

栽植密度对枣园冠层结构与果实性状的影响

罗 达,吴正保*,谢亚丽

(新疆林科院 经济林研究所,新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要:为探讨栽植密度对枣园冠层结构特征及果实性状的影响,以新疆阿克苏温宿县 10 a 生骏枣园为研究对象,利用 LAI-2200 植物冠层分析仪测定 4 种栽植密度(A. 0.5 m×4.0 m、B. 1.0 m×4.0 m、C. 1.5 m×4.0 m、D. 2.0 m×4.0 m)枣园叶面积指数(LAI)、平均叶倾角(MTA)、冠层开度(DIFN)与相对光合有效辐射(PAR)的物候变化,分析果实性状。结果表明,随着物候推进,枣园 LAI 和 DIFN 均呈现出先增大后减小的趋势,与不同物候期叶幕体积大小有关。随着株距不断增大,枣园 LAI 减小,树冠 DIFN 增大,相对 PAR 增强,光能利用率提高。C 的单果重、可溶性糖含量、单株产量及每公顷产量均高于 A 和 B,可滴定酸含量则明显低于 A 和 B,糖酸比显著高于其他 3 种栽植密度。综合以上结果可知,1.5 m×4 m 栽植密度能有效改善枣园冠层结构特征与光能利用效率,在稳定枣果产量的前提下提升了枣果品质。

关键词:栽植密度;冠层结构;叶面积指数;果实性状;枣

中图分类号:S665.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0160-06

Effects of Planting Density on Canopy Structure and Fruit Characters in Jujube Orchards

LUO Da, WU Zheng-bao*, XIE Ya-li

(Institute of Economic Forestry, Xinjiang Academy of Forestry Science, Urumqi 830063, Xinjiang, China)

Abstract: In order to explore the effects of planting density on canopy structure characteristics and fruit characters in jujube orchards, 10-year-old jujube orchards (*Ziziphus jujuba* cv. Junzao) with four planting densities (A. 0.5 m×4.0 m; B. 1.0 m×4.0 m; C. 1.5 m×4.0 m; D. 2.0 m×4.0 m) were selected as the research objects in Wensu County, Aksu, Xinjiang. The phenological changes of leaf area index (LAI), mean tilt angle (MTA), canopy opening (DIFN) and relative photosynthetically active radiation (PAR) were measured with LAI-2200 plant canopy analyzer, and the fruit characters of jujube were investigated. The results showed that, with the advance of phenology, the LAI and DIFN all increased first and then decreased, which was related to the volume of leaf curtain in different phenological periods. With the increase of plant spacing, the LAI decreased, the DIFN increased, the relative PAR enhanced, and the light utilization efficiency increased. The single fruit weight, soluble sugar content, yield per plant and per hectare of C were higher than A and B, the titratable acid content was significantly lower than A and B, while the sugar-acid ratio was significantly higher than those of the other three planting densities. These results collectively suggested that the 1.5 m×4 m planting density could effectively improve the canopy structure characteristics and light utilization efficiency of jujube orchard, and improve the jujube fruit quality on the premise of stabilizing the yield.

Key words: planting density; canopy structure; leaf area index; fruit character; jujube

收稿日期:2022-01-29 修回日期:2022-02-24

基金项目:2021 年自治区林业发展补助资金项目(XJLYKJ-2021-12);新疆红枣产业技术体系专项资金项目(XJCYTX-02)。

第一作者:罗 达,博士,副研究员。研究方向:经济林栽培与生理生态。E-mail:luoda2010@163.com

*通信作者:吴正保,副研究员。研究方向:林木遗传育种与栽培生理。E-mail:88160666@qq.com

枣(*Ziziphus jujuba*)为鼠李科(Rhamnaceae)枣属(*Ziziphus*)植物^[1],具有易栽培、早实、丰产性强、经济效益高以及抗逆性强等特性^[2],是新疆重要特色林果产业之一,也是南疆地区农民增收致富的重要经济来源之一^[3]。目前,新疆红枣种植面积 $3.19 \times 10^5 \text{ hm}^2$,约占全疆林果业面积的 1/3,其中大多为 2007 年以后直播建园的密植园。这种密植园在建园前期充分利用了光、土等资源,取得了显著的社会和经济成效。然而,随着树龄的增长,许多枣园已经因通风透光不良而导致枣园栽培管理强度增大、种植成本提高、病虫害加重、枣果品质下降等问题发生,若不及早采取合理的栽培技术调控措施,改善密植园光环境条件,势必影响红枣产业在新疆的健康可持续发展。

林农生态系统中,植物间在协调作用的同时,往往伴随着形式多样的竞争,除对水肥的竞争十分激烈外,对光的争夺也十分显著^[4-5]。冠层作为植物在地上部分的绿色覆盖层,其结构决定了林木对太阳辐射的截留能力^[6],直接影响着群落与环境之间的物质和能量交换^[7]。研究表明,通过优化种植密度可以调节植物个体的分布状态,减少个体间的竞争,为群落层次化发育提供空间^[8],改善冠层结构和功能,进而增大冠层光截获量,提高生产效率^[9]。牛莹莹等^[10]研究发现库尔勒香梨(*Pyrus sinkiangensis*) $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 栽植密度的树体结构良好,叶面积指数及果园覆盖率较为合理,光合面积充足,产量和品质最佳。在研究不同株行距对核桃(*Juglans regia*)光合作用的影响时发现, $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 株行距的核桃光合作用最强烈^[11],叶面积指数最小,单果重最大,产量和产值最高^[12]。因此,探讨适宜的种植密度,在改善冠层结构的同时,进一步提高生产力,是目前栽培学者关注的重要问题之一。针对红枣,以往的研究大多集中在果农间作的复合生产模式,如王世伟等^[3]和宋锋惠等^[13]研究了枣棉(*Gossypium*)间作对棉花冠层光环境的影响,郭佳欢等^[5]和王世伟等^[14]研究了枣麦(*Triticum aestivum*)间作系统中冬小麦冠层光分布特征,这些研究主要关注间作物的冠层结构特征,而对于不同栽植密度单一枣园的冠层光环境研究鲜有探及。本研究以新疆阿克苏地区温宿县 10 年生骏枣园为对象,通过测定不同栽植密度下枣园叶面积指数(LAI)、平均叶倾角(MTA)、冠层开度(DIFN)及光合有效辐射(PAR)的物候变化,结合果实性状分析,探讨不同栽植密度对冠层光环境特征及枣果性状的影响,以期新疆密植枣园种植模式的优化调整提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于新疆阿克苏地区温宿县佳木镇新疆林科院佳木试验站红枣试验基地($41^{\circ}15' \text{ N}$, $80^{\circ}32' \text{ E}$)。该区属典型大陆性干旱荒漠气候,年均气温 10.1°C ,年均降水量 65.4 mm ,年均蒸发量 956.3 mm ,年均日照时数 $2\,765.9 \text{ h}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $3\,882.7^{\circ}\text{C}$,极端低温 -27.6°C ,全年无霜期 185 d 。试验地立地条件基本一致,沙壤土质,灌溉方式为漫灌。

1.2 材料与方案

选取 4 种栽植密度(株距 \times 行距分别为 A: $0.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 、B: $1.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 、C: $1.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 、D: $2.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$)的枣园为研究对象。枣园均为东西行向,未间作,田间管理方式一致。枣园品种为骏枣,树龄 10 a,树体长势良好,树相整齐,无病虫害。不同栽植密度枣园的树体大小、树形结构和长势基本一致,平均树高(2.61 ± 0.31)m、基径(8.43 ± 0.72)cm、枝下高(0.55 ± 0.03)m、东西冠幅(1.70 ± 0.13)m、南北冠幅(2.20 ± 0.20)m。

试验于 5 月中旬枣树展叶期至 10 月中旬果实成熟期进行,分别在展叶期(5 月 15 日)、坐果期(7 月 21 日)、果实膨大期(8 月 23 日)和果实成熟期(10 月 17 日)对不同栽植密度枣园的冠层结构参数进行测定。不同栽植密度枣园分别设置 3 块 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的区域作为重复试验。本研究中,各栽植密度枣园只探讨行间冠层结构特征。在不同栽植密度枣园中,选择相邻 2 行枣树,在行间按 1 m 的水平间距等距离设置固定数据测定点(即 5 个测定点),测定点离地垂直高度 20 cm。测定时,首先利用 LAI-2200 植物冠层分析仪(LI-COR,美国)在空旷处测定 1 个 A 值(代表冠层上部),然后在相邻 2 行枣树行间的固定数据测定点分别测定 B 值(代表冠层下部)。因此,各栽植密度的数据记录格式为 ABBBBB, LAI-2200 植物冠层分析仪根据测定的数据最终计算各冠层结构参数。首次采集数据时对测定点进行定位标记,便于每次测定位置的固定。

1.3 方 法

1.3.1 冠层结构参数 为了避免直射阳光的影响,选择阴天或晴天的 18:00—20:00,采用 LAI-2200 植物冠层分析仪结合 45°镜头盖遮挡镜头测定冠层 LAI、MTA 和 DIFN。LAI-2200 植物冠层分析仪是根据朗伯-比尔定律制成的光学仪器,利用“鱼眼光学传感器”从 5 个不同角度方向测定冠层上下光强的变化,并通过植被的辐射转移模型计算各冠层参

数。此外,选择晴朗天气,采用 LI-191 型线状量子传感器(LI-COR,美国)测定冠层相对 PAR。

1.3.2 果实性状测定 于果实成熟期,不同栽植密度枣园随机选取 30 株参试株,统计单株结果数,然后利用单果重和每公顷株数计算单株产量和公顷产量。同时,不同栽植密度枣园随机选取 10 株参试株作为果实品质测定采样株。分别从样株东、南、西、北 4 个方向随机摘取发育状况良好的枣果 32 个,参试株枣果混匀后从中选取 40 个进行果实品质测定。采用电子天平(0.01 g)测定单果重;采用电子游标卡尺(0.01 mm)测定果实纵径和横径,计算果形指数(果形指数=纵径/横径);采用钼蓝比色法测定还原型维生素 C(Vc)含量;采用蒽酮法测定总糖含量,氢氧化钠滴定法测定可滴定酸含量,并计算糖酸比(糖酸比=可溶性糖含量/可滴定酸含量)。

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯(Duncan)新复极差法进行差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同栽植密度枣园 LAI 的物候变化

由表 1 可知,不同物候期枣园 LAI 介于 1.03~

2.94,其中 A 和 B 的 LAI 在坐果期和果实膨大期均超过了 2。随着物候推进,从展叶期到果实成熟期,不同栽植密度枣园 LAI 均呈现出先增大后减小的趋势,并在果实膨大期达到最大值。随着株距增大,不同物候期枣园 LAI 均表现为不断减小的趋势。展叶期,A 与 B 之间的差异不显著,二者显著高于 C 和 D;坐果期和果实成熟期,A 显著高于 B,二者显著高于 C 和 D;果实膨大期,C 与 B 和 D 之间的差异均不显著,但显著低于 A。

2.2 不同栽植密度枣园 MTA 的物候变化

MTA 是表示“叶片倾斜如何”的重要冠层结构参数之一。当叶片处于水平状态时,则 MTA 为 0° ;若叶片为垂直时,则 MTA 为 90° 。一般来说,MTA 多处于 30° (水平叶片占优势)~ 60° (垂直叶片占优势)之间, 30° 与 60° 分别为水平叶片和垂直叶片的优势区。从表 2 可以看出,随着物候推进,从展叶期到果实成熟期,A 和 B 的 MTA 呈先减小后增大并基本趋于稳定的特点,并在果实膨大期达到最大值;C 和 D 则表现为先增大后减小的趋势,并在坐果期达到最大值。展叶期,A、C 和 D 的 MTA 较 B 分别显著提高 34.1%、27.2%和 34.8%;坐果期,MTA 随着株距增大而增大,C 和 D 显著高于 A 和 B;果实膨大期和成熟期,MTA 随着株距增大先减小后增大,A 和 D 显著高于 C。

表 1 不同栽植密度枣园 LAI

Table 1 LAI of jujube orchard with different planting densities

栽植密度	LAI			
	展叶期	坐果期	果实膨大期	果实成熟期
A	1.93±0.24 aC	2.71±0.23 aAB	2.94±0.38 aA	2.33±0.20 aBC
B	1.70±0.19 aB	2.16±0.19 bA	2.22±0.24 bA	1.70±0.21 bB
C	1.19±0.17 bB	1.53±0.13 cA	1.84±0.25 bcA	1.15±0.06 cB
D	1.03±0.13 bB	1.28±0.15 cB	1.66±0.17 cA	1.12±0.12 cB

注:表中数据为平均值±标准差;同一列数据后不同小写字母表示不同栽植密度间差异显著,同一行数据后不同大写字母表示不同物候间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 2 不同栽植密度枣园 MTA

Table 2 MTA of jujube orchard with different planting densities

栽植密度	MTA/ $^\circ$			
	展叶期	坐果期	果实膨大期	果实成熟期
A	35.44±3.94 aB	16.45±2.07 cC	42.02±1.97 abA	40.05±3.66 aAB
B	26.44±1.89 bB	23.32±3.44 cB	37.74±1.99 bA	36.45±2.97 aA
C	33.63±3.13 aAB	36.85±4.02 bA	29.07±2.82 cB	15.85±1.62 cC
D	35.64±3.98 aB	47.66±4.87 aA	44.35±3.69 aA	29.68±2.04 bB

2.3 不同栽植密度枣园 DIFN 的物候变化

由表 3 可知,随着物候推进,从展叶期到果实成熟期,不同栽植密度枣园 DIFN 均表现为先增大后减小的趋势,并在坐果期达到最大值。其中,A 和 B 的 DIFN 介于 0.16~0.33;C 和 D 的 DIFN 介于

0.23~0.42。随着株距增大,各物候期 DIFN 均呈现出不断增大的特点。展叶期和果实成熟期,栽植密度对 DIFN 的影响一致,均表现为 C 与 D 之间的差异不显著,但显著高于 A;坐果期,D 显著高于其他栽植密度,较 A、B 和 C 分别显著提高 30.0%、

表 3 不同栽植密度枣园 DIFN

Table 3 DIFN of jujube orchard with different planting densities

栽植密度	DIFN			
	展叶期	坐果期	果实膨大期	果实成熟期
A	0.16±0.02 bC	0.32±0.03 cA	0.26±0.02 cB	0.16±0.02 bC
B	0.21±0.03 abB	0.33±0.02 cA	0.32±0.03 bA	0.21±0.03 abB
C	0.23±0.03 aB	0.37±0.02 bA	0.35±0.03 abA	0.23±0.03 aB
D	0.24±0.03 aB	0.42±0.02 aA	0.39±0.03 aA	0.23±0.04 aB

29.3%和11.7%;果实膨大期,B、C和D较A分别显著提高22.8%、34.0%和48.6%。

2.4 不同栽植密度枣园相对 PAR 的物候变化

表 4 表明,随着物候推进,从展叶期到果实膨大期,不同栽植密度枣园相对 PAR 均表现为先减小后增大的趋势,在展叶期和坐果期分别达到最大值和最小值。随着株距增大,除 B 的相对 PAR 在展叶期和果实膨大期略有下降外,各物候期相对 PAR 总体呈现出增大的特点。A 和 B 之间各物候期的相对 PAR 差异不显著,二者显著低于 C 和 D。

2.5 不同栽植密度枣园果实性状

由表 5 可知,不同栽植密度对枣果纵径和横径的影响不显著,D 的果形指数显著大于 B 和 C。C 和 D 的单果重显著高于 A 和 B。A 的 Vc 含量最高,但可溶性糖含量最低,分别是 B、C 和 D 的 80.8%、74.7%和 83.9%。C 的可滴定酸含量最

低,糖酸比最高。其中,可滴定酸较 A、B 和 D 分别降低 28.3%、19.1%和 14.4%,糖酸比较 A、B 和 D 分别显著提高 85.3%、33.3%和 30.4%。随着株距增大,单株产量呈递增趋势,其中 C 和 D 显著高于 A,二者分别为 A 的 3.26 倍和 4.39 倍。折合成每公顷产量,A、B、C、D 分别为 4 638.0、4 868.4、5 045.8、5 094.9 kg·hm⁻²。

表 4 不同栽植密度枣园相对 PAR

Table 4 Relative PAR of jujube orchard with different planting densities

栽植密度	PAR(%)		
	展叶期	坐果期	果实膨大期
A	20.91±3.03 cA	8.81±1.17 bB	18.33±1.94 bA
B	16.97±1.50 cA	8.89±1.13 bB	15.24±1.61 bA
C	31.21±4.39 bA	17.00±2.13 aB	27.62±4.27 aA
D	47.27±5.60 aA	19.30±1.88 aC	33.27±3.75 aB

表 5 不同栽植密度枣园果实性状

Table 5 Fruit characters of jujube orchard with different planting densities

果实性状	栽植密度			
	A	B	C	D
纵径/mm	37.59±2.69 a	40.09±1.19 a	39.38±2.06 a	38.80±1.38 a
横径/mm	24.88±1.89 a	26.83±0.45 a	26.38±0.99 a	24.69±1.85 a
果形指数	1.53±0.02 ab	1.51±0.02 b	1.50±0.06 b	1.60±0.09 a
单果质量/g	12.0±2.34 c	14.5±1.83 b	17.3±1.82 a	19.1±2.26 a
Vc 含量/(mg·g ⁻¹)	2.02±0.12 a	1.43±0.10 b	1.34±0.04 b	1.36±0.03 b
可溶性糖含量(%)	37.81±0.49 b	46.79±1.01 a	50.65±6.91 a	45.09±3.89 a
可滴定酸含量(%)	0.23±0.02 a	0.20±0.02 ab	0.16±0.02 c	0.19±0.01 bc
糖酸比	168.08±17.96 c	233.64±15.69 b	311.46±25.11 a	238.89±36.50 b
单株产量/g	927.85±306.21 d	1 948.70±732.67 c	3 029.25±812.94 b	4 077.40±620.83 a
产量/(kg·hm ⁻²)	4 638.0	4 868.4	5 045.8	5 094.9

注:同一行数据后不同小写字母表示不同栽植密度间差异显著($P<0.05$)。

3 结论与讨论

3.1 结论

综合分析表明,随着物候推进,不同栽植密度枣园 LAI 和 DIFN 均呈现出先增大后减小的趋势,相对 PAR 则表现为先减小后增大的特点。随着株距不断增大,枣园 LAI 减小,树冠 DIFN 增大,相对 PAR 增强,光能利用率提高。1.5 m×4 m 栽植密度能有效改善枣园冠层结构与光能利用效率,在稳

定枣果产量的前提下提升了枣果品质。

3.2 讨论

相关研究表明,种植密度会改变冠层结构特征,冠层结构的改变进而会引起群体功能和产量的改变^[15-16]。LAI 反映植物群落的生长状况,它表示冠层呼吸、光合和蒸腾等作用总面积的指数,与生态系统蒸散量、冠层光截获能力、总初级生产力等生态学重要参数指标有直接的关系^[17-19]。LAI 与栽植的株行距关系密切^[20]。本研究中,不同栽植密度枣园

LAI 随着株距增大总体呈不断减小的趋势,这与株间枝叶量及其相互遮蔽程度较高有关。随着物候推进,从展叶期到果实成熟期,枣园 LAI 均呈现出先增大后减小的趋势,与不同物候期叶幕体积大小有关。展叶期,枣树叶片还处在发育阶段,叶量少、叶面积小,因而 LAI 较小;到坐果期和果实膨大期,叶片发育完成,叶幕体积达到最大值,LAI 增大;再到果实成熟期,天气转凉,受温度、降雨量和太阳辐射等的影响,枣树生理特性随之改变,叶片开始老化、扭曲、掉落,LAI 逐渐减小。LAI 在一定程度上决定了作物的生产效率^[21]。研究认为,在适宜的 LAI 范围内,产量与 LAI 呈显著正相关关系^[22],LAI 过低或过高均对产量造成不利影响。如韩焕勇等^[23]在研究不同种植密度对棉花群体 LAI 的影响时发现,LAI 过低,造成漏光损失严重;而 LAI 过高,导致群体郁闭,透光不足,均对产量造成不同程度的影响。本研究中,A 和 B 的 LAI 在坐果期和果实膨大期均超过了 2,此时枣园冠层郁闭,在一定程度上影响枣园产量。

MTA 作为植物叶片的一个主要性状,其大小直接反映了叶片的光能利用效率,并因此引起树冠生理上的变化^[24]。MTA 通常不是固定不变的,受气候条件、栽培方式、叶龄等因素的影响,甚至在同一天中同一叶片的 MTA 也不相同。本研究中,随着物候推进,A 和 B 的 MTA 呈先减小后增大并基本趋于稳定的特点,C 和 D 则表现为先增大后减小的趋势,不同栽植密度枣园 MTA 的物候变化差异反映了叶片对气候的不同响应。研究表明,植被群体的受光面积与 MTA 有直接关系,MTA 越大(叶片越直立),受光面积越大,光合产量越高。原因在于大的 MTA 其光照反射越少,可使树冠上下层叶片受光均匀,避免了上层叶光饱和、下层叶光照不足的现象,从而更加经济地利用光能,提高光效;同时,大的 MTA 能使叶片双面受光,因此光能利用率提高^[24]。本研究发现,C 和 D 的 MTA 在展叶期明显高于 B,坐果期明显高于 A 和 B,D 在果实膨大期也高于 A 和 B,表明在一定行距条件下,通过增加株间距离大小可以在一定程度上提高 MTA,增加叶片受光面积。

DIFN 作为表征“冠层光线吸收”的指数,生产中一般将其看作是冠层对光的透射率^[25]。PAR 是生态系统中能量获取的主要来源,光照不足既影响植物的生长发育和形态建成,而且造成作物光合能力下降,产量减少^[26]。本研究发现,随着株距增大,各物候期 DIFN 和相对 PAR 均呈现出不断增大的特点,表明在一定行距条件下,栽植株距增加,透光

率增大,PAR 增强。张晓艳等^[27]在研究密度对大豆(*Glycine max*)群体冠层结构的影响时也得出,不同层次透光率随着密度减小呈递增趋势。一般认为,冠层适宜的透光率在 0.25~0.35,一方面既能保证光能充分利用;另一方面又能保持较为适宜的郁闭度,进而提高产量和品质^[22]。本研究中,C 的 DIFN 介于 0.23~0.37,其在“冠层光线吸收”方面优于 A、B 和 D。C 和 D 各物候期树冠内 PAR 均>17%,光能利用率较高。

通过改变栽植密度可以调节个体的分布状况,改善冠层结构特征,进而有效提高产量和品质。赵菁^[28]研究表明,与密植相比,稀植下的库尔勒香梨冠层内光照充足,单果质量大,果实糖多酸少,硬度小,品质好,但 Vc 含量低。与之相似,本研究发现,C 的单果重、可溶性糖含量、单株产量及每公顷产量均高于 A 和 B,可滴定酸含量则明显低于 A 和 B,糖酸比显著高于其他 3 种株距模式,表明 C 在稳定枣果产量的前提下其品质也显著提高。

参考文献:

- [1] 刘孟军,汪民. 中国枣种质资源[M]. 北京:中国林业出版社, 2010:10-11.
- [2] 吴正保,史彦江,宋锋惠. 阿克苏 5 个枣品种光合荧光特征及水分利用效率研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 43-49.
WU Z B, SHI Y J, SONG F H. Photosynthesis, fluorescence characteristics and water use efficiency of five *Ziziphus jujuba* cultivars in Aksu, Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 43-49. (in Chinese)
- [3] 王世伟,潘存德,张翠芳,等. 枣与棉花间作巷道内的光环境研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30(4): 728-733.
- [4] JOSE S, WILLIAMS R, ZAMORA D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(2/3): 231-239.
- [5] 郭佳欢,潘存德,冯会丽,等. 枣麦间作系统中冬小麦的冠层光分布特征及产量研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 183-191.
- [6] 李祥,朱玉杰,董希斌. 抚育采伐后兴安落叶松的冠层结构参数[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(2): 1-5.
LI X, ZHU Y J, DONG X B. Canopy structural parameters of *Larix gmelini* after cutting[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(2): 1-5. (in Chinese)
- [7] BROWN N, JENNINGS S, NABE-NIELSEN W J. An improved method for the rapid assessment of forest understorey light environments[J]. Journal of Applied Ecology, 2000, 37(6): 1044-1053.
- [8] 熊樱,唐德瑞,王得祥,等. 延安城郊刺槐林下物种多样性与生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 1-7.
XIONG Y, TANG D R, WANG D X, et al. Understorey species diversity and biomass of artificial *Robinia pseudoacacia* forests in Yan'an suburb[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 1-7. (in Chinese)

- [9] MATTERA J, ROMERO L A, CUATRIN A L, *et al.* Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45: 87-95.
- [10] 牛莹莹, 廖康, 赵世荣, 等. 不同栽植密度库尔勒香梨树冠结构及产量品质差异分析[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(8): 1425-1431.
- [11] 王国安, 黄闽敏, 张强, 等. 干旱灌溉区高密核桃园改优技术研究[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(10): 1788-1793.
- [12] 戴建昊, 韩暖, 余飞燕, 等. 不同株行距对核桃光合作用的影响[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(4): 96-100.
- [13] 宋锋惠, 吴正保, 史彦江. 枣桐间作对棉花产量和光环境的影响[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(9): 1624-1628.
- [14] 王世伟, 潘存德, 张翠芳, 等. 枣麦间作系统中冬小麦冠层光合有效辐射时空窗影响因素研究[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(7): 1373-1378.
- [15] MADDONNI G A, OTEGUI M E, CIRILO A G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(3): 183-193.
- [16] 吴霞, 陈源泉, 隋鹏, 等. 种植方式对华北春玉米密植群体冠层结构的调控效应[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 18-24.
- [17] CHEN J M, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using landsat TM images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 153-162.
- [18] 李轩然, 刘琪璟, 蔡哲, 等. 湿地松林叶面积指数测算[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4099-4105.
- [19] 封焕英, 张连金, 杜满义, 等. 侧柏人工林冠层特性对不同森林经营方式的响应[J]. *东北林业大学学报*, 2017, 45(12): 12-15.
- FENG H Y, ZHANG L J, DU M Y, *et al.* Effect on canopy characteristic of *Platyclusus orientalis* plantation in different forest management[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, 45(12): 12-15. (in Chinese)
- [20] 王玉蓉. 不同栽植密度杏园微气候特征研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [21] 岳玉琴, 魏钦平, 张继祥, 等. 黄金梨棚架树体结构相对光照强度与果实品质的关系[J]. *园艺学报*, 2008, 35(5): 625-630.
- [22] CAVA D, KATUL G G. Spectral short-circuiting and wake production within the canopy trunk space of an alpine hardwood forest[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 126(3): 415-431.
- [23] 韩焕勇, 王方永, 陈兵, 等. 不同种植密度下棉花叶面积指数与群体透光率的关系研究[J]. *中国棉花*, 2014, 41(7): 14-16.
- [24] 刘军和, 王建国, 杨留成. 叶倾角对阔叶树生长特性和产量的影响初报[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(10): 40-41.
- [25] 陈景玲, 张冬, 王谦, 等. 荆条孤立冠层天空开度与太阳辐射透射率关系研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(5): 19-25.
- CHEN J L, ZHANG D, WANG Q, *et al.* Solar radiation transmittance of isolated vervain family canopy using canopy analyzer[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(5): 19-25. (in Chinese)
- [26] 杜成凤, 李潮海, 刘天学, 等. 遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6633-6640.
- [27] 张晓艳, 杜吉到, 郑殿峰. 密度对大豆群体冠层结构及光合特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(4): 75-80.
- [28] 赵菁. 不同栽植密度库尔勒香梨光合特性研究及果实品质观测[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.

(上接第 152 页)

- [19] MCKENNEY D W, DAVIS J S, TURNBULL J W, *et al.* The impact of Australian tree species research in China [C]// ACIAR economic assessment series. Canberra: 1991(12): 6-7.
- [20] 李光友, 徐建民, 王伟, 等. 杂交桉家系在冷凉区优势评价与遗传分析[J]. *南京林业大学学报*, 2017, 41(4): 55-63.
- LI G Y, XU J M, WANG W, *et al.* Study on heterosis estimation and genetic analysis of *Eucalyptus* hybrids in cold area [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2017, 41(4): 55-63. (in Chinese)
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [22] 李光友, 徐建民, 彭仕尧, 等. 桉树胶合板材林栽培与无性系早期选择[J]. *桉树科技*, 2014, 31(3): 22-27.
- [23] 赵桂香, 廖泽毅, 周旭东. “生长停滞”症状桉树叶片微量元素含量分析[J]. *桉树科技*, 2010, 27(1): 45-48.
- ZHAO G X, LIAO Z Y, ZHOU X D, *et al.* Analysis of trace element concentrations from *Eucalyptus* leaves showing slow-growing symptom [J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2010, 27(1): 45-48. (in Chinese)
- [24] 陆钊华. 尾叶桉无性系选育研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2005.
- [25] 陆钊华, 徐建民, 韩超, 等. 南方桉树人工林雨雪冰冻经济损失评估与分析[J]. *林业科学*, 2008, 44(11): 36-41.
- LU Z H, XU J M, HAN C, *et al.* Economic losing evaluation of *Eucalyptus* plantations subjected to the frozen catastrophe in Southern China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11): 36-41. (in Chinese)
- [26] 杨朱河. 闽南桉树施肥效应研究[J]. *防护林科技*, 2011(1): 33-35.
- [27] 陈孝丑. 不同修枝强度对杉木干形的影响 [J]. *林业科技开发*, 2007, 21(3): 87-88.
- [28] 何沙娥, 欧阳林男, 朱林生, 等. 桉树大径材培育技术研究概述[J]. *桉树科技*, 2018, 35(1): 41-47.
- [29] 李昌荣, 陈奎, 周小金. 大花序桉研究现状与发展趋势[J]. *桉树科技*, 2012, 29(2): 40-46.