

李雪君,孙计平,段卫东,等. 烤烟新品种豫浓香 201 叶片成熟过程中碳氮代谢的特征[J]. 江苏农业科学,2025,53(15):97-103.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.15.013

# 烤烟新品种豫浓香 201 叶片成熟过程中 碳氮代谢的特征

李雪君<sup>1</sup>, 孙计平<sup>1</sup>, 段卫东<sup>3</sup>, 孙 焯<sup>1</sup>, 郭 敬<sup>1</sup>, 连文力<sup>1</sup>, 耿胜娜<sup>1</sup>, 陈海洋<sup>2</sup>

(1. 河南省农业科学院烟草研究所烟草行业黄淮烟区烟草病虫害绿色防控重点实验室,河南许昌 461000;

2. 河南农业大学烟草学院,河南郑州 450046; 3. 河南中烟工业责任有限公司,河南郑州 450016)

**摘要:**为探索烤烟新品种豫浓香 201 叶片成熟早、落黄集中的机理,以田间成熟期不同的品种中烟 100 和豫烟 13 号为对照,在相同的农艺栽培措施下,研究了 3 个品种中部叶在成熟过程中叶绿素含量、碳氮代谢产物含量以及相关基因的表达变化。结果表明,与中烟 100 和豫烟 13 号相比,豫浓香 201 叶片随着叶片年龄的增长,叶绿素降解代谢旺盛,降解速率快。相对于其他 2 个品种,在叶片成熟过程中,豫浓香 201 的淀粉合成基因和糖转化基因的表达量较高,而氮代谢相关基因的表达量较低,这导致豫浓香 201 叶片中的淀粉含量、还原糖含量和总糖含量保持在较高水平,而氮代谢产物烟碱和总氮含量相对较低,碳氮比则高。总之,豫浓香 201 中部叶成熟落黄快与其在生长发育过程中碳代谢旺盛、氮代谢能力相对较弱以及叶绿素降解速率较快的特性密切相关。

**关键词:**烤烟;豫浓香 201;碳代谢;氮代谢;成熟落黄

**中图分类号:**S572.03;S572.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)15-0097-06

作为经济作物,烤烟的烟叶成熟期是决定其品质的重要阶段<sup>[1]</sup>。烟叶的碳氮代谢进程与其成熟期密切相关<sup>[2]</sup>。碳代谢过程涵盖无机碳的光合作用固定、单糖转化和淀粉积累等<sup>[3]</sup>。焦磷酸化酶(AGPase)在淀粉合成中发挥着重要作用,淀粉合成酶(SS)参与支链淀粉的形成<sup>[4-5]</sup>;蔗糖合成和分解受到蔗糖磷酸合成酶(SPS)和蔗糖转化酶(INV)的调控<sup>[6-7]</sup>。这些关键酶的活性可有效反映碳代谢的强度。氮的吸收、同化、转运等过程都属于氮代谢<sup>[3]</sup>。在氮素的转运过程中,氮限制适应基因(*NLAI*)发挥着重要作用。在铵离子转移和再同化过程中,谷氨酰胺合成酶(GS)扮演了重要角色,其中叶绿体谷氨酰胺合成酶(GS2)在氨同化过程中发挥重要作用<sup>[8-11]</sup>。质外体铵浓度和氨气挥发量与GS2的活性呈反比<sup>[12]</sup>。研究表明,随着烟叶成熟度的增强,碳积累代谢增强,而其固定和转化逐渐降

低<sup>[3]</sup>,当碳代谢达到一定水平时,淀粉降解速度超过其积累速度,烟叶的成熟度随之增强,烟叶品质提升<sup>[13]</sup>。随着烟叶的成熟衰老,氮素物质如总氮和蛋白质的合成速率降低,而降解速率加快<sup>[14]</sup>;细胞质中的蛋白水解酶能够有效降解蛋白质,使得色素蛋白复合体被分解,同时光合碳同化能力减弱,导致质体色素分解速度加快<sup>[15-16]</sup>。因此,叶绿素和类胡萝卜素含量的减少是烟叶成熟的重要标志<sup>[17]</sup>。品种决定烟叶的碳氮代谢<sup>[18]</sup>,然而,目前关于不同烤烟品种的成熟特性与碳氮代谢之间关系的研究仍较少。

一般烟叶成熟过程表现为分层落黄,需要采收5次以上。缩短烟叶成熟期,减少烟叶采收次数,能有效降低调制成本<sup>[19]</sup>;质体色素降解快的品种,在烘烤过程中,易烤性好,烤青烟的风险较低<sup>[20]</sup>;缩短烤烟的生育期不仅可减少大田生长时间和生长风险,同时有利于节约土地利用时间,为接茬种植提供有利条件。在目前粮烟融合政策下,集中成熟更有利于机械化采收。

作为2023年审定的新品种,豫浓香201在生长过程中,与对照中烟100和豫烟13号相比,表现出叶片成熟早、中上部叶片成熟集中、生育期短等特征,满足机械化采收需求,但相关机理尚不明确。本研究以豫浓香201为试验对象,以具有不同成熟落黄特性的2个烤烟品种为对照,分析中部叶片在

收稿日期:2024-08-24

基金项目:中国烟草总公司河南省公司科技项目(编号:2022410000240014、2023410000240020);河南中烟工业责任有限公司科技项目(编号:2022410000340097)。

作者简介:李雪君(1974—),女,河南邓州人,硕士,副研究员,主要研究方向烟草育种。E-mail:lixuejun8373@163.com。

通信作者:陈海洋,博士,讲师,主要研究方向烟草抗逆及品种改良。E-mail:huchenhaiyang@163.com。

不同叶龄阶段的质体色素含量、碳氮代谢指标及相关基因的表达水平,旨在为豫浓香 201 配套栽培技术研究及集中成熟烤烟品种选育提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

豫浓香 201 是中烟 100 经 EMS 诱变筛选得到的烤烟新品种,在许昌烟区的多年种植中表现出成熟落黄速度快的特点;中烟 100 是当地的主栽品种,具有耐熟性好的特点。豫烟 13 号是以红花大金元为亲本的杂交后代,成熟落黄相对较晚。

### 1.2 试验设计

试验于 2022 年在河南省许昌市魏都区青梅路永昌路烟草所试验田进行。每个品种种植 120 株,3 次重复。施肥参照张小全等的方法<sup>[21]</sup>。

田间管理按照 GB/T 23221—2008《烤烟栽培技术规程》进行。除品种不同外,所有栽培管理措施一致。现蕾打顶后,所有品种单株留叶数相同。

每个品种选择整齐一致的 30 株烟,参照张小全等的方法<sup>[21]</sup>,当第 10~12 叶位的叶长为 1.5 cm 时开始挂牌,记为 1 d。在叶龄 20~70 d 时,每隔 10 d 取 1 次样,从 3 株烟上分别取 3 张叶片,将叶中部同一位置的无主脉叶片充分剪碎混匀,然后分成 3 份,分别用于叶绿素含量、杀青后的化学成分以及基因表达水平测定。

### 1.3 测定内容和方 法

叶绿素含量依据分光光度法<sup>[22]</sup>进行测定;淀粉、还原糖、总糖、总氮、烟碱含量依据烟草行业标准<sup>[23-26]</sup>进行测定;同时测定相关基因的表达量,内参基因为 *L25*,引物序列见表 1。

表 1 基因表达分析引物

基因名称	GenBank 登录号	F 引物(5'→3')	R 引物(5'→3')
<i>NtNYCI</i>	EU930363.1	TTCTTGTTGGCGTTATATCTTGG	ACTCATTCATCTGGCTATCTCC
<i>NtSGR</i>	EU294209.1	AGTCCAACAAGAATCAATCCATAG	GATAGCCAAAGTGAGTTTAGAGG
<i>NtAGP</i>	DQ399915.1	TTCTGCTGCTGCAAAGGCTAG	CCCTAGCCGCTTCTTGAACA
<i>NtSPS</i>	AF194022.1	AAAGGCCGCTTGCCCTAGAAT	CTAAGGCCCTCGCAAGTTC
<i>NtSS</i>	AB055497.1	GTGGTTGGAGGAGACCGAAG	ATCCATCGGAATTGGCCGTT
<i>NtINV</i>	AJ305044.2	CCTTCGCCCTTGGTTCTCTGAT	ATCTGACCGTCGGGTAGGAA
<i>NtNIAI</i>	JN384019.1	TTGCTGTTGAGCTTGGGAT	TTCCAGGTTGAGTCCGATGC
<i>NtNR</i>	LOC104118966	GCAATTCACGAGGCAATCCC	GCATGTACGCCGAGATCCGTTG
<i>NtGS2</i>	X66940	ACGCCATAAAGCTGCTCAGA	GCCACTTCACATTTTGTGG
<i>L25</i>	L18908	AGTTACATTCACCGACC	TCCTCAATCTTCTCATTGCAG

### 1.4 数据处理和显著性分析

采用 Excel 2021 和 SPSS26.0 软件对试验数据进行处理、分析和图形绘制,采用 Duncan's 法进行数据间的差异显著性分析。

## 2 结果与分析

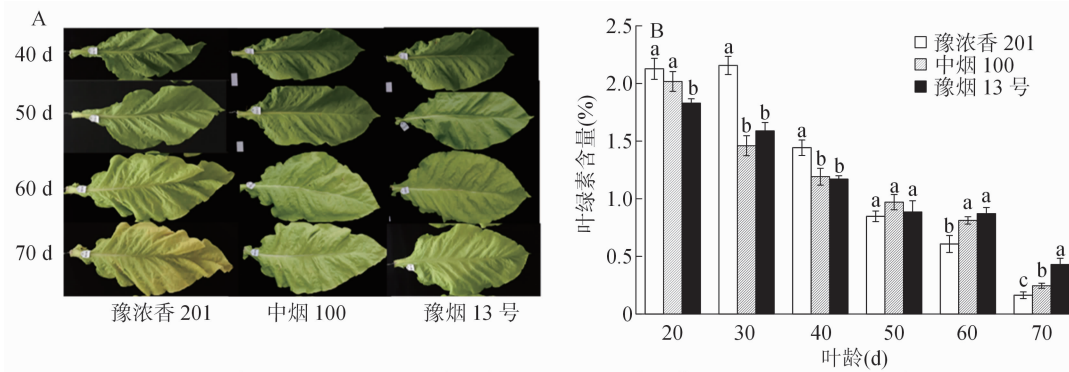
### 2.1 不同烤烟叶片成熟过程中叶绿素含量的变化情况

由图 1-A 可知,3 个品种中部叶的成熟落黄过程存在明显差异。因此,检测 3 个品种在叶龄 20~70 d 时叶片的叶绿素含量。结果(图 1-B)显示,中烟 100 和豫烟 13 号叶绿素含量的变化趋势基本一致;在叶龄 30~40 d 时,豫浓香 201 叶片的叶绿素含量显著高于中烟 100 和豫烟 13 号;叶龄达到 50 d 后,豫浓香 201 叶片叶绿素含量下降的速度大于其他 2 个品种;在叶龄 60~70 d 时,豫浓香 201 叶片的叶绿素含量显著低于中烟 100 和豫烟 13 号,

这与田间豫浓香 201 的叶片颜色变化一致。以上研究表明,在成熟过程中豫浓香 201 叶片的叶绿素含量下降较快,叶片落黄速度较快。

### 2.2 不同烤烟叶片成熟过程中叶绿素降解基因表达水平的变化

在中部叶成熟过程中,3 个烤烟叶片的叶绿素含量变化存在明显差异,因此测定叶绿素降解相关基因的表达水平。在叶龄 30 d 之前,*NtNYCI* 的表达量在 3 个品种间无显著差异(图 2-A);在叶龄 40~50 d 时,*NtNYCI* 在豫浓香 201 中的表达水平显著高于中烟 100 和豫烟 13 号,尤其在叶龄 70 d 时,豫浓香 201 中 *NtNYCI* 的表达水平是中烟 100 的 1.63 倍。然而,在叶龄 30 和 40 d 时,*NtSGR* 在中烟 100 中的表达水平显著高于豫浓香 201;在叶龄 50 d 和 60 d 时,该基因在 2 个品种间的表达水平没有明显差异(图 2-B)。*NtSGR* 在豫烟 13 号中的表



同一组柱形图上的不同字母表示处理之间具有显著差异( $P < 0.05$ )。下图同

图1 不同烤烟中部叶成熟过程中的表型和叶绿素含量的变化

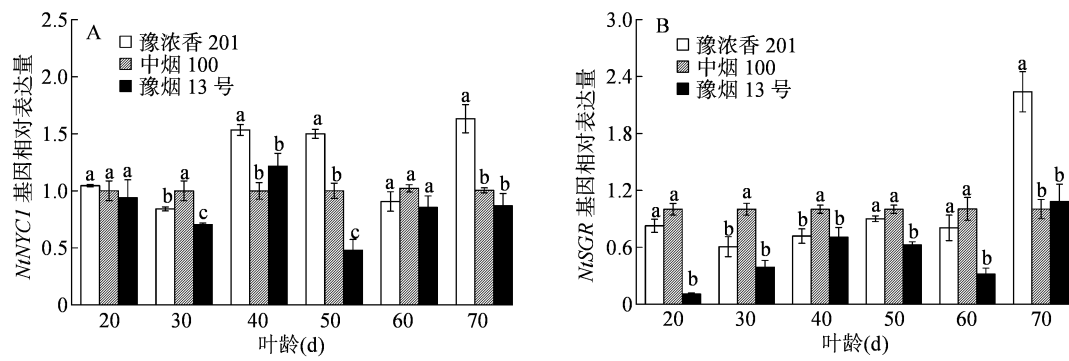


图2 不同烤烟叶片成熟过程中叶绿素降解基因表达水平的变化

达水平显著低于中烟 100。在进入叶龄 70 d 之后, 豫浓香 201 中的 *NtSGR* 表达水平迅速升高, 其表达量是中烟 100 的 2.24 倍。以上结果表明, 烟叶进入成熟期(50 d)后, 豫浓香 201 迅速进入成熟状态, 叶绿素迅速降解, 落黄速度较快。

### 2.3 不同烤烟叶片成熟过程中碳代谢相关指标的变化

**2.3.1 叶片中的淀粉含量、总糖含量、还原糖含量和总碳含量的变化** 在中部叶成熟过程中, 3 个烤烟品种的烟叶淀粉含量均呈现出先升高后降低的变化趋势(图 3 - A)。在叶龄 20 d 时, 豫浓香 201 的淀粉含量显著低于中烟 100, 但显著高于豫烟 13 号; 叶龄 30 ~ 70 d, 豫浓香 201 的淀粉含量均显著高于另外 2 个品种, 并且在叶龄 50 d 时达到峰值, 而中烟 100 和豫烟 13 号的淀粉含量均在叶龄 40 d 时最高。此外, 在叶龄 50 ~ 70 d 期间, 豫浓香 201 的淀粉含量在 3 个品种中降解量最大。在总糖和还原糖含量方面, 随着叶龄的增加, 3 个烤烟品种的总糖含量和还原糖含量都呈现出先降低后升高再降低的趋势(图 3 - B、图 3 - C), 且均在叶龄 20 d 时最高。在叶龄 20 ~ 60 d 期间, 豫浓香 201 的总糖、还原糖含量均显著高于中烟 100 和豫烟 13 号; 在叶龄 70 d 时, 3 个烤烟品种之间的总糖含量没有显著差

异, 但豫烟 13 号的还原糖含量显著低于另外 2 个品种。从叶龄 20 ~ 70 d, 豫浓香 201 和中烟 100 的总碳含量变化幅度不大, 而豫烟 13 号的总碳含量呈现出先升高后降低的变化趋势(图 3 - D)。在烟叶成熟后期, 豫烟 13 号的总碳含量显著低于豫浓香 201 和中烟 100。

### 2.3.2 叶片中的碳代谢相关基因的表达水平变化

在中部叶成熟过程中, 3 个烤烟品种烟叶的碳代谢变化存在差异。检测 3 个烤烟品种叶片碳代谢相关基因的表达水平发现, *NtAGPase* 和 *NtSS* 在豫浓香 201 整个生育期内的表达水平表现为先升高再降低再升高的变化趋势(图 4 - A、图 4 - B)。在叶龄 30、40、70 d 时, 豫浓香 201 中的 *NtAGPase* 表达水平显著高于中烟 100 和豫烟 13, 并且随着叶龄增加, 豫浓香 201 中的 *NtAGPase* 基因表达水平变化幅度最大, 这种差异可能导致 3 个烤烟品种的叶片淀粉含量降解速度不同。在叶龄 20、40、60 d 时, *NtSPS* 在中烟 100、豫浓香 201 和豫烟 13 号之间的表达水平没有显著差异, 在叶龄 70 d 时, *NtSPS* 在豫浓香 201 中的表达水平显著高于另外 2 个烤烟品种(图 4 - C)。除了在叶龄 50、60 d 外, 豫浓香 201 的 *NtINV* 表达量都显著高于中烟 100(图 4 - D)。

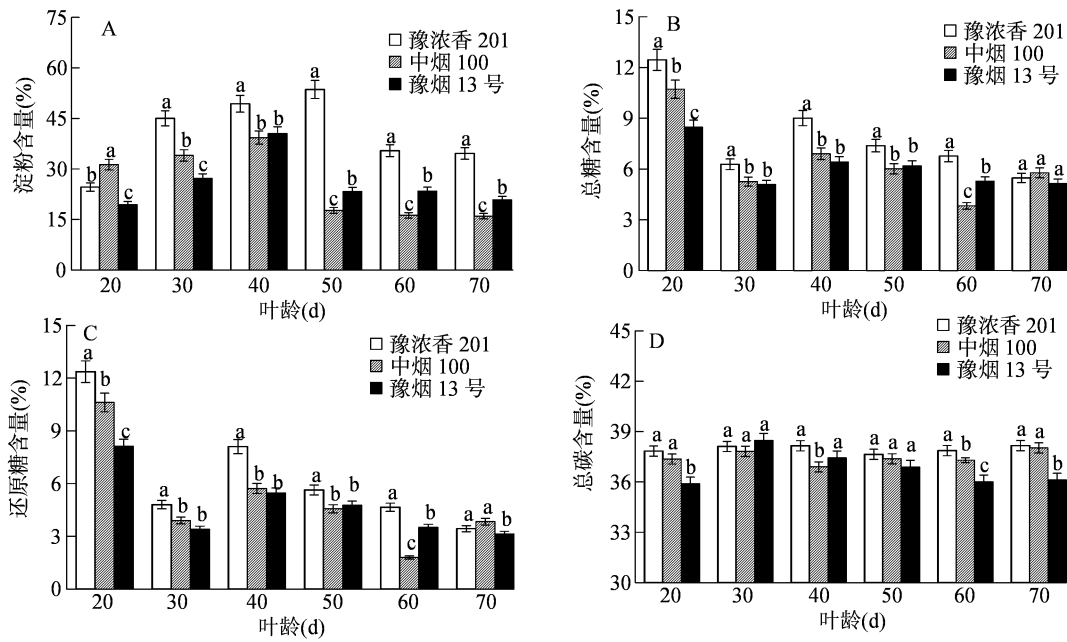


图3 不同烤烟叶片成熟过程中碳代谢相关物质的含量变化

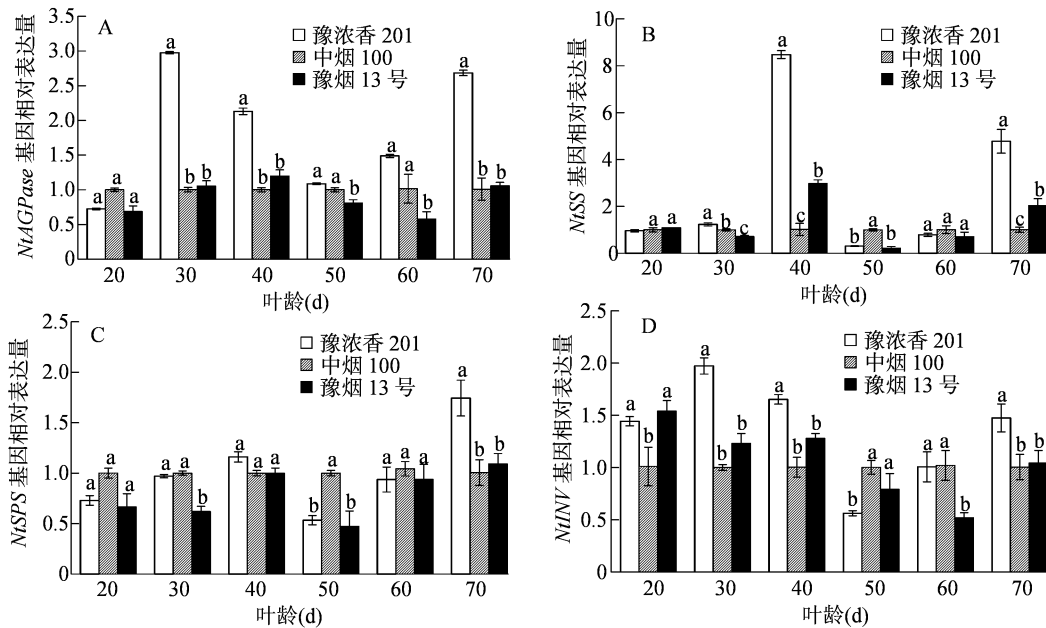


图4 不同烤烟叶片成熟过程中碳代谢相关基因表达水平的变化

## 2.4 不同烤烟品种叶片成熟过程中氮代谢相关指标变化

2.4.1 叶片中的烟碱含量和总氮含量变化 3 个烤烟品种叶片的烟碱含量在生长成熟过程中均呈现上升趋势(图 5 - A),除了在叶龄 40、60 d 时,豫浓香 201 叶片的烟碱含量均显著低于另外 2 个烤烟品种。3 个烤烟品种的总氮含量在烟叶生长过程中整体呈下降趋势(图 5 - B),并且豫浓香 201 总氮含量下降最快。

### 2.4.2 叶片中的氮代谢相关基因表达水平变化

在中部叶成熟过程中,3 个烤烟品种烟叶的氮代谢变化存在差异,因此检测 3 个烤烟品种叶片氮代谢相关基因的表达水平。研究发现,*NtGS2* 基因在植物氮素利用效率的调控中发挥着重要作用<sup>[27]</sup>。豫浓香 201 在叶龄 30 d 时 *NtGS2* 表达水平达到最高,在叶龄 40 d 时也处于较高水平;豫烟 13 号在叶龄 40 d 时,*NtGS2* 表达量达到最高。随着叶龄的进一步增加,豫浓香 201 和豫烟 13 号中的 *NtGS2* 表达水

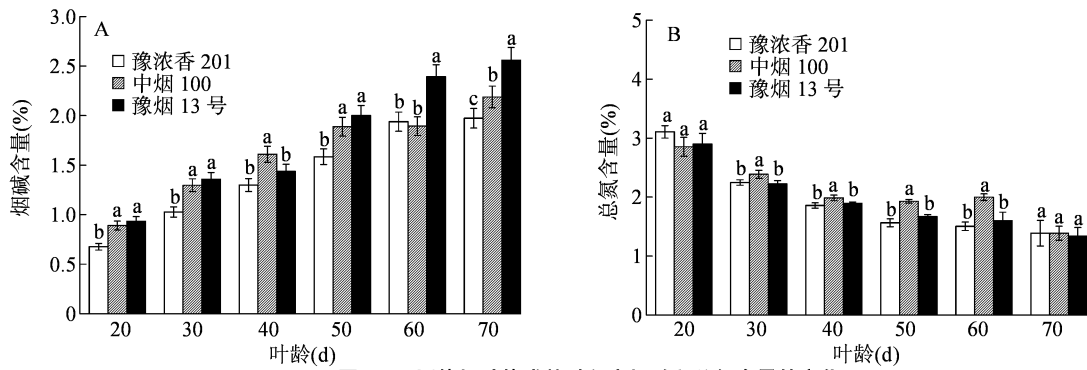


图5 不同烤烟叶片成熟过程中烟碱和总氮含量的变化

平开始降低(图 6 - A)。

豫浓香 201 中 *NtNIA1* 的表达水平在叶龄 40 d 时达到高峰,显著高于中烟 100 和豫烟 13(图 6 - B)。随着生育期的推进,豫浓香 201 中 *NtNIA1* 的

表达水平降低,显著低于中烟 100。*NtNIA1* 在豫浓香 201 中的表达水平变化最明显,而在中烟 100 中几乎没有变化,豫烟 13 号的 *NtNIA1* 表达水平整体较低,表现为先升高后降低又升高的变化趋势。

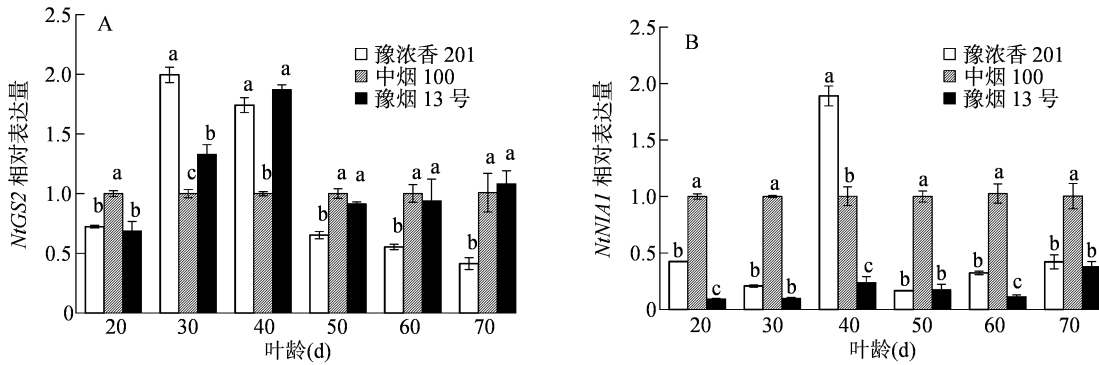


图6 不同烤烟叶片成熟过程中氮代谢相关基因表达水平的变化情况

### 2.5 不同烤烟叶片发育过程中碳氮比的变化情况

在烟叶的成熟过程中,3 个烤烟品种的烟叶碳氮比(C/N)均总体呈现上升趋势,在叶龄 20 ~ 50 d 期间,豫浓香 201 碳氮比值上升最快,且上升幅度最大,中烟 100 和豫烟 13 号碳氮比值在叶龄 60 ~ 70 d 间上升幅度最大(图 7)。

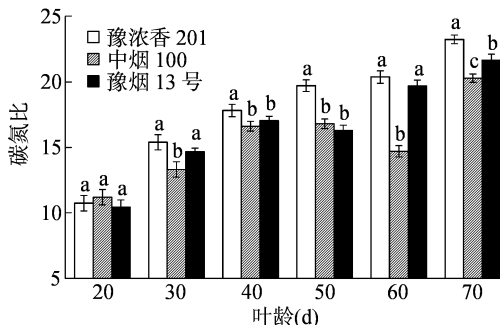


图7 不同烤烟叶片成熟过程中碳氮比的变化情况

30 d 时,豫浓香 201 的叶绿素含量没有明显变化,这与叶绿素降解基因 *NtNYC1* 表达水平的变化趋势相一致。随着叶龄的增加,叶绿素分解酶活性增大,豫浓香 201 的 *NtNYC1* 基因表达量增加,最终显著高于另外 2 个烤烟品种。到叶龄 50 d 时,该烤烟品种的叶绿素含量已经降低到中烟 100 和豫烟 13 号叶龄 60 d 时的水平。从颜色上看,豫浓香 201 已经进入成熟状态。相对于豫浓香 201 和中烟 100,豫烟 13 号的 *NtNYC1* 基因表达量一直处于较低水平,叶绿素降解较慢,最晚进入成熟状态。

碳代谢和氮代谢是烟草生长和发育中的基本代谢过程,烟叶的成熟过程是碳氮代谢的具体表现<sup>[29]</sup>。不同成熟期烟草品种碳氮代谢过程存在明显差异。本研究发现,成熟较快的品种豫浓香 201 叶龄 50 d 后,淀粉合成相关基因 *NtAGPase*、*NtSS* 和 *NtINV* 的表达量变化幅度最大,其淀粉含量下降最快;而中烟 100 和豫烟 13 号的淀粉合成相关基因 (*NtAGPase*、*NtSS* 和 *NtINV*) 表达水平和淀粉含量下降幅度较小,这与张小全等的研究结果<sup>[21]</sup>基本一

### 3 讨论与结论

叶绿素含量的降低是烟叶成熟的标志之一,其降解量越大,烟叶的成熟度越高<sup>[28]</sup>。在叶龄 20 ~

致。研究发现,质外体铵浓度和氨气挥发量与 GS2 的活性呈反比<sup>[12]</sup>。在叶龄 40 d 后,豫浓香 201 的 *NtGS2* 基因和氮限制适应基因 *NtNLA1* 始终保持在较低水平,氮素转移与氮素再利用能力较弱,吸收的氮素以氨气形式大量挥发,从而加快了叶片的衰老。

烟草的碳氮代谢受品种类型、生态条件和田间管理措施等诸多因素影响<sup>[30]</sup>。随着叶龄的增加,成熟衰老特性不同的烟草品种烟叶 C/N 呈现上升趋势<sup>[21]</sup>,本研究结果与之基本一致。此外,在叶龄 30 d 后,豫浓香 201 烟叶的碳氮比始终保持较高水平,这可能与豫浓香 201 碳代谢相关基因表达水平较高以及氮代谢相关基因表达水平较低有关。

刘心亚等研究发现,烟碱的含量在烟叶成熟过程中,随着成熟度的增加而增加<sup>[31]</sup>。本研究发现,豫浓香 201 在整个发育过程中,烟碱含量呈上升趋势,这与陈吉珩等的研究结果<sup>[32]</sup>基本一致。除了叶龄 40、60 d 外,豫浓香 201 的烟碱含量均显著低于 2 个对照品种,这可能由于豫浓香 201 的氮代谢较弱,不利于氮素的合成,最终导致烟碱含量偏低。一般来说,总氮含量从团棵期到成熟期呈现出明显的下降趋势<sup>[33-36]</sup>,本研究结果与之基本一致。与对照中烟 100 相比,豫浓香 201 在叶龄 20 d 时总氮含量略高于对照,差异不显著;在叶龄 30~60 d 时,豫浓香 201 的总氮含量显著低于中烟 100。

本研究表明,烤烟品种豫浓香 201 的烟叶碳积累速度较快,淀粉含量保持在较高水平;叶绿素降解速率快,调控叶绿素降解、总糖和还原糖合成的相关基因 *NtNYCI*、*NtSGR*、*NtINV* 和 *NtSPS* 表达量均较高,氮积累较慢,转化较快,烟叶烟碱含量相对较低。总之,豫浓香 201 碳代谢旺盛,氮代谢能力相对较弱,叶绿素降解速率较快,导致该品种成熟落黄快。

#### 参考文献:

- [1] 李先才,蔡宪杰,邓涛,等. 3 个烤烟品种在宣威高海拔多雨烟区的适宜采收成熟度研究[J]. 中国农学通报,2023,39(31): 19-26.
- [2] 高静娟,朱晨宇,柯玉琴,等. 烟稻轮作条件下有机肥施用时期对烤烟碳氮代谢的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(9): 157-165.
- [3] 史宏志,韩锦峰. 烤烟碳氮代谢几个问题的探讨[J]. 烟草科技,1998(2):34-36.
- [4] Kavakli I H, Park J S, Slattery C J, et al. Analysis of allosteric effector binding sites of potato ADP - glucose pyrophosphorylase through reverse genetics[J]. The Journal of Biological Chemistry, 2001,276(44):40834-40840.
- [5] 张青,孟杉杉,陈梓春,等. 谷物胚乳淀粉合成相关酶的调控机制研究进展[J]. 植物生理学报,2021,57(1):1-11.
- [6] Winter H, Huber S C. Regulation of sucrose metabolism in higher plants: localization and regulation of activity of key enzymes[J]. Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology, 2000,35(4):253-289.
- [7] Ruan Y L. Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling[J]. Annual Review of Plant Biology, 2014,65:33-67.
- [8] Liu W W, Sun Q, Wang K, et al. Nitrogen Limitation Adaptation (NLA) is involved in source - to - sink remobilization of nitrate by mediating the degradation of NRT1.7 in *Arabidopsis* [J]. New Phytologist, 2017,214(2):734-744.
- [9] Swarbreck S M, Defoin - Platel M, Hindle M, et al. New perspectives on glutamine synthetase in grasses [J]. Journal of Experimental Botany, 2011,62(4):1511-1522.
- [10] Uzelac B, Janošević D, Simonović A, et al. Characterization of natural leaf senescence in tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants grown in vitro[J]. Protoplasma, 2016,253(2):259-275.
- [11] 邓扬悟. 甜瓜谷氨酰胺合成酶基因的克隆和功能研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
- [12] 周健飞,武云杰,薛刚,等. 烟叶成熟期氮代谢酶活性、基因表达与烤烟氮素利用效率的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2018,24(3):625-632.
- [13] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [14] 武云杰,杨铁钊,张小全,等. 不同烤烟品种烟叶衰老期氨气挥发及其与氮素代谢的相关性[J]. 中国农业科学, 2013,46(19):4027-4034.
- [15] Matile P, Winklerbach F. Function of lysosomes and lysosomal enzymes in the senescing Corolla of the morning glory (*Ipomoea purpurea*) [J]. Journal of Experimental Botany, 1971,22(4): 759-771.
- [16] 孟凡来,赵昶灵,段丽斌,等. 高等植物类胡萝卜素的生物降解途径研究进展[J]. 中国农学通报,2013,29(24):143-150.
- [17] Chonan N, Kawahara H, Matsuda T. Changes in chloroplast ultrastructure during the senescence of leaves in rice plants [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1977,46(3):379-386.
- [18] 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.
- [19] 王小东,汪孝国,许自成,等. 对烟叶成熟度的再认识[J]. 安徽农业科学,2007,35(9):2644-2645.
- [20] 周诚,郭鸿雁,邓世媛,等. 优质烤烟烘烤特性的研究进展[J]. 广东农业科学,2014,41(10):14-17,26.
- [21] 张小全,蔡文龙,阚洪赢,等. 不同品种烤烟衰老期碳氮代谢及相关基因表达的差异分析[J]. 中国烟草学报,2020,26(6): 66-73.
- [22] 李旭华,扈强,潘义宏,等. 不同成熟度烟叶叶绿素含量及其与 SPAD 值的相关分析[J]. 河南农业科学,2014,43(3):47-52,58.

张海洋,黄安,余流,等. 开花期极端自然高温对水稻花药生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(15):103-108.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.15.014

# 开花期极端自然高温对水稻花药生理特性的影响

张海洋,黄安,余流,黄玉珍,何永明

(江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,江西南昌 330045)

**摘要:**为了在探究水稻花药在开花结实期遭受自然高温时的生理响应机制。通过比较自然高温和自然适温条件下野生型水稻中花 11 在开花前 18、4、2、0 h 4 个时间点花药的多种生理指标数据,揭示自然高温对水稻花药及结实率的影响。结果表明,极端自然高温条件下水稻结实率降低至 20.49%,远低于自然适温下的 95.17%。与自然高温相比,自然适温条件下花药中过氧化氢含量和过氧化物酶活性在开花前 18、4 h 显著提升。高温下颖花中丙二醛、游离脯氨酸含量均显著增加,而适温下的含量变化波动不大。在抗氧化酶活性方面,自然高温下花药超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶、多酚氧化酶、苯丙氨酸解氨酶、脂氧合酶活性在水稻临近开花时刻相较于自然适温下均有显著提升。在维持细胞还原势方面,自然高温下花药中谷胱甘肽、抗坏血酸含量大幅增加,谷胱甘肽还原酶活性在开花前 4 h 达到峰值。综上,自然高温条件下开花时刻的颖花中保持较多的渗透调节物质、较高的还原势以及较低的过氧化氢含量,是水稻抵抗自然高温胁迫的生理基础。

**关键词:**自然高温;自然适温;水稻花药;生理特性;酶活性;细胞还原势

**中图分类号:**S511.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)15-0103-06

水稻作为全球重要的粮食作物,其生长发育和产量受多种环境因素的影响。受全球气候变暖影响,极端高温事件频发,高温已成为世界上许多国

家和地区影响作物生长的主要胁迫因子<sup>[1]</sup>。高温影响水稻整个发育过程,其中以抽穗期、扬花期、灌浆初期较为敏感。开花期是水稻生长过程中最为关键和敏感的阶段,若抽穗扬花期日平均温度高于 32 ℃且日最高温度高于 35 ℃,花粉活力、花药开裂、花粉萌发和花粉管伸长都会受到影响,导致受精结实率下降<sup>[2-3]</sup>。开花期连续遭遇超过 35 ℃的高温天气,将会导致田间大面积减产,因此解析自然高温对水稻花药生理特性的影响具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。近年来,大量研究集中在水稻花药应对模

收稿日期:2024-09-04

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360295);江西省自然科学基金(编号:20212BAB205006)。

作者简介:张海洋(2000—),男,湖北枣阳人,硕士研究生,主要从事水稻对白叶枯病的抗性生理机制的研究。E-mail:2356404830@qq.com。

通信作者:何永明,博士,副教授,主要从事植物生理生态、植物激素的研究。E-mail:hymcom@126.com。

[23] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 淀粉的测定 连续流动法:YC/T 216—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[24] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法:YC/T 159—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[25] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 总氮的测定 连续流动法:YC/T 161—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[26] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 总植物碱的测定 连续流动法:YC/T 160—2002[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[27] Li X P, Zhao X Q, He X, et al. Haplotype analysis of the genes encoding glutamine synthetase plastic isoforms and their association with nitrogen-use- and yield-related traits in bread wheat[J]. *New Phytologist*, 2011, 189(2): 449-458.

[28] 魏星,武云杰,阚洪赢,等. 不同烤烟品种烟叶衰老特性与内源激素的关系[J]. *烟草科技*, 2020, 53(2): 1-7.

[29] 黄树永,陈良存. 烟草碳氮代谢研究进展[J]. *河南农业科学*, 2005, 34(4): 8-11.

[30] 张森,许自成,李京京,等. 烟草碳氮代谢及其调控技术研究进展[J]. *生物技术进展*, 2016, 6(5): 312-318.

[31] 刘心亚,陈小龙,冯亚克,等. 黔西南州烟区烤烟高可用性上部叶适宜采收期研究[J]. *作物杂志*, 2022(4): 227-235.

[32] 陈吉珩,喻会平,郜军艺,等. 新引品种烟叶成熟过程碳氮代谢分析[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(10): 3395-3401.

[33] 吴飞跃,申燕,杨振智,等. 不同施肥对烤烟中部叶碳氮代谢及基因表达的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(10): 21-28.

[34] 吴薇,韩相龙,郑璞帆,等. 移栽方式与施氮量对烤烟生长发育和产质量的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24(2): 535-543.

[35] 席奇亮,杨铁钊,周方,等. 水肥一体化条件下烤烟氮素营养高效利用研究[J]. *中国烟草学报*, 2018, 24(2): 74-83.

[36] 徐茜,吴平,高文霞,等. KCl 对烤烟光合作用、碳氮代谢主要酶活性的影响[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(12): 2431-2436.