

施氮量和种植密度对海岛棉冠层结构和光合特性的影响

王丽¹ 张承洁¹ 胡浩然¹ 宁丽云¹ 吴一帆¹ 郭仁松² 张巨松¹

(¹新疆农业大学农学院/教育部棉花工程研究中心, 830052, 新疆乌鲁木齐;

²新疆维吾尔自治区农业科学院经济作物研究所, 830091, 新疆乌鲁木齐)

摘 要 为明确新疆阿瓦提县机采海岛棉种植密度与氮肥施用量间的最佳平衡配比, 以“新 78”为材料, 在 66 cm+10 cm 种植模式下, 主区设 20×10⁴ (D20)、24×10⁴ (D24) 和 28×10⁴ 株/hm² (D28) 3 个种植密度, 副区设 0 (N0)、160 (N1)、320 (N2)、480 kg/hm² (N3) 4 个施氮量, 研究不同处理下机采海岛棉冠层结构、叶片光合特性及产量、品质变化。结果表明, 当种植密度为 D24, 施氮量为 N2 时, 籽棉产量最高, 为 6337.17 kg/hm², 较同密度下 N0、N1 和 N3 处理分别增产 37.23%、21.00% 和 12.06%, 与 N0 处理差异显著。同一种种植密度下, 随着施氮量增加, 海岛棉叶面积指数、叶倾角、相对叶绿素含量呈上升趋势, 当施氮量过多时, 叶倾角下降, 表现为 N2>N3>N1>N0。叶片净光合速率、蒸腾速率和棉纤维上半部平均长度随施氮量的增加而增加, 而籽棉产量、整齐度和断裂比强度随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势。同一施氮量下, 海岛棉叶面积指数的下降速度随种植密度的增大而加快; 叶倾角、籽棉产量、海岛棉纤维上半部平均长度和断裂比强度随种植密度的增大呈现先升后降的变化趋势; 平均单铃重与单铃铃数随种植密度的增加均降低。综上, 建议新疆阿瓦提县种植机采海岛棉新 78 在 66 cm+10 cm 种植模式下, 种植密度为 24×10⁴ 株/hm², 施氮量为 320 kg/hm²。

关键词 海岛棉; 冠层结构; 光合特性; 施氮量; 种植密度

新疆是我国唯一适宜海岛棉种植的区域, 以其抗枯萎病和优质纤维而闻名, 在纺织市场上备受推崇^[1-2], 是高档天然纤维的主要来源之一^[3-4]。海岛棉主要种植区域在南疆阿克苏和喀什地区^[5]。据调查, 阿克苏地区海岛棉产量、品质及种植面积均呈现逐年下降趋势^[6], 因此, 开展种植密度和施氮量对海岛棉冠层结构和光合特性影响的研究, 具有重要的生产意义。施氮量和种植密度对作物生长发育影响的研究较多^[7-12], 已成为研究热点之一。种植密度通过影响冠层光分布、叶分布和植株生理状况来调控作物生长发育^[13-14], 表现为棉花叶面积指数 (LAI) 和生物量随种植密度和氮肥施用量的增加而增加^[15]。李凤瑞等^[16]研究发现, 合理的种植密度能够有效调节个体和群体之间的生长发育, 表现为高密度处理下 LAI 显著高于低密度处理。适宜的施氮量则有利于均衡营养和生殖生长, 最终实现棉花高产。李鹏程等^[17]研究发现, 棉花群体 LAI、叶绿素含量和净光合速率 (P_n) 随施氮水平增加呈上升趋势。石爱龙等^[18]研究发现, 适宜的减氮处理可以促进棉株的光合作用, 提高光合速率, 维持较高的相对叶绿素含量 (SPAD 值), 有助于

植株的生长发育和产量形成。也有研究^[19]表明, 高施氮量会导致营养生长过度, 作物成熟延迟, 而低氮则会严重限制棉株产量, 导致株高降低、光合速率受到抑制, 大大加速早熟。因此, 只有当种植密度和施氮量维持在协调、均衡水平之下才能实现作物高产。

目前, 国内外已有许多关于施氮量和种植密度对陆地棉生长发育和产量影响的研究, 但关于海岛棉的研究相对较少且海岛棉生长环境、生理特性和纤维品质等方面与陆地棉存在显著差异。因此, 本试验以“新 78”为材料, 开展施氮量和种植密度对海岛棉冠层结构、光合特性以及产量形成的研究, 以明确施氮量和种植密度对海岛棉产量形成、冠层结构及光合特性影响的规律, 进一步探索新疆阿瓦提县海岛棉氮肥施用量与种植密度间的最佳平衡配比, 以期达到丰产高效、品质优良目的, 为当地海岛棉高产优质增效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2023 年 4 月至 10 月在新疆阿克苏地区

作者简介: 王丽, 主要从事棉花高产栽培与生理生态研究, E-mail: 1798836603@qq.com

张巨松为通信作者, 主要从事棉花高产栽培与生理生态研究, E-mail: xjndzjs@163.com

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项 (2020A01002-4)

收稿日期: 2024-03-22; 修回日期: 2024-05-25; 网络出版日期: 2024-11-27

阿瓦提县丰收二场新疆维吾尔自治区农业科学研究院试验基地（79°45′~81°05′ E，39°31′~40°50′ N）进行。该地区属温带大陆性干旱气候，降水量小，蒸发量大，日照长，昼夜温差大。年均气温 10.4℃，年均降水量 46.7 mm，无霜期 206 d，试验期间降水量 29.9 mm；土壤类型为沙壤土，播前 0~60 cm 土壤基础养分含量见表 1。

表 1 2023 年试验地土壤养分含量
Table 1 Nutrients contents of the experimental plot soil in 2023

土壤深度 Soil depth (cm)	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	碱解氮 Available N (mg/kg)	有效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
0~20	9.172	0.542	45.090	19.406	112.367
20~40	6.638	0.380	29.971	19.256	161.923
40~60	4.658	0.383	20.066	8.843	196.770
平均值 Average	6.823	0.435	31.705	15.835	157.020

表 2 施肥方案

Table 2 Fertilization treatment

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer	追肥日期（月-日）Toppdressing date (month-day)										总量 Total
		06-15	06-20	06-27	07-04	07-11	07-18	07-26	08-02	08-13	08-21	
N0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	0	0	0	8	16	32	48	32	16	8	0	160
N2	64	0	12.8	25.6	38.4	51.2	51.2	38.4	25.6	12.8	0	320
N3	96	0	38.4	38.4	57.6	57.6	57.6	57.6	38.4	38.4	0	480

5 月 12 日进行人工定苗，整个生育期内共进行 10 次灌水，总灌水量为 4200 m³/hm²，田间其余管理措施同大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 冠层结构（叶面积指数、叶倾角） 分别于海岛棉现蕾期、盛蕾期、初花期、盛花期、盛铃期和吐絮期，采用 LAI-2000（美国）植物冠层分析仪测定各个小区冠层结构。将 LAI-2000 探头水平放置在距离地面 5 cm 处，每个处理测 4 个值（即窄行、宽行、窄行、膜间行）取平均值，重复 3 次。

1.3.2 叶片 SPAD 值 于海岛棉现蕾期、盛蕾期、初花期、盛花期、盛铃期和吐絮期，采用 SPAD-502 型（日本产）叶绿素仪在各处理选取长势均匀一致的 6 株棉花主茎倒 4 叶（打顶后倒 3 叶），测定其叶绿素，每个叶片测 4 点取平均值，共测定 12 株，去除最大值和最小值后取平均值。

1.3.3 光合参数 于海岛棉现蕾期、盛蕾期、初花期、盛花期、盛铃期和吐絮期，采用 TPS-2 光合仪（英国 Hansatech 公司生产），在天气晴朗、无风无云的上午测定海岛棉主茎倒 4 叶净光合速

1.2 试验设计

本试验采用双因素裂区试验设计，主区为 3 个种植密度，即 20×10⁴（D20）、24×10⁴（D24）和 28×10⁴ 株/hm²（D28）。副区设 4 个施氮量，即 0（N0）、160（N1）、320（N2）和 480 kg/hm²（N3）。供试品种为发芽率≥96%的海岛棉品种“新 78”，并于 2023 年 4 月 15 日进行人工播种，每穴 2~3 粒种子。采用 66 cm+10 cm 种植模式，12 个处理，重复 3 次，共 36 个小区，每小区面积约 44.46 m²（长 6.50 m，宽 6.84 m）。膜宽 2.05 m，厚 0.01 mm，膜间距 0.23 m。播前将纯磷 118.6 kg/hm² 和纯钾 80 kg/hm² 结合整地施入。其中纯磷采用重过磷酸钙（P₂O₅≥46%）257.8 kg/hm²，纯钾采用滴灌硫酸钾（K₂O≥50%）160 kg/hm²。氮肥滴施时间及施入量如表 2 所示。灌溉方式为膜下滴灌，滴灌带滴孔间距 20 cm，出水量 2.1 L/h。棉花于 4 月 26 日出苗，

率（P_n）及蒸腾速率（T_r），每个处理测定 3 片叶，重复 3 次。

1.3.4 产量及其构成因素 于海岛棉吐絮期实测每小区株数和总成铃数，计算单株结铃数；并随机摘取各小区棉株上、中、下果枝吐絮铃 30、40、30 个，晾干后称重，计算产量。

1.3.5 纤维品质 将各处理棉花样品使用皮辊轧花机获得皮棉，并随机选取 20 g 皮棉送往农业农村部棉花品质监督检验测试中心（乌鲁木齐）检测，测定其纤维品质指标。

1.4 数据处理

利用 WPS office 整理数据，采用 GraphPad Prism 8 绘图，采用 DPS 7.05 数据处理系统进行方差分析，采用 RStudio 2023.09.1-494 进行相关性分析。

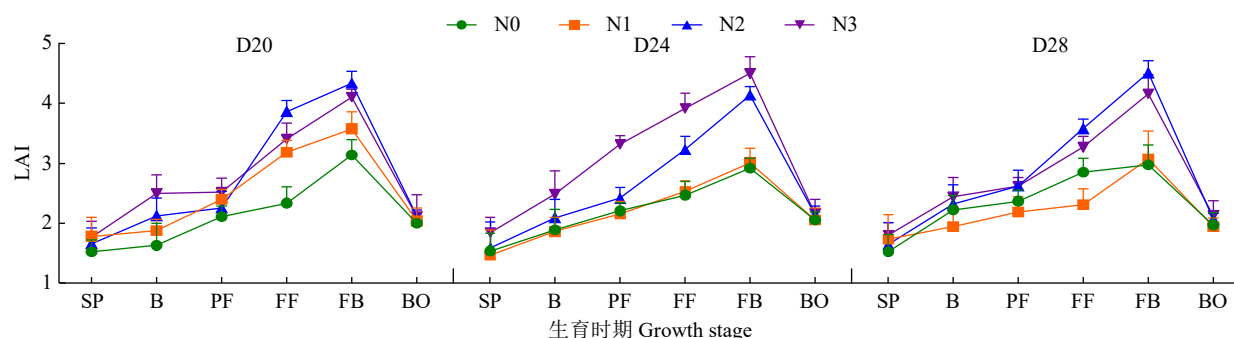
2 结果与分析

2.1 施氮量和种植密度对海岛棉冠层结构的影响

2.1.1 对海岛棉 LAI 的影响 如图 1 所示，棉花 LAI 随生育进程的推进均呈现先上升后下降的单

峰曲线, 最大值均出现在盛铃期。同一种植密度下, 随着施氮量增加, LAI 也不断增加, 表现为 $N3 > N2 > N1 > N0$ 。盛铃期 D20、D24、D28 条件下, $N2$ 、 $N3$ 处理下 LAI 较高, 远远大于 $N0$ 、 $N1$ 处理。其中, $N2$ 处理下 LAI 较 $N0$ 和 $N1$ 处理分

别高 38.11%、21.31% (D20 条件下), 41.75%、37.40% (D24 条件下), 51.55%、46.63% (D28 条件下)。进入盛铃期后, 各处理棉花 LAI 开始下降, LAI 的下降速度随种植密度的增大而加快, D28N3 处理 LAI 下降速度最快。



SP: 现蕾期, B: 盛蕾期, PF: 初花期, FF: 盛花期, FB: 盛铃期, BO: 吐絮期。下同。

SP: squaring period, B: full bud period, PF: perlim flower period, FF: full flower period, FB: full bloom period, BO: opening boll period. The same below.

图 1 施氮量和种植密度下海岛棉 LAI 变化

Fig.1 Change of LAI of sea island cotton under nitrogen application rate and planting density

2.1.2 对海岛棉叶倾角的影响 叶倾角 (MTA) 是叶轴与水平面的夹角, 反映叶片的空间分布状态。如图 2 所示, 在测定期内海岛棉 MTA 随生育进程的推进呈先升后降的变化趋势, 于盛花期达到最大值。各处理 MTA 在盛蕾期之前变化不明显, 在盛蕾期之后变化较为明显, 海岛棉 MTA 随着施氮量

的增加呈先升后降的变化趋势, 表现为 $N2 > N3 > N1 > N0$ 。盛花期, 在 D20、D24、D28 条件下, $N3$ 处理 MTA 较 $N2$ 处理分别降低了 13.65%、11.12%、3.15%。同一施氮水平下, 随着种植密度的增大, 海岛棉 MTA 也逐渐增大。两因素交互作用下, 最大值是 D24N2 处理, 较同密度下最小值

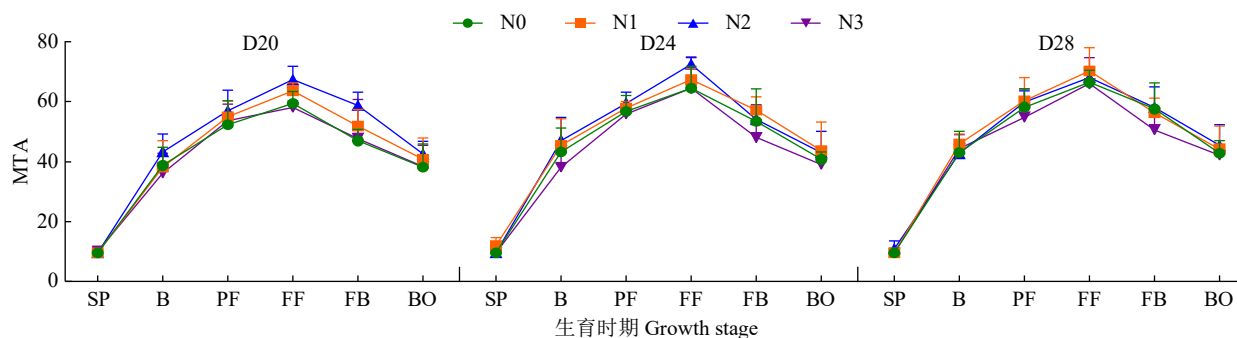


图 2 施氮量和种植密度下海岛棉 MTA 变化

Fig.2 Change of MTA of sea island cotton under nitrogen application rate and planting density

$N0$ 处理 MTA 平均值增大 12.35%。

2.2 施氮量和种植密度对海岛棉叶片 SPAD 值的影响

如图 3 所示, 4 种施氮水平在不同种植密度下海岛棉叶片 SPAD 值随生育期的推进呈“上升—下降—上升”的变化趋势, 均在吐絮期达到最高值。可能是海岛棉在盛蕾期时受旱, 导致叶片 SPAD 值下降, 水肥供应充足后, 叶片 SPAD 值呈上升趋势。两因素交互下叶片 SPAD 值以 D28N3 处理最

大, 为 59.79, 较同一施氮水平下 D20、D24 处理增幅分别为 1.40%、0.91%。各处理叶片 SPAD 值均从盛蕾期至初花期快速下降, 其中, D24N3 处理叶片 SPAD 值下降速度达到最快。施氮量的增加对海岛棉叶片 SPAD 值影响显著, 不同种植密度下各处理均表现为 $N3 > N2 > N1 > N0$ 。在 D28 条件下, $N3$ 、 $N2$ 和 $N1$ 处理在吐絮期较 $N0$ 处理分别增加了 27.75%、9.18% 和 5.49%。 $N0$ 、 $N1$ 处理叶片 SPAD 值基本随着密度的增加而下降, 反之, $N2$ 、 $N3$ 处

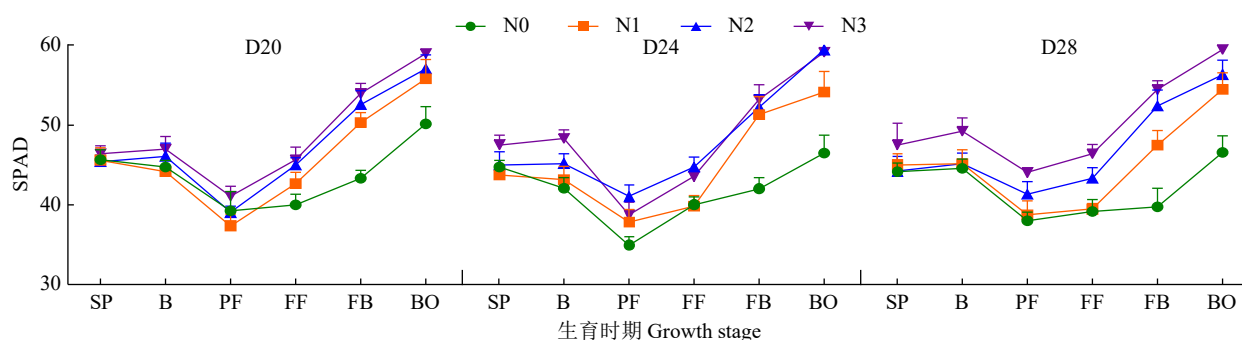


图 3 施氮量和种植密度下海岛棉叶片 SPAD 值变化

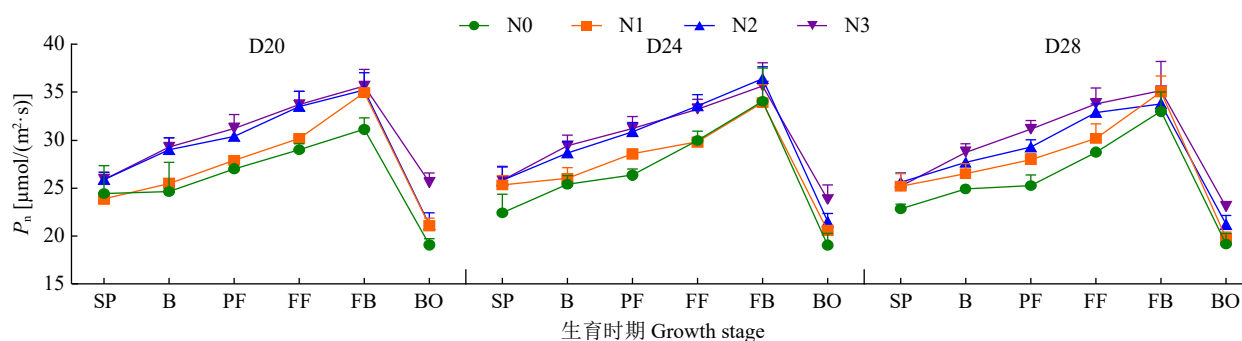
Fig.3 Changes of SPAD value of sea island cotton leaves under nitrogen application rate and planting density

理叶片 SPAD 值上升。

2.3 施氮量和种植密度对海岛棉叶片光合参数的影响

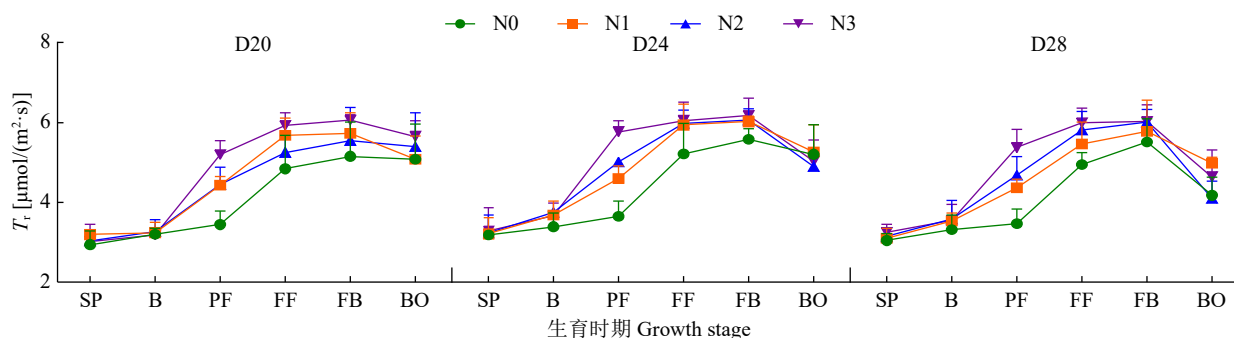
2.3.1 对海岛棉叶片 P_n 的影响 如图 4 所示, 海岛棉不同生育时期功能叶片 P_n 的总体影响趋势为随施氮量的增加而增加, 表现为 $N3 > N2 > N1 > N0$ 。盛

铃期, D20、D24、D28 条件下 N3 处理较 N0 处理分别提高 14.45%、4.70%、6.67%; 较 N1 处理分别提高 1.91%、5.11%、0.38%。两因素交互作用下 D24N2 处理 P_n 最高, 为 $36.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 较同密度下 N0、N1 和 N3 处理分别提高 6.95%、7.37%和 2.15%, 有利于光合物质的形成。

图 4 施氮量和种植密度下海岛棉 P_n 变化Fig.4 Changes of P_n of sea island cotton under nitrogen application rate and planting density

2.3.2 对海岛棉叶片 T_r 的影响 如图 5 所示, T_r 随生育进程的推进呈先升后降的趋势, 均在盛铃期达到最大值。现蕾期至盛蕾期, 海岛棉 T_r 变化不显著, 于初花期升高且差异明显, 表现为 $N3 >$

$N2 > N1 > N0$ 处理。两因素交互作用下以 D24N3 处理 T_r 最大, 较同密度下 N0、N1 和 N2 处理下 T_r 分别高出 10.81%、2.66%和 2.09%, 其中与 N0 处理差异较明显。同一施氮量下, 随着密度的增

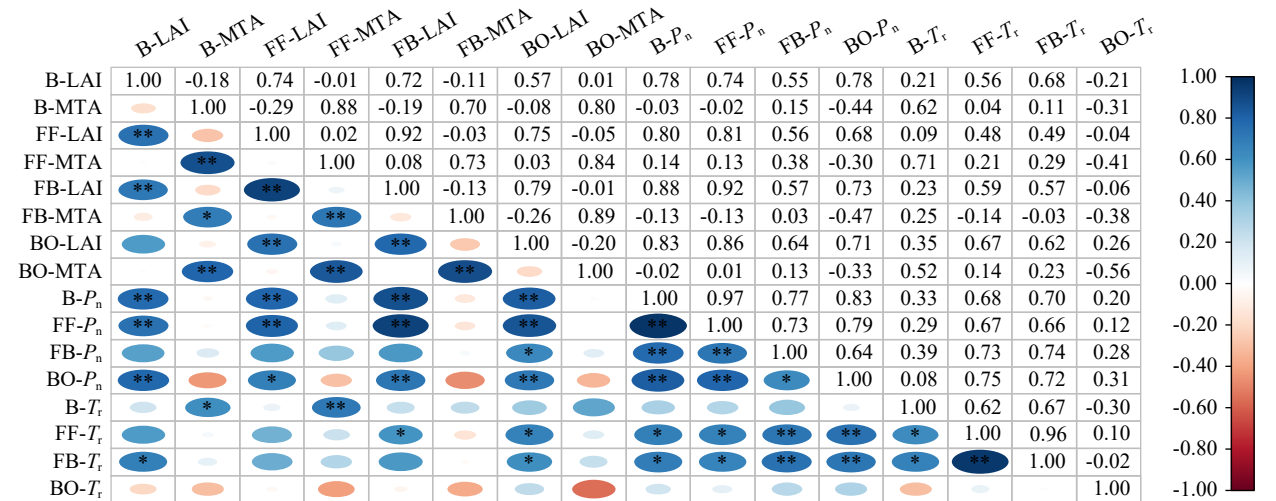
图 5 施氮量和种植密度下海岛棉 T_r 变化Fig.5 Change of T_r of sea island cotton under nitrogen application rate and planting density

加, 叶片 T_r 呈现先升后降的变化趋势。

2.3.3 冠层结构与光合参数的相关性 进一步将

LAI、MTA 与光合参数进行相关性分析 (图 6) 可知, LAI 与各生育时期 P_n 呈极显著 ($P < 0.01$) 正

相关关系（除盛铃期 P_n ）、与各生育时期 T_i 存在正相关或显著（ $P<0.05$ ）正相关关系。分析原因，随着棉花生育进程的推进，植株迅速生长，叶片生长茂密，LAI 逐渐上升，光合作用也逐渐增加，于盛铃期达到顶峰（由图 1 可知），此时 LAI 最大，说明植株叶片之间交错程度越大，但有效光合作用面积可能并没有增加，因而未出现显著或极显著相关性。MTA 与各生育时期 P_n 、 T_i 相关系数较小，但盛花期 MTA 与盛蕾、盛花和盛铃期 P_n 、 T_i 相关系数均高于其他生育时期，说明适宜的冠层结构可



“**”表示显著相关（ $P<0.05$ ）；“***”表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。下同。
“*” indicates significant correlation ($P<0.05$); “***” indicates extremely significant correlation ($P<0.01$). The same below.

图 6 各生育时期冠层结构与光合参数的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between canopy structure and photosynthetic parameters at different growth stages

以获得较高的 P_n ，从而增加光合作用。
2.4 施氮量和种植密度对海岛棉产量及其构成因素的影响
由表 3 可知，随种植密度的增加，平均单铃重与单株铃数均降低，籽棉产量呈现先上升后下降的趋势。其中，平均单铃重以 D20N1 处理最高，为 3.17 g；单株结铃数以 D20N2 处理最高，为 10.27，与 N0 处理差异显著（ $P<0.05$ ）。随施氮量的增加，

表 3 施氮量和种植密度对海岛棉产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of nitrogen application and planting density on yield and its components of sea island cotton

种植密度 Planting density	施氮量 Nitrogen application rate (kg/hm ²)	收获株数 (万株/hm ²) Number of plants harvested (×10 ⁴ plants/hm ²)	单株结铃数 Bell number per plant	单铃重 Single bell weight (g)	衣分 Lint percentage (%)	籽棉产量 Seed cotton yield (kg/hm ²)	皮棉产量 Lint cotton yield (kg/hm ²)
D20	N0	17.81c	8.29cde	2.96a	33.94ab	4410.13d	1493.14cd
	N1	18.08c	8.90abcd	3.17a	33.99a	5105.85bcd	1737.58bcd
	N2	18.01c	10.27a	3.03a	33.07abc	5609.19abc	1857.32abcd
	N3	17.95c	9.86ab	3.08a	33.35abc	5467.91abcd	1822.17abcd
D24	N0	22.33b	7.91cde	2.62bc	33.48abc	4617.89cd	1542.42cd
	N1	22.47b	7.60de	3.08a	33.11abc	5237.51abcd	1735.25bcd
	N2	22.27b	9.26abc	3.07a	33.70ab	6337.17a	2145.50a
	N3	22.40b	8.35bcde	3.03a	33.25abc	5655.41abc	1881.20abc
D28	N0	24.97a	7.51de	2.46c	32.01bc	4598.71cd	1473.33d
	N1	24.22a	7.32e	2.99a	31.70c	5278.54abcd	1672.56cd
	N2	24.56a	8.52bcde	2.98a	33.23abc	6242.89ab	2074.55ab
	N3	24.43a	8.46bcde	2.92ab	34.33a	6045.35ab	2080.52ab
施氮量 (N)		ns	**	**	ns	**	**
种植密度 (D)		*	**	*	ns	ns	ns
施氮量×种植密度 (D×N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns

不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。“ns”表示差异不显著，“*”表示 $P<0.05$ 水平下差异显著，“***”表示 $P<0.01$ 水平下差异极显著。下同。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). “ns” indicates no significant difference, “*” indicates significant difference at $P<0.05$ level, “***” indicates extremely significant difference at $P<0.01$ level. The same below.

籽棉产量呈现先增后减的趋势。两因素交互作用下，D24N2 处理籽棉产量最高，为 6337.17 kg/hm²，较 N0、N1 和 N3 处理分别增产 37.23%、21.00%和 12.06%，与 N0 处理差异显著（ $P<0.05$ ）。

进一步分析施氮量与产量之间的关系，如图 7 可以看出，施氮量与产量的非线性拟合曲线为开口向下抛物线形式，当施氮量为 320 kg/hm²，各处理产量均为最高值，表明当施氮量为 320 kg/hm² 时更适宜海岛棉种植，在此施氮量基础上增加或者减少施氮量均不利于作物高产的形成。

2.5 光合参数与产量构成因素的相关性

进一步分析光合参数与产量构成因素的相关性（图 8）可知，单株结铃数与盛蕾、盛花期 P_n 存在显著正相关性（ $P<0.05$ ），盛蕾、盛花和盛铃期 P_n 、 T_r 与籽棉产量、皮棉产量呈显著或极显

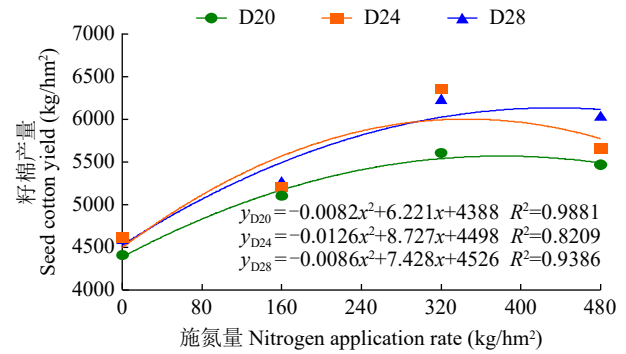
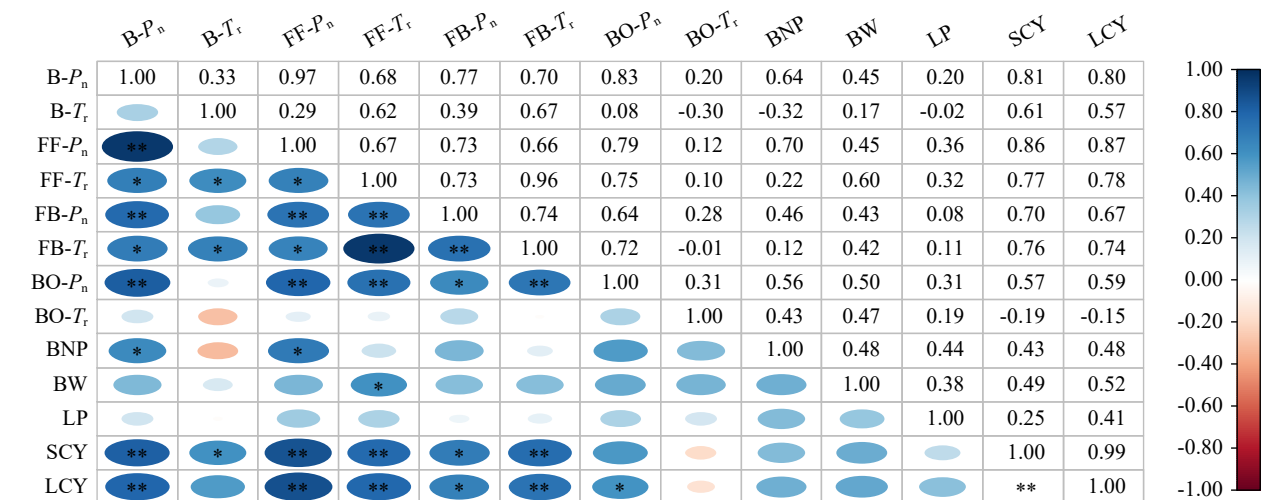


图 7 施氮量与产量的关系

Fig.7 Relationship between nitrogen application rate and yield

著相关。盛花期 P_n 与籽棉产量相关系数最大，为 0.86，呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），说明较高的 P_n 能够更加有效地利用光能合成有机物，为植株生长提供更多的能量和物质基础。



BNP: 单株结铃数; BW: 单铃重; LP: 衣分; SCY: 籽棉产量; LCY: 皮棉产量。
BNP: Bell number per plant; BW: Single bell weight; LP: Lint percentage; SCY: Seed cotton yield; LCY: Lint cotton yield.

图 8 光合参数与产量构成因素的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between photosynthetic parameters and yield components

2.6 施氮量和种植密度对海岛棉纤维品质的影响

由表 4 可知，施氮量对海岛棉纤维上半部平均长度、断裂比强度、伸长率和纺织参数有显著影响（ $P<0.05$ ），种植密度只对海岛棉纤维上半部平

均长度和断裂比强度有显著影响（ $P<0.05$ ）。不同施氮水平下，海岛棉纤维上半部平均长度随着施氮量的增加而增加，D24 条件下，N1、N2 和 N3 处理较 N0 处理上半部平均长度分别高出 4.23%、

表 4 施氮量和种植密度对海岛棉纤维品质的影响

Table 4 Effects of nitrogen application rate and planting density on fiber quality of sea island cotton

种植密度 Planting density	施氮量 Nitrogen application rate	上半部平均长度 Average length of upper half (mm)	整齐度 Uniformity (%)	断裂比强度 Specific strength at break (CN/tex)	伸长率 Elongation (%)	马克隆值 Micron value	纺织参数 Textile parameters
D20	N0	39.27ab	90.07ab	47.90a	7.93a	4.03a	238.00abc
	N1	39.60ab	90.77ab	48.23a	8.33a	4.30a	238.00abc
	N2	39.80a	91.30ab	48.57a	8.37a	4.07a	238.67abc
	N3	40.00a	90.17ab	47.83a	8.77a	4.08a	251.00a

续表 4 Table 4 (continued)

种植密度 Planting density	施氮量 Nitrogen application rate	上半部平均长度 Average length of upper half (mm)	整齐度 Uniformity (%)	断裂比强度 Specific strength at break (CN/tex)	伸长率 Elongation (%)	马克隆值 Micron value	纺织参数 Textile parameters
D24	N0	37.77ab	89.83ab	44.50ab	7.67a	4.17a	220.33cd
	N1	39.37ab	90.47ab	46.17ab	7.80a	3.80a	238.00abc
	N2	39.47ab	91.33ab	46.77ab	8.43a	4.13a	234.67abc
	N3	39.87a	90.80ab	44.97ab	8.43a	4.20a	229.33bcd
D28	N0	37.37b	89.13b	42.67b	8.40a	4.23a	210.67d
	N1	38.83ab	90.90ab	45.17ab	8.47a	4.30a	227.33cd
	N2	39.03ab	91.83a	46.63ab	8.37a	4.03a	249.33ab
	N3	38.93ab	91.60a	44.60ab	8.67a	4.27a	238.00abc
施氮量 (N)		**	ns	*	*	ns	*
种植密度 (D)		*	ns	**	ns	ns	ns
施氮量×种植密度 (D×N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns

4.50%、5.56%；整齐度和断裂比强度随施氮量的增加呈先增后降的变化规律。不同种植密度下，各处理海岛棉纤维上半部平均长度、断裂比强度均随密度的增大而减小，而整齐度和纺织参数则无明显变化规律。

3 讨论

种植密度和施氮量是棉花生产的主要调控措施^[20]。密度与 LAI 相互影响、相互依存，合理密植使群体的 LAI 增长较快^[21-22]，而适宜的施氮水平能够改善群体光合效率，搭建合理的冠层结构，从而棉花才能呈现好的生长状态，其产量和品质才能获得提高和改善^[23-24]。黎芳等^[25]研究发现，随棉花种植密度增加，株高降低，果枝数减少，中下部果枝长度缩短，LAI 增加。陈宝燕等^[26]研究发现，在一般情况下，随着生育时期的推进，棉花 MTA 呈上升趋势，随施氮量增加 MTA 有减小的趋势。与前人^[26]研究结果类似，本研究发现，随着施氮量的增大，各处理 MTA 逐渐增大，当施氮水平过大时（480 kg/hm²），叶倾角下降，表现为 N2>N3>N1>N0。MTA 于盛花期达到顶峰，最大值为 D24N2 处理，且盛花期 MTA 与盛蕾、盛花和盛铃期 P_n 、 T_r 相关系数均高于其他生育时期。说明适宜的冠层结构可以获得较高的 P_n ，从而增加光合作用。LAI 与盛蕾期、盛花期 P_n 呈极显著（ $P<0.01$ ）相关性。分析原因，随着棉花生育进程的推进，植株迅速生长，叶片生长茂密，LAI 逐渐上升，光合作用也逐渐增强，D24N2 处理 P_n 最优，为植株生长提供更多的能量和物质基础。张娜等^[27]研究指出，随种植密度的增加，陆地棉叶片 SPAD 值、 P_n

和 T_r 均呈“先升后降”的变化趋势，本试验研究结果与前人^[27]略有不同，即海岛棉叶片 SPAD 值随生育进程的推进呈“上升—下降—上升”的变化趋势。分析原因可能是海岛棉与陆地棉叶片形态不同且海岛棉在盛蕾期时受旱，导致叶片 SPAD 值下降，后期水肥供应充足后，叶片 SPAD 值呈上升趋势。

作物高产以高生物量为前提，而生物量积累则离不开氮肥的供应，种植密度也是棉花高产的重要调控因子^[28]。合理的种植密度能够有效调节个体和群体之间的生长发育，适宜的施氮量则有利于均衡营养生长和生殖生长，最终实现棉花高产。陈超等^[29]研究发现，低密度处理的单铃重和单株铃数大于中、高密度的处理，籽棉产量随密度的增加呈先增后减的变化趋势，变化规律亦是如此。与前人^[29]研究结果一致，本研究发现，随种植密度的增加，各处理平均单铃重和单株铃数均逐渐降低，籽棉产量呈现先上升后下降的趋势。石洪亮等^[30]研究发现，在南疆机采棉种植模式下，籽棉产量随着施氮量的增加呈现先上升后下降的趋势。本研究结果与前人^[30]研究结果一致，籽棉产量表现为 N2>N3>N1>N0。当施氮量为 320 kg/hm²（N2 水平），种植密度为 24×10⁴ 株/hm²（D24）时，海岛棉籽棉产量最高，为 6337.17 kg/hm²，较同密度下 N0、N1 和 N3 处理分别增产 37.23%、21.00%和 12.06%。说明该组合更有利于海岛棉生产，不仅能够有效增产，而且能减少氮肥使用量，从而降低农田生产成本，提高经济效益。王士红^[31]研究发现，不同年份间种植密度和施氮量互作对棉铃纤维品质的影响不同，增密减氮效果高于低密水平下纤维品质。周永萍等^[32]研究认为，不同种植密度之

间的棉纤维品质指标差异均不显著。也有研究^[33]认为随施氮量的增加,植株棉纤维长度与整齐度逐渐降低,而断裂比强度则缓慢上升,在施氮量为 480 kg/hm²时纤维品质最优。本研究发现,施氮量对棉纤维上半部平均长度、断裂比强度、伸长率和纺织参数有显著性 ($P<0.05$) 影响,整体纤维品质随施氮量的增加呈先升后降趋势,在施氮量为 320 kg/hm²时最优。其原因可能是海岛棉个体偏紧凑,增加密度的同时减少施氮量可使海岛棉群体生长对氮素利用最大化。种植密度对海岛棉整齐度、伸长率和纺织参数等纤维指标无显著影响,而对上半部平均长度和断裂比强度影响显著,其随种植密度的增大而减小,原因可能是当种植密度过高,棉株间的空间变小,棉株个体间养分竞争激烈,导致棉纤维伸长受限,纤维长度变短。此外,高密度 (D28) 可能导致棉纤维之间的摩擦和挤压增加,使得断裂比强度降低。因此,为进一步提高海岛棉纤维品质,应当合理搭配种植密度和施氮量。

4 结论

种植密度和施氮量合理搭配可以优化海岛棉冠层结构,使植株更好地拦截光,充分进行光合作用,为作物高产提供能量和物质基础。综合考量不同生育时期内海岛棉冠层结构、光合指标、产量表现及其与光合能力的相关性,建议新疆阿瓦提县种植机采海岛棉新 78 在 66 cm+10 cm 种植模式下,选择种植密度为 24×10⁴ 株/hm²,施氮量为 320 kg/hm²,以确保发挥最大的环境优势,使植株获取充足的阳光和养分,此时海岛棉冠层光能利用最优,产量亦达最高,为 6337.17 kg/hm²。

参考文献

- [1] Chávez M, Ricardo A, Ulloa M, et al. Assembly and annotation of the *Gossypium barbadense* L. 'Pima-S6' genome raise questions about the chromosome structure and gene content of *Gossypium barbadense* genomes. BMC Genomics, 2023, 24(1): 1-19.
- [2] Manivannan A. Assessing genetic variation in *Gossypium barbadense* L. germplasm based on fibre characters. Journal of Cotton Research, 2023, 6(3): 186-194.
- [3] Holladay S K, Bridge W, Jones M A, et al. Growth, boll development, agronomic performance, and fiber quality of *Gossypium barbadense* L. in the southeastern US Coastal Plain. Crop Science, 2022, 62(4): 1461-1471.
- [4] Zhao N, Wang W R, Crover C E, et al. Genomic and GWAS analyses demonstrate phylogenomic relationships of *Gossypium barbadense* in China and selection for fibre length, lint percentage and *Fusarium wilt* resistance. Plant Biotechnology Journal, 2021,

- 20(4): 691-710.
- [5] 王娟, 李国锋, 王晓辉, 等. 关于 GB/T 19635-2005《棉花长绒棉》的修订建议. 中国棉花, 2023, 50(12): 47-50.
- [6] 张玉洁. 海岛棉叶片光合特性调控机制及与物质生产的关系. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [7] 李丰, 高桐梅, 苏小雨, 等. 施氮量和种植密度对芝麻光合速率、产量和氮肥利用率的影响. 作物杂志, 2022(2): 215-221.
- [8] 王金凤, 王壮壮, 谷丰序, 等. 氮密调控对两个冬小麦品种碳氮代谢及产量的影响. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4070-4083.
- [9] 肖万欣, 刘晶, 史磊, 等. 氮密互作对不同株型玉米形态、光合性能及产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3690-3701.
- [10] 刘子琛, 尚李岩, 叶佳雨, 等. 增密减氮栽培对杂交水稻稻米品质的影响. 作物杂志, 2024(5): 194-203.
- [11] 代英男, 马一学, 阳会兵, 等. 施氮量、种植密度和播种期对棉花干物质积累与分配的影响. 作物研究, 2015, 29(5): 489-492.
- [12] 魏淑丽, 王志刚, 于晓芳, 等. 施氮量和密度互作对玉米产量和氮肥利用效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 382-391.
- [13] DeBruin J, Hensley R, Underwood H, et al. Yield response of maize hybrids with different ear flex to nitrogen rate and plant density. Agronomy Journal, 2023, 116(1): 260-275.
- [14] Chen H X, Zhao X X, Han Y C, et al. Competition for light interception in cotton populations of different densities. Agronomy, 2021, 11(1): 176-176.
- [15] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122-130.
- [16] 李凤瑞, 赵文超, 张东楼, 等. 黄河流域适宜机采的短季棉密度和行距配置. 应用生态学报, 2023, 34(4): 1002-1008.
- [17] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 等. 施氮量对棉花功能叶片生理特性、氮素利用效率及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 81-91.
- [18] 石爱龙, 祝海竣, 唐舟, 等. 氮肥与密度对水稻光合特性和产量的影响. 杂交水稻, 2022, 37(2): 109-117.
- [19] John S, Glendon H, Phillip R, et al. Cotton physiological and agronomic response to nitrogen application rate. Field Crops Research, 2021, 270: 108194.
- [20] 王士红, 杨中旭, 史加亮, 等. 增密减氮对棉花干物质和氮素积累分配及产量的影响. 作物学报, 2020, 46(3): 395-407.
- [21] 白岩, 毛树春, 田立文, 等. 新疆棉花高产简化栽培技术评述与展望. 中国农业科学, 2017, 50(1): 38-50.
- [22] Chen J L, Wang Y R, Zhi X Y, et al. Modifying the planting density to change water utilization in various soil layers and regulate plant growth and yield formation of cotton. Field Crops Research, 2022: 289.
- [23] 田雨, 王方永, 罗宏海, 等. 增效缩节胺化学封顶对不同施氮量条件下棉花群体生长特征的影响. 西北农业学报, 2020, 29(4): 559-569.
- [24] Yin C X, Lin J, Ma L L, et al. Study on the quantitative relationship among canopy hyperspectral reflectance, vegetation index and cotton leaf nitrogen content. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021, 49(8): 1-13.
- [25] 黎芳, 杜明伟, 徐东永, 等. 黄河流域不同密度及施氮量下增效缩节胺化学封顶对棉花生长、产量和成熟的影响. 中国农业大学学报, 2018, 23(3): 10-22.
- [26] 陈宝燕, 马红红, 牛新湘, 等. 不同生育时期施氮量调控对机采棉花冠层特性影响. 新疆农业科学, 2017, 54(11): 1990-

- 1998.
- [27] 张娜, 冯璐, 李玲, 等. 不同种植密度对新疆机采棉叶片生理特性及产量的影响. 中国农业大学学报, 2021, 26(5): 22-29.
- [28] 常佳悦, 马小龙, 吴艳莉, 等. 行距和灌水量对番茄冠层光截获和光合能力、物质积累及果实品质的影响. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2141-2157.
- [29] 陈超, 潘学标, 张立祯, 等. 种植密度对棉花产量构成、成铃和棉铃性状分布的影响. 中国棉花, 2012, 39(1): 16-21.
- [30] 石洪亮, 张巨松, 严青青, 等. 施氮量对新疆机采棉生长特性及产量的影响. 西北农业学报, 2017, 26(3): 397-404.
- [31] 王士红. 增密减氮对棉花产量品质的影响及氮高效生理基础研究. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [32] 周永萍, 田海燕, 杜海英, 等. 种植密度对棉花生长结铃及产量品质的影响. 作物杂志, 2017(4): 84-88.
- [33] 段松江, 彭增莹, 申莹莹, 等. 不同海岛棉品种产量及纤维品质对氮肥的响应. 新疆农业科学, 2023, 60(7): 1569-1579.

Effects of Nitrogen Application Rate and Planting Density on Canopy Structure and Photosynthetic Characteristics of Sea Island Cotton

Wang Li¹, Zhang Chengjie¹, Hu Haoran¹, Ning Liyun¹, Wu Yifan¹, Guo Rensong², Zhang Jusong¹

(¹College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University / Research Center of Cotton Engineering, Ministry of Education, Urumqi 830052, Xinjiang, China; ²Institute of Economic Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, Xinjiang, China)

Abstract In order to determine the optimal balance ratio between planting density and nitrogen application rate of machine-harvested sea island cotton in Awati County, Xinjiang, three planting densities were set up in the main-plots under the 66 cm+10 cm planting pattern using “Xin 78” as the material. There were 20×10^4 (D20), 24×10^4 (D24) and 28×10^4 plants/ha (D28), and four nitrogen application rates were set up in the sub-plots, namely, 0 (N0), 160 (N1), 320 (N2) and 480 kg/ha (N3). The effects of these treatments on canopy structure, leaf photosynthetic characteristics, yield, and quality of sea island cotton were evaluated. The results showed that when the planting density was D24 and the nitrogen rate was N2, the seed cotton yield of sea island cotton was the highest (6337.17 kg/ha), which was 37.23%, 21.00% and 12.06% higher than that of N0, N1 and N3 treatments, and was significant difference from N0. Under the same planting density, the leaf area index (LAI), mean leaf angle and relative chlorophyll content of sea island cotton increased with the increase of nitrogen application rate, and the mean leaf angle decreased when the nitrogen application rate was too high, which showed $N2 > N3 > N1 > N0$. The net photosynthetic rate, transpiration rate and average fiber length of upper half increased with the increase of nitrogen application rate, while the yield, uniformity and break ratio strength of seed cotton increased first and then decreased. Under the same nitrogen application rate, the decrease rate of LAI of sea island cotton increased with the increase of planting density. The mean leaf angle, seed cotton yield, the average fiber length of upper half and the breaking strength showed a trend of “first increasing and then decreasing” with the increase of planting density. The average boll weight per plant and boll number per plant decreased with the increase of planting density. In conclusion, it is recommended that planting the machine-harvested sea island cotton Xin 78 in Awati County, southern Xinjiang under the planting mode of 66 cm+10 cm, the planting density should be 24×10^4 plants/ha and the nitrogen application rate should be 320 kg/ha.

Key words Sea island cotton; Canopy structure; Photosynthetic characteristics; Nitrogen application rate; Planting density