

合理密植对不同株型烤烟冠层结构及光合生产特性的影响

沈杰¹, 王昌全^{1*}, 何玉亭², 李斌³, 徐传涛⁴, 蔡艳¹, 李冰¹, 李启权¹, 杜宣廷⁵

(1 四川农业大学资源学院, 四川成都 611130; 2 四川省成都市农业技术推广总站, 四川成都 610041;

3 中国烟草总公司四川省公司, 四川成都 610041; 4 四川省烟草公司泸州市公司, 四川泸州 646000;

5 四川省攀枝花市农林科学院, 四川攀枝花 617061)

摘要:【目的】研究不同耐密性烤烟对密植的综合响应, 为鉴定耐密品种及烤烟合理密植提供理论参考。

【方法】采用两因素裂区试验设计, 以云烟 97 (塔形, 低耐密)、NC71 (腰鼓形, 中等耐密)、K326 (筒形, 高耐密) 3 类株型烤烟为主区, 4 个种植密度 (13890、15150、16660、18510 株/hm²) 为裂区, 阐明不同株型烤烟农艺性状、冠层结构、物质积累、产量及构成对密植的响应规律。【结果】密植条件下 (15150、16660、18510 株/hm²), 烤烟株高显著增加, 最大叶位明显下降, 并逐渐表现为“高瘦”形态。品种因素对株高和最大叶位影响显著, 不同品种间茎围无显著差异。随种植密度的增加, 烤烟群体叶面积系数 (LAI) 呈增加趋势, 尤其是耐密品种 NC71 和 K326 的 LAI 显著增加, 不同密度间 K326 品种 LAI 空间分布变异最低。密植主要通过提高群体干物质生产力 (单位面积有效叶片数) 弥补单株生产力 (上中等烟率、单叶重) 的不足, 从而获得结构性增产。云烟 97 品种群体产量以 16660 株/hm² 时最高, 平均较对照 (13890 株/hm²) 显著增加 15.51%; NC71 品种群体产量以 16660 株/hm² 和 18510 株/hm² 间无明显差异, 较对照分别显著增加 17.61% 和 19.37%; K326 密植效应最大, 以 18510 株/hm² 群体产量最高, 比对照提高 24.51%。成熟期云烟 97 单株干物质在 15150 株/hm² 后持续下降, 降幅范围为 8.41%~21.08%, NC71 和 K326 品种则在密度为 16660 株/hm² 时有显著降低。合理密植可发挥烤烟群体结构性增产潜力, 紧凑品种 (NC71、K326) 的高耐密性表现为个体生理对密植响应迟钝, 从而获得功能性增产。【结论】合理密植可充分发挥烤烟群体结构性增产潜力, 不同品种耐密性差异主要表现为个体功能对密植响应的迟钝性强弱, 本试验条件下, K326、NC71、云烟 97 品种密植分别为 18510 株/hm²、16660 株/hm²、15150~16660 株/hm² 时, 可实现烤烟群体结构和个体功能平衡。

关键词: 烤烟; 种植密度; 叶面积系数; 干物质; 产量

Effects of rational close planting on canopy structure and photosynthetic production characteristics of flue-cured tobacco with different plant types

SHEN Jie¹, WANG Chang-quan^{1*}, HE Yu-ting², LI Bin³, XU Chuan-tao⁴, CAI Yan¹, LI Bing¹, LI Qi-quan¹, DU Xuan-yan⁵

(1 College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2 Chengdu Agricultural Technology

Extension Station, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3 Chinese Tobacco Corporation Sichuan Corporation, Chengdu, Sichuan

610041, China; 4 Luzhou Company of Sichuan Provincial Tobacco Corporation, Luzhou, Sichuan 646000, China;

5 Panzhihua Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Panzhihua, Sichuan 617061, China)

Abstract: 【Objectives】The purpose of the research on the response of different density-tolerant flue-cured tobacco to close planting is to provide a theoretical reference on variety identification and rational close planting. 【Methods】A two-factor split zone design was used to study the response of agronomic characteristics, canopy structure, dry matter accumulation, yield and its composition of different plant types of flue-cured tobacco to close planting. Three flue-cured tobacco varieties (low density-tolerance Yunyan 97, medium density-tolerance NC71, high density-tolerance K326) were main plots; four levels of density (13890, 15150, 16660 and 18510

收稿日期: 2018-03-07 接受日期: 2018-04-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0301701); 四川省烟草公司重点项目 (SCYC201504, SCYC201705) 资助。

联系方式: 沈杰 E-mail: shenjiesicau@163.com; * 通信作者 王昌全 E-mail: w.changquan@163.com

plant/hm²) were subplots. **【 Results 】** Higher plant density significantly increased the plant height, and decreased the position of the maximum leaf, and the plant morphology gradually became tall and thin. Variety factor had significant effect on plant height and the position of the maximum leaf, and there was no significant difference in stem girth between different varieties. With the increase of planting density, leaf area index (LAI) showed a trend of increase, especially for NC71 and K326, which increased significantly. Close planting ensured structural production increase by improving population dry matter productivity to offset the decrease of dry matter accumulation per plant. The dry matter accumulation per plant of Yunyan 97 showed continued decline when the density was above 15150 plant/hm², declined by 8.41% to 21.08%. Under the plant density of 16660 plant/hm², the yield for Yunyan 97 was the highest, increased significantly by 15.51% compared with the control. The yield of NC71 showed no significant differences between the densities of 16660 plant/hm² and 18510 plant/hm², but resulted in 17.61% and 19.37% more yield over the control. Close planting effect for K326 was the largest, which showed the highest yield in 18510 plant/hm², and enhanced by 24.51% compared to the control. **【 Conclusions 】** The structural productivity for flue-cured tobacco was fully developed in the rational close planting. The variation of density-resistance in different varieties was due to their different dull reaction of the dense planting. In order to balance the population structure and individual function, K326, NC71 and Yunyan 97 can be planted at the density of 18510 plant/hm², 16660 plant/hm², 15150 to 16660 plant/hm², respectively.

Key words: flue-cured tobacco; planting density; leaf area index; dry matter accumulation; yield

近年来, 为确保库存烟叶的稳定消耗, 各地烟草公司严控移栽面积。2014 年烤烟移栽面积 137.9 万公顷, 比 2013 年调减 14.8 万公顷^[1], 这对单位面积烟叶生产水平提出了更高要求。作为茄科作物, 烤烟收获的是成熟落黄叶片, 而叶片作为光合作用的主要器官, 其生长发育很大程度上受植株群体结构的影响^[2-3], 良好的群体结构影响叶面积指数的空间分布, 能改善植株群体通风状况和透光水平, 提高群体光合生产能力^[4-5]。而合理密植是提高作物光热资源利用率, 发挥增产潜力的重要措施^[6]。美国、加拿大烟叶生产水平较高, 其种植密度在 20000~24000 株/hm²^[7]之间, 平均单产可达 2550 kg/hm² 左右。目前我国烤烟常规种植密度则为 12000~15000 株/hm²^[8-10], 平均产量在 2000 kg/hm² 上下。因此, 我国烤烟不同密度水平下的高产潜力还有待进一步发掘。

品种耐密性、地力水肥条件是影响作物密植水平的重要因素^[11]。但在当前农业化肥减施增效背景下, 因地制宜发挥栽培措施的增产潜力显得尤为关键。合理密植是协调烤烟群体与个体矛盾, 平衡产量和质量关系的重要栽培措施之一, 主要通过影响植株形态^[12]、冠层光截获能力和光分布特征^[13], 进而影响作物群体物质生产能力及产量水平。毛家伟等^[14]研究认为, 种植密度为 16500~18000 株/hm² 时, 烤烟单产可超过 2800 kg/hm²。张喜峰等^[15]研究表明, 15380~16660 株/hm² 范围内烤烟产量增幅显著, 增

至 18180 株/hm² 时, 表现为减产。显然, 烟株密植后争夺空间环境资源加剧, 叶片发育受阻, 单株干物质降幅明显, 特别是在过度密植后表现为群体增产不显著^[16]。通常作物发生竞争时, 其对空间生长压力的反应会影响植株形态、冠层结构和产量形成^[17], 只有在适宜种植密度和适度环境压力下才能弥补单株生产力下降的负效应, 发挥密植增产的正效应。

此外, 不同株型烤烟因叶片展开方式差异, 其株间光能利用率有所不同, 因而对密植的耐受性能有所差别^[18]。目前的相关研究主要开展单一株型烤烟的耐密性分析, 对不同株型的密植效应及其种间差异研究较少。本文在分析品种、种植密度的主效应基础上, 探究品种和密度的交互作用。以不同株型烤烟(云烟 97、NC71、K326)为试验材料, 通过裂区设计研究品种、种植密度及其互作对烤烟农艺性状、冠层结构特性的影响, 分析种植密度对烤烟物质积累、产量及构成的作用规律, 以期为耐密品种的鉴定和烤烟高产栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料与试验条件

试验于 2015 年在四川省泸州市古蔺观文烟叶基地 (27.7°N, 105.8°E) 进行, 该地属亚热带季风性湿润气候, 烤烟生育期月平均温度、湿度、日照时数、降水量见图 1。供试土壤为黄壤, 其背景肥力性

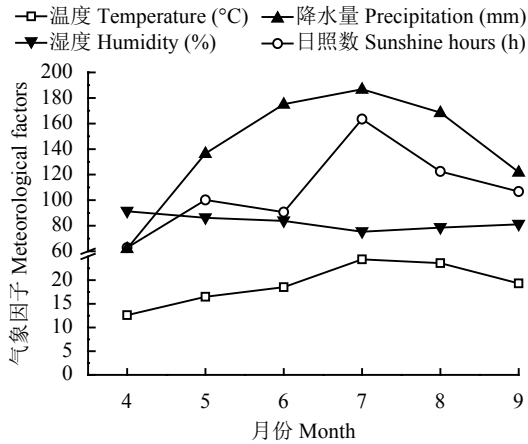


图1 烤烟生育期月平均温度、湿度、日照时数和降水量
Fig. 1 Mean temperature, humidity, sunshine hours, and precipitation during flue-cured tobacco growing seasons

状为 pH 5.53、有机质 17.41 g/kg、全氮 0.55 g/kg、碱解氮 87.36 g/kg、有效磷 9.71 mg/kg、速效钾 91.84 mg/kg。烤烟每公顷纯养分施用量为 555 kg，其中 N、P₂O₅、K₂O 施用比为 1 : 1.4 : 2.69，移栽前 15 d 将底肥 (70% N、98% P₂O₅、60% K₂O) 条施进沟，覆土起垄盖膜，移栽后 7~10 天第 1 次追肥 (30% N、2% P₂O₅、12% K₂O)，栽后 35~45 天第 2 次追肥 (28% K₂O)。

供试烤烟品种为当地主栽品种云烟 97 (Yunyan 97, 株型呈塔形, 低耐密性) 和国外引进推广的良种 NC71 (株型呈塔形或腰鼓形, 中等耐密性)、K326 (株型呈筒形, 高耐密性)。

1.2 试验设计与田间管理

采用裂区试验设计, 主区变化因素为品种, 设云烟 97、NC71、K326 三个处理。副区变化因素为种植密度, 设 4 种密度水平: 常规密度为对照 (13890 株/hm², D1); 低密植, 15150 株/hm² (D2); 中密植, 16660 株/hm² (D3); 高密植, 18510 株/hm² (D4)。移栽规格分别为 D1, 行距 120 cm × 株距 60 cm; D2, 行距 120 cm × 株距 55 cm; D3, 行距 120 cm × 株距 50 cm; D4, 行距 120 cm × 株距 45 cm。3 个品种与 4 种密度共计 12 个组合。主、副区面积分别为 480 m²、120 m², 均随机排列, 并设 3 次重复, 共计 36 个小区, 四周设保护行。于 4 月 3 日开展烤烟大田移栽, 生育期内防治病虫害, 其他栽培措施同当地常规。

1.3 试验数据采集与处理

1.3.1 农艺性状调查 于烤烟中心花开放期在每小区选取长势均匀且能代表小区生长发育状况的烟株

10 株, 按照 YC/T 142-2010^[19] 调查方法测定每株主要农艺性状株高、茎围、最大叶叶位。

1.3.2 叶面积系数 分别于移栽后 21、35、49、63、77、91 和 105 天在每小区选取代表性烟株 10 株, 测定大于 5 cm 全部叶片的叶长、叶宽。此外, 烤烟中心花开放期 (一般在 63~77 天范围内) 将烟株分 3 层测定, 即上、中和下部叶。叶面积计算如公式 (1), A_l 为单叶叶面积 (m²), L 和 W 分别为叶长 (m) 和叶宽 (m), k 为叶面积校正系数 (云烟 97、NC71、K326 分别取值 0.6420^[20]、0.6130^[20]、0.6345^[21]), 烤烟单株叶面积为全株单叶叶面积的累加。叶面积系数按公式 (2) 计算, LAI 为叶面积系数, A 为单株叶面积 (m²), P 单位面积株数, N 为单位面积 (m²), 最大叶面积系数是烤烟中心花开放期的叶面积系数:

$$A_l = k \times L \times W \quad (1)$$

$$LAI = A \times P / N \quad (2)$$

1.3.3 干物质积累 分别在烤烟团棵期、旺长期和成熟期采集代表性烟株 5 株, 于 105℃ 杀青 30 min, 60℃ 下烘干至恒重后称量其干物质量。

1.3.4 产量及其构成 烟叶成熟后各小区单独挂牌采收和烘烤, 按国家烟叶分级标准^[22] 分级, 并计算各小区有效叶片数、产量和上中等烟率。

1.4 统计分析

为区别两因素随机区组设计, 本试验数据统计以 SPSS 20.0 “一般线性模型 (General Linear Model)” 中的 “单变量 (Univariate)” 模块为基础, 将区组重复设为随机因子, 模型设置主处理 (品种)、区组间重复、副处理 (密度) 和交互作用 (品种 × 密度) 四个模块, 语言编辑器中增加区组重复 (主处理), 用以区分主处理、区组间重复和副处理、交互作用的误差项, 以期在两因素随机区组的基础上进一步分解自由度, 实现裂区主效应检验^[23]。

方差分析包括品种、种植密度以及两因素间的互作效应。多重比较分析用最小显著性差异法 (Least Significant Difference, LSD) 法。数据图和表均用 Excel 2016 绘制。

2 结果与分析

2.1 农艺性状变化特征

不同品种与种植密度对烤烟主要农艺性状的影响见表 1。结果表明, 种植密度对株高和最大叶叶位有极显著影响 ($P < 0.01$)。随种植密度的增加, 株高

表 1 不同品种和种植密度烤烟农艺性状与冠层结构特性

Table 1 Agronomic traits and canopy structure of flue-cured tobacco under different varieties and planting density

试验因子 Experimental factor		株高 (cm) Plant height	茎围 (cm) Stem girth	最大叶叶位 Position of the maximum leaf	最大叶面积系数 Maximum LAI
品种 Variety	云烟 97 Yunyan 97	117.74 ± 5.69 a	8.99 ± 0.25 a	7.66 ± 0.50 c	3.50 ± 0.12 a
	NC71	109.31 ± 2.87 b	8.11 ± 0.46 b	9.50 ± 0.34 a	3.41 ± 0.14 a
	K326	87.64 ± 3.03 c	8.49 ± 0.30 ab	8.91 ± 0.21 b	3.08 ± 0.09 b
种植密度 Planting density	D1	101.63 ± 2.15 c	8.74 ± 0.53 a	9.22 ± 0.20 a	2.85 ± 0.10 d
	D2	102.17 ± 2.11 c	8.31 ± 0.81 a	8.89 ± 0.20 ab	3.21 ± 0.15 c
	D3	105.93 ± 1.06 b	8.58 ± 0.20 a	8.55 ± 0.29 bc	3.49 ± 0.09 b
	D4	109.85 ± 2.70 a	8.51 ± 0.26 a	8.11 ± 0.24 c	3.77 ± 0.16 a
F 值 F value	品种 Variety (<i>df</i> = 2)	3445.8 **	7.3 *	44.5 **	1779.8 **
	种植密度 (<i>df</i> = 3)	72.7 **	1.2	9.1 **	320.7 **
	Planting density				
	品种 × 种植密度 (<i>df</i> = 6)	5.1 **	1.1	0.8	6.0 **
	Variety × Planting density				

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一试验因子间差异显著 ($P < 0.05$)。D1、D2、D3 和 D4 分别代表种植密度为 13890、15150、16660 和 18510 株/hm²。Values with different small letters within the same column mean significantly different ($P < 0.05$) among the factors. D1, D2, D3, and D4 indicate the planting density of 13890, 15150, 16660, and 18510 plant/hm², respectively. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

显著增加 ($P < 0.05$), 最大叶叶位从 9.22 下降至 8.11 且差异显著, 茎围呈下降趋势, 但处理间无显著差异。品种对主要农艺性状的影响均达显著 ($P < 0.05$) 或极显著水平。其中, 株高表现为云烟 97 > NC71 > K326, 且差异显著。不同品种间最大叶叶位亦有显著差异, NC71 品种最大叶叶位 9.50, 平均比云烟 97 和 K326 品种高 1.84 和 0.59 个叶位。不同品种的茎围分布在 8.11~8.99 之间, 云烟 97 平均茎围最大, 且显著高于 NC71 品种, 其他品种间无明显差异。此外, 品种与种植密度对株高的互作效应达极显著水平。

种植密度因素下, 最大叶叶位、株高和茎围变异系数分别为 6.54%、4.64% 和 3.09%, 种植密度对主要农艺性状的影响依次为最大叶叶位 > 株高 > 茎围。品种因素下, 株高和最大叶叶位变异系数分别为 14.80% 和 10.77%, 茎围变异系数仅 5.15%, 品种对株高的影响最大, 最大叶叶位次之, 对茎围影响最小。

2.2 冠层结构变化特征

2.2.1 群体 LAI 变化特征 由图 2 可知, 不同品种和种植密度烤烟群体 LAI 变化趋于一致, 即随着生育进程的推进, 呈先增后减的单峰曲线变化, 在中心花开放期 (63~77 天) 达峰值, 此后持续下降, 特别是移栽 91 天后降幅明显, 且随着种植密度的增

加, 下降速度有增大趋势, 尤其是云烟 97, 其中 (D3)、高 (D4) 密植处理降幅明显。烤烟大田生育期内, 群体 LAI 整体表现为 D4 > D3 > D2 > D1, 不同品种间差异明显, 以移栽 63~77 天期间差异最大, 此时云烟 97 各密植处理 (D2、D3、D4) 群体 LAI 趋于一致, 即密植效应不显著, 其余两个品种, 特别是 K326 密度处理间差异显著, 表现出明显的密植效应。

2.2.2 最大 LAI 变化特征 最大 LAI 反映了作物群体最大同化能力。从表 1 可知, 品种与种植密度及其互作对烤烟最大 LAI 有极显著影响 ($P < 0.01$)。随种植密度的增加, 最大 LAI 显著 ($P < 0.05$) 增加, 其分布范围在 2.85~3.77 之间。不同品种间最大 LAI 分布在 3.08~3.50 范围内, 整体表现为云烟 97 > NC71 > K326, 且差异显著。从图 3 不同品种烤烟最大 LAI 随种植密度增加的变化趋势来看, NC71、K326 品种最大 LAI 与种植密度呈显著的线性正相关, 其与种植密度的回归方程分别为 $y = 0.0002x + 0.1076$ ($R^2 = 0.9734$, $P = 0.013$) 和 $y = 0.0002x - 0.2586$ ($R^2 = 0.9975$, $P = 0.001$)。由此可见, 种植密度对 NC71、K326 品种最大 LAI 影响显著, 可有效增强两个品种群体最大光合生产潜力。而云烟 97 品种最大 LAI 并未表现出明显的密植效应, 其回归方程为 $y = 0.0002x + 0.6858$ ($R^2 = 0.8766$, $P = 0.064$), 与种

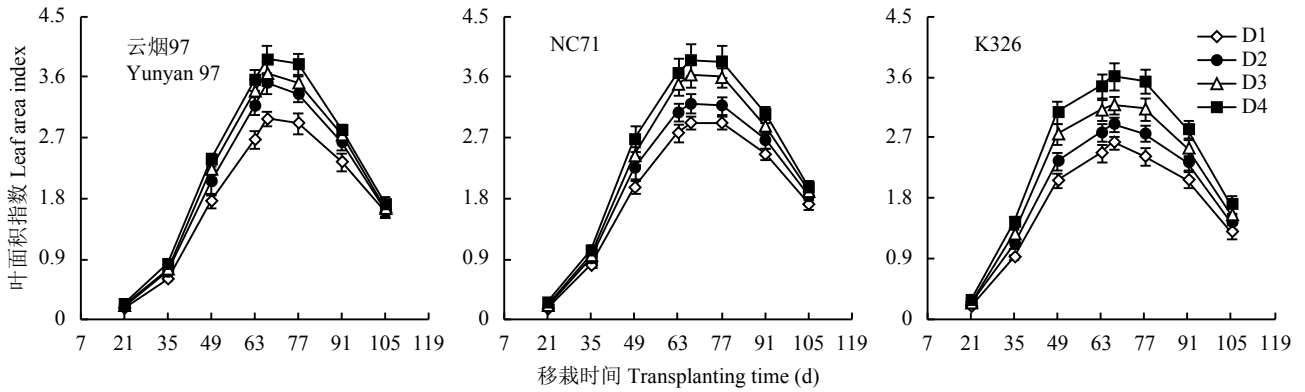


图 2 烤烟不同品种和种植密度叶面积指数 (LAI) 变化趋势

Fig. 2 Change of leaf area index (LAI) of under different varieties and planting density

[注 (Note) : D1、D2、D3 和 D4 分别代表种植密度为 13890、15150、16660 和 18510 株/hm²
D1, D2, D3 and D4 indicate the planting density of 13890, 15150, 16660, and 18510 plant/hm², respectively.]

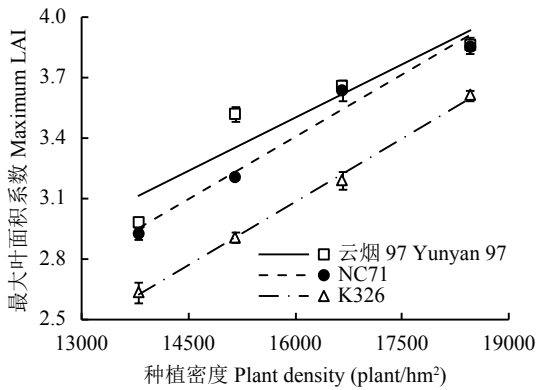


图 3 不同品种烤烟在不同种植密度下成熟期最大叶面积系数

Fig. 3 Maximum LAI at mature stage under different varieties and planting density

植密度未达显著线性相关。

2.2.3 群体 LAI 空间分布特征 表 2 为中心花开放期不同品种和种植密度烤烟群体 LAI 在上、中和下部位的分布情况。随种植密度的增加, 烤烟下部叶占群体 LAI 的比例呈增加趋势, 其中云烟 97 分布范围在 38.5%~46.2% 之间, D3、D4 密度平均分布比例达 45.8%, 比 D1 和 D2 密度高出 7.3% 和 3.5%, 且差异显著 ($P < 0.05$); NC71 由 34.4% 增加到 43.7%, 与 D1 密度相比, D4 和 D3 密度分别高出 9.3% 和 4.2%, 且差异显著; K326 品种则在 37.5%~40.7% 范围内变化, 且相邻密度间差异不明显。上部叶所占群体 LAI 比例随种植密度增加而显著下降, 云烟 97 由 27.8% 下降到 22.5%, 品种 NC71 由 31.8% 下降至 23.4%, 品种 K326 则由 28.8% 下降到 25.2%。对中部叶而言, NC71、K326 品种所占群体 LAI 比例在不同密度间无明显差异; 云烟 97 除

D4 处理有明显下降外, 其余密度间无显著差异。这说明密度增加后, 下部烟叶脚叶化趋势明显, 此为密植群体低产劣质化的负效应。

从群体 LAI 比例的变异特征来看, 云烟 97、NC71 和 K326 上部叶变异系数分别 8.11%、10.60% 和 3.42%; 下部叶则分别为 10.18%、12.88% 和 5.73%。K326 品种群体 LAI 空间分布在不同密度间变异程度低, 即对密植负效应反应的迟钝性, 表明其耐密性较好, 可做进一步的密植研究。

2.3 干物质积累变化特征

从表 3 可知, 品种、种植密度及其互作对烤烟旺长期和成熟期单株干物质积累影响极显著 ($P < 0.01$)。其中旺长期单株干物质积累随种植密度的增加呈增加趋势, 与 D1 处理相比, D4 和 D3 处理分别提高了 9.16% 和 6.05%, 且差异显著 ($P < 0.05$); 不同密度条件下烤烟成熟期单株干物质积累与旺长期趋势相反, 以 D1 处理最高, 单株平均积累 314.07 g, 与 D2 处理无显著差异, D3、D4 处理比 D1 处理平均分别降低 4.69%、15.31%, 且差异显著。不同品种间单株干物质积累差异显著, 团棵期以云烟 97 显著高于品种 NC71 和 K326, 旺长期三个品种表现为 K326 > NC71 > 云烟 97, 而从成熟期单株干物质积累表现来看, 种植密度增加后, 云烟 97 降幅显著, 其中 D3 和 D4 比 D1 处理分别下降 8.41% 和 21.08%, 相比之下, NC71 和 K326 品种除 D4 处理有明显下降外, 其余处理间差异不大 (图 4)。

品种、种植密度及其互作对烤烟各时期群体干物质积累有极显著影响。不同密度条件下烤烟群体干物质积累表现为随种植密度的增加而增加, 旺长期以前处理间差异显著, 其中团棵期在 293.33~

表 2 不同品种和种植密度烤烟 LAI 空间分布比例
Table 2 Spatial distribution of LAI under different varieties and planting density

品种 Variety	种植密度处理 Planting density treatment	下部叶 (%) Lower leaves	中部叶 (%) Middle leaves	上部叶 (%) Upper leaves
云烟 97 Yunyan 97	D1	38.5 ± 1.81 c	33.7 ± 0.63 a	27.8 ± 0.69 a
	D2	42.3 ± 0.93 b	33.4 ± 1.02 a	24.3 ± 0.86 b
	D3	45.4 ± 1.41 a	32.0 ± 0.79 ab	22.6 ± 0.31 c
	D4	46.2 ± 2.27 a	31.3 ± 0.62 b	22.5 ± 0.44 c
NC71	D1	34.4 ± 1.56 c	33.8 ± 1.06 a	31.8 ± 0.71 a
	D2	36.1 ± 2.51 bc	33.6 ± 1.72 a	30.3 ± 0.86 ab
	D3	38.6 ± 1.70 b	32.7 ± 0.93 a	28.2 ± 1.13 b
	D4	43.7 ± 2.14 a	32.9 ± 1.10 a	23.4 ± 0.80 c
K326	D1	37.5 ± 0.83 c	33.7 ± 0.92 a	28.8 ± 0.92 a
	D2	38.7 ± 0.52 bc	33.5 ± 0.71 a	27.8 ± 1.10 ab
	D3	39.4 ± 0.70 ab	34.0 ± 0.68 a	26.6 ± 0.53 bc
	D4	40.7 ± 1.17 a	34.1 ± 1.04 a	25.2 ± 0.76 c

注 (Note): D1、D2、D3 和 D4 分别代表种植密度为 13890、15150、16660 和 18510 株/hm²。同列数值后不同小写字母表示同一品种不同种植密度间差异显著 ($P < 0.05$) D1, D2, D3, and D4 indicate planting density of 13890, 15150, 16660, and 18510 plant/hm², respectively. Data with different small letters within the same column mean significantly different ($P < 0.05$) among different planting densities.

409.52 kg/hm² 范围内变化, 旺长期从 2060.63 kg/hm² 增加到 2997.52 kg/hm², 进入成熟期后 D3、D4 处理无显著差异。不同品种间群体干物质积累与单株干物质积累的趋势一致。此外, 品种、种植密度及其互作对烤烟干物质平均积累速率影响极显著。随种植密度的增加, 烤烟平均干物质积累速率呈先增后减的趋势变化, 以 D3 处理最高, 平均积累速率达 42.09 kg/(hm²·d), 分别比 D1、D2 和 D4 处理高 13.63%、5.30% 和 3.26%, 且差异显著。NC71 和 K326 品种平均积累速率差异不大, 平均为 41.38 kg/(hm²·d), 云烟 97 最低 (37.14 kg/(hm²·d)), 且显著低于 NC71 和 K326 品种。

2.4 产量及其构成因素的变化特征

2.4.1 产量及其主要构成因素 由表 4 可知, 品种、种植密度及其互作对烤烟产量、上中等烟率和单叶重影响均达极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) 水平, 单位面积有效叶片数在不同品种、种植密度间有极显著差异, 单株有效叶片数仅品种间有差异。随种植密度的增加, 烤烟产量、单位面积有效叶片数显著提高, 以 D4 处理平均产量最高, 达 2521.94 kg/hm², 比 D1、D2、D3 处理分别提高 19.01%、7.85%、2.39%, 其单位面积有效叶片数达 35.43 × 10⁴/hm², 分别为 D1、D2、D3 处理的 1.31 倍、

1.21 倍、1.10 倍。密度增加后, 烤烟上中等烟率和单叶重呈下降趋势, 除 D1 与 D2 处理无明显差异外, 其余处理间均达显著性差异, D3、D4 处理上中等烟率和单叶重分别比 D1 处理低 2.68%、5.01% 和 4.40%、14.86%。云烟 97 平均产量达 2477.38 kg/hm², 分别比 K326 和 NC71 品种高出 9.35% 和 5.92%, 且差异显著。而 NC71、K326 品种单株有效叶片数、单位面积有效叶片数和上中等烟率处于较高水平, 且与云烟 97 差异显著, 3 个品种表现为 NC71 > K326 > 云烟 97。不同品种间单叶重同样存在显著差异, 以云烟 97 平均单叶重最高 (8.40 g), 比 K326 和 NC71 品种分别高出 14.44% 和 18.98%。

密度因子下, 烤烟产量及其主要构成因素的变异表现为: 单位面积有效叶片数 (11.94%) > 单叶重 (7.87%) > 产量 (7.56%) > 上中等烟率 (2.31%) > 单株有效叶片数 (0.54%), 由此可见, 烤烟密植增产主要得益于单位面积有效叶片数的增加从而弥补由于单叶重和上中等烟率随密度增加而降低造成的产量负效应; 品种因子中, 单叶重、单位面积有效叶片数、单株有效叶片数、产量和上中等烟率变异系数分别为 9.30%、5.50%、5.43%、4.56% 和 1.35%, 云烟 97 品种高产与其较高的单叶重水平有关。

2.4.2 产量与密度关系 由图 5 可知, 不同品种烤烟产量与种植密度呈抛物线型关系, 且均达显著

表 3 不同品种和种植密度烤烟单株与群体干物质积累的变化
Table 3 Changes of dry matter accumulation for plant and population under different varieties and planting density

试验因子 Experimental factor	单株干物质积累 (g/plant) Dry matter accumulation per plant				群体干物质积累 (kg/hm ²) Population dry matter accumulation				平均积累速率 Average accumulative rate [kg/(hm ² ·d)]	
	团棵期 Rosette stage	旺长期 Vigorous growth stage	成熟期 Mature stage	团棵期 Rosette stage	旺长期 Vigorous growth stage	成熟期 Mature stage	团棵期 Rosette stage	旺长期 Vigorous growth stage		成熟期 Mature stage
品种 Variety	云烟 97 Yunyan 97	28.38 ± 0.34 a	132.09 ± 11.43 c	286.41 ± 4.38 b	455.77 ± 29.30 a	2136.99 ± 136.90 c	4552.91 ± 83.54 b	37.14 ± 1.47 b		
	NC71	12.59 ± 0.41 c	152.95 ± 5.78 b	302.77 ± 7.61 a	202.13 ± 13.32 c	2463.19 ± 120.04 b	4836.98 ± 153.60 a	41.83 ± 2.05 a		
	K326	23.69 ± 1.10 b	178.59 ± 3.20 a	304.34 ± 6.28 a	381.93 ± 32.50 b	2870.14 ± 148.45 a	4859.43 ± 139.37 a	40.93 ± 3.45 a		
种植密度 Planting density	D1	21.11 ± 2.54 a	148.35 ± 3.18 b	314.07 ± 3.31 a	293.33 ± 13.17 c	2060.63 ± 115.03 d	4362.48 ± 116.09 c	37.04 ± 0.64 c		
	D2	21.46 ± 4.58 a	150.55 ± 1.54 b	311.99 ± 1.04 a	325.12 ± 19.39 c	2280.92 ± 74.52 c	4726.67 ± 98.19 b	39.97 ± 0.35 b		
	D3	21.51 ± 1.91 a	157.34 ± 4.40 a	299.32 ± 7.51 b	358.49 ± 8.09 b	2621.34 ± 176.35 b	4986.70 ± 121.84 a	42.09 ± 1.13 a		
	D4	22.12 ± 2.73 a	161.94 ± 3.50 a	265.97 ± 10.37 c	409.52 ± 24.42 a	2997.52 ± 143.78 a	4923.24 ± 140.61 a	40.76 ± 0.94 ab		
F 值	品种 Variety (df = 2)	1108.0**	302.0**	60.8**	1019.5**	299.1**	107.2**	103.8**		
F value	种植密度 (df = 3)	2.4	58.3**	148.3**	131.8**	976.0**	95.5**	59.1**		
	品种 × 种植密度 (df = 6)	2.2	14.4**	8.1**	8.6**	4.6**	11.1**	7.4**		
	Variety × Planting density									

注 (Note) : D1、D2、D3 和 D4 分别代表种植密度为 13890、15150、16660 和 18510 株/hm²。同列数值后不同小写字母表示同一试验因子间差异显著 ($P < 0.05$)。D1、D2、D3、和 D4 indicate the planting density of 13890, 15150, 16660, and 18510 plant/hm², respectively. Data with different small letters within the same column mean significantly different ($P < 0.05$) among the same factors. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

($P < 0.05$) 相关。其回归方程如下, 云烟 97: $y = -0.00003x^2 + 1.0924x - 6777.5$ ($R^2 = 0.9886$, $P = 0.037$), NC71: $y = -0.00002x^2 + 0.7242x - 4160.7$ ($R^2 = 0.9906$, $P = 0.048$), K326: $y = -0.00002x^2 + 0.6051x - 3390.8$ ($R^2 = 0.9983$, $P = 0.022$)。随着种植密度的增加, 烤烟产量呈上升趋势, 与对照 (D1) 相

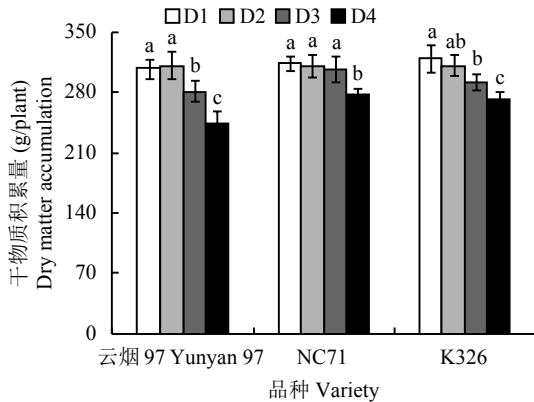


图 4 不同品种烤烟在不同种植密度干物质积累量

Fig. 4 Relationship between dry matter accumulation and planting density of different varieties

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一品种不同种植密度间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above bars indicate significantly different among the same variety ($P < 0.05$).]

比, 密植处理产量增幅显著, 但不同品种间有明显差异。云烟 97 以 D3 处理平均产量最高 (2592.79 kg/hm²), 比对照增加 15.51%, D4 平均产量与 D2 无明显差异, 平均比对照增幅 13.29%。NC71 中 D3、D4 处理无明显差异, 产量分别为 2469.90 kg/hm² 和 2506.90 kg/hm², 比对照提高 17.61% 和 19.37%, 且差异显著, 较 D2 处理亦显著提高 8.39% 和 10.01%。K326 品种处理间均达显著性差异, 以 D4 处理产量最高 (2483.54 kg/hm²), D3、D2 处理次之, 分别较对照增加 24.51%、18.54%、11.24%。

3 讨论

株高、茎围和最大叶叶位等个体农艺性状是烤烟群体结构的重要组成, 群体结构主要通过改变烟株的形状、构型、空间排列, 从而影响烟株对光合有效辐射的截获与吸收, 良好的群体结构使烟叶空间排列趋于合理, 并协调植株源库关系, 畅通同化物的运输^[6]。王瑞等^[24]研究认为, 密植主要影响株间光照强度, 而烟株对光照胁迫本身有一定的调节和适应能力。但其自动调节能力有限, 过度密植后植株群体日均光照强度明显降低, 弱光照环境使烤烟落黄成熟推迟, 大田生育期延长, 在个体形态上表

表 4 不同品种和种植密度烤烟产量及其主要构成因素的变化

Table 4 Changes of tobacco yield and its main component factors under different varieties and planting density

试验因子 Experimental factor	产量 Yield (kg/hm ²)	单株有效叶片数 Effective leaves on single plant	单位面积有效叶片数 Effective leaves per unit area (× 10 ⁴ /hm ²)	上中等烟率 Rate of top and mid tobacco (%)	单叶重 Weight per leaf (g)
品种 Variety					
云烟 97 Yunyan97	2477 ± 105	18.14 ± 0.23 c	29.08 ± 0.16 c	82.35 ± 0.39 b	8.40 ± 0.58 a
NC71	2339 ± 73	20.20 ± 0.11 a	32.43 ± 0.39 a	84.54 ± 1.09 a	7.06 ± 0.25 b
K326	2265 ± 94	19.48 ± 0.10 b	31.27 ± 0.12 b	83.97 ± 0.68 a	7.34 ± 0.15 b
种植密度 Planting density					
D1	2119 ± 38	19.38 ± 0.08 a	26.93 ± 1.26 c	85.40 ± 0.87 a	7.94 ± 0.10 ab
D2	2338 ± 61	19.25 ± 0.20 a	29.17 ± 1.42 bc	84.86 ± 0.50 a	8.10 ± 0.27 a
D3	2463 ± 28	19.32 ± 0.28 a	32.19 ± 2.14 ab	83.11 ± 0.52 b	7.59 ± 0.13 b
D4	2522 ± 55	19.14 ± 0.11 a	35.43 ± 1.97 a	81.12 ± 1.16 c	6.76 ± 0.21 c
F 值 F value					
品种 (df=2) Variety	12.2*	79.2**	86.2**	10.4*	313.2**
种植密度 (df=3) Planting density	103.1**	0.8	439.9**	38.2**	95.2**
品种 × 种植密度 Variety × Planting density (df=6)	2.91*	0.5	2.0	7.5**	19.8**

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示同一试验因子间差异显著 ($P < 0.05$)。D1、D2、D3 和 D4 分别代表种植密度为 13890、15150、16660 和 18510 株/hm²。Data with different small letters within the same column mean significantly different ($P < 0.05$) among the same factors. D1, D2, D3 and D4 indicate the planting density of 13890, 15150, 16660 and 18510 plant/hm², respectively. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

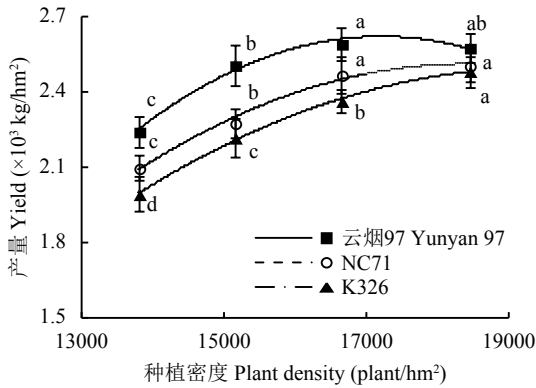


图5 不同品种烤烟产量与种植密度的关系

Fig. 5 Relationship between yield and planting density of different varieties

[注 (Note): 线上不同字母表示同一品种不同种植密度间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters within the line indicate significant difference among planting density ($P < 0.05$).]

现为株高增加, 茎围缩小, 细胞间隙增大, 叶片组织疏松, 生物量减少^[25]。本研究表明, 在 13890~18510 株/hm² 范围内, 随种植密度的增加, 烤烟株高显著增加, 最大叶位降低明显, 茎围呈下降趋势。说明密植促进烟株纵向生长抑制横向生长, 使烟株逐渐表现为“高瘦”形态。刘国顺等^[26]研究认为, 低密度强光照环境会导致烟叶海绵组织和栅栏组织细胞壁加厚, 造成细胞组织紧密细致, 株高减小, 茎围变粗, 形成“粗茎暴叶”。因而合理密植是烤烟良好群体结构建成的重要条件, 过高或过低的种植密度均不利于烟株正常生长。此外, 品种因素对烤烟株高、最大叶位的影响大于密度因素。因此, 密植条件下如何改善不同品种烤烟株高、最大叶位表现, 优化烟株群体结构, 有待进一步研究。

烟株群体冠层结构是否合理, 很大程度上取决于株间光照状况, 而叶面积系数 (LAI) 是影响株间光照水平的最大因子^[16]。张宾等^[27]研究表明, 探明作物生产过程中 LAI 的动态变化对揭示作物产量形成和掌握高产群体调控指标尤为重要。大量研究^[28-30]认为, 在一定密度范围内, 作物全生育期群体 LAI 随种植密度的增加而增大, 在生育后期高密度群体 LAI 降幅明显, 这与本研究总体趋势相同。本研究中, 烤烟群体 LAI 随生育进程呈先增后减的单峰曲线变化, 在中心花开放期 (63~77 天) 达峰值, 进入成熟期降幅明显, 且随着种植密度的增加, 下降速度明显加快。且品种间差异以中心花开放期最大, 此时群体 LAI 基本达峰值, 其数值变化即反映了不同品种烤烟最大同化能力在不同密度间的差异。由本研究可知, 种植密度与 NC71、K326 品种最大

LAI 呈显著线性相关, 表明密植可有效增强两品种群体最大光合生产潜力, 而云烟 97 最大 LAI 与种植密度并无显著线性关系。此外, 由于烤烟是以收获叶片为生产目的库源兼容性作物, 不同着生部位叶片受种植密度及冠层光照条件的影响, 表现出不同的生理特性^[31]。本研究中, 随着种植密度的增加, 下部叶所占群体 LAI 比例呈增加趋势, 这在一定程度上提高了烤烟群体的光合性能, 但过大的占比可能导致植株群体下部郁闭, 光合速率下降, 叶片衰老加快, 导致单株光合产物降低的负效应不能被群体株数增加的正效应弥补^[32], 这可能也是低耐密品种 (云烟 97) 16660 和 18510 株/hm² 密度下群体 LAI 在进入成熟期 (移栽 91 天) 后下降速度加快的原因之一。而不同品种群体 LAI 空间分布在不同密度间变异性在一定程度上反映了 3 个品种耐密性能的差异, K326 品种变异系数均处较低水平, 表明其对密植负效应反映迟钝, 品种耐密性能较强。

作物生产的实质是物质生产, 以品种的遗传特性为基础, 且受环境、栽培条件的影响, 表现为干物质的积累和变化^[6]。宋振伟等^[32]、陈传永等^[33]研究均表明, 种植密度显著影响作物单株和群体干物质积累表现, 随种植密度增加, 单株干物质下降明显, 而群体干物质呈现增长趋势。与前人研究结论不同, 本研究各生育期烤烟单株干物质积累对密植的响应规律存在差异, 即随种植密度的增加, 烤烟旺长期以前单株干物质积累呈上升趋势, 进入成熟期后则显著下降。这可能与植株个体的可变性和可调性有关, 旺长期以前烟株茎叶较小, 生长可调性好, 加之株间竞争光热资源, 个体生长旺盛, 光合产量增大, 但进入成熟期后, 茎叶过茂, 造成群体过大, 调节能力有限, 反而不利于个体光合生产力的提高^[16]。本研究表明, 各生育期群体干物质积累随密度增加显著提高。这说明烤烟密植后, 群体株数优势可弥补单株干物质积累量的减少, 从而增强烤烟物质生产能力。进入成熟期后, 群体干物质积累在一定种植密度后不再增加, 本研究中 16660 和 18510 株/hm² 密度下群体干物质无显著差异。因而, 合理密植是发挥密植群体结构正效应、弥补单株生产效应下降负效应、增强烤烟潜在生产力的有效途径。

密植条件下实现植株群体结构和个体功能平衡是实现作物增产的关键, 随着种植密度的增加, 作物群体结构的变化会影响个体功能的表达强弱, 当个体功能对群体结构增加表现出不敏感或弱敏感性

时, 通过增加群体结构压力稳定个体功能潜力获得结构性增产, 此为作物增产的有效途径之一^[34]。产量构成因素的变化对烤烟密植栽培与产量提高具有重要的参考价值, 本研究表明, 种植密度提升烟叶产量表现主要是单位面积有效叶片数增加的作用结果, 但由于单叶重和上中等烟率的下降, 引起密植处理产量增幅逐渐减弱。此外, 前人关于油菜^[35]、玉米^[36-37]、小麦^[38]高产的试验证明, 利用紧凑株型品种, 增加作物生理耐密性, 不仅提高作物适宜密度范围, 群体光照条件亦有显著改善, 可以在不影响单株生产力的前提下, 增加群体产量。本研究中, 随种植密度增加, 鼓形 (NC71) 和筒形 (K326) 品种分别在 16660 株/hm² 和 18510 株/hm² 密度下群体产量最高, 其单株干物质除 18510 株/hm² 有明显下降外, 13890~16660 株/hm² 密度间差异不大, 这说明紧凑型 (筒形、鼓形) 品种在适宜高密度条件下, 以保证一定的个体生产为前提, 增加群体产量。而塔形 (云烟 97) 品种群体产量在 16660 株/hm² 后有下降趋势, 18510 株/hm² 与 15150 株/hm² 间群体产量已无明显差异, 这与其单株干物质在 15150 株/hm² 后持续下降有关与对照相比, 16660~18510 株/hm² 降幅范围在 8.41%~21.08% 之间, 为平衡群体与个体矛盾, 云烟 97 合理密植应在 15150~16660 株/hm² 范围内。

此外, 地力是影响密植水平的重要因素, 试验黄壤地处乌蒙山和大娄山交接带, 区域高温多雨、岩石风化作用强烈, 水溶性盐基离子钾在长期成土过程中易受到破坏和淋失, 移动困难的铁、铝离子在土壤中累积, 多典型缺钾富铁铝土^[39-40]。在典型缺钾植烟土壤的研究中, 郭宁等^[41] (速效钾 108 mg/kg) 认为云烟系列的最适种植密度为 16500 株/hm², 这与本研究结论接近; 而水肥与种植密度影响关系因环境、品种、肥料类型差异, 难以比较研究, 例如唐先干等^[42] 研究中, 高肥力 (氮 165 kg/hm²) 水平下 K326 在 16660 株/hm² 时产量已达 2700 kg/hm² 以上。因而合理密植还应根据各地施肥习惯因地制宜, 选择适宜范围的上下限值, 这在本试验区有待进一步研究。而目前结论针对典型缺钾富铁铝黄壤有较强的适用性, 可为类似农业地质背景区烤烟耐密品种的鉴定和合理密植提供参考。

4 结论

随着种植密度的增加, 烤烟株高显著增加, 最大叶叶位明显下降, 茎围缩小, 使烟株逐渐表现为

“高瘦”形态; 品种因素主要影响烤烟株高和最大叶叶位, 对茎围影响不大。

增加种植密度后, 烤烟各生育期群体叶面积系数 (LAI) 呈增加趋势, 特别是耐密品种 NC71 和 K326 群体 LAI 增加显著, 其最大 LAI 与种植密度呈显著线性正相关, 进入成熟期 (移栽 91 d) 后云烟 97 群体 LAI 在 16660 株/hm²、18510 株/hm² 下降幅度较大。

NC71、K326 单株干物质在 13890~16660 株/hm² 范围内无明显差异, 分别在 16660 株/hm² 和 18510 株/hm² 达产量峰值。云烟 97 单株干物质在 15150 株/hm² 后持续下降, 群体产量在 16660 株/hm² 时最高。说明在一定范围内, 密植主要通过提高群体生产力弥补单株生产力的下降, 从而获得群体结构性增产。

不同品种耐密性表现为 K326 (筒形) > NC71 (鼓形) > 云烟 97 (塔形), 紧凑型品种的高耐性主要表现为个体生产对密植响应迟钝。综合而言, K326、NC71 合理密植水平分别为 18510 株/hm²、16660 株/hm², 而云烟 97 可在 15150~16660 株/hm² 间适度密植, 以期充分挖掘烤烟增产潜力。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[J]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [2] 陈海飞, 冯洋, 蔡红梅, 等. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1319-1328.
Chen H F, Feng Y, Cai H M, *et al.* Effect of the interaction of nitrogen and transplanting density on the rice population structure and grain yield in low-yield paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6): 1319-1328.
- [3] Roux P C, Shaw J D, Chown S L. Ontogenetic shifts in plant interactions vary with environmental severity and affect population structure[J]. *New Phytologist*, 2013, 200(1): 241-250.
- [4] 危文亮, 张艳欣, 吕海霞, 等. 芝麻资源群体结构及含油量关联分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1895-1903.
Wei W L, Zhang Y X, Lü H X, *et al.* Population structure and association analysis of oil content in a diverse set of Chinese sesame (*Sesamum indicum* L.) germplasm[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(10): 1895-1903.
- [5] 刘玉平, 李瑞平, 李志刚. 栽培模式与密度对大豆冠层结构及产量的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(5): 796-799.
Liu Y P, Li R P, Li Z G. Effects of cultivation pattern and density on canopy structure and yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2010, 29(5): 796-799.
- [6] 曹卫星. 作物栽培学总论(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 48-51, 227-229.

- Cao W X. Introduction to crop cultivation, (2nd Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2011: 48–51, 227–229.
- [7] 潘家华, 周尚勇, 李鸣, 等. 美国烤烟生产和品种的选育推广[J]. *中国烟草学报*, 2006, 12(5): 59–65.
- Pan J H, Zhou S Y, Li M, *et al.* The production practices of American flue-cured tobacco and the breeding and promotion of the varieties[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2006, 12(5): 59–65.
- [8] 张广富, 赵铭钦, 王冬, 等. 不同种植密度烤烟净光合速率日变化与生理生态因子的关系[J]. *中国烟草学报*, 2011, 17(1): 54–61.
- Zhang G F, Zhao M Q, Wang D, *et al.* Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and physio-ecological factors in flue-cured tobacco in different planting densities[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2011, 17(1): 54–61.
- [9] 张培兰, 史宏志, 杨超, 等. 基于数据包络分析(DEA)的重庆山地烤烟适宜种植规模研究[J]. *中国烟草学报*, 2012, 18(3): 87–92.
- Zhang P L, Shi H Z, Yang C, *et al.* Study on optimal farming size of flue-cured tobacco in Chongqing mountainous regions based on data envelop analysis[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2012, 18(3): 87–92.
- [10] 张喜峰, 张立新, 高梅, 等. 密度、留叶数及其互作对烤烟光合特性及经济性状的影响[J]. *中国烟草科学*, 2014, 35(5): 23–28.
- Zhang X F, Zhang L X, Gao M, *et al.* Effects of density, leaf number remained and their interaction on photosynthetic and economic characters of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2014, 35(5): 23–28.
- [11] 任佰朝, 范霞, 董树亭, 等. 种植密度和施氮量对不同株高夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 269–277.
- Ren B C, Fan X, Dong S T, *et al.* Effect of plant density and nitrogen rate on yield, nitrogen uptake and use efficiency of summer maize hybrids with different plant height[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 269–277.
- [12] 梁淑敏, 杨锦忠, 李娜娜, 等. 基于图像处理的玉米分形维数及其种植密度效应评价[J]. *作物学报*, 2009, 35(4): 745–748.
- Liang S M, Yang J Z, Li N N, *et al.* Effects of plant population density on fractal dimension of corn based on image processing[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(4): 745–748.
- [13] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(7): 1226–1233.
- Yang J S, Gao H Y, Liu P, *et al.* Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1226–1233.
- [14] 毛家伟, 张翔, 王宏, 等. 种植密度和氮用量对烟叶光合特性和产量质量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 35(5): 66–70.
- Mao J W, Zhang X, Wang H, *et al.* Effects of planting density and nitrogen rate on photosynthetic characteristics, yield and quality of tobacco leaves[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 35(5): 66–70.
- [15] 张喜峰, 张立新, 高梅, 等. 密度与氮肥互作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.
- [16] 王三根, 张建奎. 山地烟叶的生理特性与栽培调控[M]. 北京: 科学出版社, 2014. 43–45, 235–237.
- Wang S G, Zhang J K. Physiological characteristics and cultivation regulation of mountain tobacco[M]. Beijing: Science Press, 2014. 43–45, 235–237.
- [17] 李宗新, 陈源泉, 王庆成, 等. 密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7391–7401.
- Li Z X, Chen Y Q, Wang Q C, *et al.* Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(23): 7391–7401.
- [18] 顾少龙, 史宏志, 张国显, 等. 平顶山烟区主要种植烤烟品种光合生理特性研究[J]. *中国烟草科学*, 2012, 33(4): 37–41.
- Gu S L, Shi H Z, Zhang G X, *et al.* The photosynthetic physiology characteristics of the main cultivation flue-cured tobacco varieties in Pingdingshan tobacco-growing area[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2012, 33(4): 37–41.
- [19] YC/T 142-2010, 烟草农艺性状调查测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- YC/T 142-2010, Measurement method of tobacco agronomic characters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [20] 徐兴阳, 徐安传, 王欣林, 等. 基于叶形纸称重法的烤烟田间最大叶面积指数研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(28): 46–49.
- Xu X Y, Xu A C, Wang X L, *et al.* Study on maximum LAI based on leaf-shape paper weighing method in tobacco field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(28): 46–49.
- [21] 张明达, 李蒙, 胡雪琼, 等. 基于辐射积法模拟烤烟叶面积与烟叶干物质产量[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7108–7115.
- Zhang M D, Li M, Hu X Q, *et al.* Simulation of leaf area and dry matter production of tobacco leaves based on product of thermal effectiveness and photosynthetically active radiation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22): 7108–7115.
- [22] GB2635-92, 烤烟[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- GB2635-92, Flue-cured tobacco[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.
- [23] 洪曾纯. SPSS软件在肥效试验数据分析中的应用[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(8): 32–36.
- Hong Z C. The application of the SPSS software in the analysis of the data of fertilizer experiment[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2009, 29(8): 32–36.
- [24] 王瑞, 刘国顺, 陈国华, 等. 光强对苗期烤烟光合作用及干物质生产的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2072–2077.
- Wang R, Liu G S, Chen G H, *et al.* Effects of light intensity on photosynthesis and dry matter production of flue-cured tobacco at its seeding stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2072–2077.
- [25] 余利, 刘正, 王波, 等. 行距和行向对不同密度玉米群体田间小气候和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 938–942.
- Yu L, Liu Z, Wang B, *et al.* Effects of different combinations of planting density, row spacing and row direction on field microclimatic conditions and grain yield of maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8): 938–942.
- [26] 刘国顺, 乔新荣, 王芳, 等. 光照强度对烤烟光合特性及其生长和品

- 质的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(9): 1833–1837.
- Liu G S, Qiao X R, Wang F, *et al.* Effects of light intensity on photosynthetic capabilities, growth and quality of flue-cured tobacco[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(9): 1833–1837.
- [27] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物高产群体LAI动态模拟模型的建立与检验[J]. *作物学报*, 2007, 33(4): 612–619.
- Zhang B, Zhao M, Dong Z Q, *et al.* Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 612–619.
- [28] 孙锐, 朱平, 王志敏, 等. 春玉米叶面积系数动态特征的密度效应[J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1097–1105.
- Sun R, Zhu P, Wang Z M, *et al.* Effect of plant density on dynamic characteristics of leaf area index in development of spring maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(6): 1097–1105.
- [29] 李向岭, 赵明, 李从锋, 等. 玉米叶面积系数动态特征及其积温模型的建立[J]. *作物学报*, 2011, 37(2): 321–330.
- Li X L, Zhao M, Li C F, *et al.* Dynamic characteristics of leaf area index in maize and its model establishment based on accumulated temperature[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 321–330.
- [30] 张晓艳, 杜吉到, 郑殿峰, 等. 密度对大豆群体叶面积指数及干物质积累分配的影响[J]. *大豆科学*, 2011, 30(1): 96–100.
- Zhang X Y, Du J D, Zheng D F, *et al.* Effect of density on leaf area index, dry matter accumulation and distribution in soybean population[J]. *Soybean Science*, 2011, 30(1): 96–100.
- [31] 王瑞, 刘国顺, 倪国仕, 等. 种植密度对烤烟不同部位叶片光合特性及其同化物积累的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35: 2288–2295.
- Wang R, Liu G S, Ni G S, *et al.* Effects of planting density on photosynthetic characteristics and assimilate accumulation of leaves in different positions in flue-cured tobacco[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35: 2288–2295.
- [32] 宋振伟, 齐华, 张振平, 等. 春玉米中单909农艺性状和产量对密植的响应及其在东北不同区域的差异[J]. *作物学报*, 2012, 38(12): 2267–2277.
- Song Z W, Qi H, Zhang Z P, *et al.* Effects of plant density on agronomic traits and yield in spring maize Zhongdan 909 and their regional differences in northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(12): 2267–2277.
- [33] 陈传永, 侯玉虹, 孙锐, 等. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析[J]. *作物学报*, 2010, 36(7): 1153–1160.
- Chen C Y, Hou Y H, Sun R, *et al.* Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1153–1160.
- [34] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. *作物学报*, 2006, 32(10): 1566–1573.
- Zhao M, Li J G, Zhang B, *et al.* The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(10): 1566–1573.
- [35] 王寅, 鲁剑巍. 中国冬油菜栽培方式变迁与相应的养分管理策略[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(15): 2952–2966.
- Wang Y, Lu J W. The transitional cultivation patterns of winter oilseed rape in China and the corresponding nutrient management strategies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 2952–2966.
- [36] 刘铁宁, 徐彩龙, 谷利敏, 等. 高密度种植条件下去叶对不同株型夏玉米群体及单叶光合性能的调控[J]. *作物学报*, 2014, 40(1): 143–153.
- Liu T N, Xu C L, Gu L M, *et al.* Effects of leaf removal on canopy apparent photosynthesis and individual leaf photosynthetic characteristics in summer maize under high plant density[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 143–153.
- [37] 薛吉全, 梁宗锁, 马国胜, 等. 玉米不同株型耐密性的群体生理指标研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 55–59.
- Xue J Q, Liang Z S, Ma G S, *et al.* Population physiological indices on density-tolerance of maize in different plant type[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 55–59.
- [38] 邵凯, 李建伟, 于立河, 等. 不同行距和密度对耐密品种克旱16花后个体质量和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(4): 465–471.
- Shao K, Li J W, Yu L H, *et al.* Effect of plant density and row spacing on growth and yield of post-anthesis individual in spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(4): 465–471.
- [39] 石承苍. 四川省自然地理环境与农业分区[M]. 四川科学技术出版社, 2013, 12–13.
- Shi C C. Natural geography environment and agriculture division in Sichuan province[M]. Sichuan Science and Technology Press, 2013, 12–13.
- [40] 刘世全, 张明. 区域土壤地理[M]. 四川大学出版社, 1996, 232–234.
- Liu S Q, Zhang M. Regional soil geography[M]. Sichuan University Press, 1996, 232–234.
- [41] 郭宁, 严玛丽, 邵兰军, 等. 播期与密度对烤烟群体光合生产及产量和品质的影响[J]. *华北农学报*, 2015, 30(5): 153–160.
- Guo N, Yan M L, Shao L J, *et al.* Effects of sowing and density on groups photosynthetic production, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(5): 153–160.
- [42] 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 X G, 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.