



分子植物育种
Molecular Plant Breeding
ISSN 1672-416X, CN 46-1068/S

《分子植物育种》网络首发论文

题目： 太白杨(*Populus purdomii*)组织培养再生体系建立
作者： 骆泽煜, 彭子嘉, 熊朝伟, 王斌, 余仲东
网络首发日期： 2022-03-06
引用格式： 骆泽煜, 彭子嘉, 熊朝伟, 王斌, 余仲东. 太白杨(*Populus purdomii*)组织培养再生体系建立[J/OL]. 分子植物育种.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220303.1139.008.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

研究报告

Research Report

太白杨(*Populus purdomii*)组织培养再生体系建立

骆泽煜 彭子嘉 熊朝伟 王斌 余仲东*

西北农林科技大学林学院, 杨凌, 712000

*通信作者, yuzhongdong001@nwsuaf.edu.cn

摘要 为建立高效的太白杨组织培养再生体系, 以其茎段为外植体, 设置不同的实验处理方式进行诱导。结果表明: 太白杨茎段的最佳消毒处理组合为 75%酒精消毒 50 s 和 2% NaClO 水溶液消毒 8 min, 污染率为 16%, 生存率为 74%; 最佳启动培养基为 1/2MS+0.5 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA, 启动率高达 90%; 最佳增殖培养基为 1/2MS+0.5 mg/L 6-BA+0.3 mg/L IBA, 增殖系数达到 7.1; 最佳生根培养基为 1/2MS+0.3 mg/L IBA, 生根率超过 90%。本研究成功建立了太白杨组织培养再生体系, 可为其遗传转化体系的建立提供理论基础。

关键词 太白杨; 组织培养; 再生体系; 最佳培养基

Establishment of Tissue Culture Regeneration System of *Populus purdomii*

Luo Zeyu Peng Zijia Xiong Chaowei Wang Bin Yu Zhongdong *

College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, 712000

* Corresponding author, yuzhongdong001@nwsuaf.edu.cn

Abstract In order to establish an efficient regeneration system of *Populus purdomii* through tissue culture, the stems of *P. purdomii* were used as explants *in vitro*, and different experimental treatments were set up for induction. The results showed that the most favorable treatments for stem sterilizations were in 75% alcohol for 50 s and 2% NaClO for 8 min, at a contamination rate under 16% and a survival rate above 74%; the optimal starting medium involved 1/2MS+0.5 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA, reaching the starting rate of 90%; the best proliferation medium contained 1/2MS+0.5 mg/L 6-BA+0.3 mg/L IBA, with the proliferation coefficient of 7.1; the best rooting medium was consisted of 1/2MS+0.3 mg/L IBA, at a rooting rate over 90%. This research successfully established a tissue culture regeneration system of *P. purdomii*, which laid a foundation for genetic transformation in the future.

Keywords *Populus purdomii*; Tissue culture; Regeneration system; Optimal medium

近年来, 杨树作为重要的公益林以及用材林树种被大面积种植, 但随之而来的诸多病害问题给杨树产业造成了重大影响, 其中以叶锈病、溃疡病、黑斑病等带来的经济损失较大(曾大鹏, 2002; Sithixay et al., 2019)。太白杨(*Populus purdomii* Rehder)又名卜氏杨、冬瓜杨、波斯杨等, 为杨柳科杨属青杨派中国特有树种, 其树干高大、生长快、材质优良、耐寒, 在秦岭中高山区较为常见(孔令童等, 2011)。但太白杨及其杂交种对松-杨栅锈菌(*Melampsora larici-populina* Kleb.)极其感病, 引种到低海拔地区后溃疡病、黑斑

病等的为害也十分严重(Yu and Cao, 2005; Yu et al., 2011; 胡斌等, 2019)。为了深入探究植物基因功能及其与病原菌互作机制, 转基因技术被广泛应用, 而基因的稳定转化与表达依赖于植物组织培养体系的建立(王阳等, 2017; 郭垚霖等, 2019; 田呈明等, 2021)。

组织培养技术是保存植物优良遗传性状的手段和转基因工程操作的基础, 杨树组织培养研究已有很多报道。孙红英等(2019)以黑杨派(Sect. *Aigeiros* Duby)的中红杨叶片为实验材料, 确定了其不定芽诱导的最优培养基为: MS+0.5 mg/L 6-BA+0.2 mg/L NAA+30 g/L 蔗糖; 石进朝等(2021)以白杨派(Sect. *Leuce* Duby)的阳光毛白杨带芽茎段为材料, 发现其最适的生根培养基为: 1/2MS+0.5 mg/L IBA; 杜晓艳等(2011)以青杨派(Sect. *Tacamahaca* Spach)的青海青杨茎段为外植体进行组织培养, 并成功建立再生体系; 此外, 大叶杨派(Sect. *Leucoides* Spach)和胡杨派(Sect. *Turanga* Bunge)中也建立了多个树种的离体再生体系(白玉娥等, 2019)。然而, 青杨派的太白杨作为乡土杨树优良的杂交育种材料, 其组织培养再生体系还未见报道。

本研究以太白杨茎段为外植体, 探讨不同消毒处理、激素浓度和不同培养基对太白杨外植体再生的影响, 以筛选出最佳的消毒条件、激素配比和培养基类型, 为太白杨遗传转化体系的建立提供理论基础。

1 结果与分析

1.1 消毒时间对外植体灭菌的影响

外植体经 75%酒精和 2% NaClO 水溶液消毒处理, 培养 10 d 后污染及存活情况(表 1)结果显示, 随着消毒时间延长, 污染率逐渐降低, 其中 A6 的污染率最低, 但因消毒时间过长对外植体造成了伤害, 也影响了其存活率(64%)。因此, 综合考虑太白杨外植体茎段的污染率和存活率, A5 的存活率(74%)显著高于其它各处理, 且具有较低的茎段污染率(16%), 认定为太白杨外植体茎段的最佳消毒处理组合。

表 1 不同消毒时间对外植体灭菌效果的影响

Table 1 Effects of different sterilizing time on explant sterilization

编号	处理方法	接种数	污染率(%)	存活率(%)
Number	Treatment method	Number of explants	Contamination rate (%)	Survival rate (%)
A1	75% Ethanol 30 s+2% NaClO 4 min	50	36 ^a	62 ^{bc}
A2	75% Ethanol 30 s+2% NaClO 8 min	50	22 ^b	68 ^{ab}
A3	75% Ethanol 30 s+2% NaClO 12 min	50	18 ^{bc}	58 ^c
A4	75% Ethanol 50 s+2% NaClO 4 min	50	26 ^{ab}	60 ^{bc}
A5	75% Ethanol 50 s+2% NaClO 8 min	50	16 ^{bc}	74 ^a
A6	75% Ethanol 50 s+2% NaClO 12 min	50	12 ^c	64 ^b

注: 小写字母分别表示在 0.05 水平的差异显著性

Note: The lowercase letters indicate the significant difference at the level of 0.05, separately

1.2 不同浓度激素对外植体启动率的影响

通过上述最佳消毒组合处理外植体, 培养 20 d 后, 观察其启动情况(表 2)。当 6-BA 浓度为 0.1 mg/L 时, 随着 NAA 浓度增大启动率也逐步升高, 但总体启动率偏低, 诱导的腋芽细弱且生长慢(图 1A); 当 6-BA 浓度为 0.5 mg/L 时, 外植体上腋芽的总体启动率均在 80%以上, 诱导的腋芽生长快, 其中 B5 的叶片伸展, 浓绿, 茎最粗壮, 长势最好, 其启动率达到 90% (图 1B); 当培养基 6-BA 浓度升至 1 mg/L 时, 外

植体上腋芽的总体启动率明显降低，虽然生长较快，但从生芽较多，叶片畸形且变红，外植体基部产生的愈伤组织较大。最终筛选出的最佳启动培养基为：1/2MS+0.5 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA。

表 2 不同浓度激素对外植体启动率的影响

Table 2 Effects of different hormone concentrations on the initiation rate of explants

编号	6-BA (mg/L)	NAA (mg/L)	接种数	启动率(%)	启动情况
Number			Number of explants	Starting rate (%)	Starting situation
B1	0.1	0.05	30	16.7 ^e	芽生长最慢, 茎细弱, 长势弱 Buds grow slowest, stems thin and weak
B2	0.1	0.1	30	23.3 ^{dc}	芽生长慢, 茎细弱, 长势弱 Buds grow slow, stems thin and weak
B3	0.1	0.2	30	30 ^{cd}	芽生长慢, 茎细弱, 长势弱 Buds grow slow, stems thin and weak
B4	0.5	0.05	30	86.7 ^a	芽生长快, 叶片伸展, 浓绿, 茎粗 Buds grow fast, leaves extend, stems thick
B5	0.5	0.1	30	90 ^a	芽生长最快, 叶片伸展, 浓绿, 茎最粗壮 Buds grow fastest, leaves extend, stems thickest
B6	0.5	0.2	30	83.3 ^{ab}	芽生长快, 叶片小, 茎伸长 Buds grow fast, leaves small, stems elongated
B7	1	0.05	30	66.7 ^b	芽生长快, 茎粗 Buds grow fast, stems thick
B8	1	0.1	30	53.3 ^{bc}	芽生长快, 茎粗, 叶片畸形变红 Buds grow fast, stems thick, leaves malformed and red
B9	1	0.2	30	46.7 ^c	芽生长快, 茎一般, 基部愈伤组织较大 Buds grow fast, stems grow in general, base callus big

注: 小写字母分别表示在 0.05 水平的差异显著性

Note: The lowercase letters indicate the significant difference at the level of 0.05, separately

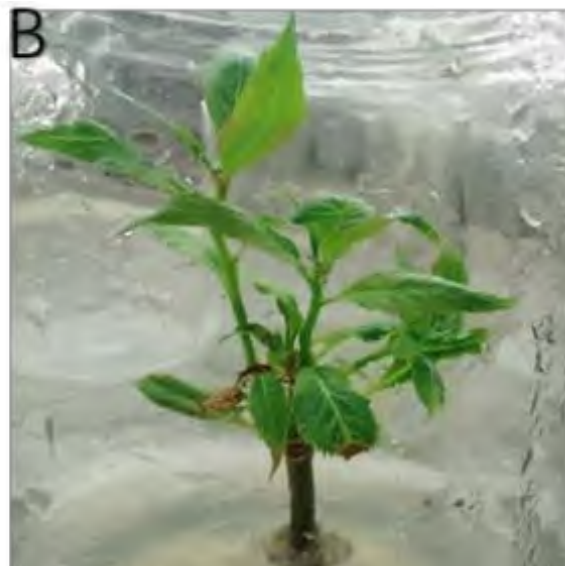
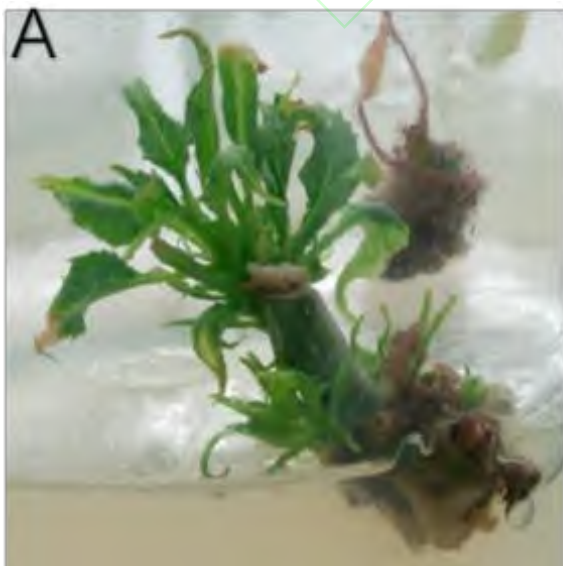


图 1 不同浓度激素对外植体启动率的影响

注: A: 1 mg/L 6-BA+0.2 mg/L NAA 诱导的腋芽; B: 0.5 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA 诱导的腋芽

Figure 1 Effects of different hormone concentrations on the initiation rate of explants

Note: A: Axillary buds induced by 1 mg/L 6-BA+0.2 mg/L NAA; B: Axillary buds induced by 0.5 mg/L 6-BA+0.1 mg/L NAA

1.3 不同浓度激素对腋芽增殖的影响

剪下由太白杨外植体茎段启动培养得到的腋芽, 接种到含不同浓度 6-BA 和 IBA 的组合培养基中诱导丛生芽, 接种 25 d 后, 统计丛生芽的生长情况(表 3)。实验结果显示: 6-BA 对太白杨腋芽增殖系数影响较大, 当 6-BA 浓度为 0.1 mg/L 时, 增殖系数最低, 且芽的生长状态不佳(图 2A)。当 6-BA 浓度为 0.5 mg/L 时, 增殖系数最高, 芽的状态最佳, 当 IBA 浓度为 0.3 mg/L 时, C5 培养基的增殖系数达到最高, 生长状态最佳(图 2B)。因此, 筛选出最佳的增殖培养基为: 1/2MS+0.5 mg/L 6-BA+0.3 mg/L IBA。

表 3 不同浓度激素对腋芽增殖的影响

Table 3 Effects of different hormone concentrations on the proliferation of adventitious buds

编号 Number	6-BA (mg/L)	IBA (mg/L)	增值系数 Proliferation rate	不定芽生长状态 Bud growth status
C1	0.1	0.1	1.5 ^d	不定芽增殖少, 生长慢 Adventitious buds proliferate few, grow slow
C2	0.1	0.3	2.2 ^{cd}	不定芽增殖少, 生长慢 Adventitious buds proliferate few, grow slow
C3	0.1	0.5	1.7 ^d	不定芽增殖少, 生长慢, 部分芽发黄 Adventitious buds proliferate few, grow slow, with some buds yellow
C4	0.5	0.1	5.3 ^{ab}	不定芽增殖多, 生长一般 Adventitious buds proliferate many, grow in general
C5	0.5	0.3	7.1 ^a	不定芽增殖最多, 芽绿色健壮, 生长快 Adventitious buds proliferate most, buds green and robust, grow fast
C6	0.5	0.5	6.2 ^{ab}	不定芽增殖多, 芽绿, 生长快 Adventitious buds proliferate many, buds green and robust, grow fast
C7	1	0.1	3.6 ^{bcd}	不定芽增殖少, 生长慢 Adventitious buds proliferate few, grow slow
C8	1	0.3	4.8 ^b	不定芽增殖少, 芽弱, 生长一般 Adventitious buds proliferate few, buds weak, grow in general
C9	1	0.5	4.3 ^{bc}	不定芽增殖少, 芽小, 部分叶片尖端枯萎 Adventitious buds proliferate few, buds small, with some leaf tips withered

注: 小写字母分别表示在 0.05 水平的差异显著性

Note: The lowercase letters indicate the significant difference at the level of 0.05, separately

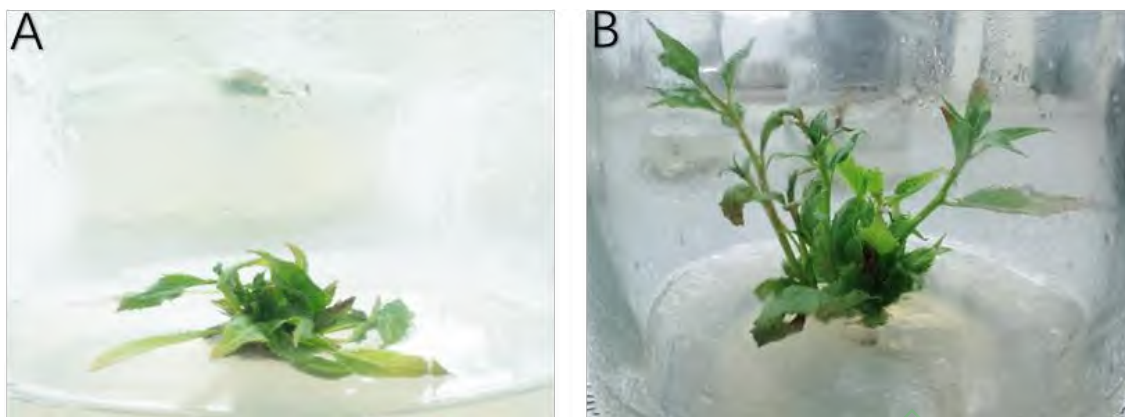


图 2 不同浓度激素对腋芽增殖的影响

注: A: 0.1 mg/L 6-BA+0.5 mg/L IBA 增殖的不定芽; B: 0.5 mg/L 6-BA+0.3 mg/L IBA 增殖的不定芽

Figure 2 Effects of different hormone concentrations on the proliferation of axillary buds

Note: A: Adventitious buds proliferation by 0.1 mg/L 6-BA+0.5 mg/L IBA; B: Adventitious buds proliferation by 0.5 mg/L 6-BA+0.3 mg/L IBA

1.4 不同浓度激素和培养基对生根的影响

将增殖得到的不定芽转接到生根培养基中, 观察并记录其生长情况。培养 7 d 后, 芽的基部出现白色凸起, 继续培养 21 d 后, 统计增殖苗的生根情况(表 4)。实验结果表明: 用 MS 和 WPM 培养基时, 组培苗长势弱(图 3B), 根细弱, 主根少(图 3D)。当用 1/2MS 培养基时, 组培苗根系粗壮, 主根多, 并随着生长素 IBA 浓度的增加, 根的生长速度加快(表 4)。在 D6 培养基中, 组培苗生根率达到最高(94.2%), 平均根条数最多(8 根), 根粗壮, 生长速度快, 且根呈辐射状(图 3C), 植株生长状态好, 叶片大(图 3A)。筛选得出最优的生根培养基为: 1/2MS+0.3 mg/L IBA。

表 4 不同因素对生根率的影响

Table 4 Effects of different factors on the rooting rate

编号	培养基类型	IBA (mg/L)	生根率	平均主根条数	生长状态
Number	Medium type		Rooting rate (%)	Average number of main roots	Starting status
D1	WPM	0.1	22.8 ^e	2	根纤细, 白色, 生长慢 Roots slender, white, grow slow
D2	WPM	0.2	28.6 ^{de}	3	根纤细, 主根少, 生长慢 Roots slender, with few main roots, grow slow
D3	WPM	0.3	34.2 ^{de}	3	根纤细, 主根少, 生长慢 Roots slender, with few main roots, grow slow
D4	1/2MS	0.1	74.2 ^b	6	根粗, 主根多, 生长快 Roots thick, with more main roots, grow fast
D5	1/2MS	0.2	85.7 ^{ab}	6	根粗, 主根多, 生长快 Roots thick, with more main roots, grow fast
D6	1/2MS	0.3	94.2 ^a	8	根粗, 粉红色, 主根多, 生长快 Roots thick, pink, with more main roots, grow fast
D7	MS	0.1	40 ^{ede}	3	根细, 主根少, 生长一般

D8	MS	0.2	45.7 ^{cd}	5	Roots slender, with few main roots, grow in general 根细, 主根少, 生长一般
D9	MS	0.3	51.4 ^c	5	Roots slender, with few main roots, grow in general 根细, 主根少, 生长一般
					Roots slender, with few main roots, grow in general

注: 小写字母分别表示在 0.05 水平的差异显著性

Note: The lowercase letters indicate the significant difference at the level of 0.05, separately

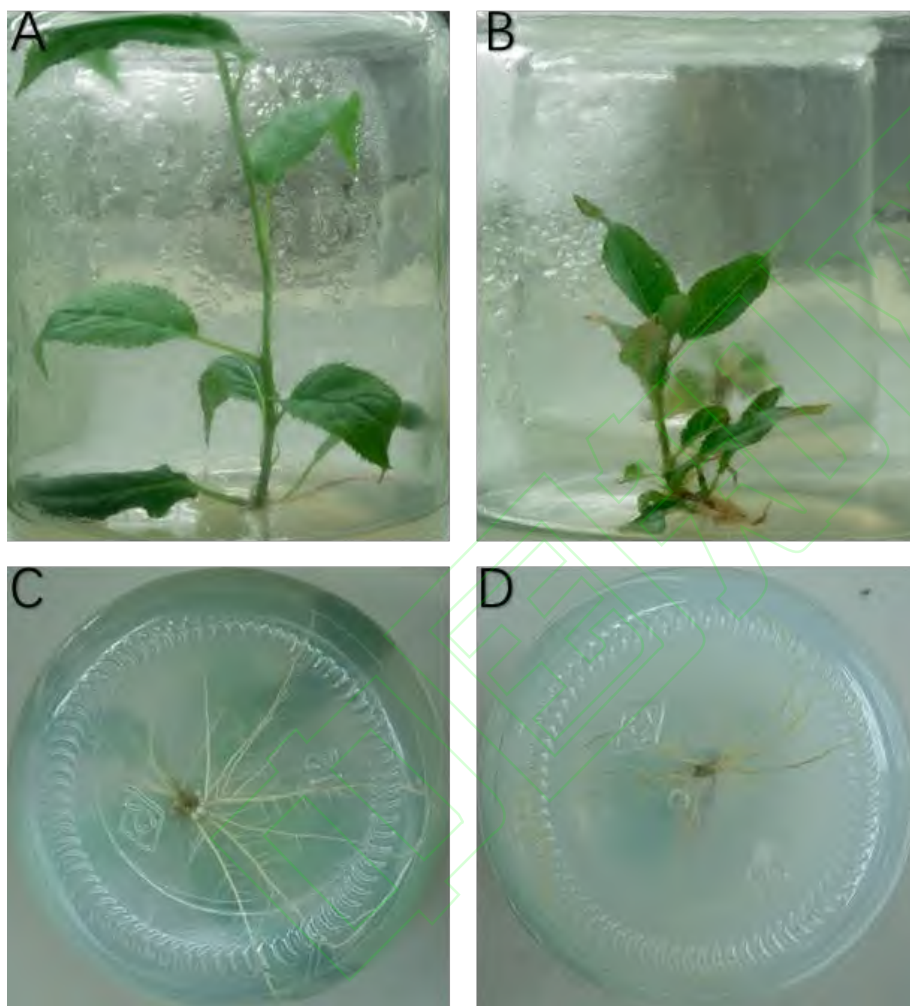


图 3 不同因素对生根率的影响

注: A: 1/2MS+0.3 mg/L IBA 诱导的生根苗; B: MS+0.3 mg/L IBA 诱导的生根苗; C: 1/2MS+0.3 mg/L IBA 诱导的根系; D: MS+0.3 mg/L IBA 诱导的根系

Figure 3 Effects of different factors on the rooting rate

Note: A: Rooted plantlets induced by 1/2MS+0.3 mg/L IBA; B: Rooted plantlets induced by MS+0.3 mg/L IBA; C: Root system induced by 1/2MS+0.3 mg/L IBA; D: Root system induced by MS+0.3 mg/L IBA

2 讨论

污染是组织培养过程中最先遇到的问题, 当选用茎段作为供试外植体时, 其消毒难度通常高于其它外植体(李键等, 2010); 若污染率过高, 将会导致后期实验无法进行, 因此选择正确的消毒方式至关重要。本实验使用 75%酒精 50 s+2% NaClO 8 min 的组合, 消毒效果最佳。随着两种消毒剂作用的时间增长, 污

染率下降、存活率先上升后下降，由此可见消毒时间增加虽然降低了污染率，同时也对植物本身造成了伤害，导致更多外植体死亡。因此，应在消毒前优化外植体选择，如可将野外采集的杨树枝条先在温室条件下进行培养，选用新抽的嫩茎作为组织培养的材料以减少外植体本身的含菌量，从而缩短消毒时间，实现更高的存活率。提高前期存活率是提高组培效率的关键，本实验消毒后的存活率为 74% 高于张赫岩等(2020)金叶杨 70% 的存活率，可能是其用 2% NaClO 消毒时间过长导致。

在建立植物组织培养再生体系时，植物激素中的细胞分裂素、生长素及不同组合对外植体的诱导分化起重要作用(吴秀燕和张鸽香, 2017)。通过研究不同配比激素(6-BA, NAA 和 IBA)对太白杨再生的影响，发现无论是诱导腋芽生长还是增殖，较低浓度 6-BA 均存在诱导效率和增殖效率较低的情况，这与桑萨尔珠拉等(2020)对新疆杨增殖研究中的结果相似。本研究发现较低浓度 6-BA 诱导出的太白杨不定芽生长缓慢、徒长小叶，茎不伸长；而较高浓度 6-BA 诱导的丛生芽虽数量较多，但是叶片会发红畸变，有些叶片甚至出现尖端枯死。由此可见，6-BA 与其他植物激素相似，存在最适作用浓度，即低浓度促进、高浓度抑制，该现象与张玉等(2012)、张小红等(2002)、覃林海等(2017)等研究结果相似。综上，本研究认为太白杨外植体腋芽启动和增殖培养中最适的 6-BA 浓度约为 0.5 mg/L。

在植物组织培养中，向培养基中加入一定量的生长素有利于诱导根的生长(Pandey et al., 2011)。通过研究不同类型培养基在不同浓度 IBA 条件下太白杨的生根情况发现，最佳生根组合为 1/2MS+0.3 mg/L IBA，生根率可达 94.2%。杜晓艳等(2011)的研究中分别使用不同浓度的 NAA 和 IBA 诱导青杨生根，当 IBA 浓度为 0.3 mg/L 时，生根数最多(6~7 条)，质量最佳，与本研究所得结果(8 条)相似，可见青杨派树种在同浓度 IBA 诱导下生根情况类似。本研究将不同浓度的 IBA 作为外源激素筛选出最佳生根培养基配方，后期还可配合多种其它激素，通过进一步优化激素配比，以实现太白杨组培苗更高的生根率。

综上，本研究建立了完整的太白杨组织培养再生体系，不仅为太白杨造林提供了育苗手段，更为后期研究太白杨遗传转化体系提供理论基础和技术支持。

3 材料与方法

3.1 实验材料

供试植株为一年生太白杨，采自陕西省宝鸡市太白山(107°90'N, 34°12'E)，温室种植条件为室温 25 °C，光周期 16 h 光照/8 h 黑暗，待其长出嫩茎后，剪下待用。

3.2 外植体消毒

将太白杨嫩茎作为原材料，去除叶片及叶柄后，将其剪为 2 cm 左右茎段(每个茎段带 1~2 个腋芽)作为外植体，流水冲洗 2 h；后续工作在超净工作台中进行：首先用 75%酒精进行漂洗(设置 30 和 50 s 2 个时间梯度)，无菌水涮洗 3~4 遍后用 2% NaClO 进行消毒(设置 4, 8, 12 min 3 个时间梯度)，再用无菌水涮洗 5~6 遍，最后用无菌滤纸吸去外植体表面水分后备用。共设 6 (2×3)个处理，每个处理 50 个茎段，接种 10 d 后观察并记录外植体生长及污染情况等。

3.3 启动培养

选用上述最佳消毒时间处理外植体，将外植体接种到 1/2MS 培养基上，分别添加 6-BA (0.1, 0.3, 0.5

mg/L)和 NAA (0.05, 0.1, 0.2 mg/L), 共 9 个处理(表 2), 每个处理 30 个茎段, 培养条件: 温度 25 °C, 光照 12 h/d, 光强 4 000 lx。20 d 后, 观察并记录腋芽的生长情况和启动情况。

3.4 增殖培养

以腋芽为材料, 以 1/2MS 为基本培养基, 分别添加 6-BA (0.1, 0.3, 0.5 mg/L)、IBA (0.1, 0.2, 0.3 mg/L), 共 9 个处理(表 3), 每个处理接种 15 个腋芽。培养条件同上。接种 25 d 后, 观察并记录增殖系数。

3.5 生根培养

剪取增殖培养后生长健壮、株高 2 cm 以上的增殖苗, 将其接种到生根培养基上。所用基本培养基类型为 WPM、1/2MS、MS, 添加 IBA (0.1, 0.2, 0.3 mg/L), 共 9 个处理(表 4), 每个处理接种 35 棵增殖苗, 培养条件同上。30 d 后, 观察并记录根系的生长情况, 并计算生根率。

3.6 数据处理分析

应用 Microsoft Excel 2020 进行数据统计和数据分析。

作者贡献

骆泽煜是本研究的实验设计者和实验研究的执行人, 完成数据分析, 论文初稿的写作; 彭子嘉、熊朝伟和王斌参与实验设计, 实验结果分析; 余仲东是项目的构思者及负责人, 指导实验设计、数据分析、论文写作与修改。全体作者都阅读并同意最终的文本。

致谢

本研究由国家自然科学基金(31670650)资助。

参考文献

- Bai Y.E., Wu R.H., Dai J.L., and Wu Y.T.N., 2019, Research progress on tissue culture of poplar, *Anhui Nongye Daxue Xuebao (Journal of Anhui Agricultural University)*, 46(3): 466-470. (白玉娥, 乌日罕, 代金玲, 乌云塔娜, 2019, 杨树组织培养研究进展, *安徽农业大学学报*, 46(3): 466-470.)
- Du X.Y., Han S.Y., Liang G.L., and Qi L.W., 2011, Establishment of an efficient regeneration system of *Populus cathayana* Rehd. var. *Qinghai*, *Linye Kexue Yanjiu (Forest Research)*, 24(6): 701-706. (杜晓艳, 韩素英, 梁国鲁, 齐力旺, 2011, 青海青杨高效再生体系的建立, *林业科学研究*, 24(6): 701-706.)
- Guo Y.L., Tian H., Zhang Q.M., Ding H.X., He Z.H., Li Q.X., Yang F.M., Zhang Y.Z., and Gao Y.F., 2019, Obtainment of transgenic tobacco with *Populus euphratica* *PeBAK1;2* gene and analysis of *Pst* DC3000 resistance, *Jiyinzuxue yu Yingyong Shengwuxue (Genomics and Applied Biology)*, 38(10): 4626-4634. (郭垚霖, 唐海, 张秋媚, 丁红霞, 何增辉, 李琦瑕, 杨丰铭, 张元珠, 高永峰, 2019, 转胡杨 *PeBAK1;2* 基因烟草的获得及对丁香假单胞杆菌抗性的分析, *基因组学与应用生物学*, 38(10): 4626-4634.)
- Hu B., Fan J.F., Gao J.S., and Zhou Y.X., 2009, One-year-old seedling traits of *Populus deltoides* hybrids with *P. cathayana*, *P. szechuanica*, and *P. purdomii*, *Zhejiang Linxueyuan Xuebao (Journal of Zhejiang Forestry College)*, 26(6): 778-783. (胡斌, 樊军锋, 高建设, 周永学, 2009, 美洲黑杨与青杨、川杨和卜氏杨人工杂交及杂种苗生长和抗病性状测定, *浙江林学院学报*, 26(6): 778-783.)
- Kong L.T., Ren G.X., Wang D.X., Guo Y.X., Hu Y.N., Tan H.Y., and Yang G.H., 2011, Niche of dominant species in *Populus purdomii* community in Wulongdong National Forest Park, *Xibei Nongye Xuebao (Acta Agriculture Boreali-Occidentalis Sinica)*, 20(10): 145-149, 167. (孔令童, 任广鑫, 王得祥, 郭垚鑫, 胡有宁, 谭胡燕, 杨改河, 2011, 五龙洞国家森林公园太白杨林优势种群生态位, *西北农业学报*, 20(10): 145-149, 167.)
- Li J., Li J.J., Wu C.Z., Hong W., Ling H., Fan H.L., and Xie A.Q., 2010, Selection and sterilization of explant of *Tripterium wilfordii* in tissue culture, *Zhongnan Linye Keji Daxue Xuebao (Journal of Central South University of Forestry & Technology)*, 30(8): 18-21. (李键, 李建鹏, 吴承祯, 洪伟, 林晗, 范海兰, 谢安强, 2010, 雷公藤组织培养外植体消毒和选择, *中南林业科技大学学报*, 30(8): 18-21.)
- Pandey A., Tamta S., and Giri D., 2011, Role of auxin on adventitious root formation and subsequent growth of cutting raised plantlets of *Ginkgo biloba* L., *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 3(4): 142-146.
- Qin L.H., Wei S.J., Wang F., Jiang S.H., Huang J.G., Xu Y.Y., and Yang M., 2017, Effects of different media on the seedling growth and physiology in *Cunninghamia lanceolata*, *Xibei Linxueyuan Xuebao (Journal of Northwest Forestry University)*, 32(3): 122-127. (覃林海, 韦素婕, 王芳, 蒋书华, 黄建国, 徐圆圆, 杨梅, 2017, 不同培养基对红心杉组培苗增殖及其生理的影响, *西北*

- 林学院学报, 32(3): 122-127.)
- Sang S.E.Z.L., Dai J.L., Wu R.H., Bao G.R., and Bai Y.E., 2020, Establishment of Tissue Culture Regeneration System of *Populusalba* var. *pyramidalis* Bge, Fenzi Zhiwu Yuzhong (Molecular Plant Breeding), 18(8): 2663-2670. (桑萨尔珠拉, 代金玲, 乌日罕, 包国荣, 白玉娥, 2020, 新疆杨组培再生体系建立, 分子植物育种, 18(8): 2663-2670.)
- Shi J.C., Chen B., Chen L.F., and Li Y.X., 2021, Establishment of regeneration system of *Populus tometosa* shoots, Jiangsu Nongye Kexue (Jiangsu Agricultural Sciences), 49(14): 50-55. (石进朝, 陈博, 陈兰芬, 李彦侠, 2021, 阳光毛白杨带芽茎段再生体系的构建, 江苏农业科学, 49(14): 50-55.)
- Sithixay P., Sheng K.C., Yu Z.D., Zheng W., Yu D., and Cao Z.M., 2019, Effects of Methyl Methane Sulfonate (MMS) treatment on rust resistance of *Populus purdomii*, Linye Kexue Yanjiu (Forest Research), 32(6): 80-89. (Phongsavath Sithixay, 沈阔程, 余仲东, 郑伟, 余丹, 曹支敏, 2019, 甲基磺酸甲醛(MMS)处理对太白杨抗锈性的影响, 林业科学研究, 32(6): 80-89.)
- Sun H.Y., Xin Q.W., Ma Z.H., and Lan S.R., 2019, Establishment of plant regeneration system from in vitro leaves of *Populus×euramericana* 'zhonghong', Zhongnan Linye Keji Daxue Xuebao (Journal of Central South University of Forestry & Technology), 39(4): 28-31. (孙红英, 辛全伟, 马志慧, 兰思仁, 2019, 中红杨离体叶片植株再生体系建立, 中南林业科技大学学报, 39(4): 28-31.)
- Tian C.M., Wang X.L., Yu L., and Han Z., 2019, A review on the studies of molecular interaction between forest trees and phytopathogens, Nanjing Linye Daxue Xuebao (Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition), 45(1): 1-12. (田呈明, 王笑连, 余璐, 韩珠, 2021, 林木与病原菌分子互作机制研究进展, 南京林业大学学报: 自然科学版, 45(1): 1-12.)
- Wang Y., Chen Y.F., Chang X.H., Wang X., Li N., and Gao Y.F., 2017, Heterologous overexpression of *PeDWF4* gene in *Populus euphratica* enhance tolerance of tobacco to abiotic stress, Jiyinzuxue yu Yingyong Shengwuxue (Genomics and Applied Biology), 36(10): 4242-4249. (王阳, 陈永富, 常晓涵, 王璇, 李娜, 高永峰, 2017, 异源过表达胡杨 *PeDWF4* 基因提高烟草对非生物胁迫的耐性, 基因组学与应用生物学, 36(10): 4242-4249.)
- Wu X.Y., and Zang G.X., 2017, Study on embryo culture and rapid propagation in vitro of *Chionanthus virginicus*, Zhiwu Shengli Xuebao (Plant Physiology Journal), 53(2): 227-233. (吴秀燕, 张鸽香, 2017, 美国流苏离体胚的组织培养与快速繁殖, 植物生理学报, 53(2): 227-233.)
- Yu Z.D., and Cao Z.M., 2005, A renewed DNA extraction method for molecular study of *Melampsora larici-populina*, Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 33(11): 155-158.
- Yu Z.D., Peng S.B., Ren Z.Z., Wang D.M., and Cao Z.M., 2011, Infection behaviour of *Melampsora larici-populina* on the leaf surface of *Populus purdomii*, Agricultural Sciences in China, 10(10): 1562-1569.
- Zeng D.P., 2002, Review of current situation of research and control on poplar diseases in China, Zhongguo Senlin Bingchong (Forest Pest and Disease), 21(1): 20-26. (曾大鹏, 2002, 我国杨树病害的研究现状与防治, 中国森林病虫, 21(1): 20-26.)
- Zhang Y., Li Y.M., Zhang H.C., Wang L.M., Wang H.J., and Zang G.X., 2012, Study on protocorn-like body induced from the leaves of *Phalaenopsis amabilis*, Henan Nongye Kexue (Journal of Henan Agricultural Sciences), 41(2): 126-128, 135. (张玉, 李艳敏, 张和臣, 王利民, 王慧娟, 张鸽香, 2012, 蝴蝶兰叶片诱导类原球茎初探, 河南农业科学, 41(2): 126-128, 135.)
- Zhang X.H., Zhang H.Y., Wu J., Min D.H., Kang B., and Li J.C., 2002, Effects of TDZ on callus induction, bud proliferation and growth of *Toona sinensis*, Xibe Nonglin Keji Daxue Xuebao (Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition), 30(5): 35-39. (张小红, 张红燕, 武军, 闵东红, 康冰, 李军超, 2002, TDZ 对香椿愈伤组织诱导及芽增殖生长等的影响, 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 30(5): 35-39.)
- Zhang H.Y., Ye D.M., Lin T., Peng P., Hua J.W., and Yu X.Q., 2020, Construction regeneration system of *Populus nigra* cv. 'Jinye' tissue culture, Beifang Yuanyi (Northern Horticulture), (9): 97-103. (张赫岩, 叶冬梅, 林涛, 彭鹏, 华佳文, 于晓倩, 2020, 金叶杨组织培养再生体系的建立, 北方园艺, (9): 97-103.)