

密度和施氮量互作对烤烟叶片组织结构的影响

刘继坤¹, 徐立国², 黄择祥², 吴元华¹, 石屹¹, 孙延国¹,
白化军³, 王大海³, 高凯³, 马兴华^{1*}

(1. 中国农业科学院烟草研究所, 农业部烟草生物学与加工重点实验室, 青岛 266101; 2. 中国烟草总公司山东省公司, 济南 250101; 3. 山东潍坊烟草有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: 为探究种植密度和施氮量对烤烟中部叶片组织结构的影响, 以烤烟品种 NC102 为材料, 采用裂区设计, 以种植密度为主区, 施氮量为副区, 在大田条件下分别采集 10、20、40 和 73 d 叶龄的中部叶片, 制作石蜡切片并观察组织结构。结果表明, 叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶面积随叶龄增加均增加, 栅栏细胞密度反之。随种植密度的降低和施氮量的提高, 叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶面积、比叶重均增加, 栅栏组织密度降低。施氮量对栅栏细胞密度的影响早于种植密度, 对栅栏组织厚度的影响晚于种植密度。73 d 时叶片厚度、栅栏组织厚度、组织比、叶面积、比叶重受低种植密度和高施氮量的正交互作用影响, 密度越低, 施氮量增加对叶片组织结构的影响更加显著。在一定范围内, 适当调节种植密度和施氮量, 利用其交互作用, 可以改善叶片结构, 达到优质适产的目的。

关键词: 烤烟; 叶片; 组织结构; 种植密度; 施氮量

中图分类号: S572.01

文章编号: 1007-5119 (2018) 01-0024-08

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2018.01.004

Effects of Planting Density and Nitrogen Fertilization Amount on Tissue Structure of Middle Leaves in Flue-cured Tobacco

LIU Jikun¹, XU Ligu², HUANG Zexiang², WU Yuanhua¹, SHI Yi¹, SUN Yanguo¹,
BAI Huajun³, WANG Dahai³, GAO Kai², MA Xinghua^{1*}

(1. Tobacco Research Institute of CAAS, Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture, Qingdao 266101, China; 2. Shandong Branch of China Tobacco Company, Jinan 250101, China; 3. Weifang Tobacco Company, Weifang, Shandong 261000, China)

Abstract: To investigate the interaction effects of different planting density and nitrogen (N) application amount on tobacco leaf development and tissue structures, a split-plot field experiment with three different planting densities (main district) and two different N application amounts (deputy district) was carried out using the cultivar NC102. Through paraffin section method, the tissue structure of middle leaves with different leaf ages (10, 20, 40 and 73 d) were observed. The results showed that leaf thickness, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness and leaf area increased with leaf aging, but palisade cell density decreased. Leaf thickness, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness, leaf area and specific leaf weight increased but palisade cell density decreased with the decrease of planting density and increased N application rate. The action time of N application amount on palisade cell density was earlier than that of planting density, while the timing of effects of these two treatments was the opposite for palisade tissue thickness. There was a positive interaction between low planting density and high N application amount on leaf thickness, palisade tissue thickness, ratio of palisade tissue thickness and spongy tissue thickness, leaf area and specific leaf weight when leaf age was 73 d. The increase of N application amount showed more significant impact under lower planting densities. Adopting appropriate planting density and N application amount and taking advantage of their interaction could improve tissue structures of middle leaves and ultimately improve the quality of tobacco under proper yield.

Keywords: flue-cured tobacco; leaf; tissue structure; planting density; nitrogen application amount

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程 (ASTIP-TRIC03); 中国烟草总公司山东省公司科技项目“山东烟区不同气象要素条件下优质特色烟叶生产技术优化研究与应用”(201504)

作者简介: 刘继坤 (1993-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为烟草栽培。E-mail: ljk441099828@163.com。*通信作者, E-mail: maxinghua@caas.cn

收稿日期: 2017-10-25

修回日期: 2018-01-05

氮素是对烟草品质与产量影响最大的元素^[1]，而种植密度又会通过群体结构和田间小气候直接或间接影响烟草生长发育和产量、品质^[2]。国内烟草种植密度和施氮量受不同烟区主栽品种、环境条件和栽培习惯等多种复杂因素的影响，加之烟草生产注重风格特色^[3-5]，种植密度和施氮量一直是烟草栽培的研究热点。烟草以叶片为收获目标，叶片组织结构对其生长发育过程中光合、呼吸等生理过程有重要影响，而原烟叶片组织结构则直接反映了叶片发育状况、营养状况、疏松度及成熟度等，合理的组织结构对优质烟叶生产至关重要^[6-8]。

前人已研究了成熟度^[9]、移栽期^[10-11]、光质^[12]、光强^[13]、土壤^[14]、揭膜与否^[15]、氮肥形态^[16]、饼肥与化肥配施^[17]等多种因素对叶片组织结构的影响，而对于种植密度和施氮量及其互作的研究往往只集中在农艺性状、化学品质、产量产值等方面^[18-22]，还有待于从组织结构层面揭示种植密度和施氮量两因素对烟草叶片生长发育共同作用的解剖学基础。此外，以往对叶片组织结构的影响报道往往只针对成熟期^[23-24]，单一时间点并不能揭示叶片发育过程中叶片组织结构关系的动态变化规律，种植密度、施氮量及其互作对烟叶组织结构的动态影响有待进一步研究。鉴于此，本文研究了不同种植密度和施氮量下不同叶龄烟草叶片组织结构的变化规律，探索两因素及其互作对叶片形态建成的影响，以期能为优质烟叶生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年在山东省潍坊市贾悦镇琅埠村进行，土壤为棕壤，耕层土壤 pH 8.4、有机质 25.7 g/kg、全氮 1.22 g/kg、碱解氮 56.31 mg/kg、全磷 0.21 g/kg、速效磷 25.2 mg/kg、全钾 3.36 g/kg、速效钾 92.18 mg/kg。前茬为烟草，供试烤烟品种为 NC102，采用滴灌灌溉。

1.2 试验设计与取样方法

1.2.1 试验设计 试验采用种植密度、施氮量两因素裂区设计，其中种植密度（A 因素）为主处理，

设 3 个水平，分别为 A1：1.2 m×0.55 m（15 200 株/hm²），A2：1.2 m×0.5 m（16 700 株/hm²），A3：1.2 m×0.45 m（18 500 株/hm²）。施氮量（B 因素）为副处理，设 2 个水平，分别为 B1：67.5 kg/hm²；B2：37.5 kg/hm²。小区面积 72 m²，每处理设 3 次重复。试验所用肥料为复合肥（含 10% N、10% P₂O₅、20% K₂O）、重过磷酸钙（P₂O₅ 44%）和硫酸钾（K₂O 51%），各处理磷、钾量一致（P₂O₅ 67.5 kg/hm²、K₂O 135 kg/hm²）。肥料全部作为基肥施入。

1.2.2 调查测定方法 还苗后，每小区选择生长发育一致的烟株 20 棵挂牌标记。参照中华人民共和国行业标准 YC/T 142—2010^[25]，在各处理中部叶（第 11 片可收叶）叶长 5 cm 时标记叶片并记为叶龄 0 d，之后分别在叶龄 10、20、40 和 73 d（采收）时取样。

组织结构测定：在所取叶片从叶尖数第 6~8 条侧脉间用直径 1 cm 的打孔器打孔，每重复各取 3 株，主脉两侧各打 1 片。取样时间为上午 9:00—10:00，取样后迅速将组织放入含有 70% 乙醇的 FAA 固定液中固定并保存，后期采用石蜡切片法制片，番红固绿对染，LEICA 摄影显微镜观察并拍照，FW400 图像分析软件测量组织厚度及单位长度栅栏细胞个数。

栅栏组织细胞密度=栅栏组织细胞个数/观测长度（mm）

组织比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度。

1.3 数据统计分析

采用 Excel 2010 进行数据的初步整理，SAS 9.2 进行裂区设计的方差分析，其中多重比较采用 Duncan 法。

2 结果

2.1 叶龄对中部叶片组织结构的影响

对不同叶龄的全部处理叶片结构做方差分析，结果如表 1 所示，叶片生长过程中叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶面积均随叶龄增加而增大，其中叶片厚度的变化比较均匀，栅栏组织厚

度和海绵组织厚度在 10~20 d 增加最快，之后速度变缓，而叶面积在 20~40 d 增加明显。上表皮厚度在 10~20 d 略有增加，之后并没有明显变化。组织比随时间的变化规律不显著。栅栏细胞密度随叶龄增加有降低的趋势，20 d 时栅栏细胞体积增大，栅

栏细胞间隙扩展，栅栏细胞密度显著下降；73 d 时由于叶片衰老，部分栅栏细胞降解，栅栏细胞密度再次出现下降。而比叶重表现出上升-下降-上升的规律，这可能是由于叶片发育过程中叶面积和叶干重增长速度不一致造成的。

表 1 中部叶不同叶龄叶片的组织结构

Table 1 The change of middle leaves tissue structures with different leaf ages

叶龄 Leaf age/d	叶片厚度 Leaf thickness/ μm	上表皮厚度 Upper epidermal thickness/ μm	栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness/ μm	海绵组织厚度 Spongy tissue thickness/ μm	组织比 The ratio of palisade tissue thickness and spongy tissue thickness	栅栏细胞密度/ Palisade cell density/(number·mm ⁻¹)	叶面积 Leaf area/ cm ²	比叶重 Specific leaf weight(SLW)/ (mg·cm ⁻²)
10	181.87±10.43c	26.62±1.98b	62.80±3.21c	91.98±9.22b	0.68±0.06a	53.61±2.40a	590.74±52.33b	6.20±0.29c
20	223.55±6.15b	29.22±2.14a	76.08±5.03b	112.99±5.40a	0.68±0.03a	45.74±3.19b	660.26±72.77b	9.75±0.74a
40	230.88±9.25ab	28.89±1.70a	81.60±4.99ab	120.19±8.31a	0.68±0.02a	45.03±2.59b	958.82±89.02a	8.19±0.48b
73	243.21±10.88a	29.30±1.67a	86.70±6.98a	122.74±4.53a	0.71±0.05a	41.02±4.58b		10.49±0.71a

注：同列数值后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著，表 2 同。各处理中部叶在 40 d 左右时已经达到定长。73 d 各处理中部叶片统一采收。

Note: Values followed by different lowercase letters are significantly different among treatments at 0.05 level, the same as in Table 2. The length of leaves was fixed at 40 d. Middle leaves of different treatments harvested at 73 d concurrently.

2.2 种植密度对中部叶片组织结构的影响

从表 2 可以看出，在同一生育期，叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶面积、比叶重均为 A1>A2>A3，即上述参数随种植密度的增加呈降低趋势。叶厚、叶面积各时期 A1 显著高于 A3；栅栏组织厚度 10 d 时差异不显著，10 d 之后 A1 均大于 A3；海绵组织厚度 10 d 时 3 个密度处理间差异显著，10 d 之后 A1 均大于 A3；比叶重除 10 d 时 A1 和 A2 之间差异不显著，73 d 时 A2 和 A3 之间差异不显著外，其余处理间均达到显著水平。上表皮厚度在 40 d 时 A3 处理较低，而其他时期密度对

上表皮厚度的影响并不明显。10 d 时由于各处理栅栏组织厚度之间没有差异，组织比主要受海绵组织厚度影响，表现为 A3>A2>A1，之后各处理间没有显著差异。10 d 时各处理栅栏细胞密度差异不显著，之后栅栏细胞密度随种植密度的降低而降低，说明较低种植密度下生长的叶片细胞间隙较大，结构较为疏松。

2.3 施氮量对中部叶片组织结构的影响

从表 3 可以看出，施氮量对叶片厚度、海绵组织厚度和叶面积影响较大，各时期 B1 处理均显著高于 B2 处理。施氮对上表皮厚度影响较小，处理

表 2 种植密度对不同叶龄中部叶片组织结构的影响

Table 2 Effects of planting density on middle leaf tissue structures at different leaf ages

叶龄 Leaf age/d	处理 Treatment	叶片厚度 Leaf thickness/ μm	上表皮厚度 Upper epidermal thickness/ μm	栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness/ μm	海绵组织厚度 Spongy tissue thickness/ μm	组织比 The ratio of palisade tissue thickness and spongy tissue thickness	栅栏细胞密度/ Palisade cell density/(number·mm ⁻¹)	叶面积 Leaf area/ cm ²	比叶重 Specific leaf weight(SLW)/ (mg·cm ⁻²)
10	A1	188.09±3.63a	26.36±1.95a	63.22±3.83a	97.80±1.52a	0.65±0.05b	54.69±1.97a	618.62±38.08a	6.41±0.20a
	A2	180.17±2.82b	26.44±2.73a	63.00±3.33a	92.57±2.94b	0.68±0.04b	53.48±2.79a	586.67±22.91ab	6.26±0.11a
	A3	181.35±2.14b	27.05±1.31a	62.20±2.91a	85.58±1.77c	0.74±0.03a	52.67±4.07a	566.95±22.01b	5.94±0.15b
20	A1	229.91±2.10a	29.07±2.09a	79.55±3.35a	117.44±2.59a	0.68±0.03a	43.58±3.22b	838.25±53.41a	10.22±0.11a
	A2	225.62±2.69a	29.29±1.28a	79.43±3.82a	115.44±3.91a	0.69±0.03a	45.45±4.05ab	807.87±58.09a	9.96±0.19b
	A3	219.13±2.39b	29.32±1.55a	71.17±4.17b	108.60±4.04b	0.66±0.02a	48.30±2.02a	744.18±31.34b	9.07±0.28c
40	A1	238.17±8.55a	28.86±1.43ab	82.27±3.80a	126.60±3.71a	0.66±0.02a	42.09±3.05b	1030.19±26.72a	8.65±0.15a
	A2	236.17±6.26a	29.48±0.79a	84.28±5.49a	122.83±4.89a	0.69±0.02a	45.45±1.42a	973.73±28.97b	8.31±0.13b
	A3	222.71±2.94b	28.33±0.63b	77.08±2.62b	113.13±2.38b	0.68±0.02a	47.57±2.59a	877.54±19.22b	7.63±0.18c
73	A1	247.39±6.06a	29.57±0.92a	89.56±2.00a	125.83±3.58a	0.71±0.05a	38.24±1.16b		11.21±0.16a
	A2	243.34±4.27ab	28.88±1.28a	86.20±2.26ab	123.82±2.37a	0.70±0.03a	41.30±1.44a		10.23±0.11b
	A3	238.70±2.78b	29.01±1.71a	84.35±3.18b	116.56±3.06b	0.72±0.02a	42.30±2.99a		10.04±0.26b

之间没有显著差异。栅栏组织厚度在 10、20 d 没有显著差异，而在 40、73 d B1 显著大于 B2 处理，说明氮素在叶片中后期促进了栅栏细胞的伸长生长。组织比在 10 d 时 B2 显著大于 B1，20~40 d 没有显著差异，73 d 时 B1 显著大于 B2，B1 后期组织比的升高与其栅栏细胞的伸长生长有关。与 10 d 时不

同种植密度间栅栏细胞密度没有差异不同，10 d 时 B1 处理的栅栏细胞密度显著高于 B2 处理，说明氮素促进了前期栅栏细胞的分裂；20 d 后 B1 处理开始低于 B2 处理，表明氮素同样促进了细胞间隙发育，降低了栅栏细胞密度。比叶重随施氮量的增加而增加，其中 20 d 和 73 d 时 B1 显著大于 B2。

表 3 施氮量对不同叶龄中部叶片组织结构的影响

Table 3 Effects of N application amount on middle leaf tissue structures at different leaf ages

叶龄 Leaf age/d	处理 Treatment	叶片厚度 Leaf thickness/ μm	上表皮厚度 Upper epidermal thickness/ μm	栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness/ μm	海绵组织厚度 Spongy tissue thickness/ μm	组织比 The ratio of palisade tissue thickness and spongy tissue thickness	栅栏细胞密度/ Palisade cell density/ (number·mm ⁻¹)	叶面积 Leaf area/ cm ²	比叶重 Specific leaf weight(SLW)/ (mg·cm ⁻²)
10	B1	191.71±4.00	26.66±2.22	64.30±2.39	98.01±4.37	0.66±0.03	55.22±1.72	628.72±32.77	6.26±0.24
	B2	174.70±3.16*	26.57±1.84	61.30±3.33	85.96±3.36*	0.71±0.02*	51.99±3.22*	552.77±17.28*	6.14±0.20
20	B1	227.43±2.10	29.25±3.72	77.75±2.49	115.92±1.14	0.68±0.02	43.87±2.05	848.34±44.33	9.91±0.11
	B2	222.33±4.00*	29.19±1.54	75.68±4.60	111.74±2.25*	0.68±0.02	47.61±1.69*	745.18±33.58*	9.58±0.20*
40	B1	235.94±3.79	28.54±1.23	83.78±3.69	123.21±2.08	0.68±0.02	44.33±2.79	1 008.73±40.11	8.25±0.24
	B2	228.76±2.03*	29.23±1.75	78.64±2.01*	117.16±3.72*	0.68±0.03	45.73±3.47	912.24±29.78*	8.14±0.12
73	B1	251.47±8.38	29.28±1.06	91.70±3.17	124.51±1.03	0.74±0.03	37.02±2.42		10.77±0.19
	B2	234.82±5.00*	29.32±1.66	81.71±3.06*	120.97±2.11*	0.68±0.02*	44.24±2.53*		10.21±0.25*

注：*表示 B2 与同组 B1 经 *t* 检验差异显著 ($P<0.05$)。

Note: * Indicates through *t*-test, there is significant difference between B1 and B2 in the same group ($p<0.05$).

2.4 种植密度与施氮量互作效应

从表 4 可以看出，10~73 d，种植密度、施氮量两因素对叶片厚度、海绵组织厚度和叶面积影响显著或极显著，对上表皮厚度无显著影响；栅栏组织厚度在 20 d 后受种植密度显著影响，40 d 后受施氮量的极显著影响，施氮量对栅栏组织厚度的效应晚于密度效应出现；栅栏细胞密度在 10 d 后受施氮量显著影响，20 d 后受种植密度显著影响，施氮量对栅栏细胞密度的效应早于密度效应出现。从 10 d 到 73 d，比叶重一直受种植密度的极显著影响，施氮量对比叶重的影响在 10 d 和 40 d 时不显著，种植密度是影响比叶重的主要因素。

不同时期的中部叶片组织结构还受两因素交互作用的影响：叶片厚度在 10 d、73 d 时受两因素交互作用的显著影响；海绵组织厚度在 10 d 时受交互作用的极显著影响；栅栏组织厚度、组织比在 73 d 时受交互作用的极显著影响；叶面积受交互作用的作用强度随着叶龄的增加而逐渐明显，在 10 d 时没有显著影响，20 d 时有显著影响，40 d 后有极显著影响；除 40 d 外，交互作用对比叶重有显著至

极显著影响；交互作用对上表皮厚度、栅栏细胞密度影响不显著。进一步计算发现增加施氮量可以促进低密度对叶片生长的促进作用：以 40 d 时叶面积为例，低施氮量下，A3 的叶面积比 A2 高 5.17%，A2 的叶面积比 A1 高 4.25%，而高施氮量下，A3 的叶面积比 A2 高 15.52%，A2 的叶面积比 A1 高 8.22%；降低种植密度可以促进增加施氮量对叶片生长的促进作用：在高、中、低密度下，B2 叶面积分别比 B1 高 1.89%、11.91%和 16.17%。降低种植密度和增加施氮量对叶面积的生长是相互促进的，叶片厚度、海绵组织厚度、组织比和比叶重之间也有相同的规律。

3 讨论

合理的种植密度和施氮量一直是烟草优质适产研究中的一项热点话题，两者都会对群体和个体性状产生影响^[26]。智磊等^[27]的研究表明，叶片组织结构受密度和施氮量影响显著，而贺国强^[28]研究表明，种植密度对叶片组织结构没有显著影响。本试验结果表明，叶厚、栅栏组织厚、海绵组织厚、组

表4 不同种植密度和施氮量下中部叶片组织结构P值

Table 4 P values of middle leaf tissue structures with different N application amount

显微结构 Organizational Structure	变异来源 Variation sources	10 d	20 d	40 d	73 d
叶片厚度 Leaf thickness	种植密度 Planting density	0.0086**	0.0007**	0.0001**	0.0271*
	施氮量 Nitrogen	<0.0001**	0.0099**	0.0059**	<0.0001**
上表皮厚度 Upper epidermal thickness	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.0276*	0.4226	0.0933	0.0184*
	种植密度 Planting density	0.3522	0.8989	0.0760	0.3548
	施氮量 Nitrogen	0.8313	0.8580	0.0893	0.5488
栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.3116	0.3296	0.4992	0.1930
	种植密度 Planting density	0.8332	0.0007**	0.0031**	0.0202*
	施氮量 Nitrogen	0.0621	0.1877	0.0029**	<0.0001**
海绵组织厚度 Spongy tissue thickness	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.4668	0.4865	0.1657	0.0009**
	种植密度 Planting density	<0.0001**	0.0010**	<0.0001**	0.0044**
	施氮量 Nitrogen	<0.0001**	0.0161*	0.0093**	0.0318*
组织比 The ratio of palisade tissue thickness and spongy tissue thickness	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.0021**	0.1884	0.5550	0.6378
	种植密度 Planting density	0.0023**	0.4032	0.0173*	0.0650
	施氮量 Nitrogen	0.0073**	0.8540	0.4087	0.0003**
栅栏细胞密度 Palisade cell density	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.1301	0.7360	0.0874	0.0076**
	种植密度 Planting density	0.3585	0.0169*	0.0056**	0.0266*
	施氮量 Nitrogen	0.0131*	0.0055**	0.2311	<0.0001**
叶面积 Leaf area	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.1252	0.1512	0.9485	0.1472
	种植密度 Planting density	0.0197*	0.0001**	<0.0001**	
	施氮量 Nitrogen	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**	
比叶重 Specific leaf weight(SLW)	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.1280	0.0220*	0.0005**	
	种植密度 Planting density	0.0038**	<0.0001**	<0.0001**	<0.0001**
	施氮量 Nitrogen	0.2136	0.0036**	0.2657	<0.0001**
	种植密度×施氮量 Planting density×nitrogen	0.0110*	<0.0001**	0.2771	0.0002**

注：*表示 0.05 显著相关水平；**表示 0.01 极显著相关水平。

Note: * Significant correlations at $p<0.05$; ** Significant correlations at $p<0.01$.

织比、叶面积和比叶重均受种植密度和施氮量的显著影响。另外本研究还发现，种植密度和施氮量对不同叶龄叶片的影响表现出先后和程度的差异。中部叶叶龄 10 d 时施氮可以促进栅栏细胞横向分裂，但其伸长没有受到种植密度和施氮量的显著影响，此时叶厚的差异主要由海绵组织的差异造成，低密度和高施氮量促进了海绵组织海绵化，海绵组织厚度随之增加。叶厚、栅栏组织厚在叶龄 20 d 后开始表现出显著的密度效应，原因可能是此时上部叶、中部叶已生长到一定面积，各密度处理群体间遮阴程度的差异开始明显，而栅栏组织内含大量叶绿体，是进行光合作用的主要部位。光对叶片的影响也可以从比叶重看出，比叶重是衡量叶片光合作用性能的一个参数，受光辐射较少的叶片往往有较小的比叶重^[29]。本试验中 10~40 d 内比叶重受施氮量影响不显著而受种植密度影响显著，随种植密度的升高

而降低。采收时叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、叶面积和比叶重均随施氮量的增加和种植密度的降低而增大，栅栏细胞密度随施氮量的增加和种植密度的降低而减小。叶片厚度、栅栏组织厚度、组织比、叶面积、比叶重均表现出显著的氮密互作效应，在一定范围内密度越低，施氮的效果越显著，叶片组织厚度和叶面积、比叶重增长幅度越大，这与张喜峰等^[19]的研究结果一致。

王宝华^[30]、强继业^[31]通过对不同品种的烟叶组织结构进行比较，指出栅栏组织厚度、组织比、栅栏组织厚度/叶片厚度是衡量叶片组织结构好坏的可靠指标，其值越高的品种，烟叶品质越佳。吴雪^[32]的研究也表明，烟叶组织比可以用来判断烤后烟叶质量，同一分类特征下，随组织比提高，烟叶等级逐级递增。但也有研究表明，增加施氮量和降低种植密度虽然提高了栅栏组织厚度和组织比，但其品

质反而变差，最佳化学品质和感官质量评价出现在适中密度和较低施氮量的条件下^[33]。因此，栅栏组织厚度、组织比、栅栏组织厚度/叶片厚度等指标高并不一定表明烟叶品质优，其可作为衡量烟叶质量的指标必须与生产的实际相结合，种植密度过低、施氮量过高反而不利于烟叶品质的提高。本研究中，施氮量较高和密度较低的处理其栅栏组织厚度、组织比、栅栏组织厚度/叶片厚度等较大，但并未明确其与烟叶品质的关系，需进一步研究。

前人研究^[34-35]发现，施氮量对烤烟生育期会产生影响，施氮过多会推迟生育期。由于本试验 73 d 时统一采收中部叶片，不同处理中部叶片成熟度会有所差异，73 d 不能代表同一成熟度的叶片，两因素对成熟度的具体影响还有待细化后期取样时间做进一步分析。此外，本试验各种种植密度处理间差距较小，密度变化范围较窄，种植密度差异较大的条件下密度对烟草叶片组织结构的影响需要进一步验证。

4 结 论

种植密度、施氮量及其互作效应对中部叶片组织结构产生了显著影响，增加施氮量和降低种植密度增加了烟草叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和叶面积，降低了栅栏细胞密度。各因素对叶片结构影响强度表现出叶龄上的差异，施氮量对栅栏细胞密度的影响早于种植密度，对栅栏组织厚度的影响晚于种植密度。叶面积、叶片厚度、栅栏组织厚度、组织比、比叶重受交互作用影响显著，低种植密度和高施氮量间有正交互作用，增加施氮量的同时降低种植密度容易使叶片过厚。只有兼顾种植密度和施氮量，充分利用两因素的互作效应，才能改善叶片结构，提高烟叶品质。

参考文献

- [1] 李春俭,张福锁,李文卿,等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 331-337.
LI C J, ZHANG F S, LI W Q, et al. Nitrogen management and its relation to leaf quality in production of flue-cured tobacco in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 331-337.
- [2] 陈瑞泰. 中国烟草栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987: 170-175.
CHEN R T. Chinese tobacco cultivation[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987: 170-175.
- [3] 唐先干,李祖章,胡启锋,等. 种植密度与施氮量对江西紫色土烤烟产量及农艺性状的影响[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(3): 47-51.
TANG G X, LI Z Z, HU Q F, et al. Effects of planting density and nitrogen rate on yield and characters of flue-cured tobacco planted in purple soil in Jiangxi Province[J]. Chinese Tobacco Science, 2012, 33(3): 47-51.
- [4] 周文亮,赖洪敏,黄瑾,等. 百色烟区烤烟合理种植密度及施肥量研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 12823-12826.
ZHOU W L, LAI H M, HUANG J, et al. Studies on planting density and fertilizer application rate of flue-cured tobacco in Baise[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(26): 12823-12826.
- [5] 吴佳溶,徐茜,陈志厚,等. 施氮量与种植密度对烟草品种 CB-1 生长及产质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(2): 67-70.
WU J R, XU X, CHEN Z H, et al. Effects of nitrogen application rate and planting density on growth, yield and quality of CB-1, a tobacco variety[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 67-70.
- [6] 黄勇,周冀衡,刘建利,等. 不同部位烟叶海绵与栅栏细胞中主要化学成分研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2289-2295.
HUANG Y, ZHOU J H, LIU J L, et al. Study on main chemical component of spongy and palisade cells from different leaf position of tobacco[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(10): 2289-2295.
- [7] 王玉军,谢胜利,邢淑华,等. 烤烟叶片厚度与主要化学组成相关性研究[J]. 中国烟草科学, 1997, 18(1): 12-14.
WANG Y J, XIE S L, XING S H, et al. Study of the correlation between leaf thickness and main chemical composition of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 1997, 18(1): 12-14.
- [8] 李小勇. 延边不同烤烟品种生育期叶片结构及化学成分的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
LI X Y. Research on leaf structure and chemical component during reproductive period of different flue-cured tobacco varieties in Yanbian[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [9] 夏凯,齐绍武,周冀衡,等. 烤烟的成熟度与叶片组织结构及叶绿素含量的关系[J]. 作物研究, 2005, 19(2): 102-105.
XIA K, QI S W, ZHOU J H, et al. The relationship between

- the maturity of flue-cured tobacco and leaf tissue structure and chlorophyll content[J]. *Crop Research*, 2005, 19(2): 102-105.
- [10] 刘德育, 孙广玉, 蔡淑燕. 移栽期对烤烟叶片组织结构的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 12(12): 187-189.
LIU D Y, SUN G Y, CAI S Y. Effects of transplanting date on leaf anatomical structure of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 12(12): 187-189.
- [11] 齐飞. 不同移栽期的气候生态因素对烤烟品质及成熟烟叶组织结构的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
QI F. Effects of climate factors for different transplanting dates on quality and ripe tissue in flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2011.
- [12] 柯学, 李军营, 徐超华, 等. 不同光质对烟草叶片组织结构及 Rubisco 羧化酶活性和 *rbc*、*rca* 基因表达的影响[J]. *植物生理学报*, 2012, 48(3): 251-259.
KE X, LI J Y, XU C H, et al. Effects of different light quality on anatomical structure, carboxylase activity of Ribulose 1,5-Biphosphate Carboxylase/Oxygenase and expression of *rbc* and *rca* genes in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaves[J]. *Plant Physiology Journal*, 2012, 48(3): 251-259.
- [13] 郑明. 光照强度对烤烟生长发育和叶片组织结构及品质影响的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
ZHENG M. Study on effects of light intensity on growth and leaf tissue structure and quality characteristic of flue-cured tobacco[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010.
- [14] 邱立友, 李富欣, 祖朝龙, 等. 皖南不同类型土壤植烟成熟期烟叶的基因差异表达和显微结构的比较[J]. *作物学报*, 2009, 35(4): 749-754.
QIU L Y, LI F X, ZU C L, et al. Comparison on gene expression and microstructure of tobacco leaves at maturity stage in different types of soil in southern Anhui province, China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(4): 749-754.
- [15] 赵光伟, 孙广玉. 揭膜和不揭膜对烤烟叶片结构的影响[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 110-113.
ZHAO G W, SUN G Y. Effects of polyethylene mulch on anatomical structure in leaves of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11): 110-113.
- [16] 李哲, 陈爱国, 金红成, 等. 不同氮肥形态下烤烟叶片组织结构的差异及对焦油释放量的影响研究[J]. *中国烟草学报*, 2014, 20(2): 70-74.
LI Z, CHEN A G, JIN H C, et al. Difference in foliar tissue structure of flue-cured tobacco fertilized with nitrogen of various forms and its effects on cigarette tar delivery[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2014, 20(2): 70-74.
- [17] 许娜, 许家来, 朱先志, 等. 饼肥与化肥配施对烤烟叶片组织结构及有机酸含量的影响[J]. *中国烟草科学*, 2016, 37(1): 20-25.
XU N, XU J L, ZHU X Z, et al. Effect of different ratios of cake fertilizer and chemical fertilizer on tissue structure and organic acid contents in the leaves of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2016, 37(1): 20-25.
- [18] 刘佳, 戴林建, 王勇, 等. 密度与施氮量对烤烟农艺性状及烟叶主要化学成分的交互效应[J]. *作物研究*, 2017, 31(2): 152-159.
LIU J, DAI L J, WANG Y, et al. The Interaction effect of density and N application rate on the main chemical composition and agronomic traits of flue-cured tobacco[J]. *Crop Research*, 2017, 31(2): 152-159.
- [19] 张喜峰, 张立新, 高梅, 等. 密度与氮肥交互对烤烟圆顶期农艺及经济性状的影响[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(5): 36-41.
ZHANG X F, ZHANG L X, GAO M, et al. Interaction between nitrogen application rate and planting density on agronomic and economic characters of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2012, 33(5): 36-41.
- [20] 张喜峰, 张立新, 高梅, 等. 密度与氮肥交互对烤烟氮钾含量、光合特性及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(2): 32-36, 61.
ZHANG X F, ZHANG L X, GAO M, et al. Interaction between nitrogen application rate and planting density on potassium content, photosynthetic characteristics and yield of flue-cured tobacco[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(2): 32-36, 61.
- [21] 范艺宽, 毛家伟, 叶红朝. 不同品种、施氮量、种植密度对烤烟农艺性状、经济性状和化学品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(12): 46-50.
FAN Y K, MAO J W, YE H C. Effects of different varieties, nitrogen rate and planting density on growth, economic characters and chemical quality of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(12): 46-50.
- [22] 张晨东, 乔连镇, 谭仲夏, 等. 种植密度及施氮量对红土晒烟产量及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1): 138-143.
ZHANG C D, QIAO L Z, TAN Z X, et al. Effects of planting density and nitrogen application rate on yield and quality of Sun-cured tobacco[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1): 138-143.
- [23] 柴家荣. 种植密度和施氮水平与白肋烟叶片组织结构的关系[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(7): 211-216.
CHAI J R. Relationship of planting density, rate of N application and tissue structure of burley tobacco leaf[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(7): 211-216.
- [24] 齐永杰, 邓小华, 徐文兵, 等. 种植密度和施氮量对上

- 部烟叶物理性状的影响效应分析[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(6): 129-137.
- QI Y J, DENG X H, XU W B, et al. Effective analysis of planting density and nitrogen levels on physical properties of upper paddy-tobacco[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(6): 129-137.
- [25] 国家烟草专卖局. YC/T 142—2010 烟草农艺性状调查方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- State Tobacco Monopoly Administration. YC/T 142—2010 Investigation method of tobacco agronomic characters[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [26] 周桓武, 冉邦定. 烤烟密度肥料两因素试验初报[J]. 云南农业科技, 1986(4): 24-27, 16.
- ZHOU H W, RAN B D. A preliminary investigation on two-factor experiment with planting density and fertilization of flue-cured tobacco[J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 1986(4): 24-27, 16.
- [27] 智磊, 罗定棋, 熊莹, 等. 施氮量对烤烟叶片组织结构和细胞发育的影响[J]. 烟草科技, 2012(7): 81-85.
- ZHI L, LUO D Q, XIONG Y, et al. Effects of nitrogen application rates on tissue structure and cell development of flue-cured tobacco leaves[J]. Tobacco Science & Technology, 2012(7): 81-85.
- [28] 贺国强. 栽培措施对烤烟叶片结构和生理特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- HE G Q. Effects of agronomic practices on tissue structure and physiological characteristic in leaves of flue-cured tobacco[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.
- [29] 武常青, 胡彦波, 贺国强. 光照强度对烤烟叶片光合特性的影响[J]. 现代化农业, 2010(9): 1-3.
- WU C Q, HU Y B, HE G Q. Effects of light intensity on photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco leaves[J]. Modernizing Agriculture, 2010(9): 1-3.
- [30] 王宝华, 吴帼英, 黄静勋. 烟叶植物学特性的观察、烤烟烟叶的栅栏组织和海绵组织[J]. 中国烟草科学, 1984, 6(2): 10-15.
- WANG B H, WU G Y, HUANG J X. Observation of botany characteristics of tobacco, palisade tissue and spongy tissue of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 1984, 6(2): 10-15.
- [31] 强继业, 刘芮, 丁艳锋, 等. 5个烤烟新品种叶片组织结构的比较研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2011, 26(1): 59-63.
- QIANG J Y, LIU R, DING Y F, et al. Comparative studies on the leaf tissue structure of five new flue-cured tobacco varieties[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2011, 26(1): 59-63.
- [32] 吴雪. 不同等级烤烟叶片的组织结构比较研究[J]. 作物研究, 2014, 28(2): 163-167.
- WU X. Leaf tissue structure comparison on flue-cured tobacco of different grades[J]. Crop Research, 2014, 28(2): 163-167.
- [33] 刘国敏. 种植密度和施氮量对烟叶组织结构发育、化学成分及产质量的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- LIU G M. Effect of tobacco organizational structure development, chemical composition, the yield and quality with different planting density and N application rate[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [34] 刘楠楠, 孙敬钊, 皮本阳, 等. 种植密度和施氮量互作对烤烟生长发育及产质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(19): 124-127, 132.
- LIU N N, SUN J Z, PI B Y, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilization amount on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(19): 124-127, 132.
- [35] 孙敬钊. 不同种植密度和施氮量对烤烟生长发育及产质量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- SUN J Z. Effects of planting density and nitrogen fertilization rate on growth, yield and quality of flue-cured tobacco[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.