DOI:10.13880/j.cnki.65-1174/n.2026.23.018 文章编号:1007-7383(2026)05-0612-11

杏树间作薄荷/紫苏对小气候、产量及经济效益的影响

赵伊桐[1],张文文[1],李国钰[1],申磊[1],李哲[1],尉雯雯[1],周润[2],周雅[2],张伟[1*]
(1 石河子大学农学院,新疆 石河子 832003;2 石河子市北泉镇鸿兴翔种植专业合作社,新疆 石河子 832003)

摘要:本研究以杏树‖薄荷、杏树‖紫苏系统为研究对象,通过田间试验探究其对小气候、作物生长、产量及经济效益的影响,为新疆地区杏药复合种植模式的推广提供理论依据。结果表明,与单作相比,间作下空气温度降低 3.90%~8.90%,空气相对湿度提高 10.14%~15.13%,平均风速降低 42.68%~56.10%。间作显著促进了薄荷与紫苏的株高、茎粗及相对叶绿素含量(SPAD 值)的增长,但叶面积有所减小。杏树产量在单作与间作模式下无显著差异,而间作模式下薄荷与紫苏的产量显著下降。2 种间作系统的土地当量比(LER)均大于 1,表明其土地综合利用率优于单作,其中杏树‖紫苏模式表现出更高的经济效益。综上,杏树‖薄荷、杏树‖紫苏模式是兼顾生态调节与经济效益的种植模式,杏树‖紫苏模式更适合在新疆地区杏园推广应用。

关键词:杏药间作;田间小气候;农艺性状;产量;经济效益
中图分类号:S344.2 **文献标志码**:A

Effects of intercropping mint/perilla on microclimate, yield and economic benefits of apricot trees

ZHAO Yitong[1], ZHANG Wenwen[1], LI Guoyu[1], SHEN Lei[1], LI Zhe[1], WEI Wenwen[1], ZHOU Run[2], ZHOU Ya[2], ZHANG Wei[1*]
(1 Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2 Shihezi Beiquan Town Hongxingxiang Planting Professional Cooperative, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: In this study, the apricot-mint and apricot-perilla intercropping system was used as the research object, and their effects on microclimate, crop growth, yield and economic benefits were explored through field experiments, which provided a theoretical basis for the promotion of apricot-medicinal compound planting mode in Xinjiang. The results show that compared with monoculture, intercropping temperature by 3.90%~8.90%, relative air humidity by 10.14%~15.13%, and average wind speed by 42.68%~56.10%. Intercropping significantly promotes the growth of plant height, stem diameter and relative chlorophyll content (SPAD) of mint and perilla, but reduces their leaf area. There is no significant difference in apricot yield between monoculture and intercropping patterns, while the yield of mint and perilla decreases significantly in intercropping patterns. The land equivalent ratio (LER) of the two intercropping systems is greater than 1, indicating that the comprehensive land use efficiency is better than that of monoculture, and the apricot-perilla model shows higher economic benefits. In summary, both the apricot mint and apricot-perilla models are planting models that balance ecological regulation and economic benefits. The apricot-perilla model is more suitable for promotion and application in apricot orchards in Xinjiang.

Key words: apricot medicine intercropping; field microclimate; agronomic traits; production; economic benefit

在全球农业可持续发展与粮食安全面临严峻挑战的背景下,传统单一种植模式的弊端日益凸显。该模式不仅易引发土壤养分失衡与生态环境退化,更难以适应气候变化加剧与水土资源短缺的双重压力胁迫[1-2]。近年来,全球气候异常导致高温事件频发,直接干扰植物正常生理生化过程,长期高温胁迫会造成不可逆损伤,最终导致作物产量与品质显著下降[3-4]。果园间作作为一种高

收稿日期:2025-12-11
基金项目:国家自然科学基金项目(32260723)
作者简介:赵伊桐(2000—),女,硕士研究生,专业方向为农艺与种业。
*通信作者:张伟(1979—),男,教授,博士研究生导师,从事绿洲生态与农作制度研究,e-mail:bluesky2002040@163.com。

效的耕作模式,在全球范围内被广泛用于提升土地利用效率、增强生物多样性并提高经济收益[5]。尤其在当前气候与资源压力下,合理间作可通过微气候调节、根系资源竞争分配及土壤养分动态平衡等机制,显著提升果园系统的生产力与生态稳定性[6]。

新疆是我国杏树栽培的主产区,种质资源丰富,栽培历史悠久[7],也是我国杏干生产的核心区域[8]。然而,杏树种植存在幼龄期长、早期经济效益低的问题,传统单作模式下行间土地长期闲置,不仅造成光、热、水及土壤养分的资源浪费,还易滋生杂草、增加水肥损耗,这些因素曾导致栽培面积一度下滑[9]。为破解这一困境,果药间作模式展现出显著优势。该模式通过在杏树行间引入适宜的矮秆药用植物,能够有效提高土地利用率、获取短期经济收益,同时借助杏树冠层对田间微气候的调节作用,如降低风速、缓解温度剧烈波动,为间作药材创造更适宜的生长环境[10]。此外,果树与矮秆作物在资源利用上具有互补性:果树树体高大、根系深,主要利用深层土壤养分和上层空间光热;而矮秆作物则集中于浅层土壤资源与近地表生态位,二者搭配有助于优化系统内资源分配效率[11]。因此,发展杏药间作,不仅能够缓解幼树期资源闲置与经济效益滞后的问题,更可通过资源互补与生态调控,实现经济效益与生态可持续性的协同提升。

薄荷和紫苏是兼具药用、食用及经济价值的重要特色作物,近年来市场需求持续增长。薄荷适应性强,香精油产量高,广泛应用于食品、医药和化妆品工业[12];紫苏作为新疆地区主栽香料作物,产量高、品质优,具有良好的经济、社会及生态效益[13]。随着“药食同源”理念普及以及健康认知的深化,中草药种植规模不断扩大[14]。在“退耕还林”及林下经济政策引导下,新疆依托地域资源优势,积极发展林下中草药生态种植。果药间作模式能够有效利用果园行间空间,缓解中草药种植对耕地的压力,实现生态与经济协同增益[15]。

目前,果园间作的理论与实践已有较多积累,但针对杏树与薄荷、紫苏间作系统的研究仍较匮乏,尤其在微气候调控、作物生长、产量及经济效益等方面尚需深入探索。因此,本研究以杏树‖薄荷、杏树‖紫苏间作系统为研究对象,通过田间试验比较单作与间作模式下小气候特征、作物生长动态、产量及经济效益的差异,以期为新疆地区杏药复合种植模式的推广提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况及试验材料

试验地位于新疆生产建设兵团第八师石河子市北泉镇双泉集村(80°56′ N,44°24′ E),海拔 412 m,该地属于干旱大陆性气候,日照时间长,年均降雨量 210 mm,年均蒸发量 1 340 mm,年均温度 6.6 ℃,年均无霜期 166 d,年均日照时数 2 784 h。土壤为沙壤土,0~60 cm 土壤有机质含量为 23.9 $g\cdot kg^{-1}$,全氮含量为 0.87 $g\cdot kg^{-1}$,速效磷含量为 30.33 $mg\cdot kg^{-1}$,速效钾含量为 119.87 $mg\cdot kg^{-1}$,pH 8.15,电导率 236.27 $\mu S\cdot cm^{-1}$。

试验材料:本试验杏树为金太阳杏,栽植于 2022 年,在试验年份时为三年生树龄。薄荷品种为:留兰香薄荷,茎直立,叶呈卵状长圆形至长圆状披针形,叶缘具尖锐锯齿。紫苏品种为:双色紫苏(正绿背紫),茎呈四棱形,叶片卵形,叶缘具钝锯齿,叶表呈深紫色,叶背为鲜绿色。

1.2　试验设计

试验于 2024 年 4 月—2025 年 10 月进行,杏树南北行向种植,株行距为 3 m×4 m。薄荷、紫苏于每年 5 月 6 日播种,播种时距树 1.25 m,行距为 0.3 m,株距为 0.2 m,行间铺设滴灌带,一管两行。单作薄荷、紫苏的株行距与间作一致。共有杏树‖薄荷(JBH)、杏树‖紫苏(JZS)、单作杏树(MX)、单作薄荷(MBH)和单作紫苏(MZS)5 个小区,每个小区 3 次重复,各小区面积均为 4 m×15 m。灌溉方式为滴灌,杏树全生育时期灌溉 6 次,总量 3 750 $m^3\cdot hm^{-2}$,2024 年 10 月末施用 350 $kg\cdot hm^{-2}$复合肥(N、P_2O_5、K_2O 比例为 15∶15∶15),次年追肥 2 次,每次施用尿素(含氮量 46%)50 $kg\cdot hm^{-2}$、磷酸二铵(含 P_2O_5 53.8%)40 $kg\cdot hm^{-2}$、硫酸钾(含 K_2O 51%)40 $kg\cdot hm^{-2}$。薄荷及紫苏全生育期灌水 8 次,单次灌溉量为 450 $m^3\cdot hm^{-2}$,播前施 170 $kg\cdot hm^{-2}$复合肥(N、P_2O_5、K_2O 比例为 15∶15∶15)为基肥,全生育时期随水追肥 2 次,每次施尿素(含氮量 46%)75 $kg\cdot hm^{-2}$、磷酸二铵(含 P_2O_5 53.8%)15 $kg\cdot hm^{-2}$、硫酸钾(含 K_2O 51%)15 $kg\cdot hm^{-2}$。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　田间小气候

在 5 个小区中薄荷、紫苏的分枝期、开花期、成熟期,使用 Kestrel 4000 手持式气象站分别测量空气

温度、空气相对湿度和风速。单间作薄荷、紫苏测量点为作物冠层,单作杏树测量点为距树干 2 m、高度为 1 m 处。测量时间为一天中的 10:00—20:00,每隔 2 h 测量 1 次(10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 和 20:00)。

1.3.2 农艺性状

在薄荷、紫苏的分枝期、开花期、成熟期时进行采样。分别于不同小区选取具有代表性的 10 株薄荷、紫苏,测定其自然株高,用游标卡尺测定茎粗,计算平均值并记录。采用 SPAD-502 叶绿素测定仪对各处理下的薄荷、紫苏叶片进行测定,测定时避开叶脉位置,重复 3 次,取平均值。选择各小区的 3 株作物,将叶片摘下平铺在带有标尺的白纸上拍照,将照片导入 Digimizer 软件测量叶面积。

杏树于成熟期在离地 1.3 m 处测定胸径,使用尺子及标杆测定东西冠幅、南北冠幅及树高。

1.3.3 干物质量

在每个小区随机选取 3 株有代表性且长势一致的薄荷及紫苏,将每株薄荷、紫苏按照根、茎、叶、花序、籽粒分别装入不同的牛皮纸袋,做好标记后放入烘箱 105 ℃杀青 30 min,随后将温度调整为 70 ℃烘干至恒重,测定干重。

1.3.4 产量

薄荷:在各处理重复小区内,随机设置 3 个 1.0 m×1.0 m 收获样方,全株采收样方内薄荷地上部植株(含茎、叶),去除杂草及病残体后测定鲜重,作为样方总产量,结合小区面积计算出各处理理论产量。

紫苏:采用与薄荷一致的抽样方法,采收样方内紫苏地上部作为样方总产量;依据小区面积换算各处理的单位面积理论产量。

杏树:在各处理重复小区内,随机选取 5 棵,待果实成熟时采收,采用电子秤(精度≥0.01 kg)测定正常果总鲜重;结合种植密度,计算各处理的单位面积产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行统计及计算,使用 SPSS 23.0 软件,通过最小显著差异法(LSD)进行方差分析($P<0.05$),使用 Origin Pro 2025 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 间作系统对空气温度的影响

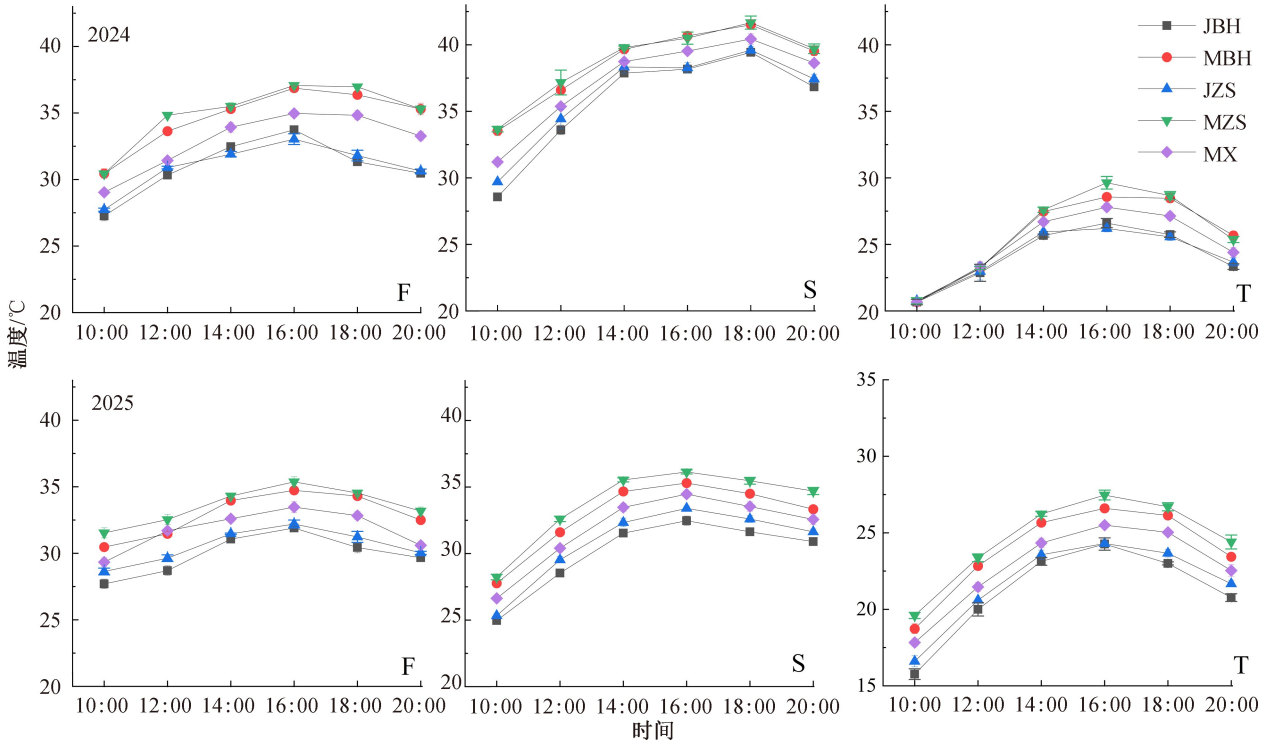
如图 1 所示,间作系统与单作系统整体空气温度变化趋势一致,且 2024 年整体空气温度均高于 2025 年。不同生育时期日变化趋势一致,空气温度先升高后降低,在开花期空气温度达到最高,杏树‖薄荷(JBH)、杏树‖紫苏(JZS)、单作薄荷(MBH)、单作紫苏(MZS)、单作杏树(MX)依次为 32.88 ℃、33.55 ℃、35.72 ℃、36.26 ℃、34.58 ℃,最低温则出现在成熟期。全天最高气温出现在 16:00,早晚温度较低,最低气温出现在日出之后的 10:00。2 种间作空气温度在各生育时期均低于单作,5 个处理从高到低分别为:MZS>MBH>MX>JZS>JBH,JBH 和 JZS 两年平均空气温度较 MX 分别降低 5.32% 和 3.90%,JBH 较 MBH 降低 8.81%,JZS 较 MZS 降低 8.90%。薄荷与紫苏单间作温度差值均在分枝期达到峰值。MBH 系统全生育时期平均温度比 JBH 系统高 2.77 ℃,MZS 系统全生育时期温度比 JZS 系统高 2.84 ℃,MBH 和 MZS 较 MX 平均温度分别低 5.32%和 3.90%。由此可见,杏树‖薄荷系统降低田间空气温度效果更显著。

2.2 间作系统对空气湿度的影响

如图 2 所示,空气湿度的变化趋势与空气温度相反,表现为早晚较高,中午较低,呈现“V”型,谷值出现在 16:00—18:00,之后逐渐回升。各处理平均空气湿度在成熟期达到最大,JBH、MBH、JZS、MZS、MX 依次为 39.23%、29.95%、37.75%、28.90%、25.99%,在开花期最低,较成熟期分别低 2.94、3.94、2.62、3.49、4.56 个百分点。与单作系统相比,JBH 和 JZS 在各生育时期的空气湿度更高,JBH 两年的平均湿度较 MBH 和 MX 分别高出 10.97 和 15.13 个百分点,JZS 两年的平均湿度较 MZS 和 MX 分别高出 10.14 和 14.18 个百分点。

2.3 间作系统对风速的影响

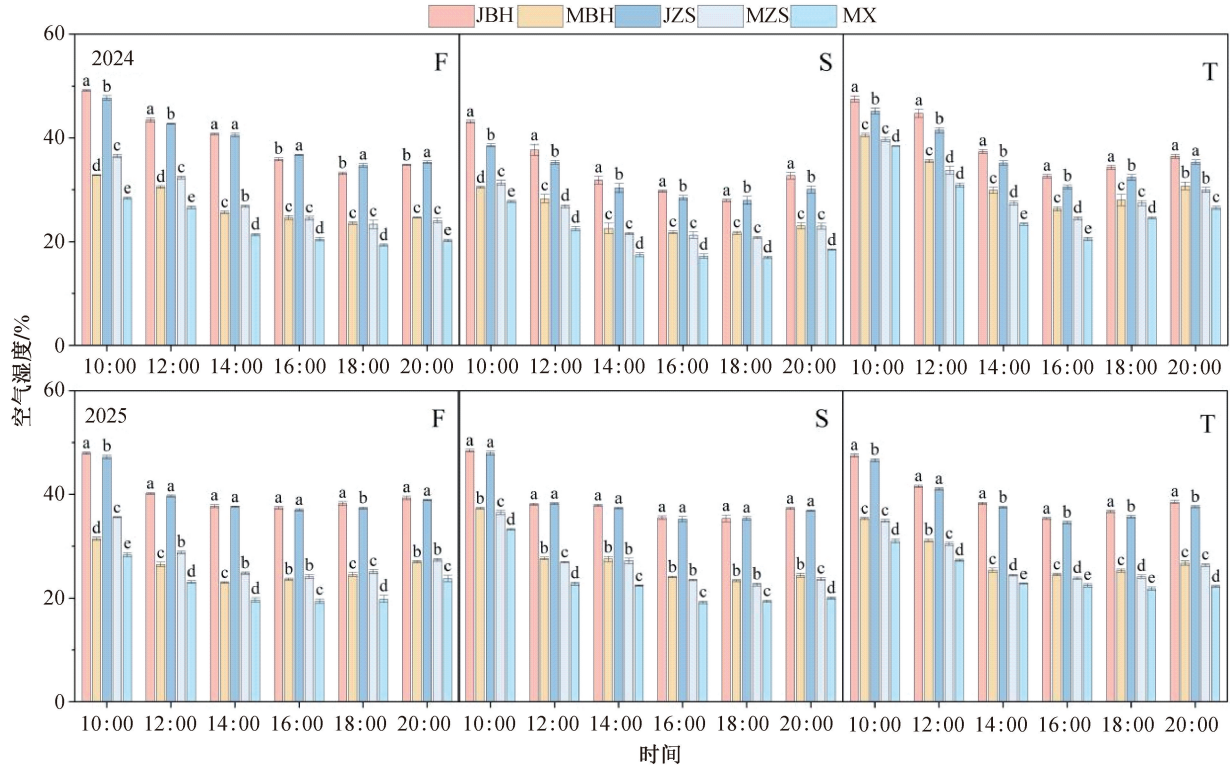
如图 3 可知,间作系统在分枝期较 MX 风速差异达到最大,JBH 与 JZS 风速比 MX 分别降低 1.24 $m\cdot s^{-1}$ 和 1.20 $m\cdot s^{-1}$,与各自单作相比降低了 0.66 $m\cdot s^{-1}$ 和 0.88 $m\cdot s^{-1}$;在开花期 JBH 与 JZS 较 MX 风速分别下降 0.91 $m\cdot s^{-1}$ 和 0.86 $m\cdot s^{-1}$,较 MBH 与 MZS 分别下降 0.63 $m\cdot s^{-1}$ 和 0.64 $m\cdot s^{-1}$;在成熟期 JBH 与 JZS 较 MX 风速分别下降 1.10 $m\cdot s^{-1}$ 和 0.95 $m\cdot s^{-1}$,较 MBH 与 MZS 分别下降 0.73 $m\cdot s^{-1}$ 和 0.72 $m\cdot s^{-1}$。从日变化趋势来看,风速变化无明显规律。两年间,JBH 系统内平均风速较 MBH、MX 分别降低了 42.68%、56.10%;JZS 系统内平均风速比 MZS、MX 分别降低了 43.61%、52.68%。



F：分枝期；S：开花期；T：成熟期；MBH：单作薄荷；JBH：杏树 ‖ 薄荷；MZS：单作紫苏；JZS：杏树 ‖ 紫苏；MX：单作杏树。

图 1　单、间作系统空气温度动态变化

Figure 1　Dynamic changes of air temperature in intercropping system and monoculture system



F：分枝期；S：开花期；T：成熟期；MBH：单作薄荷；JBH：杏树 ‖ 薄荷；MZS：单作紫苏；JZS：杏树 ‖ 紫苏；MX：单作杏树；不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著（$P<0.05$）。

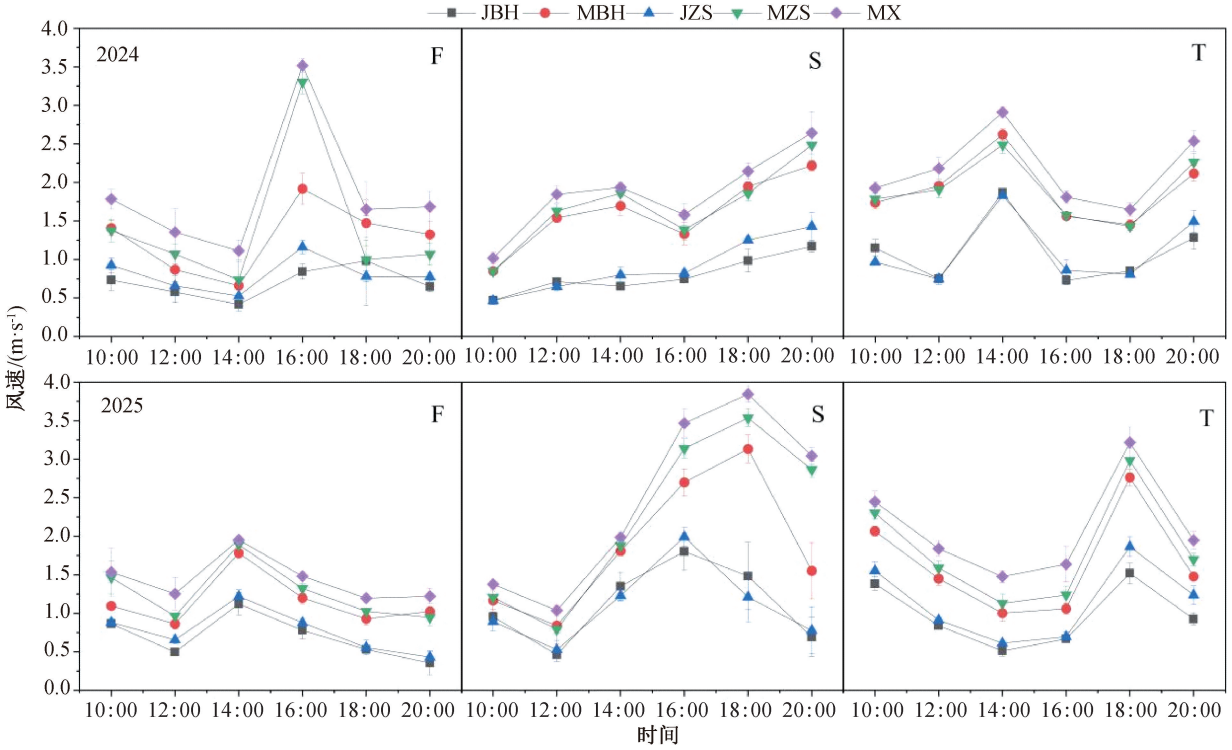
图 2　单、间作空气相对湿度动态变化

Figure 2　Dynamic changes of air relative humidity in intercropping system and monoculture system

2.4 杏树间作对薄荷、紫苏农艺性状的影响

2.4.1 杏树间作对薄荷、紫苏株高的影响

如表 1 所示,在本试验中薄荷与紫苏的株高随生育时期的推进均呈逐步上升趋势,各生育时期 JBH 的株高均显著高于 MBH,JZS 的株高亦高于 MZS。2 年试验数据表明,与 MBH 相比,JBH 在分枝期、开花期和成熟期的株高分别增加 44.78%、30.54% 和 27.75%;与 MZS 相比,JZS 在上述 3 个时期的株高分别增加 27.80%、5.49% 和 12.99%。



F:分枝期;S:开花期;T:成熟期;MBH:单作薄荷;JBH:杏树‖薄荷;MZS:单作紫苏;JZS:杏树‖紫苏;MX:单作杏树。

图 3 单、间作系统风速动态变化

Figure 3 Dynamic changes of wind speed in monocropping and intercropping systems

表 1 不同处理下薄荷、紫苏株高变化

Table 1 Changes of plant height of mint and perilla under different treatments

年份	处理	株高/cm		
		分枝期	开花期	成熟期
2024	MBH	8.10±0.86b	22.88±1.62b	46.34±3.33b
	JBH	12.04±1.70a	33.24±3.54a	53.82±2.37a
	MZS	7.02±1.40a	46.18±3.94a	102.00±4.53b
	JZS	7.62±0.71a	47.47±3.62a	115.40±4.16a
2025	MBH	7.71±1.11b	36.75±4.77b	39.00±3.80b
	JBH	10.85±0.94a	44.60±7.17a	55.20±6.38a
	MZS	13.84±1.60b	61.76±7.25a	101.78±7.65b
	JZS	19.04±2.52a	66.40±5.32a	114.86±5.01a

注:不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4.2 杏树间作对薄荷、紫苏茎粗的影响

由表 2 可知,薄荷与紫苏的茎粗在各生育阶段均呈显著上升趋势,表现为分枝期< 开花期< 成熟期。2 年试验结果表明,与 MBH 相比,JBH 在开花期和成熟期的茎粗分别显著增加 10.15% 和 22.17%。与 MZS 相比,JZS 在分枝期和成熟期茎粗分别显著增加 23.71% 和 29.18%。

2.4.3 杏树间作对薄荷、紫苏 SPAD 的影响

由表 3 可知,随着生育时期推进,薄荷和紫苏的 SPAD 值均呈逐渐上升趋势,于成熟期达到峰值。从分枝期到开花期,SPAD 值上升幅度较大;开花期至成熟期,上升幅度减缓。2 年数据显示,与 MBH 相比,JBH 在分枝期 SPAD 增幅较大,达到 15.93%,在开花期和成熟期分别提高 5.65%、5.71%;与 MZS 相比,JZS 在上述 3 个时期分别提高 6.72%、9.72% 和 7.93%。

2.4.4 杏树间作对薄荷、紫苏叶面积的影响

由表 4 可知,薄荷与紫苏的叶面积在生育时期的变化呈先升高后降低,在开花期达到峰值,各时期表现为开花期> 成熟期> 分枝期。与 MBH 相比,JBH 在分枝期、开花期和成熟期的叶面积虽略有降低,但差异均不显著;与 MZS 相比,JZS 叶面积在开花期和成熟期显著降低,降幅分别为 14.69% 和

13.98%。

表 2　不同处理下薄荷、紫苏茎粗变化

Table 2　Changes of stem diameter of mint and perilla under different treatments

年份	处理	茎粗/mm		
		分枝期	开花期	成熟期
2024	MBH	1.23±0.12a	3.65±0.58a	11.52±1.24b
	JBH	1.30±0.30a	3.23±0.46a	14.18±0.36a
	MZS	1.87±0.23a	5.71±0.22a	12.56±2.28b
	JZS	2.07±0.18a	6.80±0.87a	16.99±1.65a
2025	MBH	0.75±0.22a	2.36±0.50b	7.47±0.39b
	JBH	0.62±0.22a	3.39±0.93a	9.02±0.37a
	MZS	2.77±0.38b	6.88±1.07a	11.50±1.66b
	JZS	3.67±0.53a	7.45±0.56a	14.09±1.68a

注:不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。

表 3　不同处理下薄荷、紫苏 SPAD 变化

Table 3　SPAD changes of mint and perilla under different treatments

年份	处理	SPAD		
		分枝期	开花期	成熟期
2024	MBH	26.92±3.35b	35.54±2.34a	36.02±2.01b
	JBH	32.58±4.23a	37.80±2.89a	39.86±1.86a
	MZS	28.54±3.10a	36.29±3.28b	41.60±2.28b
	JZS	30.28±3.85a	41.13±2.07a	44.96±2.12a
2025	MBH	24.69±2.68b	33.46±3.60a	38.44±3.28a
	JBH	27.25±1.35a	35.10±3.13a	38.85±2.59a
	MZS	29.31±2.48a	40.86±1.00a	45.92±1.60b
	JZS	31.20±2.24a	43.52±3.86a	49.50±1.23a

注:不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。

表 4　不同处理下薄荷、紫苏叶面积变化

Table 4　Changes in leaf area of mint and perilla under different treatments

年份	处理	叶面积/cm^2		
		分枝期	开花期	成熟期
2024	MBH	4.16±0.85a	5.73±0.17a	4.67±0.71a
	JBH	3.68±0.47a	5.20±0.34a	4.26±0.13a
	MZS	15.80±0.43a	39.76±0.40a	34.59±2.22a
	JZS	16.05±1.04a	36.24±0.86b	33.18±1.84a
2025	MBH	3.73±0.08a	4.74±0.28a	4.28±0.01a
	JBH	3.47±0.41a	4.59±0.58a	3.92±0.66a
	MZS	15.60±1.00a	57.69±2.78a	51.40±4.07a
	JZS	16.22±0.95a	46.89±4.46b	40.79±2.57b

注:不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4.5　杏树间作对树体形态指标的影响

从胸径来看,各处理在 2 年间均呈现增长趋势。2024 年,JBH、JZS 和 MX 处理间胸径无显著差异;至 2025 年,各处理胸径均有所提高。在冠幅方面,东西冠幅与南北冠幅均呈现逐年扩大的趋势。2024 年各处理间东西与南北冠幅均无显著差异;2025 年,JZS 处理的东西冠幅最大,JBH 次之,MX 最小。从南北冠幅来看,2025 年 MX 处理略高于其他两组,达 3.94 m,各处理间亦无显著差异,表明不同处理对冠幅扩展的影响较为一致。树高方面,各处理在 2 年间均有所增加。MX 处理树高始终保持最高(表 5)。

表 5　不同处理下杏树树体形态指标变化

Table 5　Changes in morphological indexes of apricot trees under different treatments

年份	处理	胸径/cm	东西冠幅/m	南北冠幅/m	树高/m
2024	JBH	8.09±0.30a	3.57±0.43a	3.42±0.36a	4.29±0.20a
	JZS	7.82±0.27a	3.52±0.54a	3.31±0.32a	4.15±0.35a
	MX	7.95±0.36a	3.53±0.52a	0.04±0.34a	4.52±0.46a
2025	JBH	9.40±0.48a	4.12±0.69a	3.84±0.60a	4.79±0.23a
	JZS	9.34±0.49a	4.24±0.49a	3.91±0.61a	4.81±0.25a
	MX	8.82±0.50a	3.98±0.52a	3.94±0.34a	5.07±0.46a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

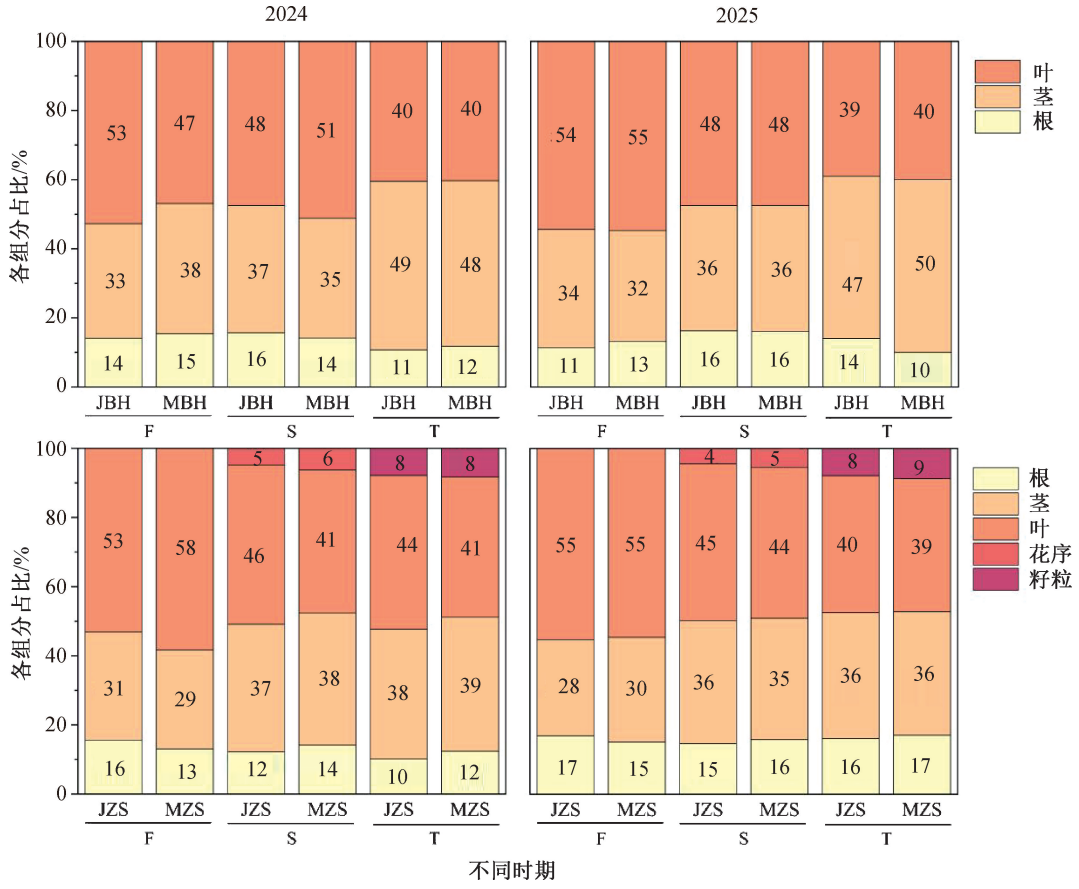
综合来看,不同处理在 2 年观测期内对杏树胸径、冠幅及树高的影响均未形成显著差异,表明在本试验条件下,间作薄荷或紫苏并未显著抑制或促进杏树的形态生长,各处理均保持了较为一致的生长趋势。

2.5　杏树间作对薄荷、紫苏干物质积累的影响

由图 4 可知,在不同生育时期,薄荷干物质分配呈现明显阶段特征:分枝期以光合器官构建为主,茎与叶分配比例较高,其中 JBH 茎占比为 33%~34%、叶片占比为 53%~55%,MBH 茎和叶占比分别为 32%~38%和 47%~55%。开花期单间作薄荷根占比略有上升达 14%~16%,茎部占比趋于稳定保持在 35%~37%,叶片占比下降至 48%~51%。至成熟期,茎部干物质分配比例进一步上升,达到 47%~50%,而叶片占比下降至 39%~40%,根下降至 10%~14%,反映干物质向茎部积累,符合成熟期结构物质再分配的特点。从不同种植模式比较来看,JBH 与 MBH 在各时期、各部位干物质分配比例上差异较小。说明单作与间作模式对薄荷整体干物质分配格局影响有限,各生育阶段的结构发育规律基本一致。

紫苏干物质分配同样呈现显著的生育阶段特征:分枝期以叶片为主要积累器官,MZS 叶片占比

为 55%~58%,JZS 为 53%~55%。开花期单间作紫苏茎部占比稳定在 35%~38%,叶片占比下降至 41%~46%,同时花序开始形成占干物质分配比例 4%~6%,显示光合产物向生殖结构初步转移。至成熟期,茎部占比维持在 36%~39%,叶片占比进一步下降至 39%~44%,而籽粒成为重要的干物质分配去向,占比稳定在 8%~9%,反映出同化产物集中向籽粒转运、完成从营养生长向生殖生长过渡的特征。种植模式比较表明,JZS 与 MZS 在各生育时期及各器官的干物质分配比例差异较小。



F:分枝期;S:开花期;T:成熟期。

图 4 单间作处理下薄荷、紫苏各部分干物质占比

Figure 4 The proportion of dry matter in each part of mint and perilla under single intercropping treatment

2.6 杏树间作对产量及土地当量比的影响

两年间 JBH 平均产量为 1 822.80 kg·hm^{-2},较 MBH 显著降低了 46.15%;JZS 产量为 3 612.94 kg·hm^{-2},较 MZS 显著降低了 57.13%,表明紫苏在间作中产量下降幅度更大。MX 与间作杏树之间产量略有降低但差异不显著,杏树‖薄荷(JBH-X)相较于 MX 降低 8.02%,杏树‖紫苏(JZS-X)较 MX 低 9.42%。

JBH 和 JZS 的土地当量比(LER)均大于 1(表 6),说明间作系统资源利用率均优于单作。杏树‖薄荷土地当量比为 1.44,比杏树‖紫苏系统高 8.32%,说明杏树‖薄荷的土地利用率更高。

2.7 不同种植模式经济效益分析

经过对表 7 中不同种植模式在 2 年间的总支出、收入及利润进行分析,结果显示,间作系统的总支出、总收入和总利润均高于单作杏树与单作薄荷;与单作紫苏相比,间作系统总支出较高,但总收入与总利润均低于单作紫苏。具体来看,单作杏树在 2024 年尚未结果,仅支出,直至 2025 年才开始获得收入,因此其总利润最低,为 12 514.56 元·hm^{-2}。间作紫苏与间作薄荷的总支出相近,但间作紫苏的利润达到 51 219.50 元·hm^{-2},显著高于间作薄荷的 24 917.60 元·hm^{-2},高出幅度为 105.55%。相比之下,单作紫苏的经济效益最为突出,2 年间总利润达 91 286.50 元·hm^{-2}。进一步通过收益当量比分析可知,间作薄荷与间作紫苏模式相比单作杏树均具有更高的经济效益优势,其中间作紫苏的经济效益表现更优。总体而言,杏药间作系统在合理增加管理投入的基础上,有效提升了单位土地的经济收益,其中以杏树‖紫苏模式在经济效益方面的综合表现最佳。

表 6　单间作薄荷、紫苏和杏树产量及土地当量比

Table 6　Yield and land equivalent ratio of monocropping mint, perilla and apricot

处理	单位面积株数/(plant·hm^{-2})	产量/(kg·hm^{-2})		土地当量比
		2024	2025	
MBH	6×10^4	3 753.07±849.86a	3 017.33±815.51a	—
JBH	166 667	2 061.50±273.10b	1 584.10±183.50b	1.44
JBH-X	833	—	4 748.10±430.19a	
MX	833	—	5 161.82±598.04a	—
JZS-X	833	—	4 675.91±546.26a	1.33
JZS	166 667	3 567.38±310.09b	3 658.50±440.45b	
MZS	6×10^4	8 307.00±1 094.19a	8 550.00±696.44a	—

注:JBH-X:杏树‖薄荷中杏树的产量;JZS-X:杏树‖紫苏中杏树的产量;杏树栽植于 2022 年,2024 年处于 3 年生树龄,无果实产量;不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著(P<0.05)。

表 7　单间作种植经济明细

Table 7　Single intercropping planting economic details　　单位:元·hm^{-2}

类型	项目	处理				
		JBH	JZS	MBH	MZS	MX
支出	苗木/种子	4 446	4 465	750	800	4 165
	肥料	2 590	2 590	2 777	2 777	2 627
	灌溉设施+灌溉	3 498	3 498	3 265	3 265	3 498
	人工管理	2 400	2 400	900	900	1 500
	农药	2 475	2 475	600	600	2 250
	机械	1 150	1 150	800	800	350
收入	2024 年售卖	11 338.25	23 187.97	20 641.89	53 995.50	—
	2025 年售卖	46 697.35	61 187.53	16 595.315	55 575.00	41 294.56
总支出		33 118.00	33 156.00	18 184.00	18 284.00	28 780.00
总收入		58 035.60	84 375.50	37 237.20	109 570.50	41 294.56
总利润		24 917.60	51 219.50	19 053.20	91 286.50	12 514.56

注:薄荷与紫苏的参考价格来源于中药材天地网市场均价,薄荷 5.5 元·kg^{-1},紫苏 6.5 元·kg^{-1}。

3　讨论

本研究结果显示,间作系统空气温度显著低于单作系统,且在外界高温时段表现出稳定的降温效应,这一结果与 Ashraf 等[16]关于油棕与黑胡椒间作、Hébert 等[5]杨树-紫花苜蓿农林复合系统研究及石然启等[17]枣树园生草的研究结果一致,证实了农林复合系统降温效应的普适性。树木的遮荫作用及其对光辐射的截获是导致农林复合系统内部温度变化的关键因素[6]。间作系统通过构建立体的“乔木-草本”双层冠层,显著改变了地表的光能分配与热能交换过程。杏树冠层对直射光的拦截,减少了到达下层草本作物冠层和土壤表面的净辐射,直接降低了系统的热来源[18-19]。在杏药间作系统中温度峰值出现一定后移,且始终低于单作,表现出对午后高温的有效缓冲作用,这与 Starck 等[20]关于林下层密度的增加有助于缓冲温度的结论一致。杏药间作系统能够有效调节田间微气候,将气温动态维持在适宜区间,从而缓和高温胁迫,避免灼伤,保障作物的正常生理机能。

杏树冠状结构在通过遮荫抑制辐射升温的同时,其自身蒸腾作用释放的水汽可协同提升空气相对湿度,形成“降温-增湿”的耦合调控效应。艾鹏睿等[21]在对枣棉间作的研究中发现,间作棉花冠层相对湿度较单作提高 15.07%。黄天忠等[22]观测表明,油茶分别与天门冬、白菜和马铃薯间作后,系统内空气相对湿度较对应单作分别提高 8.8%、6.7%和 1.3%,曹琦等[23]对枣棉间作系统棉田相对湿度的研究也具有相同的趋势。在本试验中,杏药间作系统在作物全生育时期均能显著提高田间空气湿度,且增湿效果随生育时期的推进而增加。空气相对湿度通过决定水汽扩散速度,从而对田间土壤蒸发过程产生重要影响[24],间作种植中,较高的植被覆盖与立体结构降低了系统内的风速,使蒸腾产生的水汽不易扩散,同时,间作系统的总蒸腾量通常大于单作,进一步增加了空气湿度[25-26]。

冠层内风速的衰减是由于气流在穿越植被时,其动能被显著吸收并转化为其他形式的能量耗散所

致。当气流经过粗糙度元素时,界面附近的湍流结构发生改变,从而对气流运动产生显著影响[27]。在杏树与薄荷、紫苏构成的间作系统中,多种植物形成多层次粗糙度元素,显著增大了下垫面的粗糙度。这一结构增强了气流与植被之间的摩擦阻力,使得通过冠层的空气动量被进一步吸收与耗散,最终导致冠层下方风速降低。

间作系统在优化微气候的同时,常伴随光照条件受限的问题,具体表现为光照强度减弱及红光/远红光比率下降[28]。本研究发现,间作模式下薄荷与紫苏株高与茎粗显著增加,且在生育后期,干物质向茎秆器官的分配比例明显提升,表现出显著的形态可塑性,即典型的“避荫综合征”[29]。这一形态适应策略有助于植株通过快速延伸株高突破遮荫,获取更多光资源[30]。然而,这种向茎秆的资源倾斜也相应减少了对叶片的投入,导致间作模式下薄荷与紫苏的叶面积显著减小[31]。作为反映叶片光合能力的重要指标,SPAD 值在间作条件下也发生相应变化。本试验中,间作模式下薄荷与紫苏的 SPAD 值较单作显著提高。从光合生理机制来看,SPAD 值与光合能力呈显著正相关关系,适宜的光照条件能够促进叶绿素的合成。本研究发现在间作系统中,薄荷与紫苏处于树冠下层,接受较高比例的散光辐射,这可能是促进叶绿素积累、进而提高 SPAD 值的重要诱因,该结果与前人在复合系统中观察到的趋势一致[32-33]。干物质分配格局表明,间作并未显著改变薄荷和紫苏各器官的生物量分配比例,说明间作主要影响的是作物总生物量积累而非其分配策略。叶片始终是 2 种作物生物量积累的主要器官,根系所占比例较低且在不同种植模式下保持稳定,这进一步印证了在该系统中,光资源竞争主要驱动了植株形态结构的可塑性调整,而非根本性的分配机制转变[34]。间作系统虽因遮荫对薄荷和紫苏造成一定光抑制,但薄荷与紫苏通过形态可塑性实现了适应性生长,系统整体仍保持了较稳定的器官分配模式,体现了复合系统在微气候优化与植物适应性响应之间的动态平衡。

在杏药间作系统中,杏树作为木本树种,树形高大,其主要占据上层光热空间与深层土壤资源,而薄荷和紫苏草本植物,根系较浅,主要利用近地表空间以及浅层土壤中的水分和养分。这种在垂直空间上的生态位分离有效减少了种间竞争,为资源的高效利用提供了结构基础[35]。薄荷和紫苏具有一定的耐阴性[36],杏树冠层所形成的特殊小气候环境,如较低的直射光强、较高的空气湿度和较为稳定的温度,为这类耐阴药用植物的生长提供了理想条件,有助于提升其品质与产量[37]。本研究表明,杏树‖薄荷、杏树‖紫苏模式能够显著提高土地当量比,增加经济效益。该结论与其他果树与药用植物间作系统的研究结论一致[38]。

4 结论

本研究系统评估了杏树‖薄荷、杏树‖紫苏种植模式对田间小气候、农艺性状、产量及经济效益的影响。结果表明,与单作相比,2 种间作系统均能显著降低田间空气温度和风速,并提高空气湿度。同时,间作显著促进了薄荷与紫苏的株高、茎粗及相对叶绿素含量(SPAD 值)的增加,但降低了紫苏的叶面积。2 种间作模式的土地当量比均大于 1,具有明显的土地增产优势,经济效益分析显示,杏树‖紫苏模式的经济效益更高。因此,杏树‖紫苏模式更适合作为本地区推广的杏药间作种植模式。

参考文献(References)

[1] 苏浩,张锐澎,吴思炫,等. 连作障碍产生机理及防控现状[J]. 土壤, 2024, 56(2): 242-254.
Su Hao, Zhang Ruipeng, Wu Sixuan, et al. Mechanisms of continuous cropping obstacles and current situation of prevention and control[J]. Soils, 2024, 56(2): 242-254.

[2] 郭兰萍,王铁霖,杨婉珍,等. 生态农业——中药农业的必由之路[J]. 中国中药杂志. 2017, 42(2): 231-238.
Guo Lanping, Wang Tielin, Yang Wanzhen, et al. Ecological agriculture: Future of agriculture for Chinese material *Medica*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2017, 42(2): 231-238.

[3] Mahajan S, Thakur P, Das S, et al. Impression of contemporary heat stress complexities in agricultural crops: A review[J]. Plant Growth Regulation, 2025, 105(6): 1805-1823.

[4] Agnolucci P, Rapti C, Alexander P, et al. Impacts of rising temperatures and farm management practices on global yields of 18 crops[J]. Nature Food, 2020, 1(9): 562-571.

[5] Hébert È M, Martin-Guay M O, Maheu A, et al. Microclimate, soil moisture and forage yield vary spatially within a temperate tree-based intercropping system: From competition to facilitation[J]. Agricultural Water Management, 2025, 319: 109782.

[6] Montoya S G, Motoike S Y, Kuki K N, et al. Viability

of a macauba palm-*Brachiaria grass* intercropping system as an alternative to agroforestry production[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2021, 41(4): 55.

[7] 赵忠晶. 新疆三个杏品种在主产区的植物学特征与采收指标的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.

[8] 白振华. 关于新疆杏产业发展的思考[J]. 新疆农业科技, 2024, 46(1): 19-20.
Bai Zhenhua. Thoughts on the development of apricot industry in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2024, 46(1): 19-20.

[9] 崔宽波,朱占江,杨莉玲,等. 新疆杏采后贮藏保鲜研究现状及展望[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(2): 280-286.
Cui Kuanbo, Zhu Zhanjiang, Yang Liling, et al. Research on status and prospects of Xinjiang apricot storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(2): 280-286.

[10] 文定梅,张洪彪,秦凤园,等. 林下环境因子对药用植物林下种植的影响[J]. 中国中药杂志, 2025, 50(5): 1164-1171.
Wen Dingmei, Zhang Hongbiao, Qin Fengyuan, et al. Effects of understory environmental factors on understory planting of medicinal plants [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2025, 50(5): 1164-1171.

[11] 杨春鹏. 冀北山区果药间作技术[J]. 果树实用技术与信息, 2021(10): 23-25.
Yang Chunpeng. Intercropping techniques of fruit and medicine in mountainous areas of northern Hebei Province[J]. Fruit Tree Practical Technology and Information, 2021(10): 23-25.

[12] 俞浩,辛华夏,陈浩,等. 薄荷挥发油成分的气相色谱-质谱联用分析及抗衰老作用[J]. 中药新药与临床药理,2021, 32(1): 73-78.
Yu Hao, Xin Huaxia, Chen Hao, et al. Gc-ms analysis of mentha haplocalyx oil and its anti-aging effects[J]. Traditional Chinese Drug Research and Clinical Pharmacology, 2021, 32(1): 73-78.

[13] 孙江怡. 新疆紫苏叶花色苷的提取、生物活性及其在酸奶中的应用[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.

[14] 程建明,薛峰,张云羽,等. 药食同源产品研发现状、技术关键与对策[J]. 南京中医药大学学报, 2023, 39(9): 814-826.
Cheng Jianming, Xue Feng, Zhang Yunyu, et al. Research and development status, technical keys and countermeasures of medicinal and food homologous products[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2023, 39(9): 814-826.

[15] 王红阳,康传志,张文晋,等. 中药生态农业发展的土地利用策略[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(9): 1990-1995.
Wang Hongyang, Kang Chuanzhi, Zhang Wenjin, et al. Land use strategy of ecological agriculture of Chinese materia *Medica* in future development[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(9): 1990-1995.

[16] Ashraf M, Sanusi R, Zulkifli R, et al. Alley-cropping system increases vegetation heterogeneity and moderates extreme microclimates in oil palm plantations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 276: 107632.

[17] 石然启,王晗生,邓文凯,等. 南疆平原区枣园树形与生草对小气候的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36(4): 1127-1134.
Shi Ranqi, Wang Hansheng, Deng Wenkai, et al. Effects of different tree forms and grass mulching on microclimate in *Ziziphus jujuba* orchards in the plain regions of southern Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(4): 1127-1134.

[18] Ntshidi Z, Dzikiti S, Mazvimavi D, et al. Contribution of understorey vegetation to evapotranspiration partitioning in apple orchards under Mediterranean climatic conditions in South Africa[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106627.

[19] Tanaka K, Hashimoto S. Plant canopy effects on soil thermal and hydrological properties and soil respiration [J]. Ecological Modelling, 2006, 196(1-2): 32-44.

[20] Starck I, Aalto J, Hancock S, et al. Slow recovery of microclimate temperature buffering capacity after clearcuts in boreal forests[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 363: 110434.

[21] 艾鹏睿,马英杰. 间作模式农田小气候效应对棉花生理生态指标的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(9): 1594-1602.
Ai Pengrui, Ma Yingjie. Effects of field microclimate on physiological and ecological indexes of cotton under intercropping mode[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(9): 1594-1602.

[22] 黄天忠,曹国璠,赵明书,等. 不同种植模式对油茶林地小气候和土壤养分含量的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(11): 2512-2518.
Huang Tianzhong, Cao Guofan, Zhao Mingshu, et al. Effects of different planting patterns on microclimate indicators and soil nutrient contents in *Camellia oleifera* forest [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(11): 2512-2518.

[23] 曹琦,毛廷勇,汪志强,等. 塔里木盆地西北缘不同种

植模式棉田微环境及经济效益比较[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(12): 2921-2931.
Cao Qi, Mao Tingyong, Wang Zhiqiang, et al. Comparison of microenvironment and economic benefits of cotton fields with different planting patterns in northwest margin of Tarim Basin [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(12): 2921-2931.

[24] Sawan Z M. Climatic variables: Evaporation, sunshine, relative humidity, soil and air temperature and its adverse effects on cotton production [J]. Information Processing in Agriculture, 2018, 5(1): 134-148.

[25] Ding Y K, Feng Y Q, Chen K, et al. Analysis of spatial and temporal changes in vegetation cover and its drivers in the Aksu River Basin, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 10165.

[26] Wang J H, Yin M H, Duan Y Y, et al. Enhancing water and soil resources utilization via wolfberry-alfalfa intercropping[J]. Plants, 2024, 13(17): 2374.

[27] Jiang N, Cheng H, Liu C C, et al. A wind tunnel study of the effects of vegetation structural characteristics on the airflow field[J]. Catena, 2024, 242: 108064.

[28] 刘柱,孟维伟,林松明,等. 作物对间作遮荫胁迫的响应机制及缓解措施研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2026, 48(1): 42-53.
Liu Zhu, Meng Weiwei, Lin Songming, et al. Research progress on response mechanism to intercropping shading stress and its mitigation measures in crops[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2026, 48(1): 42-53.

[29] Han R, Ma L, Terzaghi W, et al. Molecular mechanisms underlying coordinated responses of plants to shade and environmental stresses[J]. The Plant Journal, 2024, 117(6): 1893-1913.

[30] Ding S Q, Hao Y, Tian H J, et al. Response of stalk lodging resistance traits, yield and quality of silage maize to high density [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 30110.

[31] Uyehara I K, Bechinger T, Jordan A, et al. Neighbour-detection causes shifts in allocation across multiple organs to prepare plants for light competition[J]. Functional Ecology, 2024, 38(8): 1848-1858.

[32] 阿布都克尤木·阿不都热孜克,高强,徐麟,等. 遮荫对橡胶草生理特性的影响[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(11): 2126-2134.
Abudoukeyoumu Abudourezike, Gao Qiang, Xu Lin, et al. Effects of shading on the physiological characteristics of *Taraxacum kok*-saghyz Rodin[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(11): 2126-2134.

[33] Gu Y R, Ibitoye R G, He J J, et al. Photosynthetic performance and yield of intercropped maize and soybean are directly opposite under different intercropping ratios and maize planting densities interactions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(13): 7440-7452.

[34] Kishore K, Rupa T R, Samant D. Influence of shade intensity on growth, biomass allocation, yield and quality of pineapple in mango-based intercropping system[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 278: 109868.

[35] Zhang S, Liu T T, Wei W W, et al. In arid regions, the different intercropping systems reduce interspecific competition to improve system productivity[J]. Plant and Soil, 2025, 506(1): 137-155.

[36] 郭小琰,雷京奇,刘灵娣,等. 林下6种药用植物的耐阴性比较[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(4): 182-184,188.
Guo Xiaoyan, Lei Jingqi, Liu Lingdi, et al. Comparison of shade tolerance of six medicinal plants under forest [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 182-184,188.

[37] 张莉,张艳玲,刘红云,等. 茅苍术林下种植模式对土壤养分及其根茎品质的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(8): 2117-2123.
Zhang Li, Zhang Yanling, Liu Hongyun, et al. Effects of forest-medicinal plants intercropping patterns on soil nutrient contents and rhizome quality of *Atractylodes lancea*(Thunb.)DC[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(8): 2117-2123.

[38] Tripathi P, Shah S, Kashyap S D, et al. Fruit yield and quality characteristics of high density *Prunus persica* (L.) Batsch plantation intercropped with medicinal and aromatic plants in the Indian Western Himalayas[J]. Agroforestry Systems, 2019, 93(5): 1717-1728.

(责任编辑:唐慧 郭芸婕)