

钱雪松, 黄人杰, 周俊成, 等. 烟草碳代谢产物及关键酶基因对移栽期的响应[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(6): 117–124.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.06.016

# 烟草碳代谢产物及关键酶基因对移栽期的响应

钱雪松<sup>1</sup>, 黄人杰<sup>1</sup>, 周俊成<sup>1</sup>, 彭三喜<sup>1</sup>, 郜军艺<sup>2</sup>, 熊晶<sup>2</sup>, 高焕晔<sup>1</sup>

(1. 贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质研究重点实验室, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省烟草公司毕节市公司, 贵州毕节 551700)

**摘要:**探究威宁黑石地区移栽期对云烟 87 大田期碳代谢产物含量、碳代谢酶活性及其关键基因表达量的影响, 为明确威宁黑石地区最适宜的移栽时期, 提高烟叶品质提供理论依据。以云烟 87 为试验材料, 采用随机区组试验设计, 移栽期设 4 个水平: T1(4 月 10 日)、T2(4 月 20 日)、T3(4 月 30 日)、T4(5 月 10 日), 2022 年于毕节市威宁地区开展田间试验, 在大田不同生育时期测定云烟 87 碳代谢产物及关键酶基因对移栽期的响应。结果表明, 云烟 87 旺长期、现蕾期烟叶中还原糖含量呈先升后降的趋势, 且随生育进程推进, 各移栽期处理的还原糖含量也呈先升后降的趋势, T2 处理烟叶还原糖含量在多数生育期处于较高水平; 各移栽期处理的总糖含量的变化规律在各生育期都不尽相同, T2 处理烟叶总糖含量在多数生育期处于较高水平; 淀粉含量则随移栽期推迟, 在生育前期呈先降后升的趋势, 在生育后期呈先降后升再下降的趋势。碳代谢酶活性方面, 移栽后 30~70 d,  $\alpha$ -淀粉酶( $\alpha$ -Amylase)活性最低的处理均为 T3 或 T4 处理, T2 处理活性均为最高或第二高; 在同一生育时期内, 蔗糖合成酶(SS)、蔗糖转化酶(INV)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性最高的多数为 T3、T4 处理。碳代谢关键酶基因表达量方面,  $\alpha$ -淀粉酶基因(*Nt $\alpha$ -Amylase*)、蔗糖酶合成酶基因(*NtSS*)表达量总体以较早移栽处理(4 月 10 日、4 月 20 日)较高。相关性结果分析表明, 碳代谢产物含量、碳代谢酶活性及其关键酶基因表达量之间在不同生育时期均有不同程度的联系。综上, 威宁黑石地区 4 月 20 日移栽, 有利于碳代谢活动的进行。

**关键词:**烟草; 移栽期; 碳代谢产物; 关键酶; 基因; 表达量

**中图分类号:** S572.01; S572.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2024)06-0117-08

烟草(*Nicotiana tabacum* L.)是茄科烟草属一年生草本植物, 作为我国重要的经济作物, 对促进我国经济发展具有重要意义。烟叶的品质和产量直接影响烟草行业发展和烟草种植户收益, 烟叶品质是多因素(遗传因素、生态环境和栽培技术)协同作用的结果, 其中栽培技术是影响烟叶优质高产的关

键因素之一<sup>[1-3]</sup>。栽培技术能保证且调控烤烟碳代谢过程, 从而影响烤烟碳代谢产物的积累及风味的形成<sup>[4]</sup>。移栽期是通过调整烟株的大田生长期所处的气候条件, 进而影响烤烟生长发育、产量和品质<sup>[5-8]</sup>。因此, 选择适宜的移栽期, 可充分利用气候资源, 最大限度地促进优质烟叶形成, 对烤烟品质改良具有重要意义<sup>[9]</sup>。

陈义强等的研究表明, 移栽期过于提前, 烟株在大田前期将遭遇低温, 易导致提早开花, 碳代谢活动受到抑制, 最终导致产量和品质降低<sup>[10]</sup>。若移栽期过于推迟, 烟株苗期环境温度较高, 烟苗生长加快, 不利于碳代谢产物积累, 烟叶不能正常成熟,

收稿日期: 2023-07-22

基金项目: 贵州省烟草公司毕节市公司项目(编号: 2022520500240190)。

作者简介: 钱雪松(1997—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail: 2503844123@qq.com。

通信作者: 高焕晔, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail: 294248298@qq.com。

1001-1005.

[28] 李昊阳, 夏继桥, 杨连玉, 等. 植物多酚的抗氧化能力及其在动物生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2013, 25(11): 2529-2534.

[29] 李集勤, 屠乃美, 易镇邪, 等. 烟草覆盖栽培研究现状与展望[J]. 作物研究, 2009, 23(5): 349-354.

[30] Zhang L F, Wang H S, Xiong W, et al. Two new antibacterial isindolin-1-ones from the leaves of cigar tobacco[J]. Chemistry

of Natural Compounds, 2022, 58(6): 1114-1117.

[31] 朱金峰, 王涵, 王国峰, 等. 植物生长物质对不同烘烤工艺下烟叶多酚含量及其酶活性的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(3): 36-41.

[32] Cai W, Zhang Q Y, Zhu P C, et al. High throughput screening of key functional strains based on improving tobacco quality and mixed fermentation[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 11: 111108766.

烤烟品质显著降低<sup>[11]</sup>。相关研究表明,烤烟碳氮代谢强度、协调性及其动态变化均影响着烟叶化学成分含量和协调性、香吃味(感官评价中的香气特性、口感特性)等<sup>[12]</sup>。碳代谢过程中,各种酶活性的变化对碳代谢产物含量起重要调节作用<sup>[13]</sup>。潘飞龙等研究发现,蔗糖合成酶、蔗糖转化酶、蔗糖磷酸合成酶活性对蔗糖积累均有不同程度的影响,相关酶活性及基因表达量的差异可能是造成碳代谢产物差异的重要原因<sup>[14-15]</sup>。随着移栽期的后移,烟株的大田生育期相对推迟,整个生育期相应缩短,碳代谢强度受到影响,从而对烤烟总糖、还原糖、淀粉等碳代谢产物有不同程度的影响<sup>[16-23]</sup>。目前,相关研究对象大多是以低海拔为生态背景的烟区,对威宁黑石这种地处乌蒙山脉中部,属亚热带季风湿润气候的高海拔烟区研究较少,同时还缺乏大田期碳代谢产物与碳代谢关键酶活性及其基因表达量的相关性研究。

本研究以云烟 87 为材料,通过测定威宁黑石地区不同移栽期处理下云烟 87 大田碳代谢产物含量、关键酶活性及关键基因表达量,明确该地区最适宜的移栽时期,为威宁黑石优质烟叶生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年在贵州省威宁县黑石头镇河坝村烟草科技园(26.754 725°N,103.995 142°E)进行,海拔 2 218 m,年均气温 10.9℃,年总积温 3 996℃,年降水量 981 mm,年无霜期 182 d;试验地块地势平坦,肥力均匀,排水优良,上一个种烟季节未发生青枯病、黑胫病等病害,距离公路 300 m 以上。试验地土壤为黄壤土,土壤 pH 值为 5.88,耕层土壤有机质含量 11.32 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾的含量分别为 89.43、11.08、241.37 mg/kg。以绿肥为前作。

1.2 试验材料

供试品种为云烟 87。

1.3 方法

1.3.1 试验设计 不同移栽期处理设置 4 个水平: T1(4 月 10 日移栽)、T2(4 月 20 日移栽)、T3(4 月

30 日移栽)、T4(5 月 10 日移栽)。田间试验采取随机区组试验设计,3 次重复,每个小区种植 4 行(行距 1.1 m,株距 0.5 m),每行 25 株,试验地四周设置保护行。烟苗采用分期播种,以保证不同移栽期所用烟苗苗龄一致。其他栽培管理技术按所在基地单元生产技术方案执行(基肥 45 kg/hm<sup>2</sup>,N:P:K=9:13:24;提苗肥 3 kg/hm<sup>2</sup>,N:P:K=15:8:7;追肥 23 kg/hm<sup>2</sup>,N:P:K=13:0:26)。

1.3.2 测定项目

1.3.2.1 鲜烟叶碳代谢主要产物 大田期鲜烟叶碳代谢主要产物测定:各处理于团棵期、旺长期、现蕾期、成熟采烤期选择代表性烟株 3 株,取样后洗净擦干,分上部叶、中部叶、下部叶(相对部位),置于烘箱中 105℃杀青 30 min,再在 65℃下烘干至恒重。采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法测定烟叶总糖、还原糖、淀粉的含量。

1.3.2.2 碳代谢关键酶活性 各处理在烟株分别移栽后 30、40、50、60、70 d 进行取样,每个处理选择长势一致的烟株,采集烟株中部叶片(相对位置为烟株中部),相同叶位每株仅取 1 次,选取 9 个单株为一次样品采集,每 3 株混合为 1 个样本,3 次生物学重复,将上述烟叶分别沿主脉分为 2 份,迅速置于干冰中冻存,一份用于碳代谢相关酶活性的测定。采用 ELISA 检测试剂盒测定碳代谢相关酶[α-淀粉酶(α-amylase)、蔗糖合成酶(SS)、蔗糖转化酶(INV)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)]的活性。

1.3.2.3 碳代谢关键酶基因表达量 另一份烟叶用于碳代谢关键基因表达的测定。利用实时荧光定量 PCR(qRT-PCR)技术检测碳代谢关键基因[α-淀粉酶基因(Ntα-amylase)、蔗糖合成酶基因(NtSS)]的相对表达量。引物如表 1 所示,PCR 反应体系和程序按照 ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix(Vazyme,Q711)试剂盒进行。

1.4 气象条件检测

2022 年 4—9 月试验地点气象数据结果(图 1)表明,旬均气温在 7.1~19.6℃之间,呈波浪线形变化;4 月下旬、5 月中下旬、6 月上旬及 7 月上旬降水量比较充沛;4 月下旬日照时数最长。地下 5 cm 及

表 1 烟草碳代谢途径关键基因扩增引物序列

代谢途径	基因名称	引物序列(5'→3')
内参基因	L25	F:GAAGATTGAGGACAACAACACC;R:CCAAGCATCATAGTCAGGAC
碳代谢基因	Ntα-amylase	F:TATTGTTACTCGTCTGCTACCT;R:GTTCTTTTGCGACATCCTC
	NtSS	F:TATTGTTACTCGTCTGCTACCT;R:GTTCTTTTGCGACATCCTC

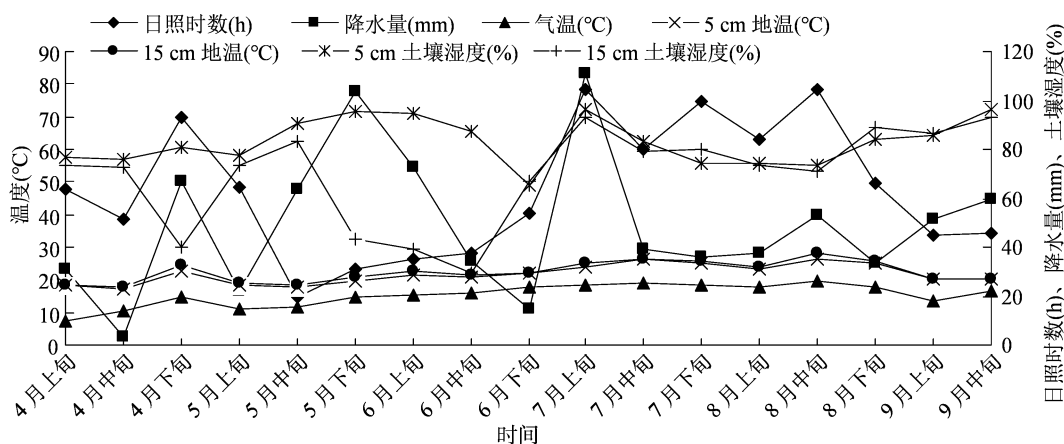


图1 2022 年威宁黑石科技园 4—9 月气象数据

地下 15 cm 土壤温度均在 22.1 °C 左右波动。不同土壤层湿度变化趋势总体一致。7 月上旬至 9 月中旬,地下 5、15 cm 土壤层湿度均呈凹峰变化,且各土壤层间湿度差异不大。

### 1.5 数据统计与分析

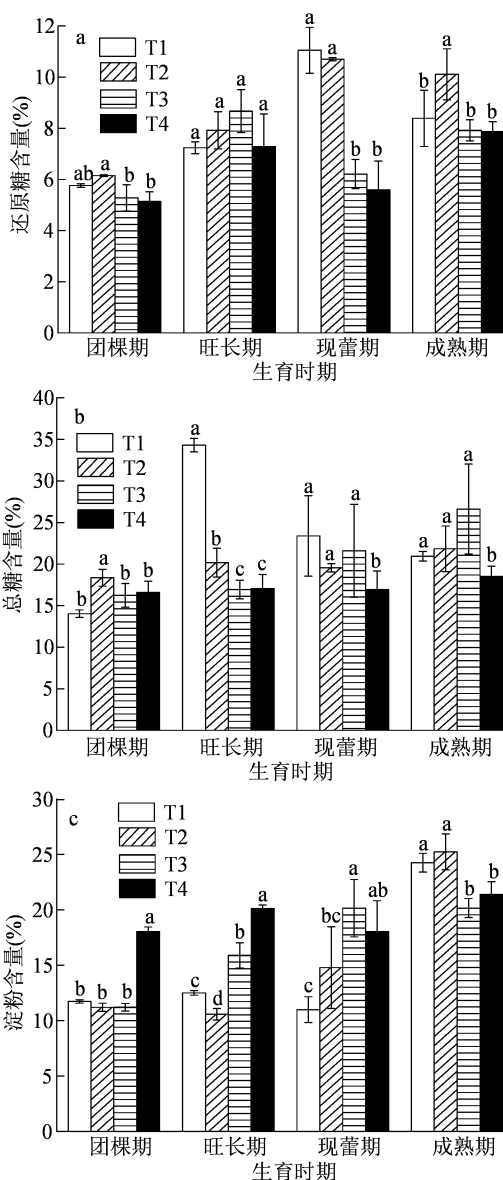
数据采用 Excel 2016 进行统计处理和制表, Origin 2021 进行制图,利用 SPSS 26 数据统计软件进行方差分析、相关性分析;处理间差异显著性比较采用邓肯氏法( $\alpha = 0.05$ 、 $\alpha = 0.01$ ),处理间相关性分析采用 Pearson 法,显著性水平为  $\alpha = 0.05$ ,极显著性水平为  $\alpha = 0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 移栽期对云烟 87 大田期碳代谢产物的影响

**2.1.1 移栽期对下部叶碳代谢产物的影响** 为明晰移栽期对烟苗下部叶碳代谢产物的影响,在团棵期、旺长期、现蕾期和成熟期进行下部叶取样,测定烟叶还原糖、总糖和淀粉的含量(图 2)。随着移栽期推迟,烟苗团棵期、现蕾期下部叶中还原糖含量下降,T1 和 T2 处理的还原糖含量显著高于 T3 和 T4 处理( $P < 0.05$ );成熟期烟苗下部叶还原糖含量以 T2 处理最佳,显著高于其他移栽期,含量达到  $(10.11 \pm 1.01)\%$ ;烟苗生育进程(现蕾期除外)中下部叶还原糖含量各移栽期均表现为先增加后减少。烟苗旺长期 T1 处理和团棵期 T2 处理下部叶总糖含量显著高于其他 3 个处理。T4 处理烟苗生育前期(团棵期、旺长期)下部叶淀粉含量显著高于其他移栽期处理;尽管 T1 和 T2 处理烟苗发育前期(团棵期、旺长期、现蕾期)下部叶淀粉含量较低,但在成熟期时,T1 和 T2 处理显著高于 T3 和 T4 处理。

**2.1.2 移栽期对中部叶碳代谢产物的影响** 为明



同一生育期柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同

图2 不同移栽期处理的大田期烟株下部叶碳代谢产物含量变化

晰移栽期对烟苗中部叶碳代谢产物的影响,在团棵期、旺长期、现蕾期和成熟期进行中部叶取样,测定烟叶还原糖、总糖和淀粉的含量(图3)。不同移栽期处理对烟苗生育前期(团棵期、旺长期)中部叶还原糖含量影响不大,对烟苗生育后期存在显著影响。现蕾期时,T1处理烟苗中部叶还原糖含量达到 $(9.27 \pm 0.43)\%$ ,T2处理达到 $(9.76 \pm 1.22)\%$ ,T3处理达到 $(10.15 \pm 1.01)\%$ ,均显著高于T4处理 $(6.25 \pm 1.23)\%$ ,而成熟期T3、T4处理显著高于T1、T2处理;不同移栽期处理烟苗中部叶还原糖含量存在共性,即旺长期和现蕾期快速积累,成熟期时含量降低。只有T1处理烟苗旺长期中部叶总糖含量显著高于其他3个处理,与上部叶的T1处理结果(图4)相似。不同移栽期烟苗中部叶淀粉主要在成熟期积累,其中T2处理的淀粉含量最高,为 $(27.12 \pm 0.90)\%$ ,显著高于其他处理,T3处理最低,为 $(15.10 \pm 0.91)\%$ 。

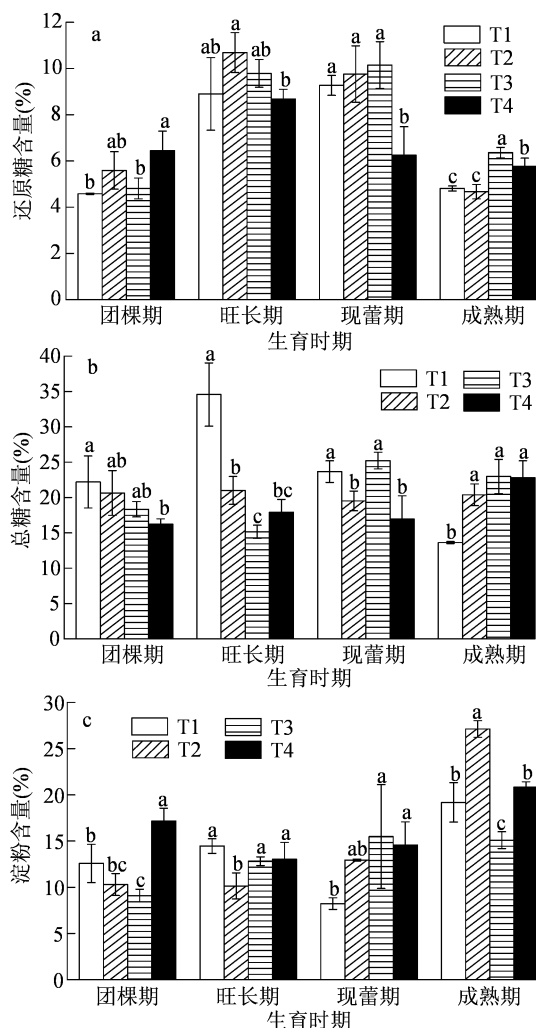


图3 不同移栽期处理的大田期烟株中部叶碳代谢产物含量变化

2.1.3 移栽期对上部叶碳代谢产物的影响 为明晰移栽期对烟苗上部叶碳代谢产物的影响,在团棵期、旺长期、现蕾期和成熟期进行上部叶取样,测定烟叶还原糖、总糖和淀粉的含量(图4)。烟草生育前期(团棵期、旺长期)上部叶还原糖含量以T2处理最高,后期各移栽期处理间无显著差异。不同移栽期处理烟苗上部叶总糖含量在团棵期表现出较大差异,T2处理最高,为 $(34.62 \pm 1.62)\%$ ,T3处理次之,为 $(21.54 \pm 1.93)\%$ ,T1、T4处理的含量较低,分别为 $(17.80 \pm 0.54)\%$ 、 $(15.78 \pm 0.14)\%$ ;T1处理烟苗旺长期总糖含量高于其他处理。淀粉含量在不同生育时期无明显变化规律。

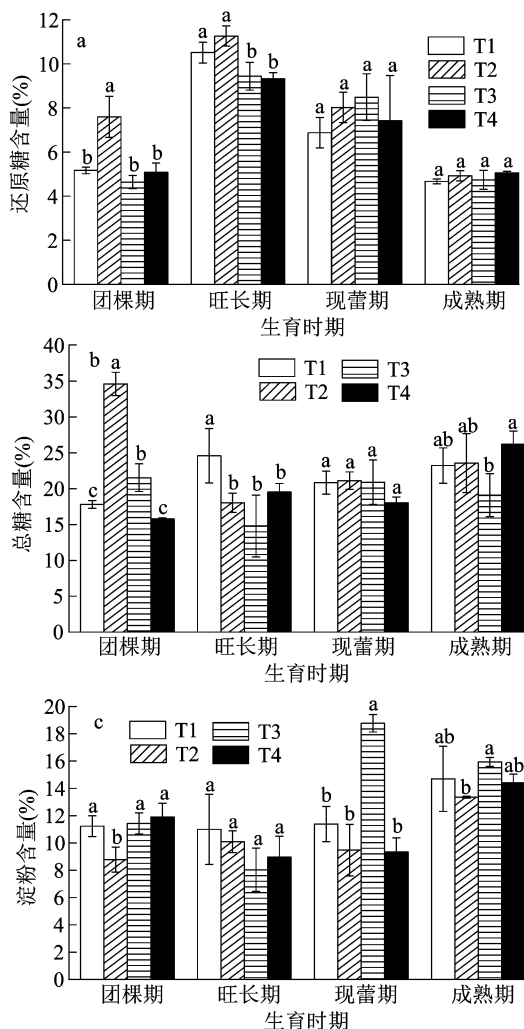


图4 不同移栽期处理的大田期烟株上部叶碳代谢产物含量变化

## 2.2 现蕾期与成熟采烤期碳代谢产物相关性分析

现蕾期碳代谢产物与成熟采烤期碳代谢产物相关性分析结果见表2,烤烟现蕾期总糖含量与成熟采烤期淀粉含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),现蕾期淀粉含量与成熟采烤期淀粉含量呈

显著负相关关系( $r = -0.359$ )。结果表明,烤烟现蕾期总糖含量、淀粉含量的变化对成熟期烟叶淀粉积累影响较为明显。

表 2 现蕾期碳代谢产物与成熟采收期碳代谢产物相关性分析

现蕾期 碳代谢产物	与成熟采收期碳代谢产物的相关系数		
	还原糖含量	总糖含量	淀粉含量
还原糖含量	-0.191	0.000	-0.270
总糖含量	-0.031	-0.185	0.450**
淀粉含量	-0.147	-0.191	-0.359*

注: \*、\*\* 分别表示相关性达显著 ( $P < 0.05$ )、极显著 ( $P < 0.01$ ) 水平。表 4 至表 6 同。

2.3 移栽期对碳代谢关键酶活性的影响

为明晰移栽期对烟苗碳代谢酶活性的影响,在烟苗移栽后 30、40、50、60、70 d 取样,测定  $\alpha$ -淀粉酶、蔗糖合成酶、蔗糖转化酶、蔗糖磷酸合成酶的活性,结果见图 5。 $\alpha$ -amylase 活性以 T1 处理的烟株活性较高,移栽后 30、60、70 d 烟株的  $\alpha$ -amylase 活性显著高于其他移栽期处理,T2 处理烟株在移栽

40 d 后  $\alpha$ -amylase 活性最高。T3 处理烟株在移栽后 30、40、50 d 的 SS 活性最高,分别为 1052.32、818.05、1 036.12 U/g;T4 处理烟株则在移栽 60 d 后 SS 活性达到 888.22 U/g,移栽 70 d 后达到 1 093.34 U/g。随着移栽期的推迟,烟株的 INV 活性总体呈增加趋势,而在移栽后 40 d 其活性则呈降低趋势;在移栽后 50、60、70 d,INV 活性总体较高的是 T4 处理烟株,分别为 327.24、321.84、297.68 U/g,T3 处理的 INV 活性在移栽后 50、60 d 最高;且各移栽期处理中 INV 活性总体均在移栽后 40~60 d 达到最高,INV 活性在进入旺长期(移栽后 30 d)后总体以较晚移栽的 T4 处理烟株较高。SPS 活性在移栽后 40 d 以较晚移栽烟株表现较好,在移栽后 30 d 是 T3 处理烟株表现最好,为 88.12 U/g,移栽后 40 d 是 T4 处理烟株表现最好,为 86.91 U/g;移栽后 50~60 d SPS 活性表现最好的是 T1 处理烟株,分别为 94.26、71.29 U/g,移栽后 30~70 d 总体表现较差的是 T2 处理烟株。

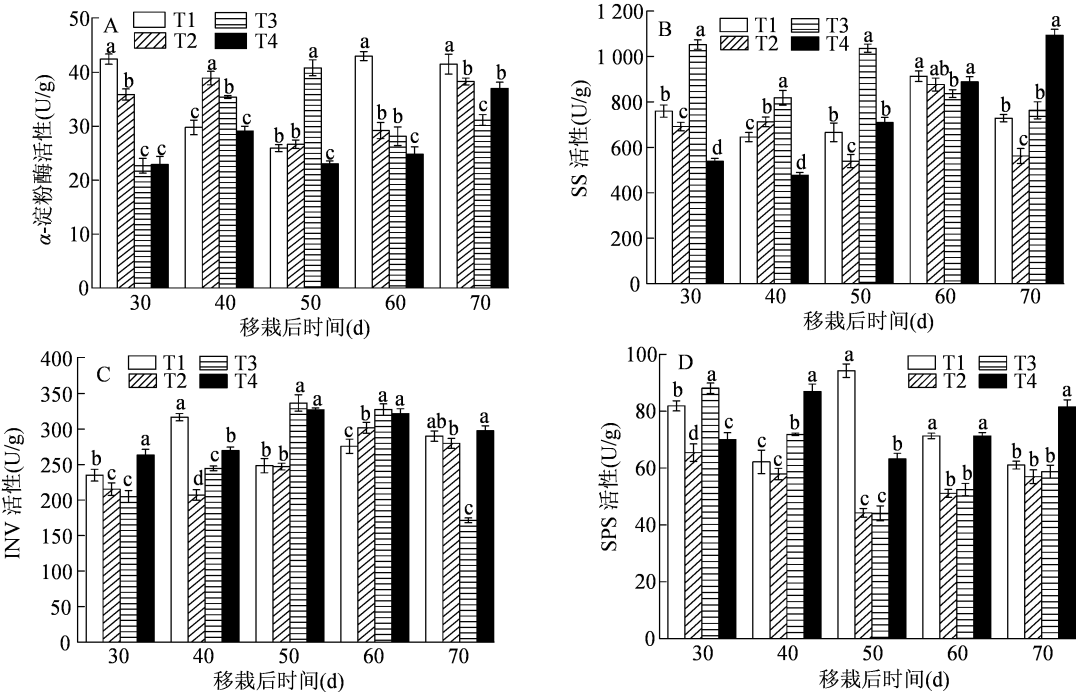


图5 不同移栽期处理的大田期烟株碳代谢关键酶活性变化

2.4 移栽期对碳代谢关键酶基因表达量的影响

$Nt\alpha$ -amylase 和  $NtSS$  这 2 个基因是烟草碳代谢途径中的关键基因,其表达量可以在一定程度上反映植株碳代谢强度。通过检测不同移栽期烤烟生长至 30、40、50、60、70 d 的碳代谢关键酶基因表达,进一步明晰移栽期对云烟 87 烟叶碳代谢的影响。qRT-PCR 结果如表 3 所示,T1 处理烟苗  $Nt\alpha$ -

amylase 和  $NtSS$  基因表达量均处于较高水平,T2 处理移栽后 30 d 表达量显著高于其他处理。

2.5 大田期碳代谢产物与碳代谢关键酶活性的相关性分析

对大田期碳代谢产物与碳代谢关键酶活性进行相关性分析,结果见表 4。在团棵期, $\alpha$ -amylase 活性与总糖含量、INV 活性与淀粉含量均呈极显著

表 3 不同移栽期各生育时期碳代谢关键酶基因表达量差异显著性分析

碳代谢基因	移栽期	不同移栽时间后碳代谢关键酶基因表达量(U/g)				
		30 d	40 d	50 d	60 d	70 d
<i>Ntα-amylase</i>	T1	1.00 ± 0.10b	0.08 ± 0.00a	0.96 ± 0.10a	1.73 ± 0.11a	0.81 ± 0.01a
	T2	1.39 ± 0.11a	0.04 ± 0.01b	0.17 ± 0.02b	0.16 ± 0.00b	0.42 ± 0.10b
	T3	0.14 ± 0.02c	0.08 ± 0.02a	0.18 ± 0.01b	0.15 ± 0.00b	0.51 ± 0.00b
	T4	0.16 ± 0.01c	0.05 ± 0.00b	0.20 ± 0.00b	0.13 ± 0.01b	0.39 ± 0.01b
<i>NtSS</i>	T1	1.00 ± 0.00b	9.15 ± 0.20a	0.42 ± 0.01b	0.43 ± 0.01a	1.62 ± 0.01a
	T2	1.75 ± 0.00a	0.32 ± 0.01b	0.25 ± 0.00c	0.14 ± 0.02b	0.55 ± 0.02c
	T3	0.16 ± 0.02d	0.32 ± 0.01bc	0.27 ± 0.01c	0.13 ± 0.00b	0.43 ± 0.02c
	T4	0.22 ± 0.01c	0.27 ± 0.01c	0.65 ± 0.03a	0.04 ± 0.01c	0.65 ± 0.02b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

正相关关系( $P < 0.01$ ),相关性系数均在 0.700 以上;SS 活性与还原糖含量显著负相关,与淀粉含量呈极显著负相关关系。在旺长期,SPS 活性与总糖含量呈极显著正相关关系, $r = 0.850$ ;SPS 活性与淀粉含量呈显著正相关关系, $r = 0.641$ ;INV 活性与总糖含量呈极显著负相关关系,相关系数  $r = -0.773$ 。现蕾后, $\alpha$ -amylase 活性与淀粉含量、SS

表 4 大田期碳代谢产物与碳代谢关键酶活性相关性分析

生育时期	碳代谢关键酶活性	相关系数		
		还原糖含量	总糖含量	淀粉含量
团棵期	$\alpha$ -amylase 活性	-0.376	0.715 **	-0.171
	SS 活性	-0.599 *	0.163	-0.756 **
	SPS 活性	-0.564	0.172	-0.387
	INV 活性	0.393	-0.317	0.940 **
旺长期	$\alpha$ -amylase 活性	0.206	-0.431	-0.034
	SS 活性	-0.159	-0.476	0.275
	SPS 活性	-0.543	0.850 **	0.641 *
	INV 活性	-0.267	-0.733 **	0.126
现蕾期	$\alpha$ -amylase 活性	-0.148	-0.196	-0.589 *
	SS 活性	-0.782 **	-0.387	0.258
	SPS 活性	-0.818 **	-0.635 *	0.237
	INV 活性	-0.505	-0.626 *	-0.377

活性与还原糖含量、SPS 活性与还原糖和总糖含量、INV 活性与总糖含量均为显著负相关关系。

2.6 大田期碳代谢产物与碳代谢关键酶基因表达量的相关性分析

对大田期碳代谢产物与碳代谢关键酶基因表达量进行相关性分析,结果见表 5。在团棵期,仅有 *Ntα-amylase* 表达量与总糖含量的相关性达到显著水平,相关系数  $r = 0.590$ ,而其他指标的相关性总体为低度相关。*NtSS* 表达量在旺长期对淀粉含量变化有较大影响,其相关性分析结果达到极显著水平,相关系数  $r = 0.900$ ;在现蕾期,*Ntα-amylase* 表达量与总糖含量呈显著正相关。

2.7 大田期碳代谢关键酶活性及其关键酶基因表达量的相关性分析

对大田期烤烟碳代谢关键酶基因表达量和碳代谢关键酶活性进行相关性分析,结果见表 6。烤烟移栽后 30 d,*Ntα-amylase* 表达量与  $\alpha$ -amylase 活性呈显著正相关关系,相关系数  $r = 0.861$ 。移栽后 50 d,*Ntα-amylase* 表达量与 SPS 活性呈显著正相关关系,相关系数  $r = 0.936$ 。移栽后 60 d,*Ntα-amylase*、*NtSS* 表达量与  $\alpha$ -amylase 活性之间

表 5 大田期碳代谢产物与碳代谢酶基因表达量相关性分析

生育时期	项目	相关系数		
		还原糖含量	总糖含量	淀粉含量
团棵期	<i>Ntα-amylase</i> 表达量	-0.152	0.590 *	-0.211
	<i>NtSS</i> 表达量	-0.092	0.532	-0.307
旺长期	<i>Ntα-amylase</i> 表达量	-0.386	0.557	0.202
	<i>NtSS</i> 表达量	0.514	-0.202	0.900 **
现蕾期	<i>Ntα-amylase</i> 表达量	-0.494	0.588 *	0.018
	<i>NtSS</i> 表达量	-0.458	0.508	0.118

表 6 不同移栽期碳代谢酶基因表达量与碳代谢酶活性相关性分析

移栽后时间 (d)	碳代谢酶活性	与碳带酶基因表达量的相关系数	
		<i>Ntα - amylase</i> 活性	<i>NtSS</i>
30	$\alpha - amylase$	0.861 *	0.767
	SS 活性	-0.226	-0.255
	INV 活性	-0.261	-0.280
	SPS 活性	-0.461	-0.557
40	$\alpha - amylase$ 活性	-0.340	-0.374
	SS 活性	0.409	0.058
	INV 活性	0.630	0.752
	SPS 活性	-0.055	-0.507
50	$\alpha - amylase$ 活性	-0.278	-0.62
	SS 活性	-0.221	-0.151
	INV 活性	-0.548	0.327
	SPS 活性	0.936 **	0.453
60	$\alpha - amylase$ 活性	0.976 **	0.960 **
	SS 活性	0.716	0.583
	INV 活性	-0.886 *	-0.896 *
	SPS 活性	0.564	0.339
70	$\alpha - amylase$ 活性	0.497	0.778
	SS 活性	-0.266	-0.076
	INV 活性	0.080	0.478
	SPS 活性	-0.365	-0.072

的正相关性系数均达到 0.9 以上,达极显著水平,而 *Ntα - amylase*、*NtSS* 表达量与 INV 活性的负相关系数均在 0.8 以上,达显著水平。

3 讨论

蒋代兵等研究发现,龙岩烟区烟株 2017 年 1 月 15 日移栽较常规的 2017 年 1 月 25 日移栽更有利于碳代谢产物积累<sup>[24]</sup>。曾文龙等的研究表明,龙岩烟区烟株随移栽期推迟,碳代谢产物含量逐渐下降<sup>[25]</sup>。余永旭等的研究表明,重庆奉节烟区烟株随移栽期推迟,碳代谢活动逐渐减弱<sup>[26]</sup>。这与本研究结果不一致,这是因为福建龙岩烟区属亚热带海洋性季风气候,海拔较低,降雨充沛,日照时数较少,烟株后期碳代谢衰弱,致碳代谢产物减少;重庆奉节烟区属亚热带湿润季风气候,降雨充沛,海拔受地形变化影响。说明烟株碳代谢活动受降雨条件影响较大,降雨过多可能会受抑制。

白应香研究发现,黔西南烟区云 87 随移栽期推迟,总糖含量增加,还原糖含量降低<sup>[27]</sup>。这与本研究有所差异,可能其所设置移栽处理间隔较小所致。卢鹏宇等研究发现,清镇烟区烟株随移栽期推

迟,还原糖含量、总糖含量均呈上升趋势<sup>[28]</sup>。高真真等的研究表明,河南烟区烟株上 6 叶总糖含量、还原糖含量随移栽期推迟呈上升趋势<sup>[29]</sup>。这与本研究结果一致。

研究显示,通过对相关酶活性的调控可以改变烤烟碳代谢活动的强弱,进而影响碳代谢产物含量<sup>[30]</sup>。白应香研究发现,在烤烟大田生长期,不同移栽期处理烟株在移栽 40 ~ 50 d 后  $\alpha - amylase$  活性达到峰值,之后下降,说明烟株生长前期对淀粉的积累量较少,随着烟株生育进程的推进,淀粉积累量逐渐增加,进入烟叶成熟期后烟叶淀粉含量又逐渐降低<sup>[27]</sup>;本研究中, $\alpha - amylase$  活性总体以较早移栽的处理较高,这与较早移栽处理前期降雨和光照均充足有关。王寒等研究发现,提前移栽处理烟株淀粉酶活性峰值出现推迟,提前移栽处理烟株淀粉酶活性峰值出现的时间提前<sup>[31]</sup>;本研究中 SS、INV 和 SPS 活性同样总体以较晚移栽的处理较高,且 SS 的活性在团棵期对还原糖含量有显著影响,SPS、INV 活性对烤烟主要碳代谢产物的合成和积累的影响主要集中在旺长期至现蕾期。碳代谢相关基因对烟株碳代谢产物的合成与积累具有重要的调控作用<sup>[32]</sup>。潘飞龙研究发现,烤烟适熟至过熟阶段,烟叶 *NtSS* 表达量对烟叶糖代谢活动的调控作用较强<sup>[33]</sup>。王红丽等研究发现,随着烟叶的成熟度增加,*NtSS* 表达量升高<sup>[34]</sup>。白应香研究发现,在黔西南州亚热带季风湿润气候条件下,云烟 87 移栽后 50 ~ 60 d,*NtSS* 表达量呈下降趋势<sup>[27]</sup>,表达量总体变化趋势与鲁黎明等的研究结论<sup>[35]</sup>一致。本研究中,*Ntα - Amylase*、*NtSS* 基因表达量总体以较早移栽处理(T1、T2 处理)较高。碳代谢关键酶基因对碳代谢产物合成和积累的影响主要在烟株进入旺长期以后,其中旺长期 *NtSS* 表达量与淀粉含量变化极显著正相关。

4 结论

对于云烟 87 大田期烟叶的碳代谢产物方面,随着生育进程推进,云烟 87 旺长期、现蕾期烟叶中还原糖含量呈先升后降的趋势,各移栽期处理的还原糖含量也呈先升后降的趋势,T2 处理烟叶还原糖含量在多数生育期处于较高水平;各移栽期处理的总糖含量的变化规律在各生育期都不尽相同,T2 处理烟叶总糖含量在多数生育期处于较高水平;淀粉含量则随移栽期推迟,在生育前期呈先降后升的趋

势,在生育后期呈先降后升再下降的趋势。碳代谢酶活性方面,移栽后 30 ~ 70 d,  $\alpha$ -amylase 活性最低的处理均为 T3 或 T4 处理, T2 处理活性均为最高或第二高;在同一生育时期内, SS、INV、SPS 活性最高的多数为 T3、T4 处理。碳代谢关键酶基因表达量方面,  $Nt\alpha$ -amylase、 $NtSS$  表达量总体以较早移栽处理(4 月 10 日、4 月 20 日)较高。相关性结果表明,碳代谢产物含量、碳代谢酶活性及其关键基因表达量之间在不同生育时期均有不同程度的联系。综上,威宁黑石地区 4 月 20 日移栽,有利于碳代谢活动的进行。

#### 参考文献:

- [1] 周金仙, 卢江平, 白永富, 等. 不同生态区烟草品种产量、品质变化研究初报[J]. 云南农业大学学报, 2003, 18(1): 97-102.
- [2] Ju X T, Chao F C, Li C J, et al. Yield and nicotine content of flue-cured tobacco as affected by soil nitrogen mineralization [J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 227-235.
- [3] 王茗珍, 郭金平. 不同播栽期对清香型烤烟新品系 C<sub>2</sub> 生长发育及产量质量的影响[J]. 井冈山学院学报, 2008, 29(6): 7-9.
- [4] 雷 佳, 吕永华, 李淮源, 等. 烤烟碳氮代谢调节机理及其指标研究进展[J]. 广东农业科学, 2018, 45(12): 20-26.
- [5] 陈 钊, 魏子全, 张 骞, 等. 移栽期对烤烟品种龙江 851 生长规律的影响[J]. 现代化农业, 2011(8): 25-28.
- [6] 李文卿, 陈顺辉, 柯玉琴, 等. 不同移栽期对烤烟生长发育及质量风格的影响[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(4): 48-54.
- [7] Ryu M H, Jung H J, Lee U C. Growth and chemical properties of oriental tobacco as affected by transplanting time[J]. Journal of the Korean society of tobacco science, 1988, 10(2): 109-116.
- [8] Alameda D, Anten N P R, Villar R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 120: 121-129.
- [9] 卢 钊, 王学华, 田 峰. 不同移栽期对烤烟生长、产量及经济效益的影响[J]. 作物研究, 2013, 27(增刊 1): 15-17.
- [10] 陈义强, 范坚强, 包可翔, 等. 不同移栽期对‘云烟 85’烟叶质量风格特色的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(4): 47-57.
- [11] 向德恩, 时 鹏, 申国明, 等. 不同移栽期对恩施烤烟产量和质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(增刊 1): 57-62.
- [12] 史宏志, 韩锦峰, 刘国顺, 等. 烤烟碳氮代谢与烟叶香吃味关系的研究[J]. 中国烟草学报, 1998, 4(2): 56-63.
- [13] 刘国顺, 彭智良, 黄元炯, 等. N、P 互作对烤烟碳氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(5): 33-37.
- [14] 潘飞龙, 高娅北, 王松峰, 等. 不同品种烤烟成熟期糖代谢酶活性及基因的表达分析[J]. 中国烟草科学, 2018, 39(5): 47-56.
- [15] 唐 煌, 张军杰, 鲁黎明, 等. 四川三大烟区烤烟蔗糖分解酶类及其基因表达的差异分析[J]. 四川农业科技, 2017(7): 56-62.
- [16] 王 玮, 张喜峰, 樊万福, 等. 不同移栽期对烤烟生长、氮、钾含

- 量及经济性状的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(16): 182-186.
- [17] 陈发元, 胡 锦, 周俊成, 等. 施氮量及基追比对烤烟碳代谢产物及关键酶的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(6): 1310-1317.
  - [18] 杨园园, 穆文静, 王维超, 等. 不同移栽期对烤烟农艺和经济性状及其质量特色的影响[J]. 河南农业大学学报, 2013, 47(5): 514-522.
  - [19] 张学伟, 邵兰军, 程园艺, 等. 不同播期与移栽方式对烤烟生长发育与品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 23-28.
  - [20] 朱 波, 马君红, 王 龙, 等. 不同移栽期对四川省会理县烟叶化学成分和香气成分的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 84-86.
  - [21] 高卫锴, 陈 杰, 罗慧红, 等. 不同移栽期对烤烟生长及烟叶质量风格特色的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(33): 48-50, 53.
  - [22] 陈永明, 陈建军, 邱妙文. 施氮水平和移栽期对烤烟还原糖及烟碱含量的影响[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(1): 34-36, 40.
  - [23] 赖佳鑫, 邓 华, 刘 峰, 等. 化肥减施配施有机肥对烤烟产质量和化学成分的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 73-78.
  - [24] 蒋代兵, 苏秀芳, 谢凤标, 等. 移栽期及移栽方式对龙岩烤烟生长发育及烟叶品质的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(4): 19-27.
  - [25] 曾文龙, 陈爱国, 周道金, 等. 移栽期对烤烟品质及香气前体物含量的影响[J]. 江西农业学报, 2020, 32(12): 94-99.
  - [26] 余永旭, 谷纪涛, 丁 伟. 移栽期与施氮量对烤烟经济性状及化学成分的影响[J]. 植物医生, 2020, 33(4): 36-42.
  - [27] 白应香. 移栽期对烟株生长发育及碳氮代谢的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
  - [28] 卢鹏宇, 刁朝强, 周建云, 等. 移栽期对贵烟 2 号产质的影响[J]. 南方农业, 2020, 14(32): 52-53, 62.
  - [29] 高真真, 李建华, 杨明坤, 等. 移栽期和采收期对豫中烤烟上六片叶经济性状和品质特性的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(10): 54-63.
  - [30] 李 峥, 潘飞龙, 方 明, 等. 烟叶发育过程中糖代谢相关酶活性及基因的表达分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(1): 29-36.
  - [31] 王 寒, 陈建军, 林锐峰, 等. 粤北地区移栽期对烤烟成熟期生理生化指标和经济性状的影响[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(6): 71-77.
  - [32] 曾孝敏. 施氮量对烤烟碳氮代谢过程中关键酶及代谢产物的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
  - [33] 潘飞龙. 烤烟成熟期和调制过程中碳代谢酶活性及基因表达的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
  - [34] 王红丽, 杨惠娟, 苏 菲, 等. 氮用量对烤烟成熟期叶片碳氮代谢及蒽类代谢相关基因表达的影响[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(5): 116-120.
  - [35] 鲁黎明, 曾孝敏, 张永辉, 等. 施氮量对烤烟糖代谢关键酶活性及其基因表达的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(6): 84-90.