

高密度条件下种植方式对夏玉米叶绿素、 荧光特性及其产量的影响

邵 扬^{1,2}, 曾建兵¹, 郭延平¹, 郭青范¹, 王同朝², 卫 丽²

(1. 临夏州农业科学院, 甘肃 临夏 731100; 2. 河南农业大学, 河南 郑州 450002)

摘要: 以郑单 958 为试验材料, 采用裂区设计, 分别在 75 000, 90 000, 105 000 株·hm⁻² 3 个种植密度下, 研究了密度与种植方式对夏玉米郑单 958 叶绿素、荧光及其产量的影响。结果表明, 展开叶叶面积指数, 穗位叶叶绿素含量均随着密度的增加呈现单峰曲线变化的趋势。在密度一定的条件下, 种植方式的改变, 增加了光能的利用效率; 高密度条件下, 宽窄行双株种植改善群体结构, 明显增加光合作用面积, 提高群体光能利用率, 有效增加高密度下玉米产量的潜力。

关键词: 玉米; 密度; 种植方式; 叶绿素; 荧光

中图分类号: S343.1 **文献标志码:** A

Effects of planting patterns with high density on chlorophyll, fluorescence and yield of summer maize

SHAO Yang^{1,2}, ZENG Jian-bin¹, GUO Yan-ping¹, GUO Qing-fan¹, WANG Tong-chao², WEI Li²

(1. Linxia Academy of Agricultural Sciences, Linxia, Gansu 731100, China;

2. Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: To investigate the effects of the density and planting patterns on chlorophyll, fluorescence and yield of summer maize Zhengdan 958, a field experiment was carried out with different plant population densities (7.5×10^4 , 9.0×10^4 , 1.05×10^4 plants·hm⁻²) using a split-split plot design. The results showed that with the increase of planting density, LAI of extended leaves and chlorophyll content of ear leaf displayed a single peak variation curve. Under certain density, changes in planting pattern could increase the use efficiency of light energy. Under high density condition, the method of double strains cultivation with wide-narrow row spacing improved population structure, significantly increased photosynthetic area, enhanced group light energy utilization, advancing the production potential of corn under high density.

Keywords: Maize; thickness; planting patterns; chlorophyll; fluorescence

密度是对玉米产量影响较大的一个重要栽培技术因子^[1]。种植密度对玉米叶片及其光合势影响表现出在一定密度范围内, 随着种植密度增加, 玉米群体的叶面积、叶面积指数、光合势呈现增长趋势^[2]。随着种植密度的进一步增加, 在玉米生育后期, 高密度将造成中下层叶片的早衰, 使群体光合势迅速下降, 降低群体生产能力^[3]。种植方式一直作为高产栽培的技术手段, 受到广大栽培学者的重视^[4-6]。种植方式的改变可以改善群体结构, 减小株间竞争,

提高叶面积^[7]。刘武仁^[8]研究发现宽窄行种植可以促进玉米生长发育, 叶面积增大, 叶片保绿期延长, 光合势强。高密度下, “80 cm + 40 cm” 行距配置有利于扩大光合面积、提高群体光合速率、增加产量^[9]。徐建民^[10]等在 75 000 株·hm⁻² 密度下研究了登海 9 号大行距双株栽培时棒三叶的荧光动力学参数, 认为大行距双株栽培改善了群体通风透光条件, 显著提高 FV/FM, 增加了玉米产量。本实验设置不同密度、不同种植方式, 研究密度与种植方式对

收稿日期: 2015-05-19

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划(30200063); 科技支撑计划(2012BAD04B07, 2011BAD16B07)

作者简介: 邵 扬(1987—), 男, 甘肃会宁人, 助理研究员, 现主要从事作物栽培与育种工作。曾建兵为本文共同第一作者(执笔人)。

通信作者: 郭青范(1968—), 男, 甘肃临夏人, 研究员, 现主要从事作物栽培与育种工作。

夏玉米叶绿素、荧光、单叶光合及其产量的影响,从而探讨郑单 958 在高密度条件下的最佳种植方式,为提高玉米产量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2011 年在河南农业大学科教园区(113°38'39"E, 34°47'51"N)进行。前茬为小麦,土壤质地为壤土,土壤耕层 0~30 cm 的速效磷 34.96 mg·kg⁻¹,速效钾 290.00 mg·kg⁻¹,碱解氮 127.23 mg·kg⁻¹,有机质 9.66 g·kg⁻¹,全氮 0.92 g·kg⁻¹。

1.2 试验材料与试验设计

本试验供试品种为郑单 958,试验采用裂区设计,主区为种植密度:分别为 75 000, 90 000, 105 000 株·hm⁻²,以下均用 A1, A2, A3 表示;副区为种植方式:分别为等行距种植 B1(行距 60 cm)和宽窄行种植 B2(宽行距 70 cm,窄行距 50 cm);副副区为留苗方式:单株留苗、双株三角留苗(每穴两株,每两行间穴距采用三角形种植),以下均用 C1, C2 表示。每小区种植 10 行,小区长 7 m,宽 6 m。A1~A3 处理,株距依次为 22.2, 18.5, 15.9 cm。双株留苗处理时穴距在单株株距基础上依次加倍,即为 44.4, 37.0, 31.8 cm。共 12 个处理,重复 4 次。施肥,其他田间管理同一般高产田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 展开绿叶叶面积指数 每小区于拔节期、大口期、抽雄期、灌浆期、乳熟期选择生长发育一致,叶片无病斑和破损的植株测定,重复 5 次,定株测定。待叶片完全展开后,用长宽系数法($LA = L \times W \times 0.75$,式中 0.75 为校正系数, L 表示叶片中脉长度, W 表示叶片最大宽度,单株叶面积为全株展开叶叶面积之和)测定不同叶位展开叶的叶面积。 $LAI = (\text{单株叶面积} \times \text{单位面积株数}) / \text{单位土地面积}$ 。

1.3.2 穗位叶叶绿素 SPAD 值 采用美能达公司生产的 SPAD-502 叶绿素计测定。在吐丝期开始每隔 15 天测定穗位叶叶绿素 SPAD 值,测定叶片中部位置,每重复活体测定 36 片叶取平均值,间隔测定 4 次。

1.3.3 荧光动力学参数 用 FMS-2 型脉冲调制式叶绿素光分析仪(美国 Hansatech 公司生产)测定,将叶夹夹在穗位叶的中部,测定前叶片暗适应 15 min,光化学强度 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。用下列公式计算光系统 II 的实际光化学效率($\phi P_s \text{ II}$),光化学猝灭系数(P)以及非光化学猝灭(NPQ): $\phi P_s \text{ II} =$

$(F_m' - F_s) / F_m'$, $P = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_o')$, $NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$ 。

1.3.4 单叶光合特性 用 LI-6400 光合仪测定。抽雄期测定穗位叶的光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度。

1.3.5 考种 重复 4 次,测产,取样考种。在每个小区选取中间两行进行,同时挑选出其中有代表性的植株(10 株)考种。

1.3.6 数据处理与分析 文中表格采用 Excel 制作,数据分析采用 DPS v7.05 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同密度条件下种植方式对玉米叶面积指数的影响

由表 1 可以看出,叶面积指数(LAI)随种植密度增加而增大,均在抽雄期达到最大值,以 105 000 株·hm⁻²密度的叶面积指数较高。方差分析表明,拔节期,大口期,抽雄期各处理 LAI 值在密度效应上达到显著差异;灌浆期,密度、种植方式两因素均达到显著差异;乳熟期,种植方式、留苗方式两因素达到显著差异。

叶面积指数的降低趋势表明,随着密度的增大,叶面积指数衰减速率增加;不同种植方式条件下,在同一密度下宽窄行叶面积指数衰减速率小于等行距处理,双株三角留苗叶面积指数衰减速率小于单株留苗。乳熟期,75 000, 90 000, 105 000 株·hm⁻²密度条件下,宽窄行双株处理仍然保持较大的叶面积指数,分别达到 3.44, 3.77, 3.91。灌浆期,籽粒形成的关键时期,宽窄行种植叶面积指数维持在 4.8 左右,并且持续时间长。由此表明,宽窄行双株三角留苗种植条件下,叶面积保绿期延长,尤其在生育后期,仍保持较高的叶面积指数,这将对提高生育后期群体光合速率、玉米群体产量有重要的意义。

2.2 不同密度条件下种植方式对夏玉米吐丝后穗位叶叶绿素 SPAD 值的影响

SPAD 值表示叶片叶绿素相对含量。表 2 表明,吐丝后穗位叶叶绿素 SPAD 值随着生育进程的推进呈现先增大后降低的趋势。方差分析显示,吐丝后 15, 45 d 在密度和种植方式上差异显著,其它时期和处理差异不显著。各个处理叶绿素 SPAD 值均在吐丝后 15 d 达到最大。同一生育期,随着密度的增大,叶绿素 SPAD 值减小。同一密度条件下,宽窄行大于等行距,双株三角留苗大于单株留苗。同时,SPAD 值降低趋势表明,同一密度条件下,宽窄行双

株三角留苗具有降低速率低、含量高的特点。这表明,宽窄行双株三角留苗种植对改善穗位叶叶绿素含量有很多大的促进作用,这可能是双株三角留苗增加冠层透光,减少叶片因“光饥饿”而造成早衰,使

叶绿素含量保持在较高水平,延长了叶片光合作用时间,提高了光和效率,这对高密度条件下,提高作物群体产量有重要意义。

表1 不同密度条件下种植方式对 LAI 动态变化的影响

Table 1 Dynamic changes of LAI under different plant densities

处理 Treatments	拔节期 Jointing period	大口期 Large bell period	抽雄期 Tasseling period	灌浆期 Filling period	乳熟期 Milking period	
A1	B1C1	1.07b	2.74b	4.89c	4.32d	2.98a
	B1C2	1.22ab	2.79ab	5.07bc	4.33d	2.99a
	B2C1	1.10b	2.75ab	4.65c	4.63cd	3.44a
	B2C2	1.11b	2.70b	4.65c	4.46d	3.21a
A2	B1C1	1.25ab	3.40ab	5.54ab	4.89bcd	3.65a
	B1C2	1.58a	3.54ab	5.70ab	5.23abc	3.77a
	B2C1	1.27ab	3.03ab	5.11bc	4.87bcd	3.37a
	B2C2	1.28ab	3.29ab	5.62bc	4.84bcd	3.42a
A3	B1C1	1.39ab	3.55ab	6.32a	5.59a	3.78a
	B1C2	1.39ab	3.65a	6.61a	5.48ab	3.26a
	B2C1	1.41ab	3.45ab	6.11a	5.68a	3.77a
	B2C2	1.40ab	3.53ab	6.03a	5.72a	3.91a

表2 不同密度条件下种植方式对吐丝后穗位叶片叶绿素 SPAD 的影响

Table 2 Effects of different densities on chlorophyll SPAD of leaves in ears

处理 Treatment	吐丝后天数 Days after silking/d				
	0	15	30	45	
A1	B1C1	50.33a	51.90ab	47.17a	23.00bcd
	B1C2	50.77a	51.92ab	47.33a	23.33bc
	B2C1	51.07a	52.8ab	47.77a	23.63b
	B2C2	52.03a	54.00a	48.33a	24.43a
A2	B1C1	48.47a	48.83b	44.83a	22.37def
	B1C2	48.57a	50.57ab	44.87a	22.93ede
	B2C1	49.63a	51.43ab	45.87a	22.93ede
	B2C2	50.00a	51.43ab	46.53a	22.97bcd
A3	B1C1	47.23a	47.50b	39.53a	21.53g
	B1C2	47.33a	48.30ab	40.70a	21.57g
	B2C1	47.50a	48.47ab	43.30a	21.77fg
	B2C2	48.37a	48.60ab	43.30a	22.27ef

2.3 不同密度条件下种植方式对夏玉米叶绿素荧光特性的影响

表3表明, FV/FM 随着密度的增大逐渐降低, ΦPS II 随着密度的增大表现出先降后升的趋势, QP, NPQ 都表现出与密度变化相反的趋势。种植方式表现为宽窄行大于等行距, 双株三角留苗大于单株留苗。方差分析表明密度效应上差异显著。这表明,

密度一定的条件下, 通过种植方式的改变, 有效改善了冠层的通风透光条件, 改善了叶片生长环境, 进而有力改善了叶片光合机构, 增加了光能利用效率。

2.4 不同密度条件下种植方式对夏玉米穗位叶光合特性的影响

75 000 株·hm⁻²密度条件下, 宽窄行双株三角留苗群体光合速率比等行距单株留苗, 等行距双株三角留苗, 宽窄行单株留苗分别高出 4.0%, 1.6%, 0.7%; 90 000 株·hm⁻²密度条件下, 宽窄行双株三角留苗群体光合速率比等行距单株留苗, 等行距双株三角留苗, 宽窄行单株留苗分别高出 1.5%, 3.0%, 0.7%; 105 000 株·hm⁻²密度条件下, 宽窄行双株三角留苗群体光合速率比等行距单株留苗, 等行距双株三角留苗, 宽窄行单株留苗分别高出 33.4%, 4.8%, 0.5%。这表明, 高密度条件下, 单株生产能力降低, 但因个体的增加弥补了群体物质生产。同一密度下, 不同种植方式条件穗位叶净光合速率变化较大, 宽窄行双株三角留苗种植表现的更加突出, 这种变化随着密度的增大变得尤其明显, 这说明, 高密度条件下, 宽窄行双株三角留苗通过改变作物冠层结构, 群体微环境得到明显改善, 显著增加了穗位叶净光合速率, 宽窄行双株三角留苗结合高密度栽培, 在籽粒形成的关键时期为玉米获得高产奠定了基础。

表4表明, 穗位叶气孔导度随着密度的增大有

减小的趋势,但是变化不明显。种植方式上表现为宽窄行大于等行距,双株三角留苗大于单株留苗。方差分析结果表明,气孔导度在各处理间差异不显著。这说明,密度,种植方式,留苗方式通过改变群体冠层结构,影响玉米群体和个体对资源的竞争和

配置,在一定程度上影响了玉米叶片的发育状况。90 000 株·hm⁻²密度条件下,宽窄行双株三角留苗气孔导度最高,和产量一致。高密度条件下,宽窄行双株三角留苗通过改变叶片生长环境,促进叶片光合效率,可以有效增加高密度下玉米产量潜力。

表 3 不同密度条件下吐丝后穗位叶片叶绿素荧光特性

Table 3 Effects of different densities on fluorescent characteristics of leaves in ears

处理 Treatment	F0	FM	FV/FM	ΦPS II	QP	NPQ	
A1	B1C1	28.67a	263.00a	0.891a	0.82abc	0.94b	0.07b
	B1C2	29.67a	274.33a	0.892a	0.86a	0.99a	0.22ab
	B2C1	29.67a	274.67a	0.892a	0.79c	0.94b	0.31ab
	B2C2	28.33a	263.33a	0.893a	0.83ab	0.96ab	0.21ab
A2	B1C1	31.67a	284.33a	0.889a	0.83ab	0.99a	0.42a
	B1C2	32.33a	288.00a	0.888a	0.84ab	0.97ab	0.16ab
	B2C1	30.33a	274.33a	0.890a	0.84ab	0.97ab	0.18ab
	B2C2	30.33a	276.00a	0.890a	0.79c	0.95b	0.30ab
A3	B1C1	34.33a	282.00a	0.878a	0.81bc	0.96ab	0.19ab
	B1C2	33.00a	284.00a	0.884a	0.83abc	0.97ab	0.25ab
	B2C1	31.00a	276.00a	0.887a	0.83ab	0.97ab	0.20ab
	B2C2	31.00a	275.33a	0.888a	0.84ab	0.97ab	0.18ab

表 4 表明,穗位叶胞间二氧化碳浓度随着密度的增大有先降低后升高的趋势,A1,A2 处理下种植方式上表现为等行距大于宽窄行,单株留苗大于双株三角留苗,A3 处理下等行距处理变化表现为单株大于双株三角留苗。方差分析表明,胞间二氧化碳浓度在密度,种植方式,留苗方式效应上均有显著差异,且三因素互作差异显著。90 000 株·hm⁻²密度条件胞间二氧化碳积累量最少,利用效率高。这

说明,宽窄行双株三角留苗明显改善了冠层结构,玉米个体,群体光合速率均高于其他处理,光合效率高,光能利用率强,胞间二氧化碳积累量少,但过高密度条件下,双株三角留苗在等行距条件下个体对养分竞争加大,同化作用减弱,出现相反的趋势。因此在适宜密度条件下,双株三角留苗表现的高的光合作用效率,可以减轻叶片因光饥饿而造成的早衰,这对提高高密度条件下玉米产量有重要的现实意义。

表 4 不同密度条件下种植方式对夏玉米单叶光合的影响

Table 4 Effects of different densities on photosynthesis characteristics of summer maize

处理 Treatment	单叶光合指标 Photosynthesis index				
	Pho/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	GS/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ci/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$)	Tr/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
A1	B1C1	24.30a	0.20a	116.40ab	4.86a
	B1C2	24.90a	0.21a	81.47ab	5.01a
	B2C1	25.30a	0.22a	85.80ab	5.20a
	B2C2	25.13a	0.20a	67.37b	5.01a
A2	B1C1	21.97a	0.23a	109.00ab	5.34a
	B1C2	22.13a	0.20a	73.03ab	4.59a
	B2C1	21.80a	0.20a	95.47ab	4.86a
	B2C2	21.47a	0.16a	82.23ab	4.04a
A3	B1C1	19.40ab	0.18a	94.13ab	4.67a
	B1C2	13.57b	0.16a	183.00a	4.02a
	B2C1	20.27ab	0.16a	170.53ab	3.88a
	B2C2	20.37ab	0.17a	148.13ab	4.44a

2.5 不同密度条件下种植方式对夏玉米产量及构成因素的影响

由表5可知,穗粗,穗长,行粒数,百粒重随着密度的增大先升高后降低。75 000 株·hm⁻²密度条件下表现为宽窄行小于等行距,双株三角留苗大于单株留苗,产量为等行距双株最高;90 000,105 000 株·hm⁻²密度条件下表现为宽窄行大于等行距,双株三角留苗大于单株留苗,产量为宽窄行双株最高。75 000 株·hm⁻²密度条件下,宽窄行双株三角留苗产量比等行距单株留苗,等行距双株三角留苗,宽窄

行单株留苗分别低0.7%,1.7%,1.0%;90 000 株·hm⁻²密度条件下,宽窄行双株三角留苗产量比等行距单株留苗,等行距双株三角留苗,宽窄行单株留苗分别高出13.4%,9.4%,5.9%;105 000 株·hm⁻²密度条件下,宽窄行双株三角留苗产量比等行距单株留苗,等行距双株三角留苗,宽窄行单株留苗分别高出12.8%,10.3%,7.9%。各处理中90 000 株·hm⁻²宽窄行双株产量最高,达到8 336.40 kg·hm⁻²。由此说明,高密度条件下,宽窄行双株栽培对挖掘玉米生产潜力,提高玉米产量有一定的意义。

表5 不同密度条件下种植方式对夏玉米产量及产量构成因素的影响

Table 5 Effects of different densities on yield and yield components of summer maize

处理 Treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	穗粗/cm Ear width	穗长/cm Ear length	行粒数 Kernels per row	百粒重/g 100-grain weight	
A1	B1C1	7 514.70b	4.74a	14.28a	31.60a	28.23a
	B1C2	7 697.85b	4.79a	14.41b	33.00b	28.73a
	B2C1	7 570.20b	4.75a	14.37b	31.67a	28.67a
	B2C2	7 492.50b	4.74a	14.39b	32.80a	28.72a
A2	B1C1	7 841.10b	4.71a	14.21ab	30.93a	27.96b
	B1C2	7 551.75b	4.68a	14.06a	30.60a	27.44ab
	B2C1	7 223.40b	4.67a	13.98a	30.53a	27.21ab
	B2C2	8 336.40a	4.71a	14.22ab	31.60a	28.05b
A3	B1C1	7 292.70b	4.58a	13.71a	30.13a	26.74ab
	B1C2	7 092.90b	4.53a	13.28a	30.13a	26.55ab
	B2C1	7 486.95b	4.59a	13.72a	30.40a	27.04b
	B2C2	8 130.75a	4.63a	13.89a	30.47a	27.16b

3 讨论与结论

大量研究表明,密度是协调玉米个体和群体最有效的措施^[11]。刘武仁^[12]等提出,光合势随密度增加而加大,保持较高的光合势是高产优质的前提。但密度增加影响玉米单株的生产能力,使穗粒数、千粒重下降^[13-14]。郭天财^[15]等研究发现,适宜密度有利于延缓叶片衰老,增加叶绿素含量,提高最大光化学转化效率,PS II 量子效率增大,非光化学猝灭系数降低,热耗散减弱,过高密度条件下,叶绿素荧光参数变劣。胡昌浩等^[16]在一定密度范围内对不同品种进行研究发现,随着密度的增加,玉米的群体光合速率提高。另外,种植方式的不同影响作物群体的光合作用效率,在高密度条件下,宽窄行种植可以明显增加光合作用面积,提高中下层叶片的光合性能,光在作物群体中的分布更加合理,显著提高群体光能利用率^[17]。本试验表明,随着密度的增大,叶面积指数衰减速率增大,叶绿素 SPAD 值减小,FV/FM 逐渐降低,同一密度条件下宽窄行双株种植叶面

积指数、叶绿素 SPAD 值,FV/FM 降低速率小于其他处理。虽然 A3 处理叶面积指数,A1 处理叶绿素 SPAD 值、FV/FM 均较高,但玉米的生产是一个群体过程,低密度条件下单株生产能力的提高对产量的影响小于密度增加群体生产能力提高带来的效应,A3 处理密度下,双株栽培植株个体间对资源竞争加大,单株生产能力降低对产量产生的负效应大于密度增加带来的效应。从叶绿素荧光特性看出宽窄行双株种植改善了群体冠层的通风透光条件和叶片生长环境,增加了光能利用效率。试验中宽窄行双株三角留苗种植,延长叶面积保绿期,中、下层光照条件得到改善,同时能有效提高后期玉米叶片光合效率。在玉米生长中后期,宽窄行双株三角留苗种植能有效改善中下部叶片受光条件,尤其在高密度条件下群体微环境得到明显改善,改善了叶片光合机构,充分发挥后期群体生产力,对玉米高产具有重要意义。产量结果表明,在90 000 株·hm⁻²密度条件下,宽窄行双株三角留苗种植产量最高,达到8 336.40 kg·hm⁻²,这说明 A1,A2 密度下,群体密度的增加补

偿了产量构成因素降低带来的负效应, A3 密度下单株生产能力影响群体产量, 产量构成因素降低产生的负效应大于群体密度增加带来的补偿效应, 群体生产能力降低。因此在 90 000 株·hm⁻² 密度条件下, 采用宽窄行双株三角留苗种植能使夏玉米郑单 958 群体生产潜力得到更大发挥, 是获得高产的重要手段。

参考文献:

- [1] 俞凤芳, 丁成芳. 种植方式和密度对高产玉米产量及相关性状的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(6): 1297-1299.
- [2] 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.
- [3] 徐恒永, 赵君实. 高产冬小麦的冠层光合能力及不同器官的贡献[J]. 作物学报, 1995, 21(2): 204-209.
- [4] 王春虎, 陈士林, 赵新亮, 等. 玉米郑单 958、14、18 系列品种高产生理研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(5): 253-256, 268.
- [5] Farnham D E. Row spacing, plant density, and hybrid effects on corn grain yield and moisture[J]. Agronomy Journal, 2001, 93: 1049-1053.
- [6] Lambert D M, Lowenberg-DeBoer J. Economic analysis of row spacing for corn and soy-bean[J]. Agronomy Journal, 2003, 95: 564-573.
- [7] 杨克军, 李 明, 李振华. 栽培方式与群体结构对寒地玉米物质积累及产量形成的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 157-160.
- [8] 刘武仁, 冯艳春, 郑金玉, 等. 玉米宽窄行种植产量与效益分析[J]. 玉米科学, 2003, 11(3): 63-65.
- [9] 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.
- [10] 徐建民, 高红权, 毛善国, 等. 大行距双株栽培对玉米后期光合特性的影响[J]. 扬州大学学报(农业科学版), 2008, (3): 66-71.
- [11] 温日宇, 郭耀东, 刘建霞, 等. 不同密度和种植方式对玉米产量的影响[J]. 山西农业科学, 2011, 39(8): 814-815.
- [12] 刘武仁, 郑金玉, 冯艳春, 等. 玉米品种不同密度下的质量效应[J]. 玉米科学, 2005, 13(2): 99-101.
- [13] 李 明, 李文雄. 肥料和密度对寒地高产玉米源库性状及产量的调节作用[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1130-1137, 182.
- [14] 张永科. 玉米密植和营养改良之研究—I, 密度对玉米产量和营养的效应—II [J]. 玉米科学, 2005, 13(3): 87-90.
- [15] 郭天财, 盛 坤, 冯 伟, 等. 种植密度对两种穗型小麦品种分蘖期茎蘖生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 350-355.
- [16] 胡昌浩, 董树亭, 岳寿松, 等. 高产夏玉米群体光合速率与产量关系的研究[J]. 作物学报, 1993, 19(1): 63-69.
- [17] 陆雪珍, 沈雪芳, 沈才标, 等. 不同种植密度下糯玉米产量及相关性状研究[J]. 上海农业学报, 2008, 24(2): 61-64.

(上接第 84 页)

- [11] 韩晓增, 裴宇峰, 王守宇, 等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响 II. 水氮耦合对大豆生理特征的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(2): 103-108.
- [12] 栗 丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1367-1373.
- [13] 冯淑梅, 张忠学. 滴灌条件下水肥耦合对大豆生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 65-67.
- [14] 邢英英, 张富仓, 张 燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713-726.
- [15] 杜清洁, 李建明, 潘铜华, 等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 10-17.
- [16] 张 燕, 张富仓, 袁宇霞, 等. 灌水和施肥对温室滴灌施肥番茄生长和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 206-212.
- [17] 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 160-165.
- [18] 龚 江, 王海江, 谢海霞, 等. 膜下滴灌水氮耦合对棉花生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 51-54.
- [19] 朱兆良, 孙 波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护, 2008, (8): 4-6.
- [20] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [21] 陈碧华, 邵庆炉, 杨和连, 等. 日光温室膜下滴灌水肥耦合技术对番茄生长发育的影响[J]. 广东农业科学, 2008, (8): 63-65, 78.
- [22] 雍太文, 刘小明, 刘文钰, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作体系中作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 474-482.
- [23] 刘学军, 巨晓荣, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 458-462.
- [24] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 870-878.
- [25] 刘新永, 田长彦. 棉花膜下滴灌水氮耦合效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 286-291.