

网络出版时间:2015-01-05 08:59 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.02.010
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150105.0859.010.html

欧洲鹅耳枥扦插生根及解剖特性

金建邦^a, 祝遵凌^{a,b}, 林庆梅^a

(南京林业大学 a 风景园林学院, b 艺术设计学院, 江苏 南京 210037)

[摘要] 【目的】研究扦插时期对欧洲鹅耳枥(*Carpinus betulus*)插穗生根能力的影响,及扦插过程中不定根的发育形成过程,为了解欧洲鹅耳枥扦插生根机制提供参考。【方法】以欧洲鹅耳枥春季硬枝(采于 2012-03-29)和夏季嫩枝(采于 2012-06-09)为材料,进行插穗生根,观察生根过程中的外部形态;利用扫描电镜技术,对欧洲鹅耳枥扦插过程中不定根的发育形成过程进行解剖观察。【结果】嫩枝扦插的相关生根指标(如生根率、最长根长、根系效果指数)均优于硬枝扦插。随着扦插时间的延长,硬枝插穗基部出现瘤状环,中间凹陷;而嫩枝插穗基部则出现乳白色半透明凸起。欧洲鹅耳枥嫩枝扦插前在插穗内没有发现潜伏根原基;根原基细胞与愈伤组织细胞的形态解剖特征差异很大,且在愈伤组织的切片中未发现根原基的存在。【结论】欧洲鹅耳枥插穗的不定根是由诱生根原基发育形成的,诱生根原基是由初生韧皮部中的薄壁细胞、髓射线与形成层交叉处的部分薄壁细胞发育而来,不定根的形成与愈伤组织的形成关联性不大。欧洲鹅耳枥是非愈伤组织生根类型树种。

[关键词] 欧洲鹅耳枥;扦插;不定根;诱生根原基;解剖学
[中图分类号] S718.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2015)02-0092-07

Rooting characteristics and anatomical structure of *Carpinus betulus* Cuttings

JIN Jian-bang^a, ZHU Zun-ling^{a,b}, LIN Qing-mei^a

(a College of Landscape Architecture, b College of Arts & Design, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: 【Objective】In this article, the effects of cutting period on rooting ability of cuttings and the formation and development process of adventitious roots from cuttings of *Carpinus betulus* were investigated. 【Method】The spring hardwood (extracted on 2012-03-29) and summer softwood (extracted on 2012-06-09) were used to conduct the rooting of cuttings and observe the external morphology. With scanning electron microscopy technology, the formation and development process of adventitious roots from cuttings of *Carpinus betulus* was observed. 【Result】The rooting results (such as rooting rate, longest root, and root effect index) of softwood cuttings were better than those of hardwood cuttings. Nodular ring with sagged center appeared on the base of hardwood, while milky white translucent projection emerged at the base of softwood. There was no latent root primordium in cutting of *Carpinus betulus*. The primordium cells and callus cells were different from the morphological and anatomical characteristics, and root primordium was not found in the callus tissue slices. 【Conclusion】The adventitious roots of *Carpinus betulus* cuttings formed from the induced root primordium. The parenchyma cell of primary phloem and the partial paren-

【收稿日期】 2013-09-22
【基金项目】 江苏省科技支撑计划项目(BE2012345); 国家林业局“948”项目(2011-4-44); 江苏省“青蓝工程”资助项目(2008); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)
【作者简介】 金建邦(1986—), 男, 江苏盐城人, 在读硕士, 主要从事园林植物应用、园林植物栽培研究。
E-mail: jinjianbang@yeah.net
【通信作者】 祝遵凌(1968—), 男, 河南固始人, 教授, 博士, 主要从事园林植物应用、园林植物栽培研究。
E-mail: zhuzunling@aliyun.com

chyma cell of pith ray at the intersection with the cambium developed into the induced root primordium and the formation of adventitious root and callus formation had little relevance. *Carpinus betulus* is non-callus rooting type species.

Key words: *Carpinus betulus*; cutting; adventitious root; induced root primordium; anatomical

欧洲鹅耳枥(*Carpinus betulus*)为桦木科鹅耳枥属落叶阔叶乔木,原产于欧洲和西亚,在北美有长期的栽培历史。欧洲鹅耳枥树形清秀、质地细腻、秋叶金黄,有众多园艺观赏品种,曾获得过英国皇家园艺学会奖杯,是重要的园林绿化树种,在许多国家和地区得以广泛应用,可用作行道树、庭院树、绿篱等^[1]。同时,因其环境适应性较强、较抗寒、喜钙、抗风能力强、少病虫害,是理想的沿海绿化及荒山造林树种,能广泛应用于我国的城市林业、园林绿化及荒山造林等工程中,具有十分广阔的市场前景。

目前,欧洲鹅耳枥的育苗方式主要是通过种子繁殖,但其种子成熟后,外部会形成坚硬的种壳,影响种子的发芽率;通过层积处理可以促进种子的发芽,但层积所需时间较长,且经过层积处理种子发芽率仍然较低^[2]。祝遵凌等^[3]研究认为,欧洲鹅耳枥种胚存在休眠现象,这是由于种皮中含有抑制幼苗生长的物质,而与种皮外壳无关。欧洲鹅耳枥扦插很难生根,Maynard和Bassuk^[4-6]研究了黄化处理、母株年龄、遮阴以及生根促进剂对欧洲鹅耳枥插穗生根的影响,结果表明,这些处理虽然在一定程度上能提高插穗生根率,但生根率总体仍较低,故认为欧洲鹅耳枥属难生根树种。为提高欧洲鹅耳枥的扦插生根率及探明其插穗生根过程中的相关机制,本试验在春季和夏季对欧洲鹅耳枥进行扦插研究,对不同扦插时期插穗的生根情况,以及生根过程中外部形态和横切面解剖结构进行观察,进一步了解欧洲鹅耳枥插穗生根和根原基的类型、不定根的发生及发育,以期为欧洲鹅耳枥的扦插生根机制研究和生产实践应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于南京林业大学园林试验中心。南京属亚热带湿润气候,四季分明。年平均气温 15.3℃,年平均相对湿度 76%,年平均降水量 1 106.5 mm;试验地为平原沙地,土层 100~150 mm,土壤类型以沙土和沙壤土为主。梅雨季节一般持续 20 d 左右,多在 6 月中下旬入梅、7 月上旬出梅。

1.2 材料处理

从 5 年生欧洲鹅耳枥嫁接苗母株上,采集当年生生长健壮、无病虫害且无机械损伤的硬枝(采于 2012-03-29)和嫩枝(采于 2012-06-09)插穗。插穗长 8~10 cm,上端平剪、下端斜剪。硬枝插穗保留 3~5 个芽,嫩枝插穗保留 2 个半片成熟叶,留腋芽。插穗扦插前用 600 mg/L IBA 处理基部 30 min,扦插基质为蛭石与珍珠岩(体积比=1:1)混合而成,在扦插前 1 周用多菌灵 800~900 倍液将基质消毒。

1.3 方法

试验于 2012-03-09 在南京林业大学园林试验中心进行,3 次重复,每重复 20 根插穗。在扦插后 100 d 调查所有插穗的存活率、生根率、平均根长、平均根系数量和根系效果指数,其中根系效果指数=(平均根长×根系数量)/总插穗数。每隔 10 d 从插穗中随机取 3~4 根,观察插穗基部是否膨大、凸起,有无愈伤组织,以及是否有不定根的生成,同时拍照记录。

以 2012-06-09 扦插的插穗为材料进行解剖学观察研究。对未处理的嫩枝插穗在扦插前用体积分数 70% FAA 固定液进行第一次固定,以观察茎扦插前的解剖结构。插穗扦插后,每隔 10 d 取样 1 次,每次取 3~4 根,至插穗不定根完全长出后停止取样。每次所取样品置于体积分数 2.5% 戊二醛中固定,0.1 mol/L 磷酸缓冲液清洗,再用体积分数 1% 锇酸固定,0.1 mol/L 磷酸缓冲液清洗,经无水乙醇系列脱水,转入醋酸异戊酯中,再用 HCP-2 临界点干燥仪黏合,IB-v 离子溅射仪喷金,在 FEI QUANTA-200 环境扫描电镜下观察茎的横切面结构,并记录和拍照。

2 结果与分析

2.1 不同扦插时期欧洲鹅耳枥插穗的生根情况

欧洲鹅耳枥插穗的生根能力与插穗的生理成熟度及扦插时间密切相关^[7]。从表 1 可以看出,扦插时期对插穗存活率、愈伤组织形成率、生根率、最长根长及根系效果指数有较大影响;嫩枝插穗的各项指标均优于硬枝插穗。因此,为获得较高的欧洲鹅

耳桤扦插生根率,应在 6 月上旬前后选用夏季嫩枝 进行扦插。

表 1 不同扦插时期欧洲鹅耳桤插穗的生根情况

扦插时期 Cuttings period	插穗存活率/% Cutting survival rate	愈伤组织形成率/% Callus formation rate	生根率/% Rooting rate	最长根长/cm Maximum root length	根系效果指数 Root effective indexes
春季(硬枝) Spring (hardwood)	16.67±7.64	11.67±2.89	5.00±2.39	3.22±0.54	0.167±0.153
夏季(嫩枝) Summer (softwood)	40.00±10.00	48.53±2.89	26.67±2.29	8.56±0.87	1.110±0.280

2.2 欧洲鹅耳桤扦插生根过程的外部形态观察

欧洲鹅耳桤硬枝扦插(春季扦插)从扦插到生根大约需要 55 d。扦插后 30 d,硬枝插穗基部切口部位出现少量乳白色半透明环状肿大(图 1-A)。扦插后 40 d,插穗基部肿胀越来越大,形成一个连续的瘤状环,中间凹陷(图 1-B)。扦插 50 d 时有少部分插

穗愈伤组织处长出不定根(图 1-C),也发现少量的皮部生根(图 1-D)。扦插 100 d 时,大部分长出愈伤组织的插穗已生根,但生根的数量较少,仅有 1~4 条(图 1-E),也有部分愈伤组织没有长出不定根(图 1-F),但插条依然存活。

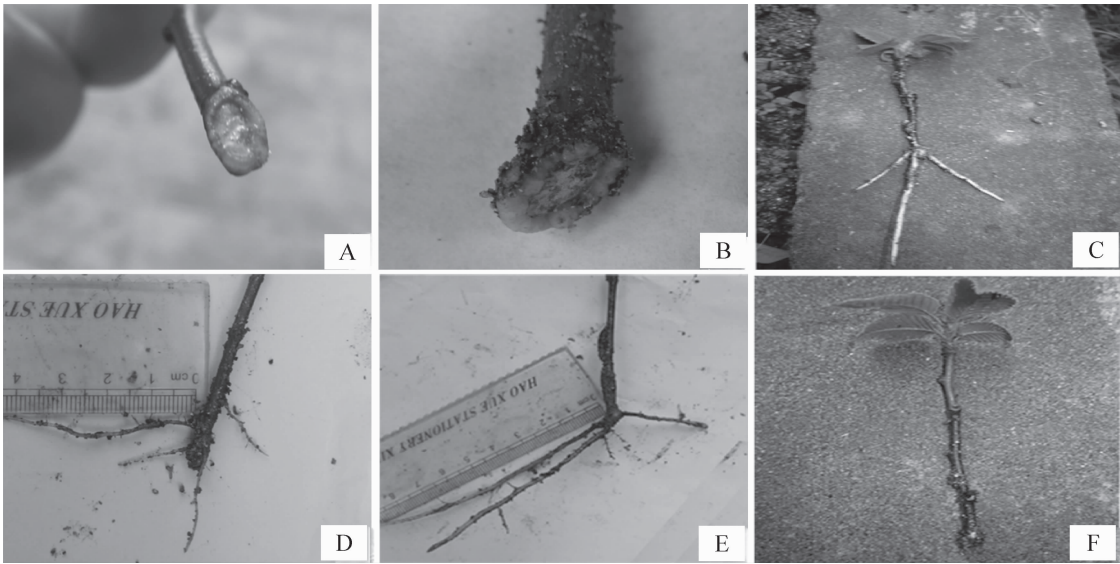


图 1 欧洲鹅耳桤春季插穗生根过程的外部形态观察

A. 插穗基部切口部位出现少量乳白色半透明环状肿大;B. 扦插后 40 d 插穗基部形成连续的瘤状环;C. 扦插 50 d,愈伤组织处长出不定根;D. 皮部生根;E. 扦插 100 d,长出愈伤组织的插穗生根;F. 未长出不定根的愈伤组织

Fig. 1 Morphologic character observation on the rooting of cuttings of *Carpinus betulus* in spring

A. A small amount of milky white translucent ring enlargement appeared on the base incision site;B. The formation of continuous warty ring on the base of cutting after 40 d;C. The adventitious root grow out from callus after 50 d;D. Surface rooting;E. The root formation of the cuttings growing callus after 100 d;F. The callus without adventitious root

欧洲鹅耳桤嫩枝扦插(夏季扦插)从扦插到生根大约需要 48 d。欧洲鹅耳桤夏季插穗生根过程的外部形态观察见图 2。嫩枝插穗扦插后 20 d,距基部切口 2 cm 范围内出现少量乳白色半透明凸起(图 2-A)。扦插 30 d,距基部切口约 3 cm 范围内的乳白色半透明凸起增多、变大(图 2-B),同时切口处也出现乳白色半透明环状愈伤组织凸起(图 2-C)。扦插 45 d 时,少部分白色(乳白色)半透明凸起已发育形成不定根(图 2-D)。扦插 60 d 时,插穗的皮部产生

了大量不定根(图 2-E、F),愈伤组织处也形成不定根(图 2-G)。

2.3 欧洲鹅耳桤扦插生根过程的解剖观察

2.3.1 插穗扦插前的解剖结构 扦插前欧洲鹅耳桤嫩枝插穗的横切面由周皮、皮层、维管柱 3 大部分组成(图 3-A)。周皮处的细胞排列紧密且呈长方形。皮层由多层细胞组成,细胞呈不规则排列,壁较薄,呈卵圆形,间隙大。维管柱主要由髓、次生木质部、维管射线、维管形成层和次生韧皮部组成,其中

髓由薄壁细胞组成,这些细胞呈圆形、排列疏松、间隙大;次生木质部主要由木纤维薄壁细胞、导管构成;维管射线由木射线和韧皮射线 2 部分组成;维管形成层由几层可恢复分裂能力的薄壁细胞组成;次

生韧皮部主要由筛管、韧皮纤维和韧皮薄壁细胞等组成。通过观察大量切片发现,在插穗内无潜伏根原基,因此认为欧洲鹅耳枥的根原基是在扦插后诱导而产生的。

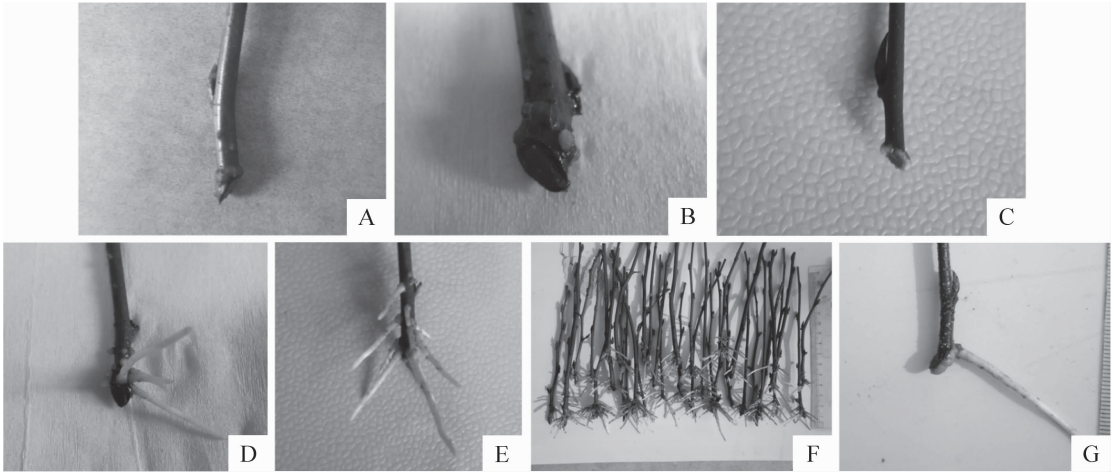


图 2 欧洲鹅耳枥夏季插穗生根过程的外部形态观察

A. 扦插后 20 d,插穗基部出现少量的乳白色半透明凸起;B. 扦插 30 d,基部出现更多、更大的乳白色半透明凸起;C. 扦插 30 d,基部出现乳白色半透明环状愈伤组织凸起;D. 扦插 45 d,白色(乳白色)半透明凸起已发育形成不定根;E、F. 扦插 60 d,插穗皮部产生不定根;G. 愈伤组织处形成不定根

Fig. 2 Morphologic character observation on the rooting of cutting of *Carpinus betulus* in summer

A. A small amount of milky white translucent swelling appeared on the base after 20 d;B. The milky white translucent swelling extended and multiplied after 30 d;C. The swelling of milky white translucent ring callus after 30 d;D. The milky white translucent swelling formed the adventitious root after 45 d;E,F. Cutting produced adventitious root from surface after 60 d;G. The adventitious root formation of callus

2.3.2 插穗扦插后的解剖结构 (1)愈伤组织。在扦插后约 30d,欧洲鹅耳枥插穗基部切口出现的半透明瘤状物,即为插穗的愈伤组织,通过对愈伤组织进行扫描电镜观察发现,愈伤组织是由形成层内具分生能力的薄壁细胞发育而来,其组成细胞大且排列紧密(图 3-B、C),愈伤组织细胞不断分裂并包裹插穗的整个切口,起到保护插穗切口的作用(图 3-D),但在整个愈伤组织切片中未发现根原基。

(2)不定根。愈伤组织形成后不久,在形成层与维管射线相交的位置,组成射线的原始细胞明显变大、增多,且向韧皮部方向横向加宽成多列,形成层变厚,从外部观察表现为枝条变粗,在髓射线与形成层交叉及紧靠维管形成层的位置,可观察到一些细胞较小、形态基本一致的分生薄壁细胞团,即为诱导的根原基细胞。根原基细胞不断生长,由圆形细胞团变成尖形细胞团,就形成了根原基(图 3-E),根原基细胞向前分裂挤破原有的皮层和周皮,同时根原基细胞继续向髓心方向分裂,形成根的维管组织(图 3-E)。扦插后约 50 d,根原基细胞继续伸长,最终形

成完整的不定根。

欧洲鹅耳枥插穗根原基细胞和愈伤组织细胞的形态解剖特征差异很大,且在愈伤组织切片中未发现根原基的存在,据此可以推断,不定根的形成与愈伤组织的形成关联性不大,愈伤组织的主要功能是保护切口免受病菌入侵及防止有效物质的流失^[8]。

3 结论与讨论

3.1 欧洲鹅耳枥扦插时期与插穗生根的关系

扦插时期对欧洲鹅耳枥插穗的生根率影响很大,对插穗的木质化程度要求不同,则插穗扦插的时间也不同。一般而言,在枝条生命活动最旺盛的时期扦插,插穗的成活率最高。本研究中,与生根有关的指标如生根率、最长根长、根系效果指数,嫩枝扦插均优于硬枝扦插,且其插穗存活率及愈伤组织形成率也都高于硬枝扦插。这可能是由于嫩枝插穗的营养物质比硬枝插穗丰富,组织发育充实,内源生长激素和其他促进生根物质的含量也逐渐增多所致。有研究表明,第 4 季度(10—12 月)为南方红豆杉

(*Taxus chinensis* var. *mairei*) 扦插的最佳时期, 扦插效果显著优于第 1 (1—3 月)、第 2 (4—6 月)、第 3 季度 (7—9 月)^[9]。余发新等^[10] 在杂种马褂木 (*Liriodendron chinensis* × *L. tulipifera*) 嫩枝扦插中研究发现, 杂种马褂木嫩枝扦插宜在 6 月上旬进行, 这与本研究结果一致。侯开举等^[11] 研究发现, 板栗 (*Castanea mollissima*) 插穗生根率最高的时期

是 6 月中旬, 插穗采集过早则枝条太嫩, 组织发育不充实; 插穗采集过晚则枝条会老化, 抑制生根的物质会增多, 这与本研究结果一致。而紫珠 (*Callicarpa bodinieri*) 扦插成活率最高的季节是春季, 原因是春季的气温回升, 枝条内储备着丰富的营养物质, 有利于插穗不定根的形成和生长^[12]。

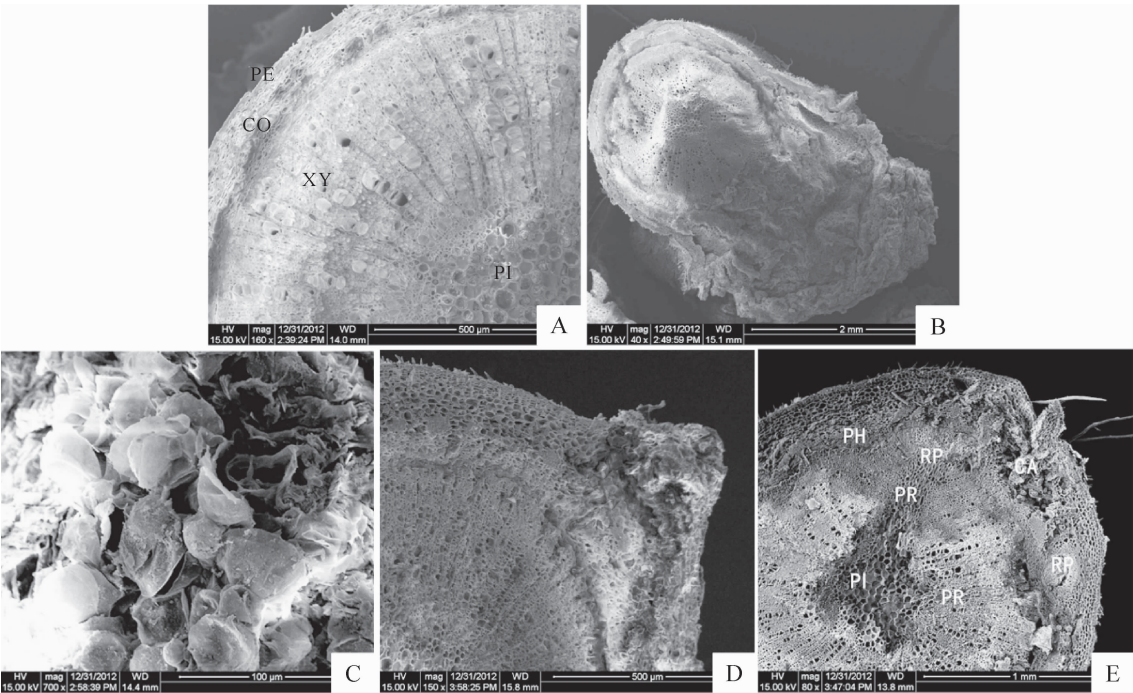


图 3 欧洲鹅耳枥扦插生根过程的扫描电镜观察
A. 扦插前插穗横切面 (×160); B. 插穗愈伤组织 (×40); C. 愈伤组织细胞 (×700); D. 愈伤组织 (×150);
E. 插穗横切面愈伤组织、根原基、髓射线、韧皮部 (×80); PE. 周皮; CO. 皮层; XY. 木质部; PI. 髓;
PH. 韧皮部; RP. 根原基; PR. 髓射线

Fig. 3 Observation on the rooting of cutting of *Carpinus betulus* with scanning electron microscope
A. Transverse section before cutting (×160); B. Callus of cuttings (×40); C. Callus cell (×700); D. Calli (×150);
E. Calli, root primordium, pith ray, phloem of transverse section of cuttings (×80); PE. Periderm;
CO. Cortex; XY. Xylem; PI. Pith; PH. Phloem; RP. Root primordium; PR. Pith ray

3.2 欧洲鹅耳枥插穗生根的诱导发生

大量研究表明, 按照不定根原基的来源, 可将其分为潜伏根原基和诱生根原基 2 种类型^[13-15]。潜伏根原基是在插穗前就存在的不定根原基, 这些不定根原基原来处于休眠状态, 一旦遇到适宜的扦插环境, 其就能继续发育成不定根, 从而形成完整的植株。而诱生根原基是在扦插后才被诱导形成的。本研究发现, 欧洲鹅耳枥嫩穗扦插前在插穗内没有发现潜伏根原基, 插穗的不定根是由诱导根原基发育形成的。因此, 欧洲鹅耳枥插穗的根原基为诱生根原基, 这与秤锤树 (*Sinojackia xylocarpa*)^[16]、东方杉 (*Taxodium mucronatum* × *Cryptomeria fortu-*

nei)^[17] 等的根原基来源相同。

研究发现, 髓射线和维管射线与不定根的发生也有关, 如苹果 (*Malus pumila*) 插穗的不定根是在射线加宽处形成的^[18]; 黑穗醋栗 (*Ribes nigrum* L.) 的生根部位也易在较宽的髓射线和维管射线处形成^[19]。本研究通过扫描电镜观察发现, 欧洲鹅耳枥的诱生根原基是由初生韧皮部中的薄壁细胞、髓射线与形成层交叉处的部分薄壁细胞发育而来, 诱导根原基发生部位对应的髓射线较其他部位的髓射线宽。

3.3 欧洲鹅耳枥愈伤组织与不定根发育的关系

学者们对于愈伤组织产生与不定根的发生之间

关系的看法各不相同。林艳等^[20]认为,白桦(*Betula platyphylla* Suk)的愈伤组织对皮部的生根有抑制作用。而张钢民等^[21]认为,矮紫杉(*Taxus cuspidate* ‘Nana’)不定根发生的先决条件是愈伤组织的形成。本研究中,欧洲鹅耳枥不定根根原基的形成明显晚于愈伤组织,在愈伤组织切片中未发现不定根原基,且根原基细胞与愈伤组织细胞的形态解剖特征差异很大,可以初步认为欧洲鹅耳枥是非愈伤组织生根类型的树种。在欧洲鹅耳枥插穗不定根形成的外部形态观察中发现,有少部分不定根是从愈伤组织处生长出来的,这可能是由于愈伤组织的形成部位恰在不定根形成的外侧,不定根需穿过愈伤组织发育出来。愈伤组织的形成对插穗的生根有重要的作用,不仅可以防止外界细菌的侵入和插穗内有效物质的流失,还可以充当营养物质及水分等的运输桥梁^[22]。

[参考文献]

- [1] Suszka B, Muller C, Bonnet-Masimbert M. Seeds of forest broad-leaves; From harvest to sowin [M]. Paris: Institut National de la Recerch Agronomique, 1998.
- [2] Paula M. The woody plant seed nanual [M]. Washington, D C: USDA Forest Service, 2008: 328-332.
- [3] 祝遵凌, 许园园, 王 飒. 欧洲鹅耳枥种子变温层积过程中结构的变化 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(7): 1-5.
Zhu Z L, Xu Y Y, Wang S. Structure changes of *Carpinus betulus* seed under fluctuating temperature stratification [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(7): 1-5. (in Chinese)
- [4] Maynard B K, Bassuk N L. Effects of stock plant etiolation, shading, banding, and shoot development on histology and cutting propagation of *Carpinus betulus* L. ‘fastigata’ [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1996, 121(5): 853-860.
- [5] Maynard B K, Bassuk N L. Stock plant etiolation and stem banding effect on the auxin dose response of rooting in stem cutting of *Carpinus betulus* L. ‘fastigata’ [J]. Plant Growth Regulation, 1991, 10: 305-311.
- [6] Maynard B K, Bassuk N L. Stock plant etiolation, shading, and banding effects on cutting propagation of *Carpinus betulus* [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1992, 117(5): 740-744.
- [7] 祝遵凌, 许园园. 欧洲鹅耳枥繁殖技术研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(1): 88-91.
Zhu Z L, Xu Y Y. Research on *Carpinus betulus* reproduction [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(1): 88-91. (in Chinese)
- [8] 森下义朗, 大山浪雄. 植物扦插理论与技术 [M]. 李云森, 译. 北京: 中国林业出版社, 1988: 1-2.

- Morishita Yoshiro, Oyama Namio. Theory and technology of plant cuttings [M]. Li Y S, translation. Beijing: China Forestry Press, 1988: 1-2. (in Chinese)
- [9] 博瑞树, 黄 琦, 胡宗庆. 南方红豆杉扦插繁殖技术研究 [J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 37-38.
Bo R S, Huang Q, Hu Z Q. Studies on the technology of cutting propagation of *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(2): 37-38. (in Chinese)
- [10] 余发新, 刘腾云, 朱 祺, 等. 杂种马褂木扦插繁殖技术研究: II. 插穗粗细及环境条件与生根的关系 [J]. 江西科学, 2006, 24(1): 21-25.
Yu F X, Liu T Y, Zhu Q, et al. A study on the cutting propagation of *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*: II. The relationship between the rooting percentage and the diameter of cuttings and other environmental factors [J]. Jiangxi Science, 2006, 24(1): 21-25. (in Chinese)
- [11] 侯开举, 周席华, 胡孝义. 板栗嫩枝扦插育苗试验总结 [J]. 湖北林业科技, 1993(4): 43-44.
Hou K J, Zhou X H, Hu X Y. Summary of *Castanea mollissima* softwood cutting test [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 1993(4): 43-44. (in Chinese)
- [12] 周晓勤, 刘更有, 曹流清. 紫珠扦插育苗及丰产栽培技术研究 [J]. 湖南林业科技, 2006, 33(6): 31-35.
Zhou X Q, Liu G Y, Cao L Q. Study on the cutting breeding and high-yield cultivation technology of *Callicupa japonica* Thunb [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2006, 33(6): 31-35. (in Chinese)
- [13] 王关林, 吴海东, 苏冬霞, 等. IBA、NAA 对樱桃砧木(*Prunus pseudocerasus* Colt)插穗的生理、生化代谢和生根的影响 [J]. 园艺学报, 2005, 32(4): 691-694.
Wang G L, Wu H D, Su D X, et al. Effects of NAA and IBA on biochemical metabolize and rooting of cherry’s stock (*Prunus pseudocerasus* Colt) [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005, 32(4): 691-694. (in Chinese)
- [14] 许晓岗, 汤庚国, 童丽丽. 海棠果插穗扦插生根过程解剖学观察 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 77-80.
Xu X G, Tang G G, Tong L L. The anatomical observation on the rooting of the cutting of *Malus prunifolia* Borkh [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2006, 30(4): 77-80. (in Chinese)
- [15] 杜慧芳, 程智慧, 赵会芳. 大蒜不同品种蒜薹发育的解剖学研究 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(9): 1720-1726.
Du H F, Cheng Z H, Zhao H F. Anatomical study of scape development of different garlic cultivars [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2005, 25(9): 1720-1726. (in Chinese)
- [16] 张 颖. 秤锤树扦插繁殖技术及生根机理的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
Zhang Y. Cutting propagation technique and rooting mechanism of *Sinojackia xylocarpa* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [17] 徐佩贤. 东方杉嫩枝扦插繁殖技术及其生根机理研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.

Xu P X. Studies on soft cutting propagation technique and rooting mechanism of *Taxodium mucronatum* × *Cryptomeria fortunei* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. (in Chinese)

[18] 张晓平, 方炎明. 杂种鹅掌楸插穗不定根发生与发育的解剖学观察 [J]. 植物资源与环境学报, 2003, 12(1): 10-15.

Zhang X P, Fang Y M. Anatomical observation of the origin and development of adventitious roots in hybrid tuliptrees during cutting [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2003, 12(1): 10-15. (in Chinese)

[19] 林金莲, 王馥兰. 黑穗醋栗 (*Ribes nigrum* L.) 茎的解剖结构与不定根形成的研究 [J]. 东北农学院学报, 1990, 21(3): 284-287.

Lin J L, Wang F L. Studies on anatomical structure of stem and adventitious root formation of *Ribes nigrum* L. [J]. Journal of Northeast Agricultural College, 1990, 21(3): 284-287. (in Chinese)

[20] 林 艳, 詹亚光, 刘玉喜, 等. 白桦嫩枝扦插根原基形成的解剖学观察 [J]. 东北林业大学学报, 1996, 24(3): 15-18.

Lin Y, Zhan Y G, Liu Y X, et al. Anatomical observation of root primordial formation of softwood cutting of *Betula platyphylla* Suk [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1996, 24(3): 15-18. (in Chinese)

[21] 张钢民, 杨文利, 贾玉彬, 等. 矮紫杉插条生根的解剖研究 [J]. 园艺学报, 1999, 26(3): 201-203.

Zhang G M, Yang W L, Jia Y B, et al. Anatomical study on the rooting of cutting of *Taxus cuspidata* ‘Nana’ [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1999, 26(3): 201-203. (in Chinese)

[22] 刘 勇, 肖德兴, 黄长干, 等. 板栗嫩枝扦插生根解剖学特征研究 [J]. 园艺学报, 1997, 24(1): 8-12.

Liu Y, Xiao D X, Huang C G, et al. Studies on anatomical characteristics of softwood cuttings rooting of *Castanea mollissima* [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1997, 24(1): 8-12. (in Chinese)

(上接第 91 页)

[24] Carol R J, Dolan L. The role of reactive oxygen species in cell growth: Lessons from root hairs [J]. J Exp Bot, 2006, 57(8): 1829-1834.

[25] Ma L, Zhang H, Sun L, et al. NADPH oxidase AtrbohD and AtrbohF function in ROS-dependent regulation of Na(+)/K(+) homeostasis in *Arabidopsis* under salt stress [J]. J Exp Bot, 2012, 63(1): 305-317.

[26] Sun J A, Li L S, Liu M Q, et al. Hydrogen peroxide and nitric oxide mediate K(+)/Na(+) homeostasis and antioxidant defense in NaCl-stressed callus cells of two contrasting poplars [J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2010, 103(2): 205-215.

[27] Oh D H, Lee S Y, Bressan R A, et al. Intracellular consequences of SOS1 deficiency during salt stress [J]. J Exp Bot, 2010, 61(4): 1205-1213.

[28] Banakou E, Dailianis S. Involvement of Na⁺/H⁺ exchanger and respiratory burst enzymes NADPH oxidase and NO synthase, in Cd-induced lipid peroxidation and DNA damage in haemocytes of mussels [J]. Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol, 2010, 152(3): 346-352.

[29] Wang R G, Chen S L, Deng L, et al. Leaf photosynthesis, fluorescence response to salinity and the relevance to chloroplast salt compartmentation and anti-oxidative stress in two poplars [J]. Trees-Structure and Function, 2007, 21(5): 581-591.

[30] Quan R, Lin H, Mendoza I, et al. SCABP8/CBL10, a putative calcium sensor, interacts with the protein kinase SOS2 to protect *Arabidopsis* shoots from salt stress [J]. Plant Cell, 2007, 19(4): 1415-1431.