

打顶后 NAA 处理对烟草生长 烟叶中钾和烟碱浓度的影响

冀宏杰^{1,2}, 李春俭¹, 徐慧¹, 张福锁¹, 洪丽芳³, 张俊⁴

¹ 中国农业大学植物营养系 / 农业部植物营养学重点开放实验室, 北京 100193;

² 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081;

³ 云南省农科院土壤肥料研究所, 昆明 650231; ⁴ 云南省曲靖市麒麟区土壤肥料工作站, 云南曲靖 655000

摘要: 在云南省田间连续三年研究了打顶后在茎断面涂抹萘乙酸(NAA)处理对烤烟植株生长、钾素吸收、烟叶中钾和烟碱浓度的影响。结果表明,打顶导致烟株中的钾素损失,烟叶中钾浓度下降,烟碱浓度增加。打顶后在茎断面用 NAA 处理可以增加烟株对钾素的吸收,促进钾素向叶片中分配,使叶片钾浓度提高;同时降低叶片烟碱浓度。第一次 NAA 处理两周后用 NAA 再处理一次虽然可以进一步提高烟叶钾浓度,但使叶片干重稍有下降,且在操作上多一道工序。若开花后不打顶,虽然叶片中钾浓度较高,但大大降低了叶片干物重,严重影响叶片的产量和品质。

关键词: 萘乙酸;烤烟;钾浓度;烟碱;打顶

中图分类号: S14、S572 **文献标识码:** A

Effects of NAA Application after Removing the Shoot Apex on Growth, K⁺ and Nicotine Concentrations in Component Tissues of Flue-cured Tobacco Plants

Ji Hongjie^{1,2}, Li Chunjian¹, Xu Hui¹, Zhang Fusuo¹, Hong Lifang³, Zhang Jun⁴

¹Department of Plant Nutrition, China Agricultural University, Key Laboratory of Plant Nutrition, Ministry of Agriculture, Beijing 100193;

²Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Key Laboratory of Plant Nutrient and Nutrient Cycle, Ministry of Agriculture, Beijing 100081;

³Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650231; ⁴Qilin Soil and Fertilizer Station, Qujing 655000

Abstract: Field experiments were conducted in three years (1999, 2000 and 2001) in Yunnan province to study the effects of NAA application after removing the shoot apex on plant growth, K⁺ and nicotine concentrations in different organs of flue-cured tobacco. The results showed that, excision of the shoot apex caused a net decrease in total K⁺ content of whole plant, a decrease in K⁺ concentration while an increase in nicotine concentration in different leaves. Application of NAA onto the cut-surface of the stem after removal of the shoot apex stimulated K⁺ uptake and distribution into the leaves, resulted in increase in K⁺ concentration and decrease in nicotine concentration in different leaves. Applying NAA twice (once again two weeks after the first application) could further improve leaf K⁺ concentration, but cause a slight decrease in leaf dry weights. Keeping plant intact (no removing the shoot apex) resulted lower leaf dry weights and yield, and

基金项目: 国家自然科学基金项目“打顶及采收对烤烟体内烟碱合成的影响及其调节”(30370842);“烤烟体内钾循环、生长后期钾的再分配及其影响因素研究”(30070452); 云南省省院省校合作项目“云南烤烟钾吸收、循环、再分配规律及提高烟叶钾含量的关键措施研究”资助。

第一作者简介: 冀宏杰,男,1971年出生,河北保定人,博士,主要从事施肥与环境研究。通信地址:100081北京市中关村南大街12号中国农科院农业资源与农业区划研究所, Tel: 010-82108704, E-mail: hjji@caas.ac.cn。

通讯作者: 李春俭,男,1957年出生,教授,博士,主要从事植物营养生理研究。通信地址:100193中国农业大学植物营养系, Tel: 010-62733886, E-mail: lichj@cau.edu.cn。

收稿日期: 2008-08-28, **修回日期:** 2008-10-19。

poor leaf quality, compared with the apex-removed plants, although the leaf K⁺ concentration was higher in the intact plants. NAA application one time after removal of the shoot apex was enough for increasing in K⁺ concentration and decreasing in nicotine concentration in tobacco leaves.

Key words: NAA, flue-cured tobacco, potassium concentration, nicotine concentration, removing the shoot apex

钾浓度是衡量烟叶品质的一项重要指标,它主要影响烟叶的燃烧性。钾浓度高的烟叶阴燃持火力大,可燃率高,燃烧温度显著降低,从而减少了有害物质的挥发,提高了安全性。通常认为优质烟叶的钾浓度要达到25 mg/g以上;此外,烟叶中烟碱含量普遍偏高,工业可用性低,是中国烟叶生产中的另一个问题^[1]。如何在生产中采取有效措施,提高烟叶含钾量,并同时降低烟碱含量,是中国烟草科技工作者所必须面对的课题。打顶是烟草生产过程中为保证烟叶产量和品质而采取的一项技术措施,能够阻止叶片中的光合产物和根系吸收的矿质养分向花器官中转移。但打顶至少可以带来两方面的不利影响:首先,茎顶端是植物的生长中心和物质交换中心,打顶去掉了烟株茎顶端强大的生长库,使烟株原有的库源关系发生变化,影响烤烟体内同化产物和矿质养分的分配。地上部的钾回流到根系的比例增加,结果造成地上部尤其是叶片中含钾量下降^[2,3]。其次,在生产中很早就观察到,打顶后烟叶中的烟碱浓度有明显增加^[4-6]。有研究表明,打顶所造成机械损伤,是刺激烟株体内烟碱浓度增加的直接原因。增加烟碱合成是烟株对外来损伤的一种自我保护的适应性反应^[7,8]。

茎尖是植物体中生长素合成的主要部位。由于打顶去掉生长素的主要合成部位,使植物体内的生长素含量明显降低,破坏了植物体内的激素平衡。许多研究表明,植物顶端产生的生长素向下极性运输所造成的浓度梯度可以决定矿质元素和同化物质在体内的运输方向及其分布^[9,10],生长素可以通过影响同化物在韧皮部的运输来控制茎中的营养梯度^[11]。打顶后涂抹生长素类物质会促进烤烟叶片的钾浓度提高^[3,12]。另一方面,生长素在调节烟株体内烟碱合成方面同样具有重要作用。打顶后涂抹生长素能够有效降低烟叶中的烟碱浓度^[8,13]。根据上述研究结果,如果生产中在打顶后用生长素处理,将能够提高烟叶中的含钾量,同时降低烟叶中的烟碱浓度,提高烟叶品质。笔者在云南田间连续进行了三年田间试验,得到了较好的效果。现将研究结果报告如下。

1 材料与与方法

供试烤烟为云南主栽品种 K326, 试验布置在云南

省曲靖市越州镇,土壤为山原红壤,肥力中等。烤烟移栽时覆盖地膜。施肥情况:1999年为烤烟移栽前基施 N 120 kg/hm², P₂O₅ 180 kg/hm², K₂O 180 kg/hm², 移栽后 25 d 再追施一次钾肥 (K₂O) 120 kg/hm²。2000年及2001年均均为烤烟移栽前基施 N 135 kg/hm², P₂O₅ 202.5 kg/hm², K₂O 337.5 kg/hm² (氮磷钾比为 1:1.5:2.5)。行株距 1.1 m×0.6 m。在田间选取光照、株型和叶片发育状况基本一致的烟株挂牌标记处理。

1999年设三个处理:①对照(不打顶,正常去侧芽);②打顶(当第一朵中心花开放时打顶,并适时去掉侧芽);③打顶+NAA(打顶后在茎切面上涂抹 NAA)

2000年设四个处理:①对照;②打顶;③打顶+NAA一次(打顶后在茎切面上涂抹 NAA 一次);④打顶+NAA两次(第一次 NAA 处理两周后,切去 2 cm 茎段并再次用 NAA 处理)。

2001年设两个处理:①打顶;②打顶+NAA。

上述每一处理 4 次重复。

NAA 是一种人工合成生长素,使用方法:打顶后在茎端切口涂抹 1 g 左右含 30 mmol/L 萘乙酸(NAA)的羊毛脂。

采样与测定:1999年分别于下二棚叶(7月30日)、腰叶(8月11日)和上二棚叶(8月24日)落黄时分三次取样,叶片共5个部位。即7月30日收获脚叶和下二棚叶,8月11日收获所有腰叶,8月24日收获上二棚叶及顶叶。2000年和2001年各部位烟叶落黄时即采收,最后采收顶叶的同时收获茎和根系。收获后将烟叶分成上、中、下三个部位,以及茎和根共5个部位。2000年除采收正常成熟叶片外,还分别在下二棚叶成熟时、腰叶成熟时与顶叶成熟时整株取样,研究生长过程中不同时间植株不同组织中钾浓度的变化动态。

含钾量的测定:样品烘干后分别称重,磨碎后用火焰光度法测定不同组织中的钾浓度。

烟碱含量的测定:采用蒸馏紫外分光光度法。称取 0.4~0.5 g 烘干植物样品直接放入 150 ml 凯氏管中,加入 10 g NaCl、20 ml 去离子水和 10 ml 30%的 NaOH 溶液,用 KDY-9810 型凯氏定氮仪蒸馏,同时用 250 ml 容量瓶盛接、加入 5 ml 1.25 mol/L H₂SO₄ 溶液吸收馏出液,至临近刻度时停止蒸馏,定容,摇匀。用岛津

UV-2201 型分光光度计比色, 在 282 nm、259 nm、236 nm 波长下测定吸光值。所用调零溶液为 0.025 mol/L 的 H₂SO₄ 溶液。根据组织干重和烟碱浓度的乘积计算样品烟碱的含量^[4]。

2 结果与分析

2.1 烤烟各部位组织干重的变化

三年的结果均可看出, 与打顶植株相比, NAA 处理对整株干重没有明显影响, 对各部位叶片干重也无显著影响(表 1~3)。

表 1 不同处理对烤烟植株各部位干重的影响(1999 年)

处理	根	茎	脚叶	下二棚	腰叶	上二棚	顶叶	顶	全株
对照	51.7 a	73.6 b	18.0 ab	21.9 a	76.8 a	47.3 a	14.8 b	50.0 a	354.1
打顶	52.1 a	116.9 a	20.1 a	24.8 a	64.0 a	29.9 a	34.5 a	1.9 b	344.1
打顶+NAA	55.0 a	115.2 a	15.1 b	23.6 a	71.8 a	47.5 a	29.3 a	1.9 b	359.4

注:表中字母为 Duncan's 新复极差测验 5%显著水平的比较结果, 每列数字后不同字母表示差异显著, 下同。

表 2 不同处理对烤烟植株各部位干重的影响(2000 年)

处理	根	茎	下部叶	中部叶	上部叶	顶	全株
对照	28.3 a	82.2 a	39.0 a	61.9 a	29.1 b	56.2 a	296.7
打顶	41.1 a	81.2 a	31.3 ab	66.8 a	38.4 a	8.6 b	267.3
打顶+NAA 一次	39.0 a	65.3 a	34.2 ab	68.8 a	46.0 a	8.6 b	261.9
打顶+NAA 两次	40.3 a	67.1 a	27.6 b	62.2 a	44.5 a	8.6 b	250.3

表 3 不同处理对烤烟植株各部位干重的影响(2001 年)

处理	根	茎	下部叶	中部叶	上部叶	全株(不含顶)
打顶	67.0 a	75.0 a	19.3 a	79.7 a	50.6 a	291.6
打顶+NAA	84.1 a	86.7 a	16.2 a	91.3 a	48.4 a	326.7

表 4 打顶及打顶后 NAA 处理对烤烟叶片中钾浓度(mg/g DW)的影响(1999 年)

处理	脚叶	下二棚	腰叶	上二棚	顶叶
对照	37.4 a	29.4 b	27.0 a	24.5 a	25.9 a
打顶	33.1 b	26.6 b	19.3 b	22.4 a	23.8 a
打顶+NAA	41.2 a	39.0 a	28.6 a	27.0 a	30.2 a
打顶+NAA 比打顶提高百分数/%	24.5	46.6	48.2	20.5	26.9

表 5 打顶及打顶后 NAA 处理对烤烟叶片中钾浓度(mg/g DW)的影响(2000-2001 年)

处理	下部叶		中部叶		上部叶	
	2000	2001	2000	2001	2000	2001
对照	44.3 a	—	33.9 a	—	24.6 a	—
打顶	38.8 b	20.4 b	26.4 b	18.4 a	24.2 a	17.1 a
打顶+NAA 一次	43.5 a	26.0 a	32.7 a	19.8 a	28.2 a	19.6 a
打顶+NAA 两次	46.6 a	—	35.3 a	—	28.5 a	—
打顶+NAA 比打顶提高百分数/%	12.1	27.5	23.9	7.6	16.5	14.6

2.2 正常落黄烟株烟株钾浓度及钾素累积量的变化

表 4、5 为三年田间条件下不同处理对正常落黄叶片钾浓度影响的结果。从 1999 年的结果中可以看出, 与打顶(烟农的常规做法)相比, 留顶和 NAA 处理显著提高了脚叶、下二棚和腰叶的钾浓度; 上二棚和顶叶的钾浓度也有不同程度提高。为了进一步验证打顶后 NAA 处理提高叶片钾浓度的结果, 分别于 2000 年和 2001 年重复了这一试验, 并在 2000 年增加了打顶后两次涂抹 NAA 的处理。

2000 年的试验结果基本与 1999 年相同, NAA 处理都能较大幅度地提高叶片钾浓度。用 NAA 处理一次的叶片钾浓度比对照提高 12.1~23.9 个百分点; NAA 处理两次对叶片钾浓度的提高幅度更大, 达到 17.8%~33.7%。

2001 年由于试验地区降雨量大大多于正常年份, 严重影响了烟株的生长, 使各部位烟叶钾浓度与往年相比也有明显下降, 但打顶后 NAA 处理仍能够提高叶片钾浓度。提高幅度为 7.6%~27.5%。

表 6 打顶及打顶后 NAA 处理对烤烟植株中钾累积量(g/株)的影响(1999 年)

处理	根	茎	脚叶	下二棚	腰叶	上二棚	顶叶	顶	全株
对照	0.5 a	1.2 a	0.6 a	0.6 b	2.0 a	1.1 a	0.4 b	1.4 a	7.9
打顶	0.4 a	0.7 a	0.7 a	0.7 b	1.2 b	0.7 a	0.8 a	0.3 b	5.4
打顶+NAA	0.7 a	1.0 a	0.6 a	1.0 a	1.9 ab	1.2 a	0.9 a	0.3 b	7.6
打顶+NAA 比打顶提高百分数/%	75	42.9	-14.3	42.9	58.3	71.4	12.5	0	40.7

表 7 打顶及打顶后 NAA 处理对烤烟植株中钾累积量(g/株)的影响(2000 年)

处理	根	茎	下部叶	中部叶	上部叶	顶	全株
对照	0.30 ab	1.31 ab	1.93 a	1.91 a	0.72 b	1.61 a	7.78
打顶	0.28 b	1.64 a	1.34 b	1.75 a	0.92 a	0.32 b	6.26
打顶+NAA 一次	0.36 a	1.00 b	1.39 b	2.18 a	1.28 a	0.32 b	6.52
打顶+NAA 两次	0.36 a	1.18 ab	1.35 b	2.35 a	1.26 a	0.32 b	6.82
打顶+NAA 比打顶提高百分数/%	28.6	-39	3.7	24.6	39.1	0	4.2

表 8 打顶及打顶后 NAA 处理对烤烟植株中钾累积量(g/株)的影响(2001 年)

处理	根	茎	下部叶	中部叶	上部叶	全株(不含顶)
打顶	0.45 a	1.06 a	0.29 a	1.46 a	0.86 a	4.13
打顶+NAA	0.61 a	1.16 a	0.42 a	1.80 a	0.95 a	4.94
打顶+NAA 比打顶提高百分数/%	35.6	9.4	44.8	23.3	10.5	19.6

表 6~8 中结果可以看出,与留顶对照相比,打顶导致烟株中钾素累积量减少,打顶后 NAA 处理可以减缓钾素累积量的下降,而且有随 NAA 涂抹次数增加而提高的趋势。分析各部位组织钾素吸收量的变化可以看到,三年试验中所有 NAA 处理均提高了叶片的钾素吸收量,特别是中上部叶片。而留顶使上部叶片的钾素吸收量大幅度下降。

2.3 处理后不同时间烟株中钾浓度和含钾量的动态变化与打顶时的结果(根、茎、下部叶、中部叶、上部叶钾浓度分别为 19.9 mg/g、37.8 mg/g、50.9 mg/g、49.6 mg/g、45 mg/g)相比,下部叶成熟时收获尽管距打顶时间较短(10d 左右),但烟株各部位组织中的钾浓度下降非常明显(表 9~11),打顶+NAA 处理能明显减缓由于打顶造成的各部位组织中钾浓度的下降。

表 9 下部叶成熟时烟株各组织中钾浓度(mg/g)的动态变化(2000)

处理	顶	根	茎	下部叶	中部叶	上部叶
对照	34.4	15.6 ab	23.1 a	44.3 a	33.8 a	33.2 ab
打顶	—	13.2 b	21.9 a	38.8 b	33.5 a	30.3 b
打顶+NAA 一次	—	14.7 ab	22.5 a	43.5 a	38.9 a	35.5 ab
打顶+NAA 两次	—	16.9 a	22.1 a	46.6 a	37.9 a	37.8 a

表 10 中部叶成熟时烟株各组织中钾浓度(mg/g)的动态变化(2000)

处理	顶	根	茎	中部叶	上部叶
对照	34.7	11.4 ab	13.6 a	33.9 a	31.8 a
打顶	—	7.5 b	16.8 a	26.4 b	23.9 a
打顶+NAA 一次	—	9.7 ab	18.8 a	32.7 a	30.5 a
打顶+NAA 两次	—	9.8 ab	14.9 a	35.3 a	33.7 a

表 11 上部叶成熟时烟株各组织中钾浓度(mg/g)的动态变化(2000)

处理	顶	根	茎	上部叶
对照	28.7	10.4 a	15.9 a	24.6 a
打顶	—	6.8 b	20.3 a	24.2 a
打顶+NAA 一次	—	9.3 a	15.2 a	28.2 a
打顶+NAA 两次	—	9.1 a	17.6 a	28.5 a

分别比较在下部叶、中部叶和上部叶成熟落黄时整株收获后烟株各组织中钾浓度的变化,可以看出,留

顶对照与涂抹 NAA 处理的烟株,各时期收获时的烤烟叶片和根中钾浓度都有所提高,茎中钾浓度没有变

化。此外,留顶对照烟株顶中的钾浓度较高,而且其浓度随生长时间的延长下降速率较慢。

打顶导致烟株中钾素累积量迅速下降,并持续到最后收获(6.2 g/株)。打顶后 NAA 处理在一定程度上减缓了整株吸钾量的下降。留顶的烟株吸钾量的增加可持续到中部叶片成熟,之后开始下降,但到收获结束时钾素累积量仍大大高于各打顶的处理(图 1)。

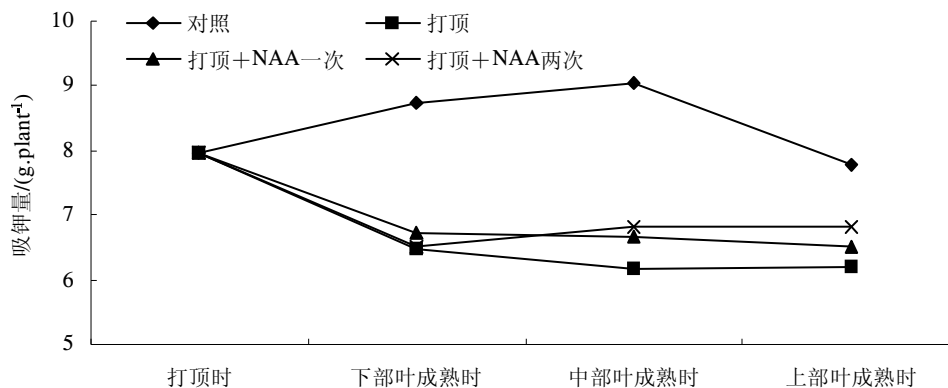


图 1 处理后不同时间烟株中钾素含量的动态变化(2000年)

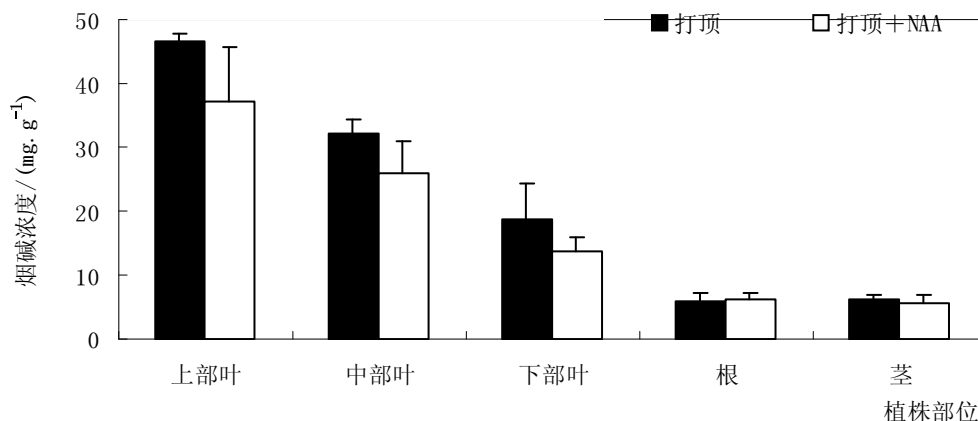


图 2 打顶后 NAA 处理对烤烟不同部位烟碱浓度的影响

3 讨论

在烤烟生产中,烟株现蕾后需要打顶,以保证光合产物及矿质养分留在营养器官中。但从生理角度来看,打顶使烟株失去了一个重要的生长中心。地上部需求减少,导致根系的吸收速率下降,使叶片中的钾浓度下降。钾离子在植株地上部与根系之间保持着循环,是维持植物体内的阴阳离子平衡及调节根系吸收的重要机制^[5]。室内营养液培养的结果表明,烟株盛旺生长期,运往地上部的钾大约有 20%~40%回流到根中,而打顶后运往地上部的钾大约有 50%~70%回流到根中^[6],说明打顶促进了钾离子从烤烟地上部向根部回流,是叶片钾浓度下降的重要原因之一。值得注意的是,打顶不仅使根系的吸收活性下降,叶片中钾浓度降低,甚至整个烟株体内的钾素累积量下降,表现出钾素的净损失(表 6~8,图 1)。以往的研究中也有类似的报

2.4 对烤烟不同部位组织烟碱含量的影响

烤烟叶片中烟碱浓度从上部叶至下部叶逐渐降低。与打顶处理相比,打顶后 NAA 处理能够降低各部位叶片中的烟碱浓度,下降幅度在 19%~28%之间。尤其对于干物重最大的中部叶片,烟碱浓度从 32 mg/g 降到了 26 mg/g,符合优质烟叶的要求。此外,NAA 处理后对于茎、根中烟碱浓度影响不大(图 2)。

道^[3,5]。即使是不打顶的烟株,在生长后期也出现钾素的净损失(图 1),详细原因目前尚不清楚。有研究证明,叶片淋洗是导致不同作物生长后期体内养分含量净损失的重要原因之一^[15]。

三年的田间试验结果表明,打顶后 NAA 处理对整株的干重并未有明显影响(表 1~3),说明 NAA 处理使叶片钾浓度提高不是由于干物质减少导致的“浓缩效应”所造成的。打顶后涂抹 NAA 在不同年份均可提高烤烟叶片钾浓度(表 4~5,9~11),并增加烟株的钾素吸收量(表 6~8,图 1),这是由于 NAA 处理一方面在一定程度上代替了顶端产生的生长素的作用,可以决定矿质元素和光合同化产物在体内的运输方向及其分布^[9,10];另一方面又与顶端不同,处理部位不会大量生长,因而不会消耗光合产物及矿质养分。这在已有的研究中已经进行了详细的讨论^[2,17]。与打顶后 NAA 处理

一次相比较, NAA 两次处理虽然可以进一步提高烟叶钾浓度(表 4~5), 但叶片干重稍有下降(表 1~3), 而且在操作上多一道工序, 难以被接受。故以打顶后 NAA 处理一次较为合适。

打顶不仅导致叶片中的钾浓度下降, 而且能够导致烟叶中的烟碱浓度增加^[4-6]。打顶造成的机械损伤, 是刺激烟株体内烟碱浓度增加的直接原因^[8,13,18]。生长素在调节根系中烟碱的合成起着重要作用。打顶使体内的生长素浓度降低, 刺激了烟碱的合成增加烟碱合成^[8,13]。打顶后 NAA 处理一定程度上能够取代顶端的作用, 抑制根系中烟碱合成, 导致叶片中的烟碱浓度降低(图 2)。

4 结论

上述研究结果表明, 打顶会同时导致叶片中钾浓度下降和烟碱浓度上升, 使烟叶品质下降。打顶又是烤烟生产中的常规措施。解决这一问题的有效措施是打顶后用生长素处理, 既能提高烟叶中的钾浓度, 又能降低烟碱含量。如果能在生产中得到推广并产业化, 将对提高中国烤烟烟叶的品质起到推动作用。

参考文献

- [1] 章启发, 陈刚, 刘光亮, 等. 施肥技术对上部烟叶使用价值的影响. 中国烟草科学, 1999, (4): 16-18.
- [2] Jiang F, Li C J, Jeschke W D, et al. Effect of top excision and replacement by 1-naphthylacetic acid on partition and flow of potassium in tobacco plants. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52: 2143-2150.
- [3] 赵正雄. 云南烤烟打顶后的干物质与钾素积累规律及其调控: [学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [4] 江锡瑜, 肖洁中, 黄立栋, 等. 试论烟碱在株内的分布及与栽培因素的关系. 中国烟草, 1988, (1): 37-41.
- [5] 胡国松, 郑伟, 王震东, 等. 烤烟营养生理. 北京: 科学出版社, 2000: 62-91.
- [6] 韩锦峰, 赫冬梅, 刘华山, 等. 不同植物激素处理方法对烤烟内烟碱含量的影响. 中国烟草学报, 2001, 7(2): 22-25.
- [7] Baldwin I. T. Mechanism of damage-induced alkaloid production in wild tobacco. *Journal of Chemical Ecology*, 1989, 15: 1661-1680.
- [8] Shi, Q M, Li C J, Zhang F S. Nicotine synthesis in *Nicotiana tabacum* L. induced by mechanical wounding is regulated by auxin. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(11): 2899-2907.
- [9] Davis C R, Wareing P F. Auxin-directed transport of radiophosphorus in stems. *Planta*, 1965, 65: 139-156.
- [10] Patrick J W, Steains K H. Auxin promoted transport of metabolites in stems of *Phaseolus vulgaris* L.: Auxin Dose-response curves and effects of inhibitors of polar auxin transport. *Journal of Experimental Botany*, 1987, 38: 203-210.
- [11] Patrick J W. An assessment of auxin promoted transport in decapitated stems and whole shoots of *Phaseolus vulgaris* L. *Planta*, 1979, 146: 107-114.
- [12] 郭丽琢. 烤烟体内钾的积累与运转: [学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2001.
- [13] Li C J, Teng W, Shi Q M, Zhang F S. Multiple signals regulate nicotine synthesis in tobacco plant. *Plant Signal & Behavior*, 2007, 2 (4): 280-281.
- [14] 曹志洪. 优质烤烟生产的土壤与施肥. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991: 271-276.
- [15] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants, 2nd edn. London: Academic Press, 1995.
- [16] 郑宪滨. 烤烟体内钾的循环、累积和分配: [学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2000.
- [17] 杨怀玉, 李春俭. 顶端调控对烤烟生长、主要矿质养分吸收和分配特性的影响. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1846-1852.
- [18] 石秋梅, 陶芾, 李春俭, 等. 机械损伤对烤烟植株氮素吸收及体内烟碱含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 292-298.