

水肥耦合对糜子干物质运转和产量的影响

王君杰^{1,2}, 陈 凌^{1,2}, 王海岗^{1,2}, 张盼盼³, 乔治军^{1,2}

(1. 山西农业科学院农作物品种资源研究所, 山西 太原 030031; 2. 农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室, 山西 太原 030031; 3. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 以晋黍 7 号为材料, 研究了不同水肥条件下糜子叶面积、净光合速率、干物质运转及产量构成因素变化。结果表明, 糜子叶面积和净光合速率基本呈现出先上升后下降的变化趋势, 叶面积在抽穗期达到最大值, 净光合速率在开花期达到最大值; 各处理均以叶片干物质的移动率高于茎, 茎干物质的运转率均高于叶片, 茎和叶的移动率以施氮量 150 kg·hm⁻²、施磷量 120 kg·hm⁻²和保水剂 60 kg·hm⁻²处理最大, 分别为 41.82%和 43.28%; 与不施肥无保水剂(CK)相比, 施氮量 150 kg·hm⁻²、施磷量 120 kg·hm⁻²和保水剂 60 kg·hm⁻²处理的产量最高, 为 5 389.36 kg·hm⁻², 增产 36.47%; 产量与有效穗数、单株穗重和主穗长呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.88、0.80 和 0.71。一定范围内, 随着施肥量的增大, 产量增加, 保水剂处理比无保水剂处理产量高; 施氮量 150 kg·hm⁻²、施磷量 120 kg·hm⁻²和保水剂 60 kg·hm⁻²处理组的糜子产量最高, 茎和叶的干物质移动率最高, 对籽粒的贡献率最大, 为理想的水肥组合。

关键词: 糜子; 水肥耦合; 干物质运转; 产量
中图分类号: S516.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0140-06

Coupling effect of water and fertilizer on dry matter distribution and yield of dryland broomcorn millet

WANG Jun-jie^{1,2}, CHEN Ling^{1,2}, WANG Hai-gang^{1,2}, ZHANG Pan-pan³, QIAO Zhi-jun^{1,2}

(1. Institute of Crop Germplasm Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China; 2. Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Taiyuan, Shanxi 030031, China; 3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Using Jinshu 7 as material, we studied the coupling effect of water and fertilizer treatment on photosynthesis, dry matter distribution, and yield of broomcorn millet. The results showed that leaf area and rate of net photosynthesis increased first and then decreased. Leaf area reached maximum at heading stage, whereas net photosynthesis was highest at flowering stage. The distribution of the dry matter in the leaf was higher than that in the stem. The translocation rate of dry matter for the leaf and the stem was highest for the nitrogen rate of 150 kg·hm⁻², phosphorus urea rate of 120 kg·hm⁻², or water-keep agent urea at 60 kg·hm⁻². The yield was highest when the nitrogen urea was applied at the rate of 150 kg·hm⁻², phosphorus urea 120 kg·hm⁻², water-keep agent urea 60 kg·hm⁻². Yield was positively correlated with panicle number, ear weight per plant, and ear length, with the correlation coefficients being 0.88, 0.80, and 0.7, respectively. The yield increased with fertilizer for a certain range. It is recommended that rate of 150 kg·hm⁻² for nitrogen, 120 kg·hm⁻² for phosphorus, and 60 kg·hm⁻² for water-keep agent urea should be used for dryland broomcorn millet production.

Keywords: broomcorn millet; coupling effect of water and fertilizer; dry matter distribution

糜子(*Panicum miliaceum* L.)是起源于中国的古老农作物,具有喜温、耐旱、耐瘠、早熟等特性^[1]。水肥是影响作物品质和产量的主要因素,水分亏缺严重制约作物生产力的提高,而生产上大多采用的漫

收稿日期: 2013-02-28
基金项目: 农业部国家谷子糜子产业技术体系项目(CARS-07-12.5)
作者简介: 王君杰(1985—),男,山西祁县人,硕士研究生,主要从事糜子栽培研究。E-mail: xiaoleiawangjie@163.com。
并列第一作者: 陈 凌(1982—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事糜子栽培研究。E-mail: 42078795@qq.com。
通信作者: 乔治军(1964—),男,山西河曲人,研究员,主要从事糜子栽培和种质资源研究工作。E-mail: nkypzs@yahoo.com.cn。

灌技术造成了大量水分流失。对农业来说,目前最大的挑战是开发提高水分利用率的技术,因地制宜地调节水分和肥料,使其处于合理的范围,使水肥产生协同作用,达到“以水促肥”和“以肥促水”的目的^[3-6]。近些年来,水分和肥料对作物干物质积累与分配^[7-10]的研究和对产量^[11-14]的研究比较多。冯鹏等^[15]研究提出,灌水 2 069.96 m³·hm⁻²,施氮肥 225 kg·hm⁻²处理组的玉米产量和玉米青贮时的乳酸含量高,营养品质好,为理想的水肥组合。郑志松等^[16]研究提出施氮量 179.2 kg·hm⁻²、施磷量 126 kg·hm⁻²和灌水量 282 mm 处理组合对冬小麦蛋白质和氨基酸的综合影响最大。王宇先等^[17]研究提出糜子密度在 60 万株·hm⁻²,施氮量在 60 kg·hm⁻²下,既能获得较高产量又能获得较高的经济效益。韦泽秀等^[18]研究指出土壤相对含水量 70%~80%、氮肥追施量 600 kg N·hm⁻²和 420 kgP₂O₅·hm⁻²处理的土壤养分含量、蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性较高。水肥耦合的研究主要集中在大宗作物上,而关于糜子的研究还比较少,尤其是对干物质运转方面的研究尚少见报道。本试验研究水肥耦合对糜子干物质运转与产量的影响,剖析水肥耦合对糜子产量影响的机理,以期探索提高丘陵旱地糜子产量及水分利用效率的途径,实现农田生态的优化,最大限度地发挥糜子的生产潜力。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012 年 6—10 月在山西忻州河曲县鹿固乡杨桥洼村进行,该区年均气温 8.8℃,年降雨量 460 mm 左右,霜冻期为九月下旬至次年四月中、下旬,无霜期 150 d 左右。温、光、热资源适宜糜子的生长发育。

1.2 试验材料与试验设计

供试土壤为砂质土壤,土壤肥力低,有机质含量 22.01 g·kg⁻¹,碱解氮 43.79 mg·kg⁻¹,有效磷 16.59 mg·kg⁻¹,速效钾 153.66 mg·kg⁻¹。供试肥料为尿素,含纯 N 46%;过磷酸钙,含 P₂O₅ 12%。供试品种为晋黍 7 号。设水、肥二因素,肥料 4 个水平,保水剂 2 个水平,以不施肥无保水剂作为对照,共 9 个处理,具体见表 1。每个处理重复 3 次,随机区组排列,小区面积 15 m²。

1.3 测试指标与方法

1.3.1 叶面积测定 在各处理小区中,选择生长一致的糜子 3 株进行标记,于分蘖期、拔节期、抽穗期、

开花期、灌浆期、成熟期,采用 CI-203 激光叶面积仪测定糜子主茎倒二叶叶面积。

表 1 各处理养分投入量/(kg·hm⁻²)

Table 1 Nutrient inputs of treatments			
处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	保水剂 Water-keep agent
CK	0	0	0
F ₁ C ₀	0	120	0
F ₂ C ₀	75	60	0
F ₃ C ₀	150	120	0
F ₄ C ₀	225	180	0
F ₁ C ₁	0	120	60
F ₂ C ₁	75	60	60
F ₃ C ₁	150	120	60
F ₄ C ₁	225	180	60

注:F 代表肥料,C 代表保水剂。
Note: F, fertilizer; C, water-keep agent.

1.3.2 光合特性 用美国生产的 CI-340 型便携式光合仪测定各处理糜子倒二叶的净光合速率(*P_n*)。测定时间为分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期、成熟期,观测时间为上午 8:30—10:30,每处理选取代表性较好的冠层倒二叶进行测定,3 次重复。

1.3.3 干物质积累与分配 在开花期直至成熟收获,每 7 天于上午 8:00 取样一次,每个处理取 3 株,迅速装入自封袋,带回实验室,将糜子植株分解为叶片、茎、穗,称其鲜重,然后于 105℃杀青 30 min,80℃烘至恒重,称各部位干重。

1.3.4 各器官干物质移动率和转运率的计算 籽粒灌浆期间,各器官干物质移动率(Move ratio, MR)和转运率(Transportation, TR)按下列公式^[19]计算:

MR/%=(开花后器官最大干质量-成熟期器官干质量)/开花后器官最大干质量×100%;

TR/%=(开花后器官最大干质量-成熟期器官干质量)/籽粒最大干质量×100%。

1.4 数据处理

试验数据都采用 Excel、DPS 和 Origin8 软件进行数据统计和图表分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对糜子绿叶面积的影响

由图 1 可见,随着生育时期的推进,糜子叶面积均表现出先上升后下降的变化趋势,在抽穗期达到最大值;除 F₄ 和分蘖期的 F₁ 外,随着肥料施用量的增加,叶面积不断增加,在分蘖期叶面积 F₁>F₃>F₂

> F₄ > CK,但肥料施用量达到 F₄ 时,叶面积呈下降的趋势。在无保水剂 C₀ 处理下,叶面积的变化趋势大致为 F₃ > F₂ > F₄ > F₁ > CK,在有保水剂 C₁ 处理下,叶面积的变化趋势大致为 F₃ > F₂ > F₁ > F₄ > CK。

由此说明,适宜的氮肥施用量可保持糜子群体较高叶面积,有利于截获更多的光能,制造更多的同化产物。氮肥施用量达到一定量时,施用保水剂反而会使糜子绿叶面积减小。

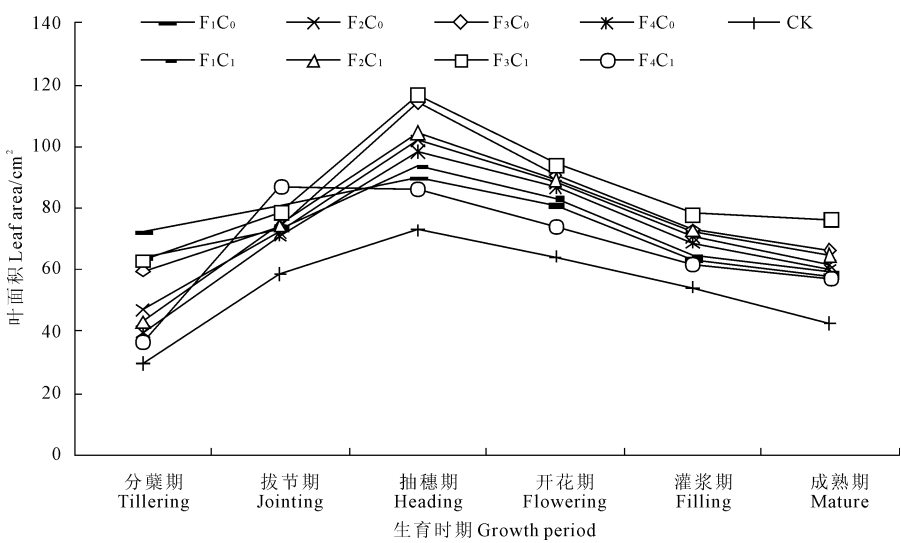


图 1 不同处理对糜子叶面积的影响

Fig.1 Effect of different treatments on millet leaf area

2.2 不同处理对糜子净光合速率的影响

净光合速率从分蘖期到拔节期呈下降趋势,然后表现出先上升后下降的变化趋势(图 2),随着肥料施用量的增加,变化趋势大致与叶面积相同。F₁C₀ 和 F₁C₁ 在分蘖期达到最大值,CK 在抽穗期达

到最大值,其余处理在开花期达到最大值;净光合速率在分蘖期以 F₁C₀ 处理最大,其次是 F₁C₁ 处理,可得磷肥在生育前期对糜子的生长发育有明显的促进作用;F₃C₀ 和 F₃C₁ 在成熟期净光合速率减低幅度最小,说明合理的水肥处理明显延缓叶片的衰老。

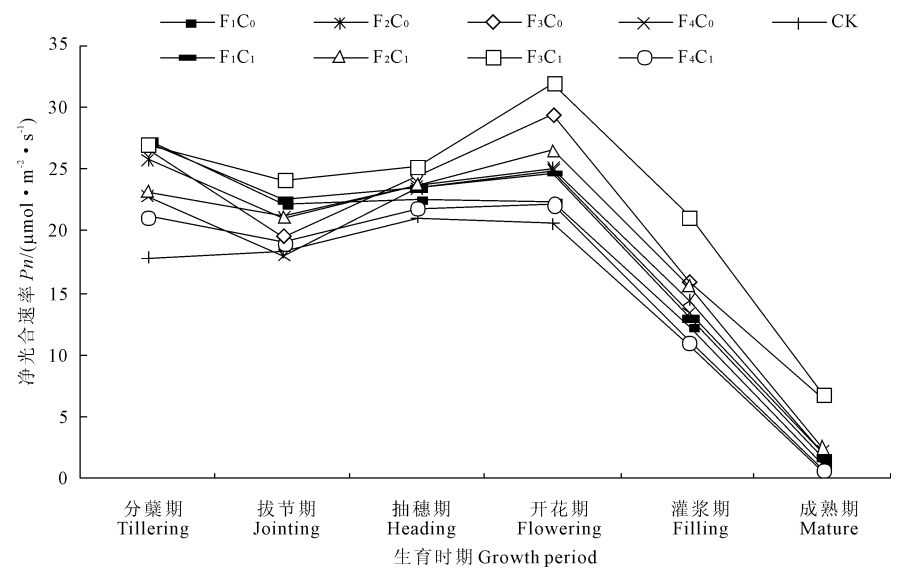


图 2 不同处理对糜子净光合速率的影响

Fig.2 Effect of different treatments on Pn

2.3 不同处理对糜子各器官干物质移动率和转运率的影响

由表 2 可得出:F₃C₁ 叶和茎的移动率最大,分别

为 43.28% 和 41.82%,叶和茎的移动率以 CK 最小,分别为 16.36% 和 13.43%,随着肥料施用量的增加,在无保水剂 C₀ 处理下,叶和茎的移动率的高低

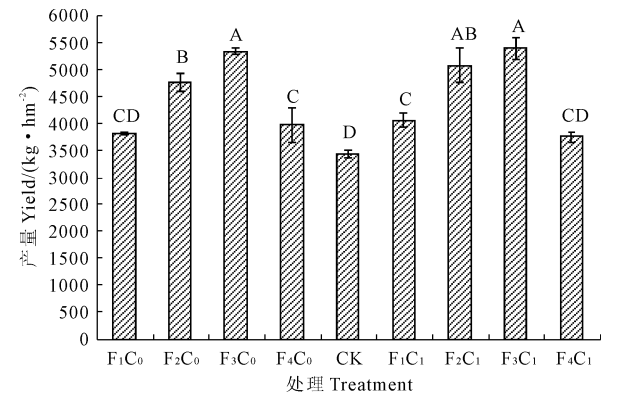
顺序为 $F_3 > F_2 > F_4 > F_1 > CK$, 在有保水剂 C_1 处理下, 叶和茎的移动率的高低顺序为 $F_3 > F_2 > F_1 > F_4 > CK$ 。但是转运率与其移动率不成正比, 茎的转运率以 F_1C_0 为最大, 值为 52.64%, 叶的转运率以 F_2C_0 为最大, 值为 24.87%; 叶和茎的转运率以 CK 最小, 值分别为 6.98% 和 15.57%。贾根良研究^[24]提出糜

子籽粒灌浆期叶片干物质的移动率最高, 即干物质输出率最大, 且运转率也最高, 表明其对籽粒的贡献率最大, 其次是茎鞘、根系和壳。本结果得出 F_3C_1 叶和茎的移动率最大, 且对籽粒的贡献率最大, 所以产量最高。

表 2 糜子不同处理各器官干物质移动率和转运率的比较					
Table 2 Comparison of transportation rate and translocation rate of dry matter among organs in broomcorn millet					
处理 Treatments	器官 Organ	最大干质量/(g·株 ⁻¹) Maximum dry weight /(g·plant ⁻¹)	成熟时干质量/(g·株 ⁻¹) Dry weight at maturity /(g·plant ⁻¹)	移动率/% Move ratio	转运率/% Transportation ratio
F_1C_0	叶 Leaves	3.08	2.24	27.32	14.40
	茎 Stems	13.38	10.30	22.98	52.64
F_2C_0	叶 Leaves	4.17	2.63	36.85	24.87
	茎 Stems	10.96	8.02	26.82	47.63
F_3C_0	叶 Leaves	4.10	2.37	42.32	17.58
	茎 Stems	10.12	6.27	38.07	39.02
F_4C_0	叶 Leaves	3.94	2.66	32.52	19.41
	茎 Stems	9.37	7.15	23.66	33.57
CK	叶 Leaves	2.43	2.04	16.36	6.98
	茎 Stems	6.61	5.73	13.43	15.57
F_1C_1	叶 Leaves	3.15	2.20	30.36	15.29
	茎 Stems	8.94	6.83	23.54	33.60
F_2C_1	叶 Leaves	3.51	2.15	38.70	16.08
	茎 Stems	8.76	5.94	32.26	33.48
F_3C_1	叶 Leaves	3.76	2.13	43.28	16.29
	茎 Stems	12.11	7.05	41.82	50.78
F_4C_1	叶 Leaves	3.09	2.35	24.05	12.94
	茎 Stems	10.84	8.59	20.78	39.25

2.4 不同处理对糜子产量的影响

合理的水肥配合, 才能以水促肥, 以肥调水, 达到水分和养分的高效利用。不同水肥条件下糜子产量的比较结果表明(见图 3), 各处理间差异明显, 在一定的肥料施用量范围内, 产量随着氮磷肥的增加而增加, 并且有保水剂处理比无保水剂处理产量高, 在无保水剂 C_0 处理下, 糜子产量的高低顺序为 $F_3 > F_2 > F_4 > F_1 > CK$, 在有保水剂 C_1 处理下, 糜子产量的高低顺序为 $F_3 > F_2 > F_1 > F_4 > CK$ 。超出一定肥料施用量范围, 产量反而减少, 并且有保水剂处理比无保水剂处理产量低, 如 F_4C_0 比 F_4C_1 产量高, 说明水分和肥料超出一定范围就会出现拮抗效应。在不同的处理条件下, 以处理 F_3C_1 和 F_3C_0 的产量比较高, 分别为 $5\,389.36\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $5\,336.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 比对照增产 36.47% 和 35.83%。



注: 不同大写字母表示差异达 0.01 显著水平。
Note: Different letters indicate significant differences at $P < 0.01$.

图 3 不同处理对糜子产量的影响
Fig.3 Effect of different treatments on grain yield of broomcorn millet

2.5 不同处理对糜子产量构成因素的影响
从产量构成因素^[20-21]分析(见表 3)来看, 与对照相比, 除千粒重外各水肥处理的产量构成因素均

达到极显著水平,不同处理间进行比较,有效穗数、主穗长和单株穗重均以 F₃C₁ 处理组合最高,CK 处理最低;千粒重以 F₂C₁ 处理组合最高,CK 处理最低,但是 F₃C₀、CK、F₃C₁ 和 F₁C₁ 间差异不显著,F₁C₀、F₂C₀、F₄C₀ 和 F₄C₁ 间差异不显著,说明千粒重在不同水肥处理下不是影响糜子产量的主要因素。

表 3 不同处理对糜子主要农艺性状及产量构成因素的影响

产量因素 Yield factors	处理 Treatments								
	F ₁ C ₀	F ₂ C ₀	F ₃ C ₀	F ₄ C ₀	CK	F ₁ C ₁	F ₂ C ₁	F ₃ C ₁	F ₄ C ₁
有效穗数/(10 ⁴ ·hm ⁻²) Panicle number	85.04E	110.06BCD	116.06AB	103.05D	75.04F	107.03CD	114.05ABC	120.06A	81.04EF
主穗长 Ear length/cm	40.00C	42.25ABC	43.50AB	42.00ABC	33.50D	40.50C	42.50ABC	44.50A	41.00BC
单株穗重/g Ear weight per plant	8.58DE	11.50ABC	13.01AB	9.56CD	6.51E	11.02BCD	11.89ABC	13.86A	9.24CD
千粒重/g 1000-grain weight	9.72AB	9.76AB	9.56B	9.77AB	9.61B	9.63B	10.02A	9.57B	9.76AB

注:不同字母表示差异达 $P < 0.01$ 显著水平。
Note: Different letters indicate significant differences at $P < 0.01$.

2.6 产量与主要农艺性状及产量构成因素间的相关分析

对有效穗数、主穗长、单株穗重、千粒重和产量进行相关分析(表 4),结果表明:除千粒重外,有效穗数、单株穗重和主穗长均与产量达到极显著正相关,有效穗数与单株穗重和主穗长呈极显著正相关,

与千粒重呈不显著正相关;主穗长与单株穗重呈极显著正相关,与千粒重呈不显著正相关;单株穗重与千粒重呈不显著负相关。可以得出影响产量的主要因素是有效穗数,其次是单株穗重和主穗长,千粒重对产量的影响最低。说明有效穗数对糜子产量水平的提高发挥了十分重要的作用。

表 4 糜子产量与主要农艺性状及产量构成因素间的相关性分析

产量性状 Yield components	有效穗数 Panicle number	主穗长 Ear length	单株穗重 Ear weight per plant	千粒重 1000-grain weight
主穗长 Ear length	0.77 * *			
单株穗重 Ear weight per plant	0.84 * *	0.83 * *		
千粒重 1000-grain weight	0.05	0.01	- 0.08	
产量 Yield	0.88 * *	0.71 * *	0.80 * *	0.09

注: * 和 * * 分别表示相关性显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。
Note: * and * * indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels respectively.

3 讨 论

茎和叶鞘较大比例的干物质含量不仅为穗部提供了充足的物质基础,而且还是提高植株抗倒伏能力的物质基础^[22]。水肥耦合对产量和干物质运转影响的研究比较多,但是针对糜子的研究还比较少。李邵^[23]研究表明在供水吸力 7 kPa(W3)处理下,植株干物质积累量、叶片光合速率和产量的高低顺序为 F₂ > F₁ > F₃,F₃ 过高的施肥量抑制了植株的生长。本试验同样表明施用保水剂 C₁ 条件下,产量、净光合速率和叶面积的高低顺序为 F₃ > F₂ > F₁ > F₄。贾根良^[24]研究表明,糜子籽粒灌浆期(拔节后 34 ~ 48 d)叶片干物质的移动率最高,茎、鞘次之,根系的最低,说明糜子叶片、茎和鞘是籽粒充实的主要源器

官,其次是根系和壳。Divis^[25]认为,氮肥对干物质含量没有明显影响。本试验的结果表明不同处理叶片干物质的移动率均高于茎,而叶片转运率低于茎。另外,本试验仅对不同肥料梯度和保水剂耦合下糜子产量及干物质转运变化进行了研究,关于水肥耦合对糜子生理代谢和品质的影响、保水剂的梯度与肥料梯度的耦合情况和不同生育时期的水肥耦合情况还需进行进一步研究。

在适宜的肥料施用量范围内,施用保水剂比不施用保水剂的产量高,并且随着肥料施用量的提高,产量不断增加;肥料施用量超出一定范围,产量降低,并且施用保水剂比不施用保水剂减产幅度更大。如 F₄C₀ 比 F₄C₁ 产量高。糜子在施氮量 150 kg·hm⁻²、施磷量 120 kg·hm⁻²和施保水剂 60 kg·hm⁻²处理组

合下茎和叶的移动率最大,产量最高。叶面积、净光合速率的变化呈先上升后下降趋势,并且在抽穗期或者开花期达到最大值,这两个时期是糜子的关键时期,通过调节这两个时期的水肥管理,增大叶面积和增强净光合速率来促进有机物质的积累,不断提高单株穗重和主穗长,从而提高糜子产量。

参 考 文 献:

[1] 杨武德,石建国,魏亦文.现代杂粮生产[M].北京:中国农业科技出版,2001:50-82.

[2] 周丽娟,牟金明,谢志明,等.密度对糜子产量性状的影响[J].辽宁农业科学,2010,(1):17-19.

[3] 徐 岩,于海业.设施农业水肥耦合技术的研究进展[J].安徽农业科学,2011,39(5):2718-2721.

[4] 潘晓莹,武继承.水肥耦合效应研究的现状与前景[J].河南农业科学,2011,40(10):20-23.

[5] 胡凯军,赵桂琴,吴昌顺,等.麦类作物水肥耦合研究进展[J].中国农学通报,2011,27(12):7-12.

[6] 肖自添,蒋卫杰,余宏军.作物水肥耦合效应研究进展[J].作物杂志,2007,(6):18-22.

[7] 李国强,汤 亮,张文宇.不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J].作物学报,2009,35(12):2258-2265.

[8] 骆兰平,于振文,王 东.土壤水分和种植密度对小麦旗叶光合性能和干物质积累与分配的影响[J].作物学报,2011,37(6):1049-1059.

[9] 赵 斌,董树亭,张吉旺.控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J].作物学报,2010,36(10):1760-1768.

[10] 韩占江,于振文,王 东.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].作物学报,2010,36(3):457-465.

[11] 侯红乾,刘秀梅,刘光荣.有机无机肥配比比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):516-523.

[12] 阎 炬,施卫明.不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1):

151-157.

[13] 蒋会利,温晓霞,廖允成.施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):237-241.

[14] 曾 宇,雷雅丽,李 京.氮、磷、钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):146-153.

[15] 冯 鹏,王晓娜,王清邴.水肥耦合效应对玉米产量及青贮品质的影响[J].中国农业科学,2012,45(2):376-384.

[16] 郑志松,王晨阳,牛俊义,等.水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(4):788-793.

[17] 王宇先,李清泉,刘玉涛,等.密度和施氮量对糜子产量及综合性状的影响[J].中国农学通报,2012,28(36):188-194.

[18] 韦泽秀,梁银丽,井上光弘,等.水肥处理对黄土地壤养分、酶及微生物多样性的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1678-1684.

[19] 高庆荣,孙兰珍,刘保申.杂种小麦花后干物质积累转运动态和分配[J].作物学报,2000,26(2):163-170.

[20] 龚金龙,胡雅杰,龙厚元,等.大穗型杂交粳稻产量构成因素协同特征及穗部性状[J].中国农业科学,2012,45(11):2147-2158.

[21] 吴桂成,张洪程,钱银飞,等.粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究[J].中国农业科学,2010,43(2):266-276.

[22] 刘万代,尹钧,朱高纪.剪叶对不同穗型小麦品种干物质积累及籽粒产量的影响[J].中国农业科学,2007,40(7):1353-1360.

[23] 李 邵,薛绪掌,郭文善,等.水肥耦合对温室盆栽黄瓜产量与水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):376-381.

[24] 贾根良,张社奇,代惠萍,等.拔节后期糜子干物质积累及分配规律研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,37(4):86-90.

[25] Divis J. The dynamic production of dry matter silage maize in less favorable temperature conditions[J]. Fytotec – hnicka Rada, 1998, 15(1):61-69.

(上接第 122 页)

[4] 王铁行,王娟娟,张龙党.冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(1):7-14.

[5] Kay B D M, Fukuda. The importance of water migration in the measurements of the thermal conductivity of unsaturated frozen soils[J]. Cold Region Science and Technology, 1981,(5):95-106.

[6] 原国红.季节冻土水分迁移的机理及数值模拟[D].吉林:吉林大学,2006.

[7] 张 婷.人工冻土冻胀、融沉特性试验研究[D].南京:南京林业大学,2004.

[8] 齐吉琳,马 巍.冻土的力学性质及研究现状[J].岩土力学,2010,31(1):133-143.

[9] 张家懿.青藏高原多年冻土区细颗粒土的分类[M].北京:科学出版社,1983.

[10] 陈肖柏.土冻结作用研究近况[J].力学进展,1991,21(2):226-235.

[11] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2010.

[12] 王铁行,刘自成,卢 靖.黄土导热系数和比热容的实验研究[J].岩土力学,2007,28(4):655-658.

[13] 孙义刚.环境因素对膨胀土边坡内温度场、湿度场影响的模型试验研究[D].南宁:广西大学,2007.

[14] Li Ning, Chen Bo, Chen Feixiong. The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2000,31(3):199-205.

[15] 李述训,程国栋,刘继民.兰州黄土在冻融过程中水热输运实验研究[J].冰川冻土,1996,18(4):319-324.