

群体分布对夏大豆产量和水分利用效率的影响

杨国敏¹, 周勋波¹, 陈雨海^{1,*}, 孙淑娟¹, 杨荣光²

(1. 山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; 2. 山东省泰安市农业气象站, 山东泰安 271000)

摘要:在田间试验条件下研究了群体不同分布对夏大豆产量构成和水分利用的影响。夏大豆‘鲁豆 4 号’ (*Glycine max* cv. Ludou 4) 在同一群体密度 (3.09×10^5 株/hm²) 下设置 5 种分布方式, 即行距 × 株距分别为 A: 18 cm × 18 cm, B: 27 cm × 12 cm, C: 36 cm × 9 cm, D: 45 cm × 7.2 cm, E: 54 cm × 6 cm。结果表明, 群体分布影响夏大豆的产量、叶片水分特征和水分利用效率 (*WUE*)。A、B 处理的产量显著高于 D、E 处理 ($P < 0.05$), 其他处理间均无显著差异; 随着行距加大, 单株有效荚数、粒数及百粒重呈下降趋势; 叶片相对含水量 (*RWC*)、水势 (Ψ_w) 和渗透势 (Ψ_s) 随生育进程的推进呈整体下降趋势, 其中, A、B 处理 *RWC*、 Ψ_w 和 Ψ_s 的平均值均显著高于 D、E 处理, E 处理的 Ψ_w 在日变化的正午阶段明显低于其他处理; *WUE* 与行距呈负相关 ($R = -0.935^*$), 与产量呈正相关 ($R = 0.997^{**}$), 其中, A、B 处理的 *WUE* 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), D、E 处理极显著低于 B 处理 ($P < 0.01$)。夏大豆植株相对均匀分布的处理可改善产量构成因素及叶片水分状况, 进而形成较高的产量, 提高水分利用效率。

关键词:夏大豆; 群体分布; 产量构成; 水分特征; 水分利用效率

文章编号: 1000-0933 (2009) 12-6458-08 中图分类号: Q945 文献标识码: A

Effect of population distribution on yield and water use efficiency in summer soybean

YANG Guo-Min¹, ZHOU Xun-Bo¹, CHEN Yu-Hai^{1,*}, SUN Shu-Juan¹, YANG Rong-Guang²

1 College of Agronomy, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, China

2 Meteorological Experiment Station, Tai'an 271000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6458 ~ 6465.

Abstract: One approach to improve summer soybean yield and water use efficiency (*WUE*) is to identify appropriate crop population distribution pattern. The objective of this investigation was to investigate the effect of different population distribution patterns on yield, yield components, and *WUE* in summer soybean. The experiment was carried out from June to September in 2007 at Agronomy Experimental Station of Shandong Agricultural University. The summer soybean (*Glycine max* cv. Ludou 4) was grown under 5 distribution patterns with the same plant population (3.09×10^5 plant/hm²). The row spacing (cm) plant spacing (cm) was A: 18 cm × 18 cm, B: 27 cm × 12 cm, C: 36 cm × 9 cm, D: 45 cm × 7.2 cm, and E: 54 cm × 6 cm respectively. Yield, leaf water character, and water use efficiency were affected by the population distribution of summer soybean. The yields in case of A and B were significantly higher than in case of D and E ($P < 0.05$), while no significant differences were found among other treatments; The number of productive pod, seed per plant, and 100-seed weight declined gradually with the increase crop spacing; The yield had a positive correlation with seed number in main stem ($R = 0.994^{**}$) and 100-seed weight ($R = 0.893^*$); Leaf relative water content (*RWC*), water potential (Ψ_w), and osmotic potential (Ψ_s) declined gradually with crop growth, The average of *RWC*, Ψ_w and Ψ_s in case of A and B was all significantly greater than in case of D and E, Ψ_w in case of E was obviously lower than other treatments at noon in the daytime; The *WUE* was negatively correlated ($R = -0.935^*$) with the row spacing, but positively correlated ($R = 0.997^{**}$) with the yield. The *WUE* in case of A and B was significantly higher than other treatments ($P < 0.05$),

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2005CB121106)

收稿日期: 2008-08-20; 修订日期: 2009-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yhchen@sda.u.edu.cn

and that of D and E was significantly lower than in case of B ($P < 0.01$). These results indicate that the summer soybean population with relatively uniform distribution would improve the yield components and leaf water conditions, consequently develop high yield, and increase WUE.

Key Words: summer soybean; population distribution; yield components; water character; water use efficiency

作物生产是一个群体过程,是作物群体同生物环境和物理环境相互作用的结果^[1]。作物产量取决于群体大小和个体的生产特性^[2],兼顾个体与群体关系的基础是建立合理的群体分布,以充分利用环境资源。作物群体不同分布影响其群体结构,群体发育导致个体间的竞争,主要的竞争因子包括光照、水分、养分及杂草等^[3]。其中,水是作物生长过程中最重要的资源因子,是溶解、运送和分配养分的重要载体^[4]。夏大豆是需水量较多不耐干旱的作物,水分不仅影响大豆植株形态建成,而且还影响其生理过程,进而影响产量^[5]。

近年来,有关作物群体分布的研究多集中在种植密度及其行株距配置对作物的生长发育状况、生理生态特性及产量的影响上。周勋波^[4]等研究表明,群体分布能影响小麦的分蘖数量和单株小穗数,进而影响产量。刘忠堂^[6]研究表明,大豆窄行密植,由于植株分布均匀合理增加了绿色面积,改善了受光条件,提高了光能利用率,是大豆获得增产的生理基础。Ethredge^[7]和赵双进^[8]等研究认为,增加种植密度、缩小行距、扩大株距,有利于大豆产量潜力的表达。David^[9]和 Jason^[10]等研究发现,由于大豆生长类型、各地区环境条件的不同使实验结果产生较大差异。而对于一个特定的品种,在特定地区其适宜密度一般比较稳定。在确定的种植密度中,适宜行距、株距是调节大豆合理分布的重要手段和措施^[11,12]。目前,有关相同密度条件下的夏大豆群体分布对作物产量构成因素及水分利用等影响的研究国内外仍鲜见报道^[13,14]。本研究在密度相同的条件下,通过调整行株距,设计不同的群体分布类型,研究了夏大豆群体分布对产量及其构成因素和叶片水分特征的影响,探讨了通过调节作物群体分布提高水分利用效率的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料与设计

试验于 2007 年 6 月~9 月在山东农业大学农学实验站进行。试验地位于泰安市南邻(36°10'N,117°09'E),土壤类型为壤土,土壤耕层(0~20cm)有机质含量为 16.3g/kg,碱解氮 92.0mg/kg,速效磷 34.8mg/kg,速效钾 95.5mg/kg;0~60cm 土层的 pH 为 6.9,容重为 1.50g/cm³,田间体积持水量为 38.6%。1971~2006 年,平均年降雨量 701.6 mm,夏大豆生长的 6~9 月份恰为山东省的雨季,其间降雨量约占年降雨量的 60%~70%,一般年份为 420~490mm,2007 年 6~9 月降雨量为 539.1mm,比常年略高。试验期间降雨量见表 1。

试验地前茬作物为冬小麦,夏大豆供试品种为鲁豆 4 号。冬小麦收获后,于 2007 年 6 月 14 日按当地常规密度 3.09×10^5 株/hm² 进行人工点播。通过调整行株距,设置 5 种不同的群体分布类型,即行距×株距分别为 A:18cm×18cm,B:27cm×12cm,C:36cm×9cm,D:45cm×7.2cm,E:54cm×6cm。小区面积为 4 m×2.5 m,4 次重复,随机排列。生育期间不灌水。

表 1 2007 年 6~9 月降雨情况

Table 1 Monthly rainfall over the summer soybean growing seasons from June to September 2007

月份 Month	6	7	8	9	总量 Amount
降雨量 Precipitation(mm)	203.4	120.4	186.0	29.3	539.1

1.2 测定项目及方法

1.2.1 叶片相对含水量(RWC)

自 7 月 4 日起每 10d 测定 1 次。于 8:00~9:00 时取样,每个小区取 3 片复叶,每次均选取自真叶节起的第 7 片复叶,称其鲜重、饱和鲜重和干重。

1.2.2 叶片水势和渗透势

取样方法和测定时期同叶片相对含水量,用 Psypso 露点水势仪测定叶片水势(Ψ_w),用 Vapro5520 渗透压仪测定叶片渗透势(Ψ_s)。

1.2.3 叶片水势日变化

于 2007 年 8 月 19 日测定,自 8:00 ~ 17:00,每小时测定 1 次。

1.2.4 考种

每个小区取 10 株考种,自然风干后测株高、茎粗、分枝数、主茎及分枝有效荚数、主茎粒数和分枝粒数、百粒重、生物量等。

1.2.5 水分利用效率

于 2007 年 9 月 25 日收获,去除小区边行及两端的植株,保留代表性较强的中间群体,进行实收测产,测产面积为 2m^2 ,然后将其折算成每公顷产量,计算水分利用效率(WUE)

$$WUE = Y/Eta \quad (1)$$

式中, Y 为单位经济产量(kg/km^2), Eta 为作物耗水量(mm)。

$$\text{作物耗水量}(\text{mm}) \quad Eta = \Delta W + R - SI - Q \quad (2)$$

式中, ΔW 为土壤贮水量变化量(mm), R 为降雨量(mm), SI 为土壤水渗漏量(mm), SI 采用龚元石法^[15]计算

$$SI = W - FK \quad (3)$$

式中, W 为土壤贮水量, FK 为田间持水量, Q 为径流量(mm),根据实际观测发生径流情况,采用 SCS 径流模型^[16,17],其计算式为:

$$Q = (R - 0.2S)^2 / (R + 0.8S) \quad (4)$$

式中, S 为流域饱和储水量(mm),其计算式为:

$$S = (25400/CN) - 254 \quad (5)$$

式中, CN 为径流曲线数,为无量纲参数。

1.3 资料统计与分析

试验数据采用 EXCEL 作图,用 DPS 软件进行统计分析(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 夏大豆群体不同分布对产量及其构成因素的影响

表 2 是夏大豆的产量和考种结果,可以看出,群体分布明显影响了夏大豆的产量及产量构成因素。各处理的产量结果为 $B > A > C > D > E$,其中,A、B 处理显著高于 D、E 处理,其他处理间均无显著差异。产量构成因素中,主茎粒数 B 处理比 D、E 处理的值高 16.57%,17.96%,达极显著差异,A 处理显著高于 D、E 处理;分枝粒数 A、B、C 处理间无显著差异,A 处理显著高于 D 处理,A 和 B 处理极显著高于 E 处理。进一步回归分析表明,随着行距的增大,产量和产量构成因素呈下降趋势,其中,产量与行距二者呈显著负相关($R = -0.925^*$);主茎粒数与行距呈显著负相关($R = -0.881^*$),分枝粒数、百粒重与行距呈极显著负相关($R = -0.982^{**}$, -0.965^{**})。即随着行距加大、株距减小,产量降低的原因是主茎粒数、分枝粒数和百粒重的同步减小。此外,主茎粒数与产量呈极显著正相关($R = 0.994^{**}$),分枝粒数、百粒重与产量呈显著正相关($R = 0.945^*$, 0.893^*)。

群体分布能够明显影响主茎有效荚数,这也是各处理产量构成因素产生差异的原因。A、B 处理的主茎有效荚数均与 D、E 处理呈极显著差异,与 C 处理达显著差异;不同处理的分枝有效荚数及百粒重随着行距增大,呈减小的趋势。

群体分布对大豆营养生长也具有一定的影响。可以看出,A、B 处理的生物量显著高于 D、E 处理,随着行距加大,植株分布的均匀性变差,各处理的生物量逐渐下降,此外,植株的株高、茎粗和分枝数具有降低、变细

和减少的趋势,其中 A 处理的株高显著高于 E 处理。

整体来看,群体分布对大豆主茎的影响大于对分枝的影响,对生殖生长的影响大于营养生长的影响。

表 2 夏大豆群体不同分布对产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of different population distribution on yield and yield components in summer soybean										
处理 Treat- ment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem thickness (cm)	分枝数 Number of branch	主茎有 效荚数 Productive pod number of main stem	主茎粒数 Seed number of main stem	分枝有 效荚数 Productive pod number of branch	分枝粒数 Seed number of branch	百粒重 100 seed weight (g)	生物量 Biomass (kg/hm ²)	产量 Yield (kg/hm ²)
A	71.4aA	0.76aA	4.2aA	20.6aAB	38.1abAB	16.9aA	31.4aA	18.4aA	7745.68aA	2615.6aA
B	71.1abA	0.76aA	4.1aA	21.6aA	39.4aA	16.6aA	31.1abA	18.3aA	7784.26aA	2668.0aA
C	69.8abA	0.73aA	4.0aA	19.0bBC	34.8bcAB	16.1aA	29.5abAB	18.2aA	7129.01abA	2339.9abA
D	69.6abA	0.72aA	3.7aA	18.4bcC	33.8cB	15.4aA	28.3bcAB	17.8aA	7041.52bA	2265.2bA
E	69.1bA	0.68aA	4.0aA	17.9cC	33.4cB	15.6aA	26.6cB	17.7aA	6859.87bA	2195.5bA

同列不相同小写与大写字母分别表示 5% 和 1% 的显著水平;下同 Small and capital letter in the same column indicate significant at 0.05 and 0.01 level, respectively; the same below

2.2 夏大豆群体不同分布下叶片相对含水量的变化

叶片相对含水量(*RWC*)反应了叶片持水能力的强弱。随着生育进程的推进 *RWC* 整体呈下降趋势,期间受降雨的影响 *RWC* 有所回升(表 3)。在测定时期内,分布均匀的 A、B 处理 *RWC* 明显高于 D、E 处理,具有较好的叶片持水能力,另外, A、B、C、D、E 处理 *RWC* 的平均值分别为 88.16%、88.91%、87.52%、85.99% 和 85.41%,其中,以 B 处理为最高,B 处理的值比 D、E 处理分别高 3.39%、4.10%,达极显著差异。表明群体分布方式显著影响叶片相对含水量。

表 3 夏大豆群体不同分布对叶片相对含水量的影响

Table 3 Effects of different population distribution on relative water content of trifoliolate leaf in summer soybean								
处理 Treatment	相对含水量 Relative water content (%)							平均值 Mean
	07-04	07-14	07-24	08-03	08-13	08-23	09-02	
A	96.36a	87.32ab	99.26a	80.76bc	85.98a	83.47ab	83.99a	88.16bAB
B	96.52a	89.27a	99.61a	82.58a	85.67ab	84.43a	84.29a	88.91aA
C	95.64ab	87.27b	99.21a	81.19ab	84.96ab	82.90abc	81.48b	87.52cB
D	95.34b	86.20b	96.91b	79.94bc	83.46bc	81.03c	79.07bc	85.99dC
E	95.03b	85.64b	95.13cc	79.58c	82.29c	82.03bc	78.18c	85.41dC

2.3 夏大豆群体不同分布对叶片水势及渗透势的影响

叶片水势(Ψ_w)反应了植物水分亏缺的程度。如表 4 所示,叶片 Ψ_w 整体变化趋势与 *RWC* 相似。可以看出,夏大豆群体不同分布明显影响叶片 Ψ_w ,在整个生育时期内,A、B、C、D、E 处理 Ψ_w 的平均值分别为 -0.87、-0.85、-0.90、-0.95 MPa 和 -0.92 MPa,A、B 处理的 Ψ_w 处于较高水平,D、E 处理值较低,A、B 处理分别比 D 处理高 9.79%、12.23%,达极显著差异。

表 4 夏大豆群体不同分布对叶片水势的影响

Table 4 Effects of different population distribution on leaf water potential in summer soybean								
处理 Treatment	水势 Water potential (MPa)							平均值 Mean
	07-04	07-14	07-24	08-03	08-13	08-23	09-02	
A	-0.80a	-0.83ab	-0.63bc	-1.12ab	-0.81a	-0.88b	-1.00a	-0.87aAB
B	-0.82a	-0.80a	-0.59ab	-1.08a	-0.84ab	-0.83a	-0.97a	-0.85aA
C	-0.79a	-0.86bc	-0.54a	-1.14ab	-0.98c	-0.99c	-1.03ab	-0.90bB
D	-0.86a	-0.91c	-0.67c	-1.29c	-0.99c	-0.88b	-1.07bc	-0.96cC
E	-0.84a	-0.92c	-0.64bc	-1.20bc	-0.86b	-0.85a	-1.10c	-0.92bBC

渗透势(Ψ_s)反映了植物叶片对水势的调节能力。可以看出, Ψ_s 整体变化趋势同 Ψ_w (表5)。除7月4日和9月2日外,A、B处理的 Ψ_s 均显著高于D、E处理;在测定时期内,A、B、C、D、E处理 Ψ_s 的平均值分别为-0.97、-0.96、-1.02、-1.07 MPa和-1.07 MPa,以B处理为最高,其次为A、C处理,D、E处理最低,其中,E处理比A、B处理分别低10%、11%,达极显著差异。以上结果说明,不同群体分布方式下的叶片水势及渗透势具有显著差异,A、B处理的叶片水分状况优于其他处理。

表5 夏大豆群体不同分布对叶片渗透势的影响

Table 5 Effects of different population distribution on leaf osmotic potential in summer soybean

处理 Treatment	渗透势 Osmotic potential (MPa)							平均值 Mean
	07-04	07-14	07-24	08-03	08-13	08-23	09-02	
A	-0.88a	-0.85a	-0.77a	-1.19b	-0.98a	-1.00a	-1.13b	-0.97bA
B	-0.87a	-0.86a	-0.78a	-1.17a	-0.99a	-1.02b	-1.06a	-0.96aA
C	-0.87a	-0.90b	-0.80b	-1.24c	-1.12b	-1.10c	-1.14b	-1.02cB
D	-0.93b	-0.97c	-0.87c	-1.33d	-1.15c	-1.13d	-1.14bc	-1.07dC
E	-0.89ab	-0.98c	-0.93c	-1.25c	-1.16c	-1.11c	-1.16c	-1.07dC

2.4 夏大豆群体不同分布对叶片水势日变化的影响

测定结果表明(图1),叶片 Ψ_w 随时间变化而改变,表现为早晨和傍晚较高且比较接近,11:00~13:00最低,呈明显的“V”型特征。群体不同分布明显影响 Ψ_w 的日变化,A、B、C、D、E5种分布方式 Ψ_w 日变化的平均值分别为-0.87、-0.83、-0.89、-0.90 MPa和-0.92 MPa,其中,B处理比D、E处理分别高8.57%、10.62%,达显著差异。结果还表明,在日变化的正午阶段,E处理的值明显低于其他处理,且其日变幅最大,达0.40 MPa,而均匀分布的A、B处理日变幅较小,约为0.20 MPa。

2.5 夏大豆群体不同分布对水分利用效率的影响

从表6可以看出,群体分布可影响大豆的农田耗水量和水分利用效率。A处理的总耗水量显著低于其他处理,其他处理间无显著差异;B处理的水分利用效率(WUE)最高,显著高于C处理,极显著高于D、E处理,A处理的WUE显著高于D处理,极显著高于E处理;相关分析结果表明(表7),WUE与行距呈显著负相关($R = -0.935^*$),与产量呈极显著正相关($R = 0.997^{**}$),与总耗水量相关性不显著($R = -0.728$)。结果说明,在相同密度条件下,通过调整行株距,不仅能够提高产量,而且可以影响水分利用效率。

3 讨论

赵双进等认为,作物群体产量最高时,其单株在田间的分布应该处于最佳状态^[8]。这一推论得到了有关农业生产实践的证实^[18,19]。本研究通过调整夏大豆的行株距,在相同密度条件下,构建了个体状态不同的五种群体类型,研究表明,以B处理(27cm×12cm)的群体产量和水分利用效率为最高,其田间配置为个体的最佳状态。发现随着行距增大,株距减小,群体的均匀性变差,夏大豆产量降低。导致产量降低的直接原因是单株有效荚数、粒数及百粒重的下

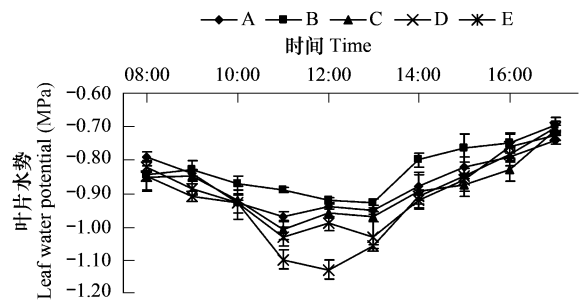


图1 夏大豆群体不同分布对叶片水势日变化的影响

Fig. 1 Effects of different population distribution on leaf water potential in the daytime in summer soybean

表6 夏大豆群体不同分布对水分利用效率的影响

Table 6 Effects of different population distribution on water use efficiency (WUE) in summer soybean

处理 Treatment	总耗水量 Total water consumption (mm)	水分利用效率 WUE (kg/(hm ⁻² ·mm))
A	439.59b	5.95aAB
B	446.47a	5.98aA
C	450.82a	5.19bABC
D	447.19a	5.06bBC
E	449.47a	4.88bC

降。群体分布对夏大豆生殖生长的影响大于对营养生长的影响,这与以往对小麦所做类似试验的研究结果不同^[4]。群体分布不仅影响小麦的生殖生长,而且明显影响小麦的分蘖特性、数量等营养生长。产生这种差异的原因可能是作物种类、生长季节乃至环境的差异。

表 7 夏大豆叶片水分状况、产量、水分利用效率和行距间的相关表型分析

Table 7 Pearson correlation coefficients among leaf water character, yield, water use efficiency and row spacing

项目 Item	RS	RWC	Ψ_w	Ψ_s	Y	Eta	WUE
RS	1						
RWC	-0.907 *	1					
Ψ_w	-0.798	0.905 *	1				
Ψ_s	-0.931 *	0.973 **	0.957 *	1			
Y	-0.925 *	0.942 *	0.907 *	0.976 **	1		
Eta	0.745	-0.449	-0.443	-0.582	-0.671	1	
WUE	-0.935 *	0.919 *	0.887 *	0.965 **	0.997 **	-0.728	1

RS:行距;RWC:相对含水量; Ψ_w :水势; Ψ_s :渗透势;Y:产量;Eta:耗水量;WUE:水分利用效率;RS: Row spacing RWC: Relative water content; Ψ_w : Water potential; Ψ_s : Osmotic potential; Y: Yield; Eta: Total water consumption; WUE: Water use efficiency

前人研究表明,叶片含水量、水势和渗透势可影响植物生长等生理、生化过程,与作物光合产物的分配及产量形成有密切关系^[20,21]。本研究相关分析表明(表 7),叶片含水量、水势和渗透势与产量呈显著或极显著正相关($R=0.942^*$, 0.907^* , 0.976^{**}),与水分利用效率呈显著或极显著正相关($R=0.919^*$, 0.887^* , 0.965^{**}),与以往的研究结论一致^[20,21]。本研究结果表明,群体分布影响叶片水分生理指标(表 7),行距与叶片含水量、水势和渗透势呈负相关($R=-0.907^*$, -0.798 , -0.931^*),均匀分布的群体具有较好的叶片水分状况,从而进一步影响植物蒸腾耗水和光合产物的积累等过程。另外,通过调整作物的行株距形成不同的群体冠层结构,可以影响作物的棵间蒸发^[13,22,23],从而导致了不同处理间产量及水分利用的差异。

作物的水分利用效率受作物种类、灌溉制度、栽培技术等多种因素影响^[24~27]。本研究发现,通过调整作物个体间的水平空间位置,构成不同的群体类型,能够明显影响水分利用效率,主要表现在,与不均匀分布群体相比,均匀分布的群体具有较高的产量和较低的耗水量,从而提高了作物的水分利用效率,这与周勋波的研究结论一致^[14]。因此,在作物品种、密度一定的情况下,通过构建合理的群体分布,能够实现节水之目的,从而为山东省的夏大豆节水栽培技术提供一定的理论依据。但是,群体分布影响耗水量和产量的深层次原因还需要进一步研究,如群体分布对作物蒸腾、土壤蒸发的过程以及蒸腾与蒸发比例的影响,群体分布对作物产量形成的生物学过程、生理和生态效应的影响等。

References:

- [1] Zhao S L, Li F M, Zhang D Y, Duan S S. Crop production is a population process. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 100—104.
- [2] Han B J, Chen Y, Meng K, Zhao D C. Study on crop's effective nutrient soil areas. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 711—716.
- [3] Liu X B, Jin J, Wang G H, Herbert S J, Hashemi A M. Influences of row-spacing on competing limited resources in soybean. *Soybean Science*, 2004, 23(8): 215—221.
- [4] Zhou X B, Sun S J, Chen Y H, Li Q Q, Yang G M. Relationship between water character and yield component under different distribution patterns of winter wheat population. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 119—122.
- [5] Li Y X. Shandong Soybean. In: Li Y X ed. *Shandong Soybean*. Jinan: Shandong Science Technology Press, 1999. 154—157.
- [6] Liu Z T. Study on technology for high yield of solid-seeded soybean. *Soybean Science*, 2002, 21(2): 117—121.
- [7] Ethredge W J, Ashley D A, Woodruff J M. Row spacing and plant population effect on yield components of soybean. *Agronomy Journal*, 1989, 81: 947—951.
- [8] Zhao S J, Zhang M C, Yang C Y, Wang W X. Effect of culture factors on growth and yield of soybean I. Effect of sowing date, density, space in row and plant space on yield. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 2002, 24(12): 29—32.

- [9] Jason K N, Emerson R S. Effect of row spacing and soybean genotype on mainstem and branch yield. *Agronomy Journal*, 2005, 97: 919—923.
- [10] David L H, Joshua P W. Plant population and row-spacing effects on early soybean production systems in the Mid-Atlantic USA. *Agronomy Journal*, 2002, 94:603—611.
- [11] Li S X, Wei J J, Liu J G, Gao Z J. Effects of planting with narrow line and proper density on canopy structure light penetration of soybean. *Xinjiang Agricultural Science*, 2005, 42(6):412—414.
- [12] Dong Z. Soybean yield physiology. In: Dong Z ed. *Soybean yield physiology*. Beijing: Agricultural Press of China, 1999. 135—137.
- [13] Lehrsch G A, Whisler F D, Buehring N W. Cropping system influences on extractable water for mono- and double- cropped soybean. *Agricultural Water Management*, 1994, 26 (2):13—25.
- [14] Zhou X B, Sun S J, Chen Y H, Yang G M, Yang R G. Planting patterns affects soil water and water use efficiency of summer soybean. *Soybean Science*, 2008, 27(2):283—287.
- [15] Gong Y S, Li B G. Using field water balance model to estimate the percolation of soil water. *Advance in Water Science*, 1995, 6 (1):16—21.
- [16] Liu X Z, Kang S Z, Liu D L, Zhang X P. SCS model based on geographic information and its application to simulate rainfall-runoff relationship at typical small watershed level in Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(5):93—97.
- [17] Bosznay M. Generalization of SCS curve number method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1989, 115(1):139—144.
- [18] Zhang W, Zhang H J, Wang H Y, Xie F T, Chen Z W. Effects of spacings and planting densities on agronomic traits and yield in high-oil soybeans. *Soybean Science*, 2005, 12(3):283—287.
- [19] Song Q J, Wu T X, Qiu J X, Gai J Y. Effect of soybean population and space on yield and other agronomic traits of different types of variety. *Soybean Science*, 1995, 14(1):40—46.
- [20] Philip E, Mustafa P. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in Northern Syria. *Plant and Soil*, 2005, 268:195—208.
- [21] Hu J C, Jiang D, Cao W X, Luo W H. Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (1): 63—67.
- [22] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, Chen S Y, Pei D. Effects of different row spacings on soil evaporation, evapotranspiration and yield of winter wheat. *Transactions of CSAE*, 2006, 22(3):22—26.
- [23] Chen S Y, Zhang X Y, Chen S L, Pei D, Zhang Q T. Effects of different row spaces on the soil evaporation and water use in winter wheat field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3):86—89.
- [24] Hu M Y, Zhang Z B, Xu P, Dong B T, Li W Q, Li J J. Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport in wheat under deficit irrigation. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10):1711—1719.
- [25] Wei Y X, Zhang Z X, Wang L M. Research on Temporal Fractal Features of Reference Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(10):6—9.
- [26] Liu Z J, Li B P, Li Y H, Cui Y L. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4):58—63.
- [27] Wang H. Influences of environmental factors on water use efficiency of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(6):584—590.

参考文献:

- [1] 赵松岭,李凤民,张大勇,段舜山.作物生产是一个群体过程.生态学报,1997,17(1):100~104.
- [2] 韩秉进,陈渊,孟凯,赵殿臣.作物有效土壤营养面积研究.土壤学报,2003,40(5):711~716.
- [3] 刘晓冰,金剑,王光华, Herbert S J, Hashemi A M. 行距对大豆竞争有限资源的影响.大豆科学,2004,23(8):215~221.
- [4] 周勋波,孙淑娟,陈雨海,李全起,杨国敏.冬小麦种群不同分布方式下水分特征与产量构成关系.水土保持学报,2007,21(2):119~122.
- [5] 李永孝.山东大豆.见:李永孝主编.山东大豆.济南:山东科学技术出版社,1999. 154~157.
- [6] 刘忠堂.大豆窄行密植高产栽培技术的研究.大豆科学,2002,21(2):117~121.
- [8] 赵双进,张孟臣,杨春燕,王文秀.栽培因子对大豆生长发育及群体产量的影响播期 I.密度、行株距(配置方式)对产量的影响.中国油料作物学报,2002,24(12):29~32.
- [11] 李生秀,魏建军,刘建国,高振江.窄行密植对大豆群体冠层结构及光分布的影响.新疆农业科学,2005,42(6):412~414.
- [12] 董钻.大豆产量生理.见:董钻主编.大豆产量生理.北京:中国农业出版社,1999. 135~137.
- [14] 周勋波,孙淑娟,陈雨海,杨国敏,杨荣光.夏大豆不同种植方式对土壤水分及水分利用效率的影响.大豆科学,2008,27(2):283~287.

- [15] 龚元石,李保国. 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量. 水利科学进展, 1995,6(1):16~21.
- [16] 刘贤赵,康绍忠,刘德林,张晓萍. 基于地理信息的 SCS 模型及其在黄土高原小流域降雨-径流关系中的应用. 农业工程学报,2005,21(5):93~97.
- [18] 张伟,张惠君,王海英,谢甫绋,陈振武. 株行距和种植密度对高油大豆农艺性状及产量的影响. 大豆科学,2005,12(3):283~287.
- [19] 宋启建,吴天侠,邱家驯,盖钧镒. 夏大豆群体结构对不同类型品种产量及农艺性状的影响. 大豆科学,1995,14(1):40~46.
- [21] 胡继超,姜东,曹卫星,罗卫红. 短期干旱对水稻叶水势、光合作用及干物质分配的影响. 应用生态学报, 2004,15(1):63~67.
- [22] 孙宏勇,刘昌明,张喜英,陈素英,裴冬. 不同行距对冬小麦麦田蒸发、蒸散和产量的影响. 农业工程学报,2006,22(3):22~26.
- [23] 陈素英,张喜英,陈四龙,裴冬,张清涛. 种植行距对冬小麦田土壤蒸发与水分利用的影响. 中国生态农业学报,2006,14(3):86~89.
- [24] 胡梦芸,张正斌,徐萍,董宝娣,李魏强,李景娟. 亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究. 作物学报,2007,33(10):1711~1719.
- [25] 魏永霞,张忠学,王立敏. 东北半干旱抗旱灌溉区有限供水对大豆水分利用效率的影响研究. 灌溉排水学报,2006,25(10):6~9.
- [26] 刘增进,李宝萍,李远华,崔远来. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究. 农业工程学报,2004,20(4):58~63.
- [27] 王慧. 环境因子对冬小麦水分利用效率的影响. 生态学报,1996,16(6):584~590.