

引文格式: 张帆, 王鸿, 张雪冰, 等. 吲哚丁酸对桃砧木 GF677 不定根形成过程中生理生化指标的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1025–1031. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202303056](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202303056)

吲哚丁酸对桃砧木 GF677 不定根形成过程中生理生化指标的影响*

张帆, 王鸿**, 张雪冰, 陈建军

(甘肃省农业科学院 林果花卉研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 【目的】明确激素诱导对无性系砧木不定根形成的影响。【方法】以清水为对照组(CK), 分别用 200、500、800 和 1100 mg/L 吲哚丁酸(3-indole butyric acid, IBA)处理桃无性系砧木 GF677 的 1 年生插穗基部, 研究其扦插生根过程中生理生化指标的变化。【结果】经 200 mg/L IBA (T_1) 诱导的根系效果指数显著大于其他处理 ($P<0.05$), 生根率达 94.63%。处理组插穗全氮(total nitrogen, TN)、全磷(total phosphorus, TP)和全钾(total potassium, TK)含量均呈下降趋势, 降幅均大于 CK; 插穗多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和吲哚乙酸氧化酶(indoleacetic acid oxidase, IAAO)活性先增强后减弱, 吲哚乙酸(indole acetic acid, IAA)含量先升高后降低, 上述 4 个指标均在不定根形成期(21 d)出现峰值, 且变幅最大为 T_1 处理; 处理组细胞分裂素(cytokinin, CTK)含量逐渐下降, 且以 T_1 处理降幅最大; 处理组乙烯(ethylene, ETH)含量缓慢升高, 且以 T_1 处理变幅最小。相关性分析显示: 生根率与插穗 TN、TP、TK 和 CTK 含量极显著负相关 ($P<0.01$), 与 IAA 含量、IAAO 活性和 PPO 活性极显著正相关 ($P<0.01$)。【结论】 T_1 处理可显著提高插穗酶活性并加速 IAA 合成, 说明 200 mg/L IBA 能更好地调节氧化酶和内源激素水平, 促进不定根形成。

关键词: 无性系砧木; 扦插生根; 营养成分; 氧化酶; 激素

中图分类号: S662.101

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2023)06-1025-07

Effects of 3-Indole Butyric Acid (IBA) on the Physiological and Biochemical Indexes of Adventitious Root Formation in Peach Rootstock GF677

ZHANG Fan, WANG Hong, ZHANG Xuebing, CHEN Jianjun

(Institute of Fruit and Floriculture Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Purpose] To clarify the effects of hormone induction on the formation of adventitious root of clonal rootstocks. [Methods] Clear water was used as the control (CK), the bases of 1-year-old spikes of peach clonal rootstock GF677 were treated with 200, 500, 800 and 1100 mg/L 3-indole butyric acid (IBA), the physiological and biochemical indexes changes during the rooting process of its cuttings were studied. [Results] The root induction effect index of 200 mg/L IBA treatment (T_1) was significantly higher than that of other treatments ($P<0.05$), the rooting rate reached 94.63%. The

收稿日期: 2023-04-03

修回日期: 2023-09-20

网络首发日期: 2023-11-22

*基金项目: 国家自然科学基金项目(32360717); 甘肃省农业科学院科技成果转化(2022GAAS-CGZH06);

国家桃产业技术体系(CARS-30-1-6)

作者简介: 张帆(1976—), 女, 新疆石河子市人, 博士, 副研究员, 主要从事果树育种与栽培生理调控研究。E-mail: zhfan528@163.com

**通信作者 Corresponding author: 王鸿(1973—), 男, 甘肃灵台人, 博士, 研究员, 主要从事果树育种与栽培生理研究。E-mail: wanghong@gsagr.ac.cn

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20231122.0943.001>



contents of total nitrogen (TP), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) of cuttings showed a downward trend, with a decrease greater than that of CK. The activities of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD), and indoleacetic acid oxidase (IAAO), and the content of indole acetic acid (IAA) in cuttings increased first and then decreased, and the peak value appeared at the formation stage of adventitious root (21 days), with the maximum amplitude of T_1 treatment. The content of cytokinin (CTK) in the treatment groups gradually decreased, with T_1 treatment showing the largest decrease. The content of ethylene (ETH) showed a slow increase, and the T_1 treatment showed the smallest variation. Correlation analysis results showed that the rooting rate was extremely significantly negatively correlated with the contents of TN, TP, TK, and CTK ($P<0.01$), and extremely significantly positively correlated with IAA content, and the activities of IAAO and PPO ($P<0.01$). [Conclusion] T_1 treatment increases the enzyme activity of cuttings significantly, and accelerates the synthesis of IAA. It indicates that the exogenous hormone 200 mg/L IBA can better regulate its oxidase and endogenous hormone levels and promote adventitious root formation.

Keywords: clonal rootstock; cuttings rooting; nutrients; oxidase; endogenous hormones

“十四五”是桃 (*Prunus persica* L.) 产业发展的关键阶段, 新老果园将面临大面积更新, 产业亟需质量较高的苗木^[1]。桃砧木产业正在经历由传统实生砧木向自根砧的变革^[2]。中国长期使用实生砧木, 尽管嫁接育苗价格低廉, 但存在易使后代发生变异、性状分离、形成的新群体在遗传上具有不稳定性、苗木整齐度差和果品商品性低等问题^[1], 因此, 实生砧木已不能满足市场需求。无性系砧木不但可以克服实生嫁接苗生理年龄小、挂果迟的缺陷, 而且树体一致性强, 果实商品性高, 是发达国家主要的生产模式, 也是中国桃产业发展的必然趋势^[3]。在欧洲国家, 桃育苗已用无性系砧木代替实生砧木, 在组培和扦插等无性繁殖技术方面取得了一定的进展^[2]。尽管国外桃砧木组培快繁技术较为成熟, 但国内还没有桃砧木无性繁殖生产技术体系, 故尚未推广普及; 加之桃属无性系繁育中较难生根的树种之一, 使桃砧木无性繁育技术发展受到限制, 严重影响了桃产业的发展, 减慢了中国优良桃砧木成为商品推广应用的进程。桃砧木无性繁育技术研发是目前桃产业发展亟待解决的重要问题之一, 因此, 明确影响桃无性系砧木繁育不定根的关键因素, 解决桃砧木无性繁殖生根率极低这一重大科学问题, 对现代可持续果业的发展至关重要。

不定根属茎源根系, 其形成受诸多因素影响, 如激素、扦插环境和插穗性状等。不定根从根原基发生、分化、发育、生根成活, 其过程长

且复杂^[1-2]。已有研究明确了扦插不定根形成受植物遗传物质、插条生理状况和木质化程度、扦插时间、环境、基质及外源激素等综合因素的影响^[4], 但对桃无性系砧木 GF677 激素诱导不定根形成过程中生理生化指标动态变化的系统研究鲜有报道。本研究在前期试验的基础上, 以桃无性系砧木 GF677 绿枝为试材进行扦插试验, 通过对比分析吲哚丁酸 (3-indole butyric acid, IBA) 处理插穗生根过程中生理生化指标的变化, 进而解决不定根发生困难的普遍问题, 对于提高桃优良砧木品种的快速繁殖技术、加速不定根发生能力的遗传改良和促进桃产业发展具有重要理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年 7 月中旬在甘肃省农业科学院进行。选取无病虫害的桃无性系砧木 GF677 当年生中部和中上部枝条 (直径 0.5~1.0 cm) 制成 15~20 cm 的插穗, 保留 3~5 个半叶, 用裁纸刀在基部靠近基芽处削成 40°~45°斜面, 沿斜面向上削去长 1.5 cm 的韧皮, 顶端削平。选择透气性和疏松性都较好的大颗粒珍珠岩, 使用前用 800 倍 80% 代森锰锌灭菌, 装至规格为 50 穴、深 8 cm 的扦插育苗穴盘中。

1.2 试验处理

试验设置 5 个处理, 分别为清水对照 (CK)、200 mg/L IBA (T_1)、500 mg/L IBA (T_2)、800 mg/L

IBA (T₃) 和 1 100 mg/L IBA (T₄)。将削好的插穗基部用不同质量浓度 IBA 蘸根 10 s, 放置 1 min 后再速蘸 5 s; 扦插至育苗穴盘中, 深度为 3~5 cm。扦插完成后使用全光弥雾系统 (2.2 kW、380 V 进口 ABB 电机直连原装进口英特泵 12 L 流量带时间控制器, 浙江温州) 及时进行雾化, 雾化时间为 15 s/3 min, 配合叶面感应器 (湿度+温度, RS458 输出, 江苏常州), 使插穗叶面始终保持湿润状。

1.3 生根效果的观察和测定

扦插后定期观察插条变化, 每隔 7 d 取样观察愈伤形成情况; 35 d 时 (移栽前) 调查生根指标, 每次取样 100 个插穗, 用水冲洗干净, 统计生根数量和生根率, 测量不定根长度, 重复 3 次, 取平均值。按公式计算根系效果指数: 根系效果指数=平均根长×生根数量×生根率/生根插穗数。

1.4 生理指标测定

扦插前第 1 次采样, 扦插后每隔 7 d 取样 1 次, 试验至 28 d 最后 1 次取样, 试验期间共采样 4 次, 每次取样后迅速剥取插穗基部 1 cm 范围内的皮层, 混合后分为 9 组。其中 3 组用液氮冷冻后于 -20 ℃ 低温冰箱保存, 参考王小玲等^[5]的方法, 对吲哚乙酸氧化酶 (indoleacetic acid oxidase, IAAO)、过氧化物酶 (peroxidase, POD) 和多酚氧化酶 (polyphenol oxidase, PPO) 活性进行测定, 每个处理重复 3 次。另外 3 组用自来水冲洗, 再用去离子水冲洗 3 遍, 整个洗涤时间不超过 3 min; 准确称取样品 50.0 g 阴干, 参考卢楠等^[6]的方法测定全氮 (total nitrogen, TN)、全磷 (total phosphorus, TP) 和全钾 (total potassium, TK) 含量, 每处理重复 3 次。最后 3 组插穗皮层用于测定内源激素生长素吲哚乙酸 (indole acetic acid, IAA)、细胞分裂素 (cytokinin, CTK) 和乙烯 (ethylene, ETH) 含量, 每处理放入预冷研钵

中, 加入少许石英砂, 加入提取液 1 mL, 冰浴研磨成匀浆, 转入 10 mL 离心管中, 再用提取液 4 mL 分 2 次冲洗研钵, 转入离心管中, 4 ℃ 冰箱保存 3 h 以上备用^[6]; 再采用间接酶联免疫吸附法 (ELISA) 测定各激素含量, 试剂盒由上海酶联生物科技有限公司提供, 每处理重复 3 次。

1.5 数据统计与分析

采用 WPS 2019 和 SPSS 19.0 统计分析软件处理数据; 采用 LSD 法比较差异显著性。

2 结果与分析

2.1 生根效果

不同质量浓度 IBA 诱导无性系砧木 GF677 扦插的生根效果存在差异。诱导期 (0~7 d), 插穗保持鲜活状态, 大部分切口处未发生明显变化, 部分韧皮部开始膨大; 愈伤形成期 (7~14 d), 切口处愈伤组织发生分化, 愈伤组织形成; 不定根形成期 (14~21 d), 插穗叶片普遍色泽暗淡, 部分有新叶长出, 切口处愈伤组织增多, 并开始有根尖露出; 21 d 后, 生出大量不定根, 且生根类型以愈伤组织生根为主, 极少有皮部生根; 28 d 后, 切口开始大量生根, 平均生根率达到 36.48% (图 1)。50 d 的调查显示: T₁ 处理生根率达 94.63%, 平均根长、最大根长和根系效果指数均显著大于其他处理 (表 1)。

2.2 营养成分动态变化

由图 2 可知: GF677 扦插不定根的形成过程中, 插穗全氮含量呈下降趋势, 4 个 IBA 处理的降幅均大于 CK, 且下降幅度与 IBA 质量浓度呈反比, T₁ 处理的下降幅度最大。插穗全磷和全钾含量的变化趋势与全氮一致。

2.3 激素动态变化

GF677 扦插中, 插穗激素在不同不定根形成



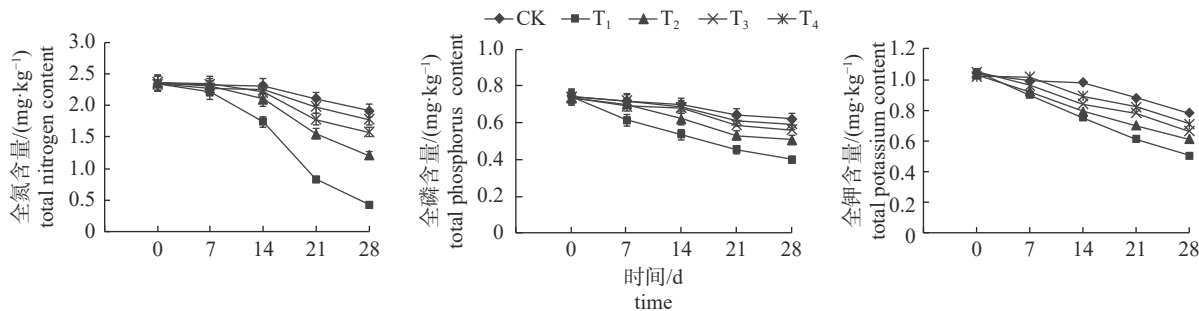
图 1 GF677 扦插的生根效果

Fig. 1 Rooting effect of GF677 cuttings

表 1 不同处理对插穗生根的影响
Tab. 1 Effects of different treatments on the rooting of cuttings

处理 treatments	愈伤率/% callus rate	生根数 rooting number	生根率/% rooting rate	平均根长/cm average root length	最大根长/cm maximum root length	根系效果指数 root effect index
T ₁	97.47±0.67 a	11.30±0.80 a	94.63±0.15 a	9.87±0.35 a	15.13±0.25 a	1.32±0.10 a
T ₂	62.63±3.19 b	8.10±0.72 b	54.27±1.05 b	4.13±0.21 b	8.13±0.65 b	0.36±0.02 b
T ₃	50.40±0.80 c	6.13±0.76 c	45.43±0.61 c	3.50±0.10 c	6.60±0.56 c	0.17±0.01 c
T ₄	40.30±0.21 d	3.64±0.24 d	25.36±0.14 d	2.86±0.25 d	3.40±0.21 d	0.11±0.31 d
CK	14.13±1.56 e	2.00±0.25 e	9.40±0.30 e	2.63±0.15 e	2.17±0.38 e	0.01±0.01 e

注：T₁. 200 mg/L IBA, T₂. 500 mg/L IBA, T₃. 800 mg/L IBA, T₄. 1100 mg/L IBA, CK. 清水对照；不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: CK. water control; different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).



注：CK. 清水对照, T₁. 200 mg/L IBA, T₂. 500 mg/L IBA, T₃. 800 mg/L IBA, T₄. 1100 mg/L IBA; 下同。
Note: CK. water control; the same as below.

图 2 GF677 不定根形成过程中营养成分变化

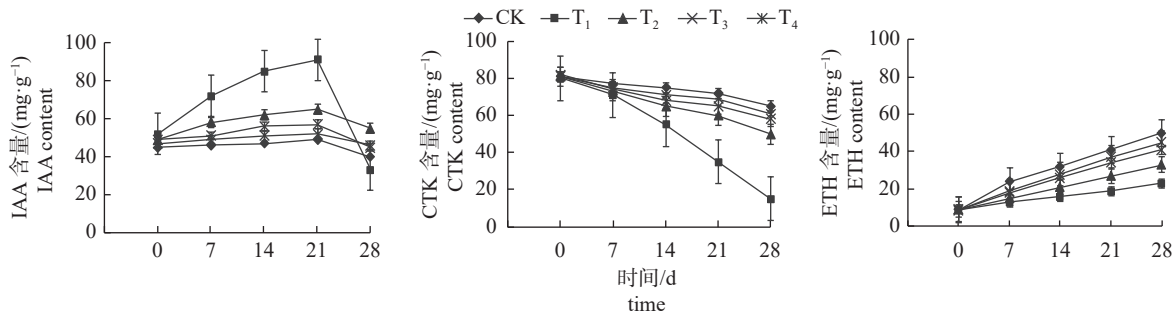
Fig. 2 Changes of nutrient components during the formation of GF677 adventitious root

时期的变化不尽相同 (图 3)。随着 GF677 不定根发生至延长, IAA 含量呈先升高后降低的变化趋势, 21 d 时出现峰值, 且 T₁ 处理峰值最大、CK 处理最小, 28 d 时降至最低值, 且以 T₁ 处理下降幅度最大。CTK 含量的变化趋势与 IAA 不同, 呈逐渐下降的趋势, 且 T₁ 处理较其他处理降幅大, CK 处理的降幅最小。在不定根形成和伸长期, ETH 含量的变化与 IAA 和 CTK 含量的

变化相反, 呈缓慢上升趋势, 试验结束时达到最大值, 不同时期 T₁ 处理的值小于其他处理, 且变幅最小。

2.4 氧化酶活性动态变化

由图 4 可知: 经激素诱导, 插穗 PPO 活性呈先增强后减弱的变化趋势, 21 d 时出现峰值, 而 CK 处理在整个试验过程中变幅不大, 处理间 PPO 活性从大到小为 T₁>T₂>T₃>T₄>CK; 插穗 POD 活



注：IAA. 吲哚乙酸; CTK. 细胞分裂素; ETH. 乙烯。
Note: IAA. indole acetic acid; CTK. cytokinin; ETH. ethylene.

图 3 GF677 扦插不定根形成过程中插穗激素变化

Fig. 3 Hormonal changes during cutting of adventitious roots formation of GF677

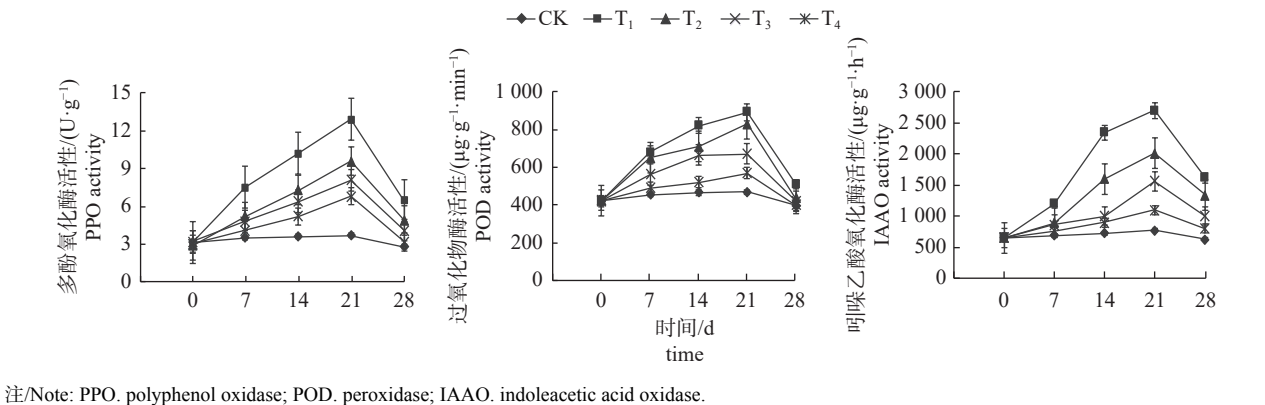


图 4 GF677 扦插不定根形成过程中插穗氧化酶活性变化
Fig. 4 Changes of oxidase activity during cutting of adventitious root formation of GF677

性也呈先增强后减弱的变化趋势, 21 d 时出现峰值, 且 T₁ 处理的变幅最大, 28 d 后各处理间差异不显著 ($P>0.05$); IAAO 活性也呈先增强后减弱的变化趋势, 除 CK 处理外, 其他处理均在 21 d 达到峰值, 且 T₁ 处理变幅最大。

2.5 扦插生根指标间的相关性

由表 2 可知: GF677 扦插生根指标之间呈线性关系。插穗 TN 与 TP、TK、CTK 呈极显著正相关, 此外, TN 还与除愈伤率外的其他指标呈显著或极显著负相关; TP 与 TK、CTK、ETH 呈极显著正相关, 与其他指标呈显著或极显著负相

关; TK 与 CTK 呈显著正相关, 与 ETH、PPO、POD、生根率呈极显著负相关, 与 IAAO 呈显著负相关; IAA 与各氧化酶活性、生根率呈极显著正相关, 与 CTK 和 ETH 呈显著负相关; CTK 与 ETH 呈极显著正相关, 与 PPO、生根率呈极显著负相关; ETH 与平均根长呈显著正相关; PPO 与 POD、IAAO、生根率呈极显著正相关; POD 与 IAAO、愈伤率呈极显著正相关; IAAO 与生根率呈极显著正相关; 愈伤率与生根数、生根率、平均根长、根系效果指数呈极显著正相关。说明桃无性系砧木 GF677 属愈伤组织生根。

表 2 GF677 扦插生根指标间的相关性													
Tab. 2 Correlation analysis among rooting indexes of GF677 cuttings													
	TP	TK	IAA	CTK	ETH	PPO	POD	IAAO	CR	RN	RR	ARL	REI
TN	0.915**	0.918**	-0.985**	0.971**	-0.979**	-0.993**	-0.918*	-0.966**	-0.862	-0.977**	-0.968**	-0.966**	-0.952**
TP		0.963**	-0.961**	0.961**	0.999**	-0.997**	-0.967**	-0.984**	-0.920*	-0.990**	-0.982**	-0.946*	-0.894*
TK			-0.945*	0.914*	-0.998**	-0.991**	-0.982**	-0.683*	-0.920**	-0.902**	-0.856**	-0.925**	-0.661
IAA				-0.772*	-0.604*	0.824**	0.856**	0.770**	0.280*	0.177*	0.958**	0.541*	0.940*
CTK					0.948**	-0.565**	-0.366*	-0.794*	-0.794	-0.912*	-0.907**	-0.965**	-0.885**
ETH						-0.003	-0.141	-0.036	0.340	0.324	0.271	0.360*	0.05
PPO							0.943**	0.928**	0.715**	0.508**	0.503**	0.539**	0.366**
POD								0.847**	0.543**	0.288	0.271	0.317	0.172
IAAO									0.826**	0.665**	0.636**	0.673**	0.495**
CR										0.925**	0.886**	0.915**	0.681**
RN											0.982**	0.926**	0.808**
RR												0.923**	0.860**
ARL													0.848**

注: TN. 全氮含量, TP. 全磷含量, TK. 全钾含量, IAA. 吲哚乙酸含量, CTK. 细胞分裂素含量, ETH. 乙烯含量, PPO. 多酚氧化酶活性, POD. 过氧化物酶活性, IAAO. 吲哚乙酸氧化酶活性, CR. 愈伤率, RN. 生根数, RR. 生根率, ARL. 平均根长, REI. 根系效果指数; “*”表示显著相关 ($P<0.05$), “**”表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: TN. total nitrogen content, TP. total phosphorus content, TK. total potassium content, IAA. indole acetic acid content, CTK. cytokinin content, ETH. ethylene content, PPO. polyphenol oxidase activity, POD. peroxidase activity, IAAO. indoleacetic acid oxidase activity, CR. callus rate, RN. rooting number, RR. rooting rate, ARL. average root length, REI. root effect index; “*” indicates significant correlation ($P<0.05$), “**” indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

3 讨论

3.1 激素与不定根的关系

内源激素 IAA、CTK 和 ETH 在桃无性系砧木 GF677 不定根形成过程中具有重要作用。本研究中,经不同质量浓度外源激素 IBA 诱导,GF677 插穗不定根形成过程中处理组 IAA 含量逐渐升高,可能是由于 IBA 刺激了插穗基部形成层细胞的活性,形成层细胞产生大量 IAA,促进韧皮产生大量愈伤组织,进一步形成根原基;若 IAA 含量无变化或较低,则只能形成愈伤组织,不能诱导不定根的形成,这一结果与敖红等^[7]的研究一致。待不定根延长时,IAA 含量呈下降趋势,分析其原因可能是 IAA 在插穗愈伤组织和根原基形成过程中逐渐被氧化,不定根形成后含量逐渐减少。因此,推测 IBA 诱导插条后不易被分解,但能刺激根原基生长点细胞的活性继而产生 IAA。有研究表明:较低浓度的 CTK 有利于不定根分化^[8],且根原基诱导初期 CTK 含量下降^[9],不定根形成后 CTK 含量增加^[10];而较高浓度的 CTK 有利于插穗不定根原基的诱导,促进愈伤组织形成以及不定根的伸长和生长^[11]。本研究中,桃砧木插穗在不定根诱导期和形成期 CTK 含量呈下降趋势,这可能与植物种类差异有关,其机理还需进一步深入研究。ETH 在植物 IAA 含量较高时会随之大量产生。有研究认为:ETH 可抑制不定根的形成^[12],且生根数量与 ETH 释放量成正比,但与不定根的形成无关^[10]。本研究发现:ETH 含量随扦插时间的延长而缓慢上升,且不同处理的生根率有所差异,可能是高浓度的 ETH 改变了 IAA 运输和代谢,从而影响 IAA 对不定根形成的诱导效应,ETH 仅是间接影响了不定根的形成,它与不定根的形成无直接关系。

3.2 氧化酶活性与不定根的关系

氧化酶可影响插穗不定根的发生^[1]。PPO 可通过酚类化合物的氧化作用影响不定根形成,与插穗不定根的发生密切相关^[2]。研究表明 PPO 对不定根的形成具有双重作用^[12]。TAHIR 等^[13]研究认为:PPO 活性与根原基形成极显著相关;尚文倩等^[14]研究发现:扦插后,插穗的 PPO 活性呈先升高后降低的变化趋势;也有学者发现扦插生根过程中 PPO 活性呈逐渐上升趋势^[15]。曹帮华等^[16]研究发现:桑树插穗的 PPO 活性与不定根密切相关,不易生根的插穗中 PPO 保持较低水平,影响

不定根形成,分析其原因可能是插穗中 PPO 与酚类形成醌类,导致插穗褐变,从而抑制不定根的发生。本研究中,在不定根诱导期和形成期,桃砧木 GF677 插穗的 PPO 活性成增加趋势,在不定根延长期呈下降趋势,与前人研究结果基本一致。BRITO 等^[17]认为插穗 POD 活性与不定根关系密切。研究表明:在长柄扁桃嫩枝扦插的插穗生根过程中,POD 活性在不定根的诱导期和表达期有 2 个活性高峰^[13];也有研究认为:难以生根的树种可能与扦插发生不定根时期的低 POD 活性有关^[18]。本研究表明:在不定根诱导期和形成期,桃砧木 GF677 插穗的 POD 活性成增加趋势,在不定根延长期呈下降趋势,这与前人研究结果相似。研究发现:不易生根的插穗中具有较高的 IAAO 活性,导致更多的 IAA 被降解,不利于生根^[2]。曹帮华等^[16]研究发现:插穗 IAAO 活性越高,生根率越低。颜廷武等^[19]研究发现:插穗愈伤组织形成阶段,IAAO 活性逐渐升高;但 IAAO 活性在不定根的诱导和表达期间下降,可促进插穗不定根的诱导和伸长。本研究中,无性系砧木 GF677 属难生根树种,经 IBA 诱导,插穗不定根诱导期和形成期 IAAO 活性保持较低水平,有利于插穗愈伤形成和不定根表达;随着插穗时间的延长,IAAO 活性在不定根形成期出现峰值,即不定根伸长期需要较高的 IAAO 氧化过多 IAA,使 IAA 含量降低,促进不定根伸长。

3.3 营养成分与不定根的关系

LAKEHAL 等^[10]认为插穗生根需要消耗大量营养成分和能量,特别是插穗生根和生长所必需的碳水化合物和氮素。已有研究认为:插穗 TN 含量与生根率呈正比,而与 TP 含量成反比^[7];外源激素处理能够促进插穗 TN 的再分配^[20]。本研究中,随着不定根的形成,插穗 TN、TP 和 TK 含量均呈下降趋势,且与生根率呈极显著负相关,与 MURTHY 等^[21]的研究结果一致。此外,TK 有助于贮藏物质的活化移动,促进细胞和器官主动吸水,为插穗不定根的孕育提供能量物质和结构物质,有利于不定根形成^[21-22]。

4 结论

扦插不定根的发生涉及外源信号感知与内外信号级联耦合,属极其复杂的非根器官发生过程。200 mg/L IBA 处理可显著提高桃插穗的酶活

性,加速 IAA 合成,通过调节插穗氧化酶和内源激素水平促进不定根的形成。

[参考文献]

- [1] 张帆,王鸿.桃硬枝扦插生根机理研究进展[J].植物生理学报,2019,55(11):1595. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2019.0102](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2019.0102).
- [2] MAO J P, NIU C D, LI K, et al. Cytokinin-responsive MdTCP17 interacts with MdWOX11 to repress adventitious root primordium formation in apple rootstocks[J]. The Plant Cell, 2023, 35(4): 1202. DOI: [10.1093/plcell/koac369](https://doi.org/10.1093/plcell/koac369).
- [3] 王力荣.我国桃产业现状与发展建议[J].中国果树,2021(10):1. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2021.10.001](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2021.10.001).
- [4] 张帆,王鸿.桃绿枝扦插研究进展[J].中国果树,2019(2):20. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2019.02.005](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2019.02.005).
- [5] 王小玲,高柱,余发新,等.观赏羽扇豆离体培养生根关联酶活性及可溶性蛋白含量变化规律研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2010,25(6):835. DOI: [10.16211/j.issn.1004-390x\(n\).2010.06.019](https://doi.org/10.16211/j.issn.1004-390x(n).2010.06.019).
- [6] 卢楠,孟丙南,孙宇涵,等.四倍体刺槐黄化嫩枝扦插生根过程生理生化分析[J].东北林业大学学报,2013,41(11):5. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2013.11.002](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2013.11.002).
- [7] 敖红,王昆,冯玉龙.长白落叶松插穗的内源激素水平及其与扦插生根的关系[J].植物研究,2002,22(2):190. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5102.2002.02.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5102.2002.02.014).
- [8] LIAO C Y. Advances on internal influence factors of adventitious rooting of forest trees[J]. Agricultural Science & Technology, 2017, 18(7): 1168. DOI: [10.16175/j.cnki.1009-4229.2017.07.005](https://doi.org/10.16175/j.cnki.1009-4229.2017.07.005).
- [9] BANNOUD F, BELLINI C. Adventitious rooting in *Populus* species: update and perspectives[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 668837. DOI: [10.3389/fpls.2021.668837](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.668837).
- [10] LAKEHAL A, BELLINI C. Control of adventitious root formation: insights into synergistic and antagonistic hormonal interactions[J]. Physiologia Plantarum, 2018, 165(1): 90. DOI: [10.1111/ppi.12823](https://doi.org/10.1111/ppi.12823).
- [11] LI S W. Molecular bases for the regulation of adventitious root generation in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 614072. DOI: [10.3389/fpls.2021.614072](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.614072).
- [12] MAO J P, ZHANG D, MENG Y, et al. Inhibition of adventitious root development in apple rootstocks by cytokinin is based on its suppression of adventitious root primordia formation[J]. Physiologia Plantarum, 2019, 166(2): 663. DOI: [10.1111/ppi.12817](https://doi.org/10.1111/ppi.12817).
- [13] TAHIR M M, MAO J P, LI S H, et al. Insights into factors controlling adventitious root formation in apples[J]. Horticulturae, 2022, 8(4): 276. DOI: [10.3390/horticulturae8040276](https://doi.org/10.3390/horticulturae8040276).
- [14] 尚文倩,王政,何松林,等.牡丹试管苗生根过程中内源 IAA 及相关酶活性的变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(2):129. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.02.017](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.02.017).
- [15] ZHAO Y Q, CHEN Y J, JIANG C, et al. Exogenous hormones supplementation improve adventitious root formation in woody plants[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 1009531. DOI: [10.3389/fbioe.2022.1009531](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1009531).
- [16] 曹帮华,扈红军,张大鹏,等.桑树硬枝扦插生根能力及其生根关联酶活性的研究[J].蚕业科学,2008,34(1):96. DOI: [10.3969/j.issn.0257-4799.2008.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.0257-4799.2008.01.019).
- [17] BRITO B P, JORI F, DWARKA R, et al. Transmission of foot-and-mouth disease SAT2 viruses at the wildlife-livestock interface of two major transfrontier conservation areas in Southern Africa[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7(26): 528. DOI: [10.3389/fmicb.2016.00528](https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00528).
- [18] 钱家连,李迎超,许慧慧,等.不同年龄栓皮栎嫩枝扦插生根及解剖学分析和酶活性变化[J].浙江农林大学学报,2023,40(1):107. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220143](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220143).
- [19] 颜廷武,陈光华,李光,等. ABT1 对蒙古栎插穗生根及营养物质含量和酶活性动态变化影响初探[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2022,43(6):34. DOI: [10.16853/j.cnki.1009-3575.2022.06.006](https://doi.org/10.16853/j.cnki.1009-3575.2022.06.006).
- [20] 张焕欣,董春娟,李福凯,等.植物不定根发生机理的研究进展[J].西北植物学报,2017,37(7):1457. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2017.07.1457](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2017.07.1457).
- [21] MURTHY H N, DANDIN V S, PAEK K Y. Tools for biotechnological production of useful phytochemicals from adventitious root cultures[J]. Phytochemistry Reviews, 2016, 15(1): 1. DOI: [10.1007/s11101-014-9391-z](https://doi.org/10.1007/s11101-014-9391-z).
- [22] 张宜春,刘同仇,谢振翅,等译.植物营养原理[M].北京:农业出版社,1997.

责任编辑:何馨成