 4 可以看出,根组织 N 含量随序级升高而降低,仅山乌桕 5 级根 N 含量较 4 级根高。各树种根组织平均 N 含量从 1 级根到 5 级根分别为 14.48,10.65,7.69,6.03 和 5.70 g/kg。在种间,木荷的 1 级根 N 含量最低(9.17 g/kg),刨花润楠的 1 级根 N 含量最高(22.12 g/kg)。11 个树种 1~3 级根之间 N 含量均差异显著($P<0.05$),且山乌桕、深山含笑、拟赤杨、丝栗栲和欆木 5 个树种 1~5 级根之间 N 含量存在显著差异($P<0.05$),刨花润楠、小叶青冈、杉木、木荷、梓木和油桐等 6 个树种则表现为后 2 级根之间 N 含量差异不显著($P>0.05$)。在 1、2 和 3 级根上,刨花润楠根组织 N 含量与其他 10 个树种均存在显著差异($P<0.05$),而在 4 和 5 级根上,刨花润楠仅与油桐无显

著差异($P>0.05$);但山乌桕根组织 N 含量却表现为 1 和 2 级根上与梓木无显著差异($P>0.05$),而在 3、4 和 5 级根上,2 树种均表现为与其他树种差异显著($P<0.05$)。

2.2.3 C/N 由图 5 可知,从 1 级根到 5 级根,有 9 个树种的 C/N 随序级升高而增加,其余 2 个树种,即山乌桕和梓木 4 级根的 C/N 略高于 5 级根。在种间,刨花润楠 1 级根 C/N 最低(17.93),木荷 1 级根 C/N 最高(39.93)。11 个树种中,除小叶青冈和欆木前 4 级根间 C/N 差异显著($P<0.05$),而后 2 级根之间差异不显著($P>0.05$)外,其余 9 个树种 1~5 级根之间 C/N 均存在显著差异($P<0.05$),欆木 C/N 在 1、2 和 4 级根上与其他 10 个树种均存在明显差异($P<0.05$),油桐和拟赤杨 C/N 则在 2 和

3 级根上与其他树种差异显著 ($P<0.05$), 而梓木 ($P<0.05$), 在 5 级根上, 深山含笑 C/N 与其他树种 C/N 在 3 和 4 级根上与其他树种存在显著差异 ($P<0.05$)。

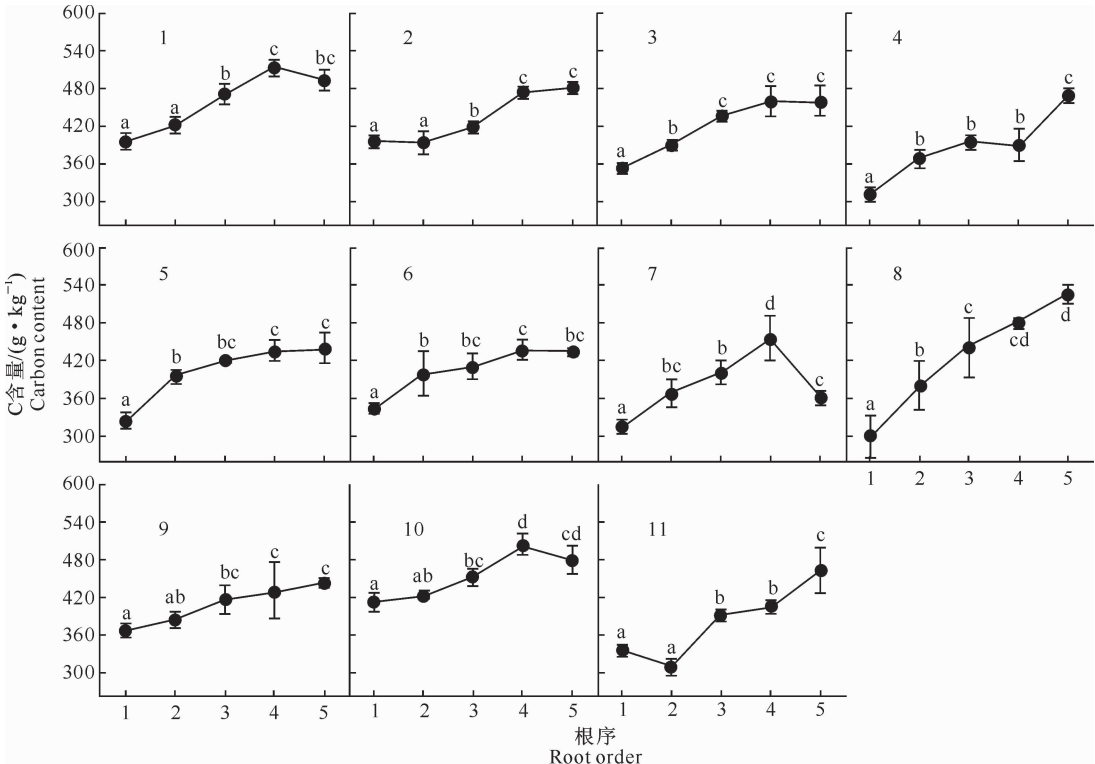


图 3 亚热带常绿阔叶林 11 个树种前 5 级根的 C 含量

Fig. 3 Carbon contents of the first five roots of eleven tree species in subtropical evergreen forest

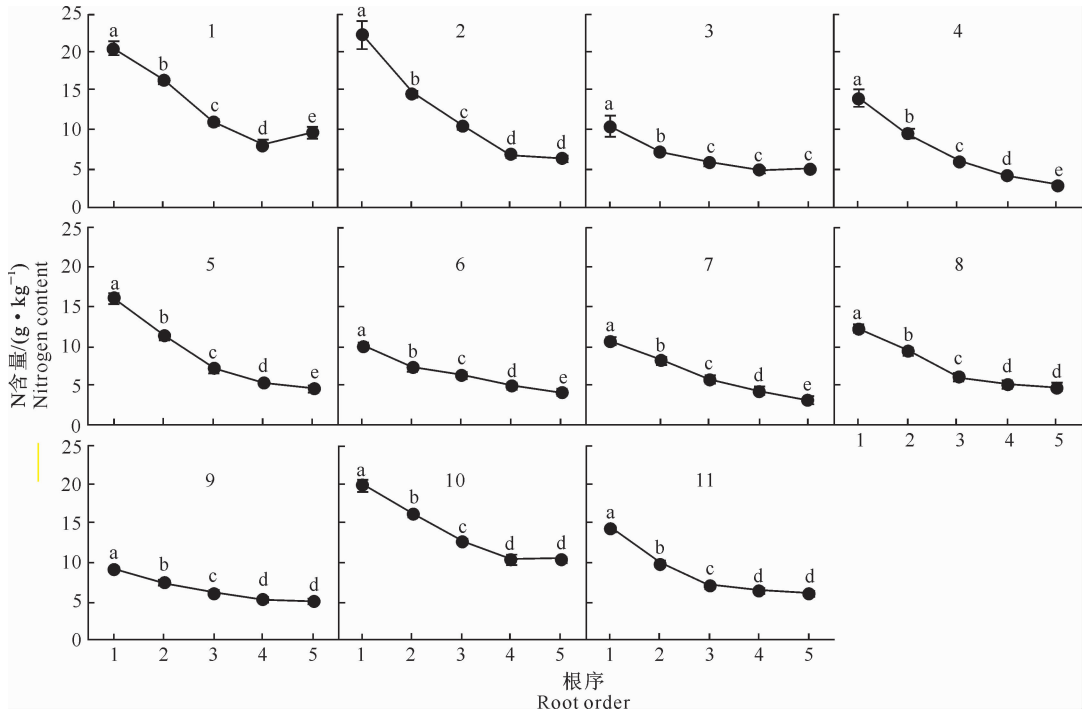


图 4 亚热带常绿阔叶林 11 个树种前 5 级根的 N 含量

Fig. 4 Nitrogen contents of the first five roots of eleven tree species in subtropical evergreen forest

由表 3 可知, 在 11 个树种中, 6 个外生菌根侵染树种的前 4 级根 C、N 平均含量较 5 个内生菌根侵染树种高; 但在 5 级根上, 外生菌根侵染树种的 C、N 平均含量较内生菌根侵染树种低。在 C/N 上,

外生菌根侵染树种 1、2 和 4 级根的 C/N 较内生菌根侵染树种高,但在另 2 个根级上,外生菌根侵染树种的 C/N 较内生菌根侵染的树种低。

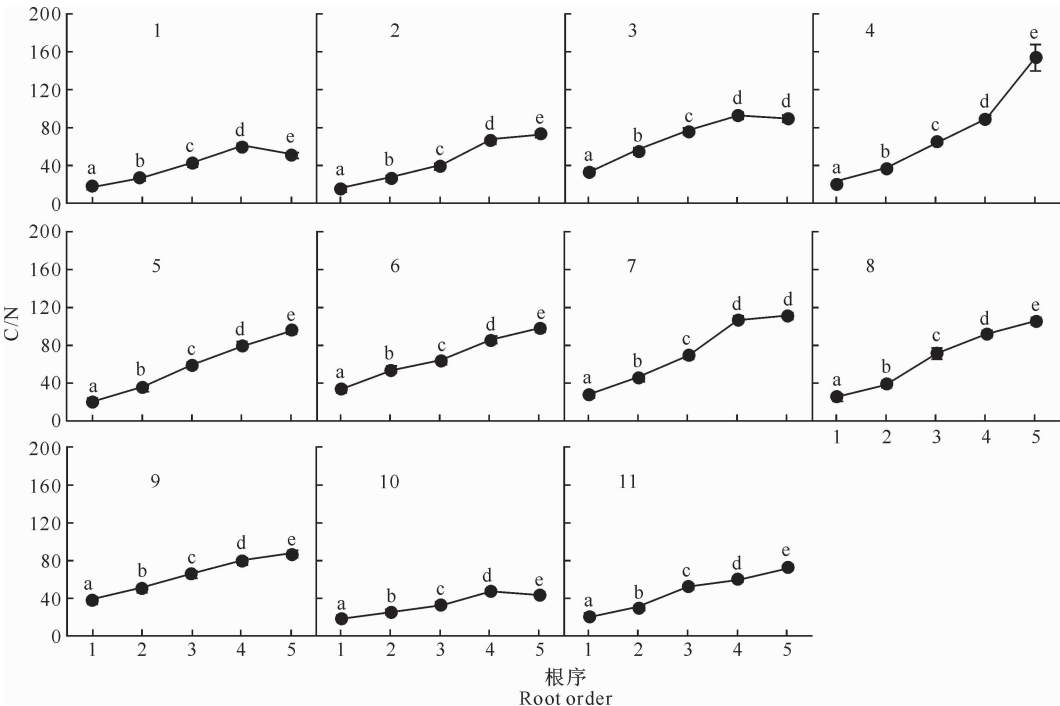


图 5 亚热带常绿阔叶林 11 个树种前 5 级根的 C/N

Fig. 5 C/N ratios for the first five roots of eleven tree species in subtropical evergreen forest

表 3 亚热带常绿阔叶林内生菌根与外生菌根侵染树种的 C、N 含量和 C/N

Table 3 Carbon and nitrogen contents and C/N of the five species infected by arbuscular mycorrhizae (AM) and the six species infected by ectomycorrhizae (EM) in subtropical evergreen forest

根序 Root order	C 含量/(g · kg ⁻¹) Carbon content		N 含量/(g · kg ⁻¹) Nitrogen content		C/N	
	内生菌根树种 AM	外生菌根树种 EM	内生菌根树种 AM	外生菌根树种 EM	内生菌根树种 AM	外生菌根树种 EM
1	341.64±17.30	357.91±15.44	14.01±1.81	14.88±2.15	25.91±3.60	26.15±3.03
2	372.22±18.47	395.26±6.99	10.52±1.51	10.75±1.59	37.51±4.40	40.60±5.36
3	422.36±14.91	423.40±7.02	7.28±0.95	8.03±1.17	60.54±5.24	57.52±6.71
4	422.45±22.97	461.20±9.99	5.89±0.67	6.15±0.91	77.75±6.65	80.91±8.44
5	478.04±14.69	442.07±17.73	5.71±1.06	5.69±1.04	95.60±17.46	86.26±9.48

3 讨 论

3.1 11 个树种细根的形态差异

树木根系形态结构反映其生理功能。以往的研究根据直径将根系简单分为细根和粗根^[4],认为细根的主要功能是养分和水分吸收,而粗根主要起支撑、运输和贮藏作用。但后来的研究表明,木本植物根系在发育过程中形成了不同的分支结构,是由各个根序构成的复杂分枝系统^[5,17]。低根序级细根(1,2 级)主要起吸收功能,而高根序级细根(3,4 级或更高级)则主要起运输、贮藏和结构支撑作用^[18-19]。Goebel 等^[20]和 Wells 等^[21]研究发现,低级根分解速率快,高级根分解速率慢。因此,采用细根序级方法研究根系生理生态过程更具实际意义。

本研究采用细根分级方法分析我国亚热带常绿阔叶林 11 个树种的前 5 级细根形态,结果发现:1 级根单个根长最短、比根长最大,而 5 级根根长最长、比根长最小,根系形态(即直径、根长、比根长)与细根序级之间存在紧密关系^[22]。相关研究也有类似结果,如 Pregitzer 等^[5]对北美 4 个阔叶树种和 5 个针叶树种前 3 级根的研究、师伟等^[6]对帽儿山 20 个阔叶树种前 5 级根的研究、熊德成等^[10]对亚热带 6 个树种细根序级结构和形态特征的研究、刘佳等^[12]对湖南会同 5 个树种细根的研究、Guo 等^[23]对美国长叶松细根的研究及 Huang 等^[24]对科尔沁 3 种沙地灌木树种细根的形态学研究等。以上研究结果说明,无论针叶或阔叶树种,或是热带、亚热带、温带树种,木本植物根系不同序级的形态结构具有相

似的变化规律。

Pregitzer 等^[5]认为,根系中前 2 级根的平均根长相似,而 2 级根之后平均根长会随着序级的增加而增大。在本研究中,11 个树种中有 9 个树种的前 2 级根的根长变化差异不明显,而 2 级根之后平均根长随着细根序级的变化增加比较明显。Makita 等^[25]对德国光叶桦直径小于 2 mm 的细根研究后发现,比根长为 1.05~80.39 m/g;Wang 等^[22]对东北落叶松和水曲柳的研究发现,其细根比根长分别为 2.36~40.54 和 2.85~101.57 m/g。本研究中各树种的比根长大部分都在上述报道范围内,只是最小比根长较之略小。

对于本研究中的 11 个树种,虽然前 5 级根形态与序级之间具有系统的变化规律,但是不同树种之间差异明显。在 11 个树种的比根长中,有 2 个树种(深山含笑和木荷)1 级根的比根长显著大于其他树种,可能是这 2 个树种的 1 级根根长较小(分别为 2.70 和 2.35 mm)所致。有研究表明,根系的比根长受多种因素的影响,通常直径越小,比根长越大^[26];组织密度越高,比根长越低^[5,23]。Pregitzer 等^[5]对北美 9 个树种的研究发现,其 1~3 级根的平均根长分别为 2,6.5 和 15 mm,这些数据均小于本研究所测 11 个树种相对应根序的平均根长。

已有研究表明,菌根侵染会改变细根形态^[5],且受外生菌根侵染的细根,其根长一般较内生菌根侵染的细根短^[27],这主要是由于受外生菌根的菌丝侵染后形成了菌套,限制了根部生长,而内生菌根的菌丝对根生长影响较小,所以内生菌根侵染的根的长度一般较外生菌根侵染的长。但在本研究中,5 个内生菌根侵染树种中,只有杉木的根长较其他树种的根长长,与上述结果相符合,而 5 个内生菌根侵染树种的平均根长却较 6 个外生菌根侵染树种的根长短,这与师伟等^[6]对帽儿山 20 个阔叶树种细根的研究结果相反,可能是其他原因所致。如 Pregitzer 等^[5]认为,古老树种比进化树种根长短。另外,植株间的竞争也会影响细根长度^[28]。本研究中各个树种间根长的差异,可以在后续试验中通过解剖学的方法得到更详细的分析与验证。

以上分析说明,树种间根长和比根长的差异,一方面可能是由于不同树种遗传基因的不同所致,另一方面也可能与研究区所处的地理位置、气候环境条件及土壤水分、养分的有效性有关。

3.2 11 个树种细根不同根序 C、N 含量的差异

本研究中,11 个树种 C/N 基本表现为随序级

升高而升高,N 含量则随序级升高而下降,这与 Pregitzer 等^[5]、刘佳等^[12]、Guo 等^[23]和许旻等^[29]的研究结果相似。C、N 养分的分配格局与根的代谢活动有关,低级根根尖细胞分裂旺盛,代谢活跃,需消耗大量的 C。同时,低级根是吸收养分和水分的主要器官,养分的吸收和运输也会消耗大量的 C^[12]。从解剖结构上看,低级根主要由初生组织组成,其主要的细胞类型为皮层细胞^[18]。随着序级增加,皮层细胞比例减少,木质部增加。最后,高级根的皮层细胞消失,由次生组织构成^[30],因此,N 含量一般随序级升高而降低。与 N 含量的变化趋势相比,本研究的 11 个树种中,有 7 个树种的 C 含量表现为随序级升高而增加;而另外 4 个树种中,山乌柏、榿木和梓木表现为 4 级根 C 含量大于 5 级根,油桐 1 级根 C 含量大于 2 级根。这与熊德成等^[11]对亚热带 6 个树种和 Pregitzer 等^[5]对北美 9 个树种的研究中“个别树种细根 C 含量不随序级增加而增加”的结果相类似。Pregitzer 等^[5]认为,出现这种变化的原因可能与根系中非结构性碳组分或不稳定的微生物基质有关,从而导致个别树种 C 含量随序级变化表现出不同的趋势。

在本研究的 11 个树种中,1 级根 N 含量最高的是刨花润楠,最低的是木荷,C/N 则刚好相反,而 C 含量最低的是杉木,最高的是梓木,说明 C/N 的变异受根组织 N 含量的影响大于根组织 C 含量的影响,这与许旻等^[29]对海南岛 4 个阔叶树种细根 C、N 含量的研究结果相同。而熊德成等^[11]研究发现,低级根的 C/N 变异主要由 N 含量决定,高级根中 C、N 含量共同决定 C/N 的变异,这主要是由于低级根根尖分裂旺盛,组织内酶和 RNA 投入高,对 N 需求大,而高级根主要为结构组织,C、N 是其中的构建元素。另外,C/N 的变化主要由 N 含量决定,与 N 含量相对于 C 含量有更大的变化范围有关。

在自然生态系统中,菌根对细根水分和养分的吸收有重要影响,外生菌根通过形成密集的菌丝网,增强对各种矿物营养尤其是磷的吸收。但由于一般菌根菌与宿主间的专一性不强,已形成外生菌根菌的植物其根外菌丝可进一步侵染其相邻的植物根系,导致在一个生态系统内大量的植物个体会由于菌丝而联系在一起。因此,菌丝联系在一起的地下菌丝体网络,会对植物间的资源进行调节,并会导致资源分配的不均衡^[31]。所以菌根菌的存在会影响细根的 C、N 含量。另外,许旻等^[29]研究发现,维根比与 N 含量存在负相关关系,而与 C 含量呈正相关

关系。为了探明不同树种及其根系不同序级间 C、N 含量的差异,还需在后续试验中理清外生菌根菌和内生菌根菌对细根组织含量的影响,同时在解剖学上对不同树种的细根进行进一步的分析。

4 结 论

对江西大岗山天然次生林 11 个树种细根形态和组织 C、N 含量的研究表明:虽然 11 个树种前 5 级根细根形态和 C、N 含量存在差异,但根长、比根长、C 含量、N 含量和 C/N 随序级增加而表现出相似的变化规律,生长在根系先端的 1 级根根长、C 含量和 C/N 最小,比根长和 N 含量最大,随着序级增加,根长、C 含量和 C/N 增加,而比根长和 N 含量降低。受外生菌根侵染的树种,其根长和 C、N 含量均大于内生菌根侵染树种。11 个树种之间细根形态和 C、N 含量存在明显差异,表明不同树种对地下环境的适应策略及对土壤养分的利用效率存在差异。为了进一步探明这些差异,可以从细根生理和解剖上进行更深入的研究。

[参考文献]

- [1] Hendrick R L, Pregitzer K S. The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23 (12): 2507-2520.
- [2] Nadelhoffer K J. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems [J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 131-139.
- [3] Gordon W S, Jackson R B. Nutrient concentrations in fine roots [J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 275-280.
- [4] Vogt K A, Grier C C, Gower S T, et al. Overestimation of net root production: A real or imaginary problem [J]. *Ecology*, 1986, 67(2): 577-579.
- [5] Pregitzer K S, Deforest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine North American trees [J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [6] 师 伟, 王政权, 刘金梁, 等. 帽儿山天然次生林 20 个阔叶树种细根形态 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1217-1226.
- Shi W, Wang Z Q, Liu J L, et al. Fine root morphology of twenty hardwood species in Maershan natural secondary forest in northeastern China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1217-1226. (in Chinese)
- [7] Chapin I F S, Matson P P A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. Heidelberg: Springer, 2011.
- [8] 陈灵芝, 王献溥, 汪 松. 中国的生物多样性: 现状及其保护对策 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- Chen L Z, Wang X F, Wang S. Chinese biodiversity: Status and conservation strategies [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in

- Chinese)
- [9] Legendre P, Mi X, Ren H, et al. Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China [J]. *Ecology*, 2009, 90 (3): 663-674.
- [10] 熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 等. 亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1888-1897.
- Xiong D C, Huang J X, Yang Z J, et al. Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1888-1897. (in Chinese)
- [11] 熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 等. 亚热带六种天然林树种细根养分异质性 [J]. *生态学报*, 2012, 32(14): 4343-4351.
- Xiong D C, Huang J X, Yang Z J, et al. Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4343-4351. (in Chinese)
- [12] 刘 佳, 项文化, 徐 晓, 等. 湖南会同 5 个亚热带树种的细根构型及功能特征分析 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 938-945.
- Liu J, Xiang W H, Xu X, et al. Analysis of architecture and functions of fine roots of five subtropical tree species in Huitong, Hunan Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 938-945. (in Chinese)
- [13] 王 燕, 刘苑秋, 曾炳生, 等. 江西大岗山常绿阔叶林土壤养分特征研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(1): 96-100.
- Wang Y, Liu Y Q, Zeng B S, et al. A study on soil nutrient characteristics of evergreen broad-leaved forests in Dagangshan mountain [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(1): 96-100. (in Chinese)
- [14] 陈祥欣, 陈连庆. 我国亚热带主要树种菌根调查 [J]. *林业科技通讯*, 1983(5): 8-12.
- Chen X X, Chen L Q. The survey of mycorrhizal of main tropical tree species in China [J]. *Forest Science and Technology*, 1983(5): 8-12. (in Chinese)
- [15] 张梅芳. 菌根的研究和应用概况 [J]. *广西农学院学报*, 1989, 8(2): 75-81.
- Zhang M F. The overview of research and application of mycorrhizal [J]. *Journal of Guangxi Agricultural College*, 1989, 8 (2): 75-81. (in Chinese)
- [16] 苏珞英, 程爱兴, 喻爱林, 等. 天目山自然保护区林木菌根调查 [J]. *浙江林学院学报*, 1992, 9(3): 30-43.
- Su L Y, Chen A X, Yu A L, et al. The survey of tree mycorrhizae in Tianmu Mountain Nature Reserve [J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1992, 9(3): 30-43. (in Chinese)
- [17] Pregitzer K S, Kubiske M E, Yu C K, et al. Relationships among root branch order, carbon, and nitrogen in four temperate species [J]. *Oecologia*, 1997, 111(3): 302-308.
- [18] Guo D, Xia M, Wei X, et al. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species [J]. *New Phytologist*, 2008, 180(3): 673-683.
- [19] Valenzuela-Estrada L R, Vera-Caraballo V, Ruth L E, et al. Root anatomy, morphology, and longevity among root orders

- in *Vaccinium corymbosum* (Ericaceae) [J]. American Journal of Botany, 2008, 95(12): 1506-1514.
- [20] Goebel M, Hobbie S E, Bulaj B, et al. Decomposition of the finest root branching orders: Linking belowground dynamics to fine-root function and structure [J]. Ecological Monographs, 2011, 81(1): 89-102.
- [21] Wells C E, Eissenstat D M. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters [J]. Ecology, 2001, 82(3): 882-892.
- [22] Wang Z, Guo D, Wang X, et al. Fine root architecture, morphology, and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species [J]. Plant and Soil, 2006, 288(1/2): 155-171.
- [23] Guo D L, Mitchell R J, Hendricks J J. Fine root branch orders respond differentially to carbon source-sink manipulations in a longleaf pine forest [J]. Oecologia, 2004, 140(3): 450-457.
- [24] Huang G, Zhao X, Zhao H, et al. Linking root morphology, longevity and function to root branch order: A case study in three shrubs [J]. Plant and Soil, 2010, 336(1/2): 197-208.
- [25] Makita N, Hirano Y, Dannoura M, et al. Fine root morphological traits determine variation in root respiration of *Quercus serrate* [J]. Tree Physiology, 2009, 29(4): 579-585.
- [26] Eissenstat D M, Yanai R D. The ecology of root lifespan [J]. Advances in Ecological Research, 1997, 27: 1-60.
- [27] 郭秀珍, 毕国昌. 林木菌根及应用技术 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- Guo X Z, Bi G C. Tree mycorrhizae and application technology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [28] Cahill J F, Menickel G G, Haag J J, et al. Plants integrate information about nutrients and neighbors [J]. Science, 2010, 328(5986): 1657.
- [29] 许 畅, 谷加存, 董雪云, 等. 海南岛 4 个热带阔叶树种前 5 级细根的形态、解剖结构和组织碳氮含量 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(9): 955-964.
- Xu Y, Gu J C, Dong X Y, et al. Fine root morphology, anatomy and tissue nitrogen and carbon contents of the first five orders in four tropical hardwood species in Hainan Island, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(9): 955-964. (in Chinese)
- [30] 常文静, 郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林 45 个常见树种细根直径变异 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1248-1257.
- Chang W J, Guo D L. Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forests in China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1248-1257. (in Chinese)
- [31] 刘永俊. 丛枝菌根的生理生态功能 [J]. 西北民族大学学报: 自然科学版, 2008(1): 54-59.
- Liu Y J. The physiological and ecological functions of arbuscular mycorrhizal [J]. Journal of Northwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2008(1): 54-59. (in Chinese)

(上接第 44 页)

- [17] Secco M, Zucconi E, Vieira N M, et al. Multipotent stem cells from umbilical cord: Cord is richer than blood [J]. Stem Cells, 2008, 26: 146-150.
- [18] Troyer D L, Weiss M L. Wharton's jelly-derived cells are a primitive stromal cell population [J]. Stem Cells, 2008, 26(3): 591-599.
- [19] Zhu H, Craig J A, Dyce P W, et al. Embryos derived from porcine skin-derived stem cells exhibit enhanced preimplantation development [J]. Biol Reprod, 2004, 71: 1890-1897.
- [20] Bosch P, Pratt S L, Stice S L. Isolation, characterization, gene modification and nuclear transfer reprogramming of porcine mesenchymal stem cells [J]. Biol Reprod, 2006, 74: 46-57.
- [21] Kues W A, Petersen B, Mysegades W, et al. Isolation of murine and porcine fetal stem cells from somatic tissue [J]. Biol Reprod, 2005, 72(4): 1020-1028.
- [22] Pochampally R R, Smith J R, Ylostalo J, et al. Serum deprivation of human marrow stromal cells (hMSCs) selects for a subpopulation of early progenitor cells with enhanced expression of OCT-4 and other embryonic genes [J]. Blood, 2004, 103(5): 1647-1652.
- [23] Tsung H C, Du Z W, Rui R, et al. The culture and establishment of embryonic germ (EG) cell lines from Chinese mini swine [J]. Cell Res, 2003, 13(3): 195-202.
- [24] Kucia M, Halasa M, Wyszmyrski M, et al. Morphological and molecular characterization of novel population of CXCR4⁺, SSEA4⁺, Oct4⁺ very small embryonic-like cells purified from human cord blood: Preliminary report [J]. Leukemia, 2007, 21(2): 297-303.
- [25] Lengner C J, Camargo F D, Hochedlinger K, et al. Oct4 expression is not required for mouse somatic stem cell self-renewal [J]. Cell Stem Cell, 2007, 1(4): 403-415.
- [26] Arnold K, Sarkar A, Yram M A, et al. Sox2(+) adult stem and progenitor cells are important for tissue regeneration and survival of mice [J]. Cell Stem Cell, 2011, 9(4): 317-329.
- [27] Suo G, Han J, Wang X, et al. Oct4 pseudogenes are transcribed in cancers [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2005, 337(4): 1047-1051.