

玉米不同冠层结构下产量及水氮利用效率分析

吕丽华¹, 贾秀领¹, 梁双波¹, 王 璞²

(1. 河北省农林科学院 粮油作物研究所, 河北 石家庄 050035; 2. 农业部作物栽培与耕作学重点实验室, 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100094)

摘要: 研究了种植密度对夏播玉米(CF008、郑单 958 和金海 5 号)冠层、产量及水氮利用效率的影响。通过密度调控, 构建高效冠层, 发挥品种潜力, 实现高产和高水氮效率同时提高。结果表明, 低中密度条件下冠层结构合理, 穗位层透光率较高, 植株 LAI 发展符合中稳、后衰慢的动态, 穗粒数和产量较高。耗水量随密度增加而增加, 而水分利用率(WUE)随密度增加而先升后降, 为中密度下较高。地上部总氮量、氮素吸收效率和氮肥利用率与种植密度并不呈正比, 3 个品种夏玉米各项氮效率指标均为低或中密度处理较高。可见, 适当增加种植密度可以提高产量和水氮利用效率, 但密度增加有一定的上限范围, 过高反而不利于产量和水氮效率的提高。

关键词: 夏玉米; 密度; 产量; 水分利用效率(WUE); 氮效率

中图分类号: S143.1; S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2013)02-0180-06

Yield ,Water and Nitrogen Use Efficiency under Different Canopy Structure

LÜ Li-hua¹, JIA Xiu-ling¹, LIANG Shuang-bo, WANG Pu²

(1. Institute of Cereal and Oil Crops, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050035, China; 2. Key Laboratory of Crop Cultivation and Farming System, Ministry of Agriculture, College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract: The experiment was employed with main plot of plant density(low ,medium ,and high respectively) , sub-plot of cultivar(CF008 ,Zhengdan 958 ,Jinhai 5 respectively) ,studied the effect of different density on canopy structure ,yield ,water use efficiency(WUE) and recovery of N fertilizer(RNF) . The objective to obtain high yield , high water and N efficiency simultaneously through regulating canopy structure under suitable planting density. The main results showed that the high-yielding canopy structure was obtained under both low and medium densities of the three cultivars. Percent transmission of ear layer leaf was high ,and LAI developmental dynamic were rational , and grain yield and grain number per ear were high because of the even light distribution within canopy under both low and medium densities. Water consumption increased with the increase in density ,but WUE was higher under medium density. Shoot N ,N uptake efficiency(NUPE) ,N use efficiency(NUE) and RNF were significantly higher under low or medium densities for three cultivars. Our results confirmed that proper higher planting density can increase grain yield and efficiency of water and N ,and proper planting density of CF008 ,Zhengdan 958 and Jinhai 5 were below 11.25×10^4 , 9.75×10^4 , 8.25×10^4 plants/ha respectively.

Key words: Summer maize; Density; Grain yield; WUE; Nitrogen efficiency

密度是影响冠层结构和产量的重要因素之一。不同种植密度下冠层形态结构不同, 因此造成群体光合和物质生产特性的不同, 最终影响到产量的形成。随着密度的增加, 群体的叶面积、地上部干物质积累^[1]、群体穗数、群体粒数均呈现出增高的趋势,

这个增加值补偿并超过了总体粒质量下降造成的产量损失。适宜种植密度下, 产量构成因素间协调得较好, 表现为粒数、粒质量较高、经济系数适宜^[2]。但随密度进一步升高, 不同品种产量潜力发挥程度呈降低趋势^[3-4], 过高的密度冠层光截获率过高, 将

收稿日期: 2012-10-27

基金项目: 农业部公益性行业专项(201203100); 河北省财政项目(2012055002); 河北省科技支撑计划项目(11220201Z; 11220202D)

作者简介: 吕丽华(1977-), 女, 河北景县人, 助理研究员, 博士, 主要从事作物高产与资源高效利用研究。

通讯作者: 王 璞(1957-), 男, 山西朔州人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物高产与资源高效利用研究。

贾秀领(1964-), 女, 河北正定人, 研究员, 博士, 主要从事作物栽培生理研究。

削弱中下部叶层的光照条件,从而破坏群体与个体发育的平衡关系,使干物质积累减少。因此,高密度下选用适宜品种和密度利于塑造合理冠层结构,减少生长后期出现早衰的可能性,提高冠层光合性能,最终提高籽粒产量。

为了达到作物高产的同时实现高效目的,提高作物水氮利用效率一直是许多研究者的研究热点问题。王空军^[5]经相关分析得出,籽粒产量与氮肥利用率呈极显著正相关,说明高产与高氮肥利用率的关系密切,可以同时实现玉米的高产高效。影响玉米对氮素吸收利用的因素很多,如:供氮水平^[6]、氮磷钾配施比例^[7]、整地方式^[8]以及水肥时空耦合方式^[9]等。影响作物对水分利用的因素也很多,如:灌水频率、灌水量^[10-12]、秸秆覆盖^[13]以及行距配置^[14]等,但种植密度对水氮利用率的影响报道较少。本研究是通过不同品种在不同密度下的产量和水氮利用效率表现,探讨通过品种和密度的优化组合进一步提高作物产量和水氮效率的潜力,以期达到产量与水氮利用效率同步提高。

1 材料和方法

1.1 试验设计

2006 年试验在中国农业大学吴桥实验站进行。该实验站位于黑龙港流域中部,实验站地处河北省沧州市吴桥县,该县位于北纬 37°29′~37°47′、东经 116°19′~116°42′。年均降雨量 562.0 mm,全年≥0℃积温 4 862.9℃。据试验站气象资料,玉米生育期间降雨量为 382.0 mm。

试验地 0~20 cm 土层含有效磷 48.49 mg/kg、全氮 0.076%、有机质 10.34 g/kg、速效钾 107.65 mg/kg、碱解氮 67.86 mg/kg。

试验为两因素试验,裂区设计,3 次重复。选用 3 个夏玉米品种,CF008(小株小穗)、郑单 958(中株中穗)和金海 5 号(大株大穗)。根据品种特性分别设置了 3 个种植密度,CF008 为 9.75×10^4 , 11.25×10^4 , 12.45×10^4 株/hm²;郑单 958 为 8.25×10^4 , 9.75×10^4 , 11.25×10^4 株/hm²;金海 5 号为 6.75×10^4 , 8.25×10^4 , 9.75×10^4 株/hm²,小区面积 42 m², 6.75×10^4 , 8.25×10^4 株/hm²处理行距 0.6 m,其余处理行距 0.45 m。

基施钾肥(K₂SO₄) 112.5 kg/hm²(K₂O)、磷肥(重过磷酸钙) 103.5 kg/hm²(P₂O₅)和 ZnSO₄ 15 kg/hm²,氮肥(尿素)为 180 kg/hm²(N),在播种前和大喇叭口期以 1:4 施用。为了计算氮肥利用率,在中等密度条件下设置了不施氮处理。6 月 17 日播种,生育期分别为 107(郑单 958),100(CF008)和

111 d(金海 5 号)。全生育期内未进行灌溉。

1.2 测定项目及方法

干物质质量和叶面积指数(LAI):分别于 9 叶展、12 叶展、吐丝期、灌浆中期(吐丝后 24 d)、成熟期取样,每个重复取 4 株。单叶叶面积=长×宽×系数(系数为 0.75~0.5),夏玉米全展叶系数定为 0.75,最上面一片非全展叶系数定为 0.5,其他非全展叶系数按出叶先后顺序(即由下至上)在 0.75~0.5 之间等额递减。LAI=每公顷单株叶面积×每公顷内株数/每公顷土地面积。将叶、茎鞘、苞叶(苞叶+穗轴)、与籽粒四部分分别装袋,于 105℃下杀青 30 min,然后在 80℃下烘干至恒质量。

透光率:采用 LAI-2000 在 9 叶展、12 叶展、吐丝期和灌浆中期(吐丝后 29 d)测定,9 叶展、12 叶展测定顶部和底部,吐丝期和灌浆中期测定顶部、穗位层、底层。透光率(%)=测定层光强度/冠层顶部光强度×100。

产量:每小区收获玉米 3 行,每行 4 m,每小区按平均鲜穗质量从 3 行所收果穗中随机选取 10 穗,大田实际产量由各小区所取的 10 穗籽粒质量折算得到(含水量以 14%计)。

全生育期耗水量=灌水量+全生育期有效降雨量+播种前 0~120 cm 土层原有储水量-作物生育末期 0~120 cm 土层储水量。

水分利用效率(kg/m³)=籽粒产量/耗水量。

氮素利用效率(kg/kg)=籽粒产量/植株地上部总氮量。

氮素吸收效率(kg/kg)=植株地上部总氮量/施氮量。

氮肥利用率(%)=(施氮处理植株地上部总氮量-不施氮处理区植株地上部总氮量)/施氮量×100。

1.3 数据分析处理

采用 SAS 软件 GLM 程序和 Microsoft Excel 2003 进行分析。

2 结果与分析

2.1 冠层结构

2.1.1 冠层内光分布 随种植密度增加群体底层和穗层透光率呈现出明显降低趋势。低中密度条件下群体截光率低于高密度,但群体截光率在吐丝期仍达 95% 以上,灌浆中期仍保持在 93% 以上,总体表现较好。除 12 叶展时期外,郑单 958 和金海 5 号底层和穗位层的透光率均为低中密度处理显著高于高密度处理。CF008 底层透光率在低密度下最高,

穗位层透光率为低或中密度下显著高于高密度。

郑单 958 和 CF008 冠层透光率在吐丝期达最低,灌浆中期又有所回升;吐丝期前底层和穗位层透光率均低于金海 5 号,灌浆中期正好相反。而金海

5 号底层和穗位层透光率在整个生育期均呈下降趋势。可见,郑单 958 和 CF008 中前期群体光截获率较大,在籽粒形成的灌浆期透光率又上升,为叶片光合提供了充足光照条件,有利于籽粒灌浆(表 1)。

表 1 不同密度下 3 个品种夏玉米透光率

Tab. 1 Percent transmission of summer maize cultivar under different densities

品种 Cultivar	密度 /($\times 10^4$ 株/hm ²) Density	底层透光率/% Percent transmission of bottom				穗位层透光率/% Percent transmission of ear layer	
		9 叶展 9-leaf	12 叶展 12-leaf	吐丝期 Silking	灌浆中期 Mid-filling	吐丝期 Silking	灌浆中期 Mid-filling
CF008	9.75	15.48a	5.59a	3.04a	6.19a	13.66a	21.48a
	11.25	13.93ab	3.96b	2.24a	5.34a	9.73b	19.03a
	12.45	12.18b	5.00ab	3.12a	4.35a	8.99b	13.78b
郑单 958	8.25	19.33a	6.06a	2.55a	5.39a	18.24a	19.34a
Zhengdan 958	9.75	18.85a	4.63b	2.38ab	5.00a	13.40ab	16.93a
	11.25	14.75b	4.67b	1.60b	1.98b	8.33b	10.80b
金海 5 号	6.75	27.34a	9.65a	4.23a	2.16a	19.45a	19.93a
Jin Hai 5	8.25	22.87a	8.41a	3.29ab	1.32ab	15.58a	16.19ab
	9.75	18.67b	5.69b	2.79b	0.94b	14.68a	8.02b

注:同一列内同一品种标以不同字母的数据处理间差异显著($n=3$)。

Note: In each cultivar values followed by a different letter within a column are significantly different at 0.05 probability level($n=3$).

2.1.2 不同层次叶面积分布特点 表 2 显示,在灌浆中期之前,高密度处理各层 LAI 较高,成熟期则为低或中密度处理较高,尤其是穗下层 LAI 变化趋势更为明显。可见高密度处理茎叶生长较为旺盛,消耗过多光合产物的同时,使冠层内通风透光条件变差,造成后期下层叶片提早衰老。成熟期 CF008 中下层 LAI 受密度影响较大,高密度处理 LAI 下降较为迅速;郑单 958 和金海 5 号仅穗下层 LAI 下降较为迅速,其 LAI 在生育后期仍保持较高值。CF008 低中密度和高密度穗位层 LAI 成熟期比灌浆中期分

别降低 57%、76%,穗下层分别降低 100%、100%,郑单 958 低中密度和高密度穗位层 LAI 分别降低 18%、17%,穗下层分别降低 76%、86%,金海 5 号低中密度和高密度穗位层 LAI 分别降低 7%、10%,穗下层分别降低 69%、73%。

CF008 成熟期中下层叶片早衰较严重,LAI 较小。金海 5 号和郑单 958 穗位层 LAI 高于穗上层,并且成熟期穗位层 LAI 仍保持较高值。说明这 2 个品种穗位以上叶片较小,这种叶片分布有利于穗位层透光率提高和穗层 LAI 高值持续时间延长。

表 2 不同密度下夏玉米穗下层、穗位层、穗上层 LAI 分布

Tab. 2 LAI distributing of the under ear layer, ear layer and above ear layer under different densities

品种 Cultivar	吐丝期 Silking				灌浆中期 Mid-filling				成熟期 Maturity			
	穗位层 以上 Layer above ear	穗位层 Ear layer	穗位层 以下 Layer below ear	全株 Whole plant	穗位层 以上 Layer above ear	穗位层 Ear layer	穗位层 以下 Layer below ear	全株 Whole plant	穗位层 以上 Layer above ear	穗位层 Ear layer	穗位层 以下 Layer below ear	全株 Whole plant
CF008	1.75b	1.95 b	1.89b	5.59b	1.52ab	1.77b	1.03a	4.32b	1.45ab	0.79a	0.0 a	2.24a
	1.73b	2.87 a	2.06a	6.66a	1.72a	2.01a	1.15a	4.88ab	1.63a	0.84a	0.0 a	2.47a
	2.27a	2.35 a	1.86b	6.47a	1.69a	2.15a	1.19a	5.03a	1.37b	0.52b	0.0 a	1.89a
郑单 958	1.26a	1.70ab	3.55b	6.52b	1.24a	1.67b	2.96ab	5.87b	1.00a	1.40ab	0.84a	3.24a
Zhengdan	1.17a	1.76ab	3.82ab	6.75ab	1.23a	1.77ab	2.95ab	5.95a	1.03a	1.39ab	0.60b	3.02a
958	1.25a	1.97a	4.40a	7.62a	1.14a	1.86a	3.26a	6.26a	0.99a	1.61a	0.42c	3.00a
金海 5 号	1.31ab	1.54b	2.15b	5.01c	1.22b	1.46b	1.86a	4.55b	1.21b	1.42b	0.52a	3.15a
Jin Hai 5	1.21b	1.66b	2.89a	5.76b	1.49a	1.82a	1.92a	5.24a	1.43a	1.63ab	0.62a	3.68a
	1.54a	1.94a	3.03a	6.52a	1.41a	1.86a	1.95a	5.23a	1.34ab	1.70a	0.54a	3.58a

2.2 不同冠层下夏玉米产量及产量构成

表 3 显示,3 个品种夏玉米产量、产量构成因素

和收获指数均为低中密度处理较高。穗粒数随密度增加而降低,3 个品种夏玉米高密度穗粒数比低中

密度分别降低 12%、10%、20%。千粒质量为金海 5 号最高,比其他 2 个品种高 37 g 左右,千粒质量同样为低或中密度处理显著较高。理论产量和实际产量为郑单 958 和金海 5 号较高,除 CF008 处理间差异不显著外,其他 2 个品种均为中密度处理显著较高,郑单 958 和金海 5 号中密度实际产量比高密度

分别高 10% 和 11%。3 个品种夏玉米收获指数为低中密度处理显著高于高密度处理。空秆率为 CF008 最高,3 个品种夏玉米空秆率均随密度增加而增加,主要原因:密度过高导致个体间竞争激烈,使养分分配失调,植株营养不足。

表 3 不同密度下夏玉米产量性状

Tab. 3 Yield characters of summer maize under different densities

品种 Cultivar	密度 /(× 10 ⁴ 株/hm ²) Density	穗数 /(× 10 ⁴ 穗/hm ²) Ear number	穗粒数 Grainnumber per ear	千粒质量/g 1000-grain weight	理论产量 /(kg/hm ²) Theoretical yield	实际产量 /(kg/hm ²) Actual yield	收获指数 Harvest index	空秆率/% Plant without ear
CF008	9.75	9.26c	354a	325.0a	10 615a	10 262a	0.58a	4.7a
	11.25	10.37b	327ab	304.1b	10 300a	10 188a	0.57a	6.9b
	12.45	11.06a	300b	317.2ab	10 534a	10 313a	0.58a	10.3b
郑单 958	8.25	8.23c	380a	304.9a	9 871bc	10 348b	0.54a	0.9a
Zhengdan958	9.75	9.74b	388a	302.8a	11 425a	11 478a	0.54a	0.6a
	11.25	10.48a	346b	291.1a	10 540b	10 354b	0.53a	6.4b
金海 5 号	6.75	6.77c	474a	357.0a	11 483a	11 308a	0.52a	3.0a
Jinhai5	8.25	8.36b	403b	344.2b	11 566a	11 461a	0.51a	3.7ab
	9.75	9.10a	350b	330.5c	10 532ab	10 208b	0.48b	4.4b

2.3 密度对水氮利用效率的影响

表 4 显示,耗水量随密度增加而增加,3 个品种高密度处理耗水量显著较高。水分利用效率随密度增加而先升后降(CF008 除外),均为低或中密度处

理显著较高,CF008、郑单 958 和金海 5 号低、中密度处理水分利用效率比高密度处理分别高 2%、7%、13%。不同品种间比较,耗水量和水分利用效率均以金海 5 号较高,CF008 较小。

表 4 不同种植密度下 3 个品种夏玉米耗水量和水分利用效率

Tab. 4 Water consumption(WC) and water use efficiency(WUE) of summer maize under different plant densities

品种 Cultivar	密度/(× 10 ⁴ 株/hm ²) Density	耗水量/(m ³ /hm ²) WC	产量/(kg/hm ²) Grain yield	水分利用效率/(kg/m ³) WUE
CF008	9.75	3 983ab	10 262a	2.58a
	11.25	4 031ab	10 188a	2.53ab
	12.45	4 129a	10 313a	2.50ab
郑单 958	8.25	4 002a	10 348b	2.59b
Zhengdan 958	9.75	4 085a	11 478a	2.81a
	11.25	4 109a	10 354b	2.52b
金海 5 号	6.75	4 117b	11 308a	2.75a
Jinhai 5	8.25	4 132b	11 461a	2.77a
	9.75	4 236a	10 208b	2.41b

由表 5 可见,对氮素的吸收、利用效率和对氮肥的利用率在密度间存在明显的差异。3 个品种夏玉米氮素吸收、利用效率和氮肥利用率均为低或中密度处理较高,与产量和地上部总氮量变化趋势基本一致。说明这 3 个品种不适于高密度种植,在高密度条件下地上部总氮量和籽粒产量较低,造成氮效率降低。

CF008 氮素吸收效率明显低于郑单 958 和金海 5 号,氮素利用效率明显高于这 2 个品种,说明 CF008 植株吸收肥料氮的能力较弱,但单位植株吸

氮量生产的籽粒产量最高;氮素吸收效率低中密度处理显著高于高密度处理。CF008 氮肥利用率明显高于郑单 958,随密度增加氮肥利用率呈下降的趋势,低中密度处理显著高于高密度处理。郑单 958 中密度处理籽粒产量较高,因此氮素利用效率也显著较高;低密度处理由于地上部总氮量较高,因此氮素吸收效率和氮肥利用率也同样为低密度显著较高。金海 5 号籽粒产量和地上部总氮量均为中密度处理较高,因此各项氮效率指标为中密度处理显著高于其他处理。

表 5 不同种植密度下 3 个品种夏玉米氮效率

Tab.5 Nitrogen efficiency of three summer maize under different planting densities

品种 Cultivar	密度 /($\times 10^4$ 株/hm ²) Density	施氮量/(kg/hm ²) N fertilizer application rates	地上部总 氮/(kg/hm ²) Total N	氮素吸收 效率/(kg/kg) NUPE	氮素利用 效率/(kg/kg) NUE	氮肥利用 率/% RNF
CF008	9.75	180	200a	1.11a	51.31b	34.11a
	11.25	180	198a	1.09a	51.45b	31.55a
	12.45	180	181b	1.00b	57.14b	23.29b
	11.25	0	139c		67.50a	
郑单 958	8.25	180	264a	1.47a	39.23b	30.46a
Zhengdan 958	9.75	180	236a	1.31b	48.59a	15.11b
	11.25	180	235b	1.31b	44.00a	14.62b
	9.75	0	209c		51.53a	
金海 5 号	6.75	180	247b	1.37b	45.86b	23.00b
Jinhai 5	8.25	180	266a	1.48a	43.07b	33.83a
	9.75	180	252b	1.40b	40.56b	25.87b
	8.25	0	205c		51.45a	

2.4 冠层结构指标与产量及水氮利用的相关性分析

表 6 显示,在不同种植密度下,吐丝前 LAI 与产量呈显著负相关,灌浆中期之后呈正相关。说明吐丝前叶面积指数过高,一方面叶片互相遮荫,使冠层内通风透光不良,叶片光合活性降低,另一方面营养生长过旺消耗过多营养物质,均不利于产量的提高;而灌浆中期至成熟期维持较长绿叶面积持续时间利于产量提高。群体穗位层透光率与夏玉米产量呈正相关,说明生育中后期,中上层叶片接受较多光能,利于叶片光合性能提高及产量提高。

水分利用效率与 LAI 和穗位层透光率的关系大

表 6 不同密度下冠层结构指标与产量和水氮效率相关系数

Tab.6 Correlation coefficient(r) between canopy structure indices and grain yield, WUE, RNF

处理 Treatment	指标 Index	12 叶展 12-leaf	吐丝期 Silking	灌浆中期 Mid-filling	成熟期 Maturity
与产量相关系数 Correlation coefficient with yield	LAI	-0.625*	-0.409	0.118	0.443
	穗位层透光率	-	0.550	0.157	-
与水分利用率相关系数 Correlation coefficient with WUE	LAI		-0.446	0.573*	0.296
	穗位层透光率		0.557	0.442	-
与氮肥利用率相关系数 Correlation coefficient with RNF	LAI		-0.518	-0.605*	0.086
	穗位层透光率		0.264	0.445	-

3 结论与讨论

密度对玉米不同穗型品种的产量和产量构成具有很大的影响,只有协调好玉米产量组成各因素间的关系,才能更好地挖掘各穗型品种的高产潜力。各穗型能充分发挥其产量潜力的适宜密度各不相同,在适宜密度下,产量构成各因素间的关系均协调得较好,表现为穗粒数和千粒质量较高、经济系数适宜^[2]。本研究中,CF008、郑单 958 和金海 5 号适宜的种植密度为 $9.75 \times 10^4 \sim 11.25 \times 10^4$, $8.25 \times 10^4 \sim$

致相同,不再做详细描述。

灌浆中期前不同种植密度下 LAI 与氮肥利用率均呈负相关,而成熟期呈正相关。说明密度越高,生育中前期 LAI 越大,使冠层内通风透光不良,叶片光合活性降低,对氮素的吸收能力也降低,从而不利于氮肥利用率的提高;而成熟期 LAI 较高,说明叶片光合活性较高,对氮素的吸收能力也较强,从而有利于氮肥利用率的提高。穗位层透光率与氮肥利用率均呈正相关。说明穗位层透光率较高,中上部叶片就能接受较多的光能,干物质生产能力较强,吸收的氮素较多,利于氮肥利用率提高。

9.75×10^4 , $6.75 \times 10^4 \sim 8.25 \times 10^4$ 株/hm²,在此种植密度下,叶面积发展动态合理,冠层内通风透光条件较好,叶片光合活性较高,干物质积累量较多,从而为实现较高的产量奠定了基础。

适当高的种植密度下 WUE 也较高^[15-16]。邵立威等^[17]对不同品种和种植密度玉米产量和水分利用效率研究表明,品种和不同密度之间的产量差异是影响 WUE 的主导因素。高光照利用率冠层结构与高 WUE 紧密相关,冠层高效利用光照所增加的水分蒸腾,更多地转化为产量,使产量水平 WUE

提高,与本研究结果一致。本试验中,对于高产品种郑单 958 和金海 5 号通过选择适宜的密度,可显著提高其产量和 WUE,但种植密度不宜大幅度提高,郑单 958 以不超过 9.75×10^4 株/hm²、金海 5 号以不超过 8.25×10^4 株/hm² 种植密度,对作物产量形成及 WUE 的提高更有利。

作物生产的过程就是作物光合产物生产、分配和转运的过程^[18]。本试验中,茎叶碳氮积累量和茎叶碳氮运转率均以中密度下较高,在此密度下碳氮代谢协调,既保持了较高碳氮运转率^[19],又保持了较高籽粒产量和氮肥利用率。

3 个品种夏玉米产量、产量构成因素和收获指数均为低或中密度处理较高,说明在低中密度下,较高的穗层透光率,适宜的 LAI 发展动态(中稳、后缓慢),可使叶片保持较高光合活性,为实现较高产量奠定基础。而过高密度,造成冠层内光分布较不合理,使生育后期叶片早衰,从而不利于籽粒产量的提高。

增加种植密度可以提高产量和水氮利用率,但密度增加有一定的上限范围,过高反而不利于产量和水氮利用率的提高。本试验水氮利用率均为低或中密度下较高。在低中密度下 CF008($9.75 \times 10^4 \sim 11.25 \times 10^4$ 株/hm²)、郑单 958($8.25 \times 10^4 \sim 9.75 \times 10^4$ 株/hm²)和金海 5 号($6.75 \times 10^4 \sim 8.25 \times 10^4$ 株/hm²)水分利用效率分别高达 2.58、2.81、2.77 kg/m³,氮肥利用率分别达 34.1%、30.46%、33.83%。

参考文献:

- [1] 杨国虎,李 新,王承莲,等. 种植密度影响玉米产量及部分产量相关性状的研究[J]. 西北农业学报, 2006, 15(5): 57–60, 64.
- [2] 郭玉秋,董树亭,王空军,等. 玉米不同穗型品种产量、产量构成及源库关系的群体调节研究[J]. 华北农学报, 2002, 17(增刊): 193–198.
- [3] 郭国亮,李 洪,栗红生. 不同株型玉米品种的结实性及其受光态势的研究[J]. 山西农业科学, 1998, 26(1): 19–23.
- [4] 赵化春,韩 萍. 玉米栽培的适宜密度问题[J]. 玉米科学, 2001, 9(增刊): 34–38.
- [5] 王空军,张 吉,郭玉秋,等. 我国北方玉米品种个体产量潜力与氮利用效率研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 879–884.
- [6] 向春阳,凌碧莹,关义新,等. 氮肥及基因型差异对玉米吸氮量的反应[J]. 中国农学通报, 2003, 19(3): 26–28.
- [7] 杨玉画,褚清河,杜慧玲. 施肥比例及施肥量对玉米吸肥的影响及增产机理[J]. 山西农业科学, 2004, 32(4): 33–36.
- [8] 赵允格,邵明安. 不同整地方式下施肥对夏玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 41–44.
- [9] 邢维芹,骆永明,王林权,等. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应 I. 氮素的吸收和残留及其环境效应[J]. 土壤, 2003(2): 118–121.
- [10] Purcella L C, Edwardsb J T, Bryea K R. Soybean yield and biomass responses to cumulative transpiration: Questioning widely held beliefs[J]. Field Crops Res, 2007, 101(1): 10–18.
- [11] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y *et al.* Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrig Sci, 2008, 27: 1–10.
- [12] Shao L W, Zhang X Y, Chen S Y *et al.* Effects of irrigation frequency under limited irrigation on root water uptake, yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Irrig and Drain, 2009, 58: 393–405.
- [13] Chen S Y, Zhang X Y, Pei D. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain[J]. Ann Appl Biol, 2007, 150: 261–268.
- [14] Chen S Y, Zhang X Y, Sun H Y *et al.* Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2010, 7: 1126–1132.
- [15] 高玉山,窦金刚,刘慧涛,等. 吉林省半干旱区玉米超高产品种、密度与产量关系研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(1): 120–122.
- [16] 刘战东,肖俊夫,于景春,等. 春玉米品种和种植密度对植株性状和耗水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 125–131.
- [17] 邵立威,王艳哲,苗文芳,等. 品种与密度对华北平原夏玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 182–188.
- [18] 张银锁,宇振荣, Paul M D. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累分配及转移的试验研究[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 104–109.
- [19] 吕丽华,陶洪斌,王 璞,等. 密度对夏玉米碳氮代谢和氮利用效率的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(4): 718–723.