

# 不同时期环割对上部烟叶生长发育及质量的影响

杨趁义<sup>1</sup>, 孙光伟<sup>2</sup>, 陈振国<sup>2</sup>, 于涛<sup>1</sup>, 刘迎超<sup>1</sup>, 马振<sup>1</sup>, 崔志成<sup>1</sup>, 孙秀朋<sup>1</sup>, 王玉军<sup>1\*</sup>

(1. 山东农业大学, 山东 泰安 271000; 2. 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430030)

**摘要:** 为探究不同时期环割对烤烟上部烟叶生长发育及质量的影响, 以云烟 87 为试验材料, 分别设打顶后环割 (T1)、下部叶采收后环割 (T2)、中部叶采收后环割 (T3) 3 个处理, 以不环割烟株作为对照, 对上部烟叶农艺性状、光合参数、糖代谢指标、碳氮代谢关键酶、氧化胁迫指标、化学成分、烤后感官质量进行测定分析。结果表明, 下部叶采收后环割 (T2) 能够促进烟叶开片, 长宽比降低 7.90%, 叶面积提升 6.53%; 叶片光合作用受到抑制, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度提升 16.48%, 蒸腾速率下降 20.26%。环割处理不同程度地抑制叶片中 SOD、POD、CAT 活性, 提高烟叶中 MDA 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量, 促进叶片衰老。T1、T2 处理显著提高 淀粉酶、淀粉酶、总淀粉酶和 NI 活性, 降低叶片 NR 活性, 显著降低烤后叶片烟碱和蛋白质含量, 烤后烟叶香气质和香气量提升, 余味改善, 感官质量提高。以下部叶采收后环割对烟叶质量的改善效果最优。

**关键词:** 环割; 上部烟叶; 抗氧化酶; 碳氮代谢; 衰老指标

## Effects of Girdling at Different Stages on Growth and Development and Quality of Upper Tobacco Leaves

YANG Chenyi<sup>1</sup>, SUN Guangwei<sup>2</sup>, CHEN Zhenguo<sup>2</sup>, YU Tao<sup>1</sup>, LIU Yingchao<sup>1</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, CUI Zhicheng<sup>1</sup>, SUN Xiupeng<sup>1</sup>, WANG Yujun<sup>1\*</sup>

(1. Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271000, China; 2. Hubei Tobacco Science Research Institute, Wuhan 430030, China)

**Abstract:** To study the effect of girdling on growth and development, and quality of upper tobacco leaves of flue-cured tobacco, Yunyan 87 was used as the test material, and girdling after topping (T1), girdling after harvesting the lower leaves (T2), and girdling after harvesting the middle leaves (T3) were used as test treatments, with ungirdling plants as controls to determine and analyze the agronomic traits, photosynthetic parameters, sugar metabolism indexes, key enzymes of carbon and nitrogen metabolism, oxidative stress indexes, chemical routines, and sensory quality of the upper tobacco leaves. The results showed that girdling after harvesting the lower leaves (T2) promoted the opening of tobacco leaves, reduced the aspect ratio by 7.90%, increased the leaf area by 6.53%, inhibited photosynthesis, promoted intercellular CO<sub>2</sub> concentration by 16.48%, and reduced transpiration rate by 20.26%. Girdling treatments inhibited the activities of SOD, POD and CAT, increased the content of MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and promoted leaf aging in varying degrees. T1 and T2 significantly promoted the activities of alapha amylase, beta amylase, total amylase and NI, but reduced the NR activity as well as the content of nicotine and proteins, improved the aroma quality, aroma amount, the aftertaste and sensory quality. Girdling after harvesting the lower leaves had the best effect on the upper leaves.

**Keywords:** girdling; upper leaf; antioxidant enzymes; carbon and nitrogen metabolism; aging index

上部烟叶产量占整株烟叶总产量的 30%~45%, 优质上部烟叶对卷烟香味和风格具有很大贡献, 但烤烟上部烟叶存在开片差, 叶片厚, 组织结构致密, 烟碱、蛋白质、淀粉含量偏高, 还原糖及糖碱比偏低, 难以落黄成熟等一系列问题<sup>[1-3]</sup>。因此, 提高上部烟叶的可用性对促进烟草行业的发展具有重要意义。

前人研究发现, 环割对提升上部烟叶质量具有一定的作用<sup>[4]</sup>。环割会破坏植株皮层, 阻止叶片形成的光合产物向下运转, 能使叶片产生的有机物在枝叶、花芽中积累, 促进叶片的增大<sup>[5]</sup>, 同时碳水化合物在库端积累会造成库存增多, 引起植物体内源-库失衡, 通过植株的反馈调节, 降低叶片光合速率<sup>[6]</sup>, 调节碳氮代谢<sup>[7]</sup>, 促进叶片衰老<sup>[8-9]</sup>。但是环

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系烟草创新团队 (SDAIT-25-1); 中国烟草总公司山东省公司项目 (202010、201806)

作者简介: 杨趁义 (1996-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为烤烟栽培与调制。E-mail: 1778365063@qq.com

\*通信作者, E-mail: yancao@sdau.edu.cn

收稿日期: 2020-07-30

修回日期: 2020-10-20

割有一定的缺陷,唐钢梁等<sup>[10]</sup>发现,适宜的环割措施能够提高上部烟叶质量,但如果阻断次数过多或皮层损伤过大会造成伤口愈合困难,植株不能及时恢复正常生理代谢,易引起植株长势衰退、提前变黄,甚至死亡。目前尚未见不同时期环割对上部烟叶质量影响的相关研究。本文通过探讨不同时期环割处理对上部烟叶生长发育及质量的影响,为改善上部烟叶提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2018、2019 年 7—9 月在恩施州利川市柏杨镇进行,供试品种为云烟 87,土壤为砂壤土,土壤有机质含量 2.39%,pH 5.91,速效氮 91.00 mg/kg,有效磷 49.34 mg/kg,速效钾 158.00 mg/kg。施肥量纯氮 90 kg/hm<sup>2</sup>, $m(N):m(P_2O_5):m(K_2O)=1:1.5:2.5$ ,行距 1.2 m,株距 0.55 m。其他技术措施和田间管理按常规生产。

### 1.2 试验设计

选取烟株生长正常、长势一致的烟田,设置 4 个处理:CK,不环割;T1,打顶后地面上方 10 cm 处宽度为 1 cm 环割;T2,下部叶采收后地面上方 10 cm 处宽度为 1 cm 环割;T3,中部叶采收后地面上方 10 cm 处宽度为 1 cm 环割。每处理 3 次重复,每小区 3 行,每行 10 株,田间随机区组排列。

### 1.3 测定项目及方法

于上部烟叶成熟采收时,每个小区选取自下而上第 15 叶位进行农艺性状和生理指标测定。

1.3.1 农艺性状 测定叶长和叶宽,叶面积=叶长×叶宽×0.6345。每小区测定 3 株。

1.3.2 光合参数 光合参数采用 Li-6400 光合仪测定,每处理各 3 片。

1.3.3 酶类及生理指标 随机取 6 片第 15 叶位烟叶,用蒸馏水洗净、擦干,取叶片基部第 2、3 叶脉之间部分采用试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)测定生理衰老指标超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性,丙二醛(MDA)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)含量,糖代谢相关指标 α 淀粉酶活性、β 淀粉酶活性、总淀粉酶活性、NI 活性、蔗糖含量、NR 活性,测定方法参照文献<sup>[11-12]</sup>进行。

1.3.4 化学成分 每小区随机取 6 片第 15 叶位烟叶进行标记,随各小区上部烟叶烘烤后制成样品。总糖、还原糖、烟碱含量分别按照 YC/T 159—2002、YC/T 160—2002 烤烟及烤烟制品化学成分连续流动法测定,蛋白质含量采用试剂盒(购自南京建成生物工程研究所)测定。

1.3.5 感官品质评价 感官质量由湖北中烟工业有限责任公司技术中心评吸专家按标准 YC/T 138—1998 进行鉴定。指标包括香气质、香气量、杂气、刺激性、余味、燃烧性、灰色。

1.3.6 经济性状 通过三段五步式烘烤工艺进行烘烤后回潮,按照 GB 2635—1992 要求进行烤烟分级,计算产值。

## 1.4 数据处理

所有试验数据均通过 Microsoft Office Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件进行统计分析,多重比较采用 Duncan 法。

## 2 结果

### 2.1 不同时期环割对上部烟叶农艺性状的影响

由表 1 可知,不同时期环割处理对上部烟叶农艺性状具有一定影响。与 CK 相比,各处理叶长、叶宽之间均无显著差异,但 T1、T2、T3 处理长宽比分别较 CK 降低 5.60%,7.90%,4.40%,且 T2 处理差异显著;叶面积分别增加 7.87%,6.53%,5.51%,且均与 CK 差异显著。说明环割能够增加上部烟叶叶面积,降低长宽比,促进开片。综合来看,以下部叶采收后环割处理效果最优。

### 2.2 不同时期环割对上部烟叶光合参数的影响

由表 2 可知,不同时期环割对叶片光合特性具有一定的影响。与 CK 相比,各处理的净光合速率均下降,其中 T1、T2、T3 分别降低了 9.15%,19.15%,12.69%,但差异不显著;T2 处理气孔导度降低 8.33%,T1 和 T3 处理较 CK 分别上升 25%和 8.33%,但各处理气孔导度之间没有显著差异,以下部叶采收后环割气孔导度最低;胞间 CO<sub>2</sub> 浓度较 CK 有所上升,其中 T1、T2、T3 分别上升了 6.00%,16.48%,15.45%,且 T2、T3 较 CK 差异显著;蒸腾速率以 T2 最低,且显著低于其他处理。说明适时环割能够抑制上部烟叶的光合作用。以下部叶采收后环割抑制作用最强。

表1 不同时期环割对上部烟叶农艺性状的影响

Table 1 Effects of girdling at different stages on agronomic characteristics of upper tobacco leaves

处理	叶长	叶宽	叶长/叶宽	叶面积
Treatment	Blade length/cm	Blade width/cm	Leaf length/ leaf width	Leaf area/cm <sup>2</sup>
CK	66.47±2.11a	17.24±1.23a	3.86±0.23a	727.10±11.23b
T1	67.11±3.16a	18.42±1.74a	3.64±0.12ab	784.34±23.58a
T2	65.88±2.89a	18.53±2.58a	3.56±0.15b	774.57±14.21a
T3	66.80±4.12a	18.10±2.95a	3.69±0.21ab	767.16±21.15a

注：同列数据后有不同小写字母者表示处理间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ )，下同。

Note: Different lowercase letters after the same column data indicate that the difference between treatments is statistically significant ( $p < 0.05$ ). Same as below.

表2 不同时期环割对上部烟叶光合参数的影响

Table 2 Effects of girdling at different stages on photosynthetic parameters of upper tobacco leaves

处理	净光合速率	气孔导度	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度	蒸腾速率
Treatment	Net photosynthetic rate/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Stomatal conductance/ ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	Transpiration rate/ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
CK	13.00±2.58a	0.12±0.02a	155.91±8.21b	3.11±0.24a
T1	11.81±2.37a	0.15±0.03a	165.26±7.57b	3.17±0.35a
T2	10.51±2.31a	0.11±0.02a	181.61±5.32a	2.48±0.21b
T3	11.35±1.58a	0.13±0.01a	180.00±6.12a	2.79±0.18a

### 2.3 不同时期环割对上部烟叶生理指标的影响

2.3.1 不同时期环割对上部烟叶衰老生理指标的影响 由表3可知,不同时期环割处理对SOD、POD、CAT活性及MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量的影响效果显著。与CK相比,各处理SOD活性分别降低15.10%、26.92%、6.76%,其中T2处理差异显著;POD、CAT活性均有所降低,但各处理之间差异不显著。各处理中MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量表现均表现为T1、T2较高,且显著高于CK。说明在打顶、下部叶采收后环割能抑制抗氧化酶活性,提高MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量,促进上部烟叶落黄衰老,有利于叶片成熟,而中部叶采收后环割对上部烟叶衰老生理指标影响较小。

2.3.2 不同时期环割对糖代谢相关指标的影响 由表4可知,不同时期环割对上部烟叶糖代谢指标

具有显著影响。T1、T2处理 $\alpha$ 淀粉酶活性分别较CK显著上升9.78%、34.78%,而T3处理有所降低,为34.78%; $\beta$ 淀粉酶活性表现为T1>T2>T3>CK,T1、T2显著高于CK;总淀粉酶活性表现为T1>T2>T3>CK,T1、T2显著高于CK。NI活性表现为T2>T1>T3>CK,且T1、T2处理显著高于CK,各处理的蔗糖含量均低于对照,且以T2处理最低。说明打顶和下部叶采收后环割均能提高淀粉酶和NI活性,促进淀粉和蔗糖的代谢转化。

2.3.3 不同时期环割对NR活性的影响 由图1可知,不同时期环割处理均能抑制NR活性。各处理NR活性大小表现为T2<T1<T3<CK,其中T1、T2处理差异显著且分别较CK降低了55.93%、61.01%。说明环割能够抑制NR活性,从而抑制上部烟叶氮代谢,以打顶后环割处理效果最明显。

表3 不同时期环割对上部烟叶衰老生理指标的影响

Table 3 Effects of girdling at different stages on the physiological aging indicators of upper tobacco leaves

处理	SOD活性	POD活性	CAT活性	MDA含量	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 含量
Treatment	SOD activity/ ( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ )	POD activity/ ( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ )	CAT activity/ ( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ )	MDA content/ ( $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ )	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> content/ ( $\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ )
CK	259.34±13.24a	295.06±23.42a	254.64±13.81a	49.05±3.14b	3 453.01±36.38b
T1	220.19±15.17a	273.86±27.31a	246.11±15.93a	55.54±2.53a	4 047.15±42.51a
T2	189.52±18.14b	277.31±18.58a	249.29±27.20a	57.44±2.41a	4 158.44±46.75a
T3	241.82±21.26a	288.51±26.31a	229.49±26.26a	43.30±2.58b	3 679.40±51.20b

表4 不同时期环割对上部烟叶糖代谢指标的影响

Table 4 Effects of girdling at different stages on the sugar metabolism indexes of upper tobacco leaves

处理	$\alpha$ 淀粉酶活性	$\beta$ 淀粉酶活性	总淀粉酶活性	NI活性	蔗糖含量
Treatment	Alpha amylase activity/( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Beta amylase activity/( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Total amylase activity/( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ )	NI activity/( $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Sucrose content/( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ )
CK	2.76±0.05b	6.52±0.58b	9.28±0.47b	41.96±3.61c	97.18±7.21a
T1	3.03±0.13a	13.83±1.74a	16.86±2.14a	58.49±2.54b	94.86±6.18ab
T2	3.72±0.27a	11.31±1.92a	15.03±2.25a	74.74±5.71a	90.67±6.21b
T3	1.80±0.06c	7.60±0.63b	9.40±1.03b	48.72±4.31c	96.47±4.74ab

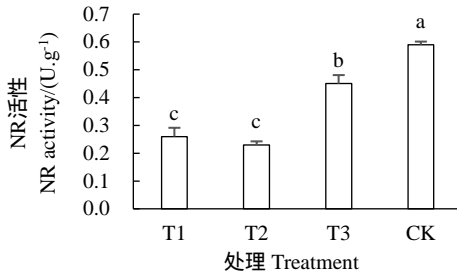


图 1 不同时期环割对 NR 活性的影响

Fig. 1 Effects of girdling at different stages on NR activity

2.4 不同时期环割对烤后上部烟叶化学成分的影响

由表 5 可知，不同时期环割对上部烟叶化学成分具有显著影响。与 CK 相比，T1、T2、T3 处理的烟碱含量较 CK 分别降低 25.82%、24.17%、3.31%，其中 T1、T2 处理较 CK 达到差异显著水平；蛋白质含量分别较 CK 降低了 21.00%、26.47%、8.29%，且均较 CK 差异显著；还原糖含量分别上升 3.14%、8.95%、2.62%，但差异不显著；总糖含量各处理均低于 CK；糖碱比和两糖比均以 T2 最高，且较 CK 差异显著。说明不同时期环割处理均能够降低上部烟叶烟碱和蛋白质含量，促进总糖向还原糖类物质转化，提高糖碱比和两糖比。综合来看以打顶和下部叶采收后环割效果较明显。

表 5 不同时期环割对烤后上部烟叶化学成分的影响

Table 5 Effects of girdling at different stages on the chemical composition of upper tobacco leaves

处理 Treatment	烟碱 Nicotine/%	还原糖 Reducing sugar/%	总糖 Total sugar/%	蛋白质 Protein/g	糖碱比 Sugar/alkaloid	两糖比 Reducing sugar/total sugar
CK	3.02±0.26a	26.72±2.17a	35.62±3.58a	53.08±6.37a	8.85±0.98b	0.75±0.02b
T1	2.24±0.12b	27.56±3.52a	33.13±4.24a	41.93±4.11b	12.30±1.17a	0.83±0.12ab
T2	2.29±0.18b	29.11±3.19a	30.85±5.12a	39.03±3.84b	12.71±1.33a	0.94±0.05a
T3	2.92±0.21a	27.42±3.35a	33.14±3.41a	48.68±6.12ab	9.39±1.04b	0.83±0.11ab

表 6 不同时期环割对烤后上部烟叶感官质量的影响

Table 6 Effects of girdling at different stages on the sensory quality after baking of upper leaves

处理 Treatment	香气质 Aroma (18)	香气量 Aroma amount (16)	杂气 Miscellaneous (16)	刺激性 Irritating (20)	余味 Aftertaste (22)	燃烧性 Flammability (4)	灰色 Grey (4)	合计 Total (100)
CK	16±0.5b	13±0a	14±0a	17±0.5a	16.5±0.5b	4±0a	4±0a	84.5±1.0b
T1	16.5±0.5ab	13.5±0.5a	13.5±0.5a	17±0.5a	17±0.5ab	4±0a	4±0a	85.5±0.5ab
T2	17±0.5a	13.5±0.5a	13.5±0.5a	17±1.0a	17.5±0.5a	4±0a	4±0a	86.5±0.5a
T3	16±0.5b	13.5±0.5a	13.5±0.5a	17±1.0a	17±0.5ab	4±0a	4±0a	85±1.0ab

表 7 不同时期环割对烟叶经济性状的影响

Table 7 Effects of girdling at different stages on the economic properties of tobacco leaves

处理 Treatment	上等烟比例 The first-class tobacco proportion/%	上中等烟比例 The first-class and middle-class tobacco proportion/%	均价 Average price/ (yuan·kg <sup>-1</sup> )	产量 Yield/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	产值 Output value/ (yuan·hm <sup>-2</sup> )
CK	32.66±2.14b	73.15±2.58b	17.47±1.89a	2 527.05±78.42a	44 147.56±2 127.63b
T1	38.83±3.51a	74.54±3.14ab	18.95±2.06a	2 635.20±121.17a	49 937.04±3 012.56ab
T2	41.12±2.27a	78.58±2.29a	19.56±1.12a	2 675.85±132.10a	52 339.33±1 823.12a
T3	31.83±3.24b	74.82±5.75ab	18.17±1.66a	2 496.45±221.83a	45 360.50±2 248.61b

2.5 不同时期环割对烤后上部烟叶感官质量的影响

由表 6 可以看出，不同时期环割对上部烟叶烤后感官质量具有一定影响。T1、T2 处理香气质较 CK 略好，环割处理香气量略有提升，余味改善，总分略高，但杂气略重。各处理间刺激性、燃烧性和灰色无显著差异。说明打顶后和下部叶采收后环割能够小幅提升上部烟叶烤后感官质量，提高香气质和香气量。总体以下部叶采收后环割处理感官质量最佳。

2.6 不同时期环割对烟叶经济性状的影响

由表 7 可以看出，不同时期环割对烤后烟叶的经济性状具有显著影响。随着环割时间的推迟，各处理烤后烟的上等烟比例、上中等烟比例、产量和产值均表现为先增加后降低的趋势。与 CK 相比，T1、T2 上等烟比例分别显著增加 18.89%、25.90%，T3 处理较 CK 降低 2.54%；T1、T2、T3 上中等烟比例分别增加 1.90%、7.42%、2.28%，其中 T2 处理达到显著水平。T1、T2 产量分别较 CK 增加 4.28%、5.87%，而 T3 则略有降低，较 CK 降低 1.21%。均价和产值均以 T2 最高；T1 次之。说明适宜的时期环割能够提高烤后烟叶的经济性状，以 T2 最优。

### 3 讨论

为解决烤烟上部烟叶叶片厚、开片差、组织结构致密、难以正常落黄成熟、工业可用性低等问题,已有研究提出了一系列措施<sup>[1-2]</sup>。罗海波等<sup>[13]</sup>、吴黎明等<sup>[14]</sup>研究发现,环割处理能够阻遏光合产物向韧皮部的运输,提升叶面积,降低长宽比,促进上部烟叶开片。本试验研究也发现,与CK相比,下部叶采收后环割能够有效降低上部叶长宽比,提升叶面积,促进上部叶开片,效果最优。

前人研究表明,环割会抑制上部叶净光合速率,降低叶片蒸腾速率<sup>[15-17]</sup>。本试验研究发现,下部叶采收后环割能够显著降低上部叶蒸腾速率,提升胞间CO<sub>2</sub>浓度,降低净光合速率和气孔导度,改善上部叶光合特性。

研究发现,环割处理对多种植物生理过程都有影响,梁春辉等<sup>[8]</sup>、顾祝禹等<sup>[9]</sup>在柑橘和花烟草上研究发现环割能抑制SOD、POD、CAT等活性,提高MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量,造成上部叶氧化胁迫加剧,促进上部叶的生理衰老。本试验研究发现,打顶、下部叶采收后环割能有效抑制抗氧化酶活性,提高MDA、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量。此外烤烟植株韧皮部受到破坏后,阻碍了烟碱和叶片中的光合产物运输,会导致碳代谢旺盛,而氮代谢受到抑制<sup>[18-21]</sup>。本试验结果表明,与CK相比,不同时期环割后会抑制上部叶NR活性,提高NI活性,且下部叶采收后环割对改善上部叶碳氮代谢效果最为显著。同时薛琳等<sup>[22]</sup>研究发现,烤后烟叶的感官质量和还原糖、糖碱比等呈显著正相关关系,与烟碱、总氮等呈显著的负相关关系。本试验研究发现不同时期环割均能使上部叶蛋白质、烟碱含量降低,还原糖含量增加,糖碱比提升,促进上部叶化学成分协调,且下部叶采收后环割香气质较好,香气量略增加,余味改善、感官质量最好。

### 4 结论

研究表明,打顶后环割、下部叶采收环割、中部叶采收后环割3个处理均能增加上部叶叶面积,降低长宽比、促进开片,同时能抑制抗氧化酶活性,促进叶片衰老,并能调节碳氮代谢,提升烤后烟叶两糖比、降低蛋白质和烟碱含量,提高烟叶感官质量。在下部叶采收后环割对提升上部叶质量效果最为显著。

### 参考文献

- [1] 宫长荣,刘霞,宋朝鹏,等.影响烤烟上部叶质量的因素及提高其可用性的措施[J].中国农学通报,2007,23(3):103-108.  
GONG C R, LIU X, SONG Z P, et al. The influential factors of quality in upper leaf of flue-cured tobacco and agricultural measures for improving its usability[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 103-108.
- [2] 蔡宪杰,刘茂林,谢德平,等.提高上部烟叶工业可用性技术研究[J].烟草科技,2010(6):10-17.  
CAI X J, LIU M L, XIE D P, et al. Study on improving usability of upper flue-cured tobacco leaves[J]. Tobacco Science & Technology, 2010(6): 10-17.
- [3] 赵环宇,孙光伟,王玉军,等.植物生长调节剂对烤烟上部叶质量的影响[J].中国烟草科学,2019,40(2):38-43.  
ZHAO H Y, SUN G W, WANG Y J, et al. Effects of plant growth regulators on the quality of upper leaves of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2019, 40(2): 38-43.
- [4] 孙军伟,许东亚,史宏志,等.环割对烤烟成熟落黄以及烤后烟质量的影响[J].西南农业学报,2017,30(9):2142-2148.  
SUN J W, XU D Y, SHI H Z, et al. Effect of ringing on yellowing and quality of flue-cured tobacco[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(9): 2142-2148.
- [5] VAIO C D, PETTITO A, BUCCHERI M. Effect of girdling on gas exchanges and leaf mineral content in the "independence" nectarine[J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24(7): 1047-1060.
- [6] TADEO R, MANUEL T. Regulation of photosynthesis through source: sink imbalance in citrus is mediated by carbohydrate content in leaves[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 116(4): 563-572.
- [7] 刘华山,韩锦峰,台国琴,等.环割对烤烟酶活性及烟碱和钾含量的影响[J].河南农业科学,2005(3):32-34.  
LIU H S, HAN J F, TAI G Q, et al. Effect of girdling on enzymatic activity and nicotine and potassium content in flue-cured tobacco[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2005(3): 32-34.
- [8] 梁春辉,陈惠敏,李娟,等.环割对柑橘叶片衰老的影响[J].园艺学报,2018,45(6):1204-1212.  
LIANG C H, CHEN H M, LI J, et al. Effects of girdling on senescence of citrus leaf[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(6): 1204-1212.
- [9] 顾祝禹,唐钢梁,艾克拜尔·伊拉洪,等.韧皮部环割诱导下的花烟草衰老机制[J].植物生态学报,2015,39(11):1082-1092.  
GU Z Y, TANG G L, IKBYER Y, et al. Senescence mechanisms induced by phloem girdling in *Karelinia caspia*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(11): 1082-1092.
- [10] 唐钢梁,李向义,林丽莎,等.表皮环割对花烟草(*Karelinia caspia*)水势及光合参数的短期影响[J].中国沙漠,2014(6):1527-1536.  
TANG G L, LI X Y, LIN L S, et al. Short-term effect of phloem girdling on water potential and photosynthetic characteristics in *Karelinia caspia*[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1527-1536.
- [11] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.  
GAO J F. Experimental guidance on plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [12] 王丽,关雪莲.植物学实验指导[M].北京:中国农业大学出版社,2013.  
WANG L, GUAN X L. Botanical experimental guidance[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013.
- [13] 罗海波,钱晓刚,何腾兵,等.增施氮肥和环割对烤烟光合速率的影响[J].土壤,2003(3):259-261.  
LUO H B, QIAN X G, HE T B, et al. Effects of cultural methods on photosynthesis of flue-cured tobacco[J]. Soils, 2003(3): 259-261.
- [14] 吴黎明,蒋迎春,周民生,等.环割对金水柑树体生长、树体营养及果实品质的影响[J].湖北农业科学,2009,48(11):2762-2766.  
WU L M, JIANG Y C, ZHOU M S, et al. Effects of ringing on growth, nutrition and fruit quality of Jinshuigan ponkan mandarin[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(11): 2762-2766.

- [15] SCHAPER H, CHACKO E K. Effect of irradiance, leaf age, chlorophyll content and branch-girdling on gas exchange of cashew (*Anacardium occidentale* L.) leaves[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2015, 68(4): 541-550.
- [16] ROPER T R, WILLIAMS L E. Net CO<sub>2</sub> assimilation and carbohydrate partitioning of grapevine leaves in response to trunk girdling and gibberellic acid application[J]. Plant Physiology, 1989, 89(4): 1136-40.
- [17] URBAN L, ALPHONSOUT L. Girdling decreases photosynthetic electron fluxes and induces sustained photoprotection in mango leaves[J]. Tree Physiology, 2007, 27(3): 345-352.
- [18] 李思云. 烤烟打顶后环割对氮素分配及上部叶品质的影响[D]. 郑州：河南农业大学，2014.  
LI S Y. The influence of girdling after topping on distribution of nitrogen and quality of upper leaf of flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [19] 许东亚. 烤烟氮代谢动态调控及其对烟叶质量的影响[D]. 郑州：河南农业大学，2016.  
XU D Y. Dynamic regulation of nitrogen metabolism in flue-cured tobacco and its effect on tobacco leaf quality[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.
- [20] 黄助理. 茎部环割处理对烤烟生长及烟碱和钾素运输与分配的影响[D]. 长沙：湖南农业大学，2015.  
HUANG S L. Stem girdling treatment effects on the transport and distribution in flue cured tobacco growth and nicotine and potassium[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [21] 杨俊兴, 杨虹琦, 周冀衡, 等. 环割处理对烤烟成熟期叶片理化成分的影响[J]. 湖南农业科学, 2007 ( 4 ) : 64-66  
YANG J X, YANG H Q, ZHOU J H, et al. Effect of girdling on physical-chemical components of mature leaf of flue-cured tobacco[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2007(4): 64-66
- [22] 薛琳, 朱启法, 季学军, 等. 皖南烤烟烟叶化学成分与感官品质的相关性[J]. 烟草科技, 2016, 49 ( 11 ) : 26-32  
XUE L, ZHU Q F, JI X J, et al. Correlation of chemical components with overall sensory quality of tobacco leaves in south Anhui[J]. Tobacco Science & Technology, 2016, 49(11): 26-32

(上接第 14 页)

- [28] WANG Z G, ZHANG P X, SHAO Y T, et al. Molecular cloning and the expression pattern of a phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase in *Kalidium foliatum* under NaCl treatment[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2020, 67(4): 750-757.
- [29] LI W J, FENG H, FAN J H, et al. Molecular cloning and expression of a phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase homolog in *Oryza sativa*[J]. Biochim Biophys Acta, 2000, 1493(1): 225-230.
- [30] SUGIMOTO M, SAKAMOTO W. Putative phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase gene from *Arabidopsis thaliana* induced by oxidative stress[J]. Genes & Genetic Systems, 1997, 72(5): 311-316.
- [31] 乌凤章. 三个越橘品种对盐胁迫的生长和生理响应及耐盐性差异[J]. 植物生理学报, 2019, 55 ( 11 ) : 1638-1646.  
WU F Z. Growth and physiological response and salt-tolerance differences of three blueberry seedlings under salt stress[J]. Plant Physiology Journal, 2019, 55(11):1638-1646.
- [32] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 909-930.
- [33] 王菲菲, 丁明全, 邓澍荣, 等. 胡杨谷胱甘肽过氧化物酶 *PeGPX* 基因的克隆及转化植株耐盐性分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2012, 31 ( 3 ) : 231-239.  
WANG F F, DING M Q, DENG S R, et al. Cloning of glutathione peroxidase gene *PeGPX* from *Populus euphratica* and the salt tolerance of the transformed plants[J]. Genomics and Applied Biology, 2012, 31(3): 231-239.
- [34] 宋建辉, 李甜, 吴秀云, 等. *OsPHGPx* 基因的过量表达增强水稻抗氧化能力[J]. 生物技术通报, 2014 ( 11 ) : 107-113.  
SONG J H, LI T, WU X Y, et al. Enhanced oxidative stress tolerance of transgenic rice plants overexpressing *OsPHGPx* gene[J]. Biotechnology Bulletin, 2014(11): 107-113.
- [35] 刘冠兰, 李甜, 刘进元, 等. 原核表达的萝卜 PHGPx 和谷胱甘肽对 NIH3T3 细胞氧化损伤的联合保护作用[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30 ( 9 ) : 13-18.  
LIU G L, LI T, LIU J Y, et al. Protection effects of prokaryotic expressed radish phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase and glutathione on hydroperoxide-mediated injury in mouse NIH3T3 fibroblasts[J]. China Biotechnology, 2010, 30(9): 13-18.