

# 黄土塬区不同玉米品种间作的竞争力表现\*

王小林<sup>1,2</sup> 张岁岐<sup>1,3\*\*</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 杨凌 712100)

**摘要** 为探明不同玉米品种间作下植株对资源的竞争力变化,以及竞争对植株生长和产量的影响,本文利用紧凑型玉米品种“郑单 958”和半紧凑型玉米品种“沈单 16 号”,在两个密度(低密度: 45 000 株·hm<sup>-2</sup>, 高密度: 75 000 株·hm<sup>-2</sup>)条件下进行隔行间作田间试验,测定了不同玉米品种茎叶干物质积累量、株高、穗位高度和根系干物质量及收获期产量和产量构成因素的变化。研究表明:随着生育期的延伸,玉米茎叶比呈先增加而后逐渐稳定的变化趋势;茎叶比在营养生长阶段呈明显增长,灌浆期后间作竞争明显降低了茎叶比;低密度间作茎叶比有所增加,高密度间作茎叶比显著降低,“郑单 958”表现突出。间作栽培下根冠比随间作密度的增加显著降低,低密度间作处理之间根冠比差异显著。穗位比、收获指数随间作密度的增加而增加,穗位比在低密度间作时显著低于单作,高密度间作时显著增加,“沈单 16 号”变化较明显;间作收获指数较单作明显增加,且随间作密度的增加而增加,“郑单 958”变化不稳定,低密度间作时较单作显著增加,“沈单 16 号”具有稳定而明显的变化。品种间作竞争可以改变间作种群的产量构成,穗长和穗粗明显减小,秃尖长明显缩短。竞争系数具有品种差异,“郑单 958”强于“沈单 16 号”。说明品种间作竞争具有提高玉米产量的能力,有效利用竞争效应,有可能实现高效利用资源和发掘玉米增产潜力。

**关键词** 黄土塬区 玉米 品种间作 竞争 干物质分配 竞争系数

中图分类号: S314 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)11-1403-08

## Competitiveness of intercropped maize cultivars in the Loess Plateau, China

WANG Xiao-Lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Sui-Qi<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources; State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract** The competitive expression of intercropped maize cultivars with different characteristics for water, nutrient, dry matter partitioning and yield factors were studied in an experiment in the Loess Plateau region of China. To determine the competitiveness of intercropped maize cultivars with regards to growth and yield formation, two maize cultivars (compact cultivar “ZD958” and semi-compact cultivar “SD16”) were intercropped in alternative rows under two densities (45 000 plants·hm<sup>-2</sup>, 75 000 plants·hm<sup>-2</sup>) conditions. The dynamic changes in dry matter of different plant organs, plant height, ear height, grain yield and yield components were investigated. The results showed that stem to leaf ratio (SLR) increased during vegetative growth and decreased after grain filling due to competition between cultivars. Intercropping increased SLR under low planting density, while significant decreased SLR under high planting density. This was more evident under high density intercropping, especially for “ZD958”. Root to shoot ratio (RSR) limited redundant root growth, thereby saved resources. The RSR decrease was clear under intercropped treatments with significant differences between the low and high intercropping density. Two different cultivars with special morphology under intercropping conditions had root and canopy structures favorable for higher grain yield. With increasing intercropping density, spike to height ratio (SHR) and harvest index (HI) significantly increased. Meantime the decrease in SHR under low density of intercropping was more obvious than that of monocropping. Also SHR increased markedly under high intercropping density. The changes for “ZD958” were especially obvious. These evidences showed that intercropping improved the productive potential of

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100504)和高等学校学科创新引智计划项目(B12007)资助

\*\* 通讯作者: 张岁岐(1966—), 男, 博士生导师, 研究员, 研究方向为植物水分生理生态。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

王小林(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为植物水分生理生态学。E-mail: amon8304@gmail.com

收稿日期: 2013-03-21 接受日期: 2013-07-09

maize. The structural factors of yield varied with significant decreases in spike length and thickness. However, the obvious shrinking of the length of bald needles suggested high grain pollination ratio. Finally, the analysis of competitive ratio (CR) showed that "ZD958" was more competitive than "SD16" under intercropping conditions. However, both "ZD958" and "SD16" showed distinct features which were mutually complementary for resources utilization. Intercrop competition was therefore an effective cultivation strategy for high productivity and beneficial competition among cultivars that increased water and nutrient use efficiency.

**Key words** Loess Plateau, Maize, Cultivar intercropping, Competition, Biomass distribution, Competitive rate

(Received Mar. 21, 2013; accepted Jul. 9, 2013)

黄土塬区土壤水分、养分是限制作物正常生理活动的主要环境因子。利用作物品种间的竞争可以改善作物对资源的利用能力<sup>[1]</sup>。黄土高原地处半干旱地区,主要限制性资源是水分<sup>[1-2]</sup>,作物种群内、个体之间对有限水资源存在竞争<sup>[3]</sup>,且竞争是塑造植物体形态和生活史的动力因素之一<sup>[4-5]</sup>。竞争是生物个体利用共享的有限资源形成个体最佳适合度的相互作用现象<sup>[6]</sup>。对水资源的竞争必然形成较强的群体特异性,如具有庞大根系或较高根冠比<sup>[3]</sup>。植物地上和地下竞争的重要性是随环境发生转变的,两者之间的权衡赋予植物更强的环境适应性<sup>[1]</sup>。

个体生长因环境条件发生变化,减小个体将养分、水分向营养器官的分配比例,增大资源向繁殖体部位运输的比例<sup>[7]</sup>,是作物竞争作用的体现。竞争系数可以用于描述竞争效应,也就是竞争能力的数量表现<sup>[5]</sup>。将作物的竞争能力数量化,有利于了解作物的竞争习性特征。根、茎、叶等营养器官的生长特征,对籽粒中各种有机物的合成、运送、代谢调节起着重要作用,同时又是水分、养分、光能等资源的消耗者<sup>[7]</sup>。所以,竞争不仅会影响作物根冠比、茎叶比和产量,甚至可以制约作物的有机物同化能力和资源利用效率,是作物生产很重要的影响因素。

在资源有限的条件下,较强的竞争能力是以牺牲籽粒产量为代价的<sup>[7]</sup>。因此,作物品种竞争能力与生产能力之间就形成了一种负相关关系<sup>[7-8]</sup>。而且,植株较强的竞争能力依赖于庞大的营养体<sup>[3]</sup>,有利的营养生长(根、茎、叶)可以更多地获取水、肥、光资源<sup>[9]</sup>。刘琳<sup>[1]</sup>在对小麦的研究中认为,根系生长导致营养体形成具有两种极端,竞争能力达到最大或群体产量达到最大。这种极端性的竞争会导致营养器官生长冗余的产生,是植物适应自然胁迫环境、植物竞争环境及植物群落功能最大化的必然结果。植株个体总生物量的增加有利于产量增加,但并非一味追求生物量的最大化,有时根长、株高及叶面积等性状的增加对产量增加具有副作用,会更多地占有水分和养分。所以,减少生长冗余,将有限的资源投入到目标器官的生产中意义重大<sup>[7]</sup>。籽粒产量是由干物质生产的绝对量和在干物质生产量中籽粒

所占的比率(收获指数)共同决定的<sup>[9]</sup>,实现收获指数的最大化,才是提升产量的有效途径之一。

优化玉米间套作中器官生长的合理分配,形成科学的群体营养结构,为籽粒生长节约资源,提供有机物支撑,是当今玉米栽培研究的热点之一。唐永金<sup>[10]</sup>指出,间种栽培能使不同作物多层次利用地上的光能资源和地下的水分和养分资源,改善作物群体结构,增强群体抗逆性和抗病性<sup>[11-12]</sup>,且不同品种具有不同的阶段发育特性和资源竞争力,间作模式有利于增强群体防御机制<sup>[12-13]</sup>,提高光、热、水、肥、土、气等自然资源的利用效率<sup>[14]</sup>,从而提高间作复合群体的产量。史振声等<sup>[13]</sup>研究认为,间作群体光合速率的提高使空间结构优势转化为生理优势,叶面积及叶绿素含量的增加表明间作群体结构更利于光合作用<sup>[15]</sup>。作物的适应性和竞争力表现在生长发育上即为根与冠、茎与叶、穗位高度与株高、收获指数以及竞争系数的不同生长和变化。较高大的植株有相对较高的光竞争能力,而庞大的根系有相对较高的水分竞争能力<sup>[3]</sup>,不同的营养器官生长配比,是作物自身竞争力表现的直接反应。

以往研究多以提高养分利用效率或群体结构单方面出发,而利用群体竞争的最终表现来分析竞争力差异的研究较少。本试验以竞争理论为基础,利用玉米品种间作竞争对个体生长发育过程的影响,检测植株个体根、茎、叶干物质的分配,群体冠层和根系结构的变化,探明光合产物的有效利用和合理积累规律,更加深刻地了解间作对玉米品种竞争力的影响,为间作竞争的增产机理研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在中国科学院水利部水土保持研究所武生生态农业试验站进行。试验站位于黄土高原中南部陕甘交界处,陕西省长武县洪家镇王东村(107°40'30"E, 35°12'30"N),海拔 1 200 m,属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候,光照充足,昼夜温差较大;年均降水量 584 mm,且多集中于 6—9 月份;年均气温 9.1 °C,无霜期 171 d,作物种植多为一年 1 季;地下水埋深 50~80 m,属典型旱作农业区;

地貌属高原沟壑区, 塬面和沟壑两大地貌单元各占 35% 和 65%; 地带性土壤为黑垆土, 土体结构均匀疏松, 0~200 cm 土壤容重均值为  $1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; 土壤有机质含量为  $11.582 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $0.802 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $52.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.679 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $11.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $154.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 是黄土高原沟壑区典型性土壤。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 品种选择与特性

试验选用的紧凑型品种“郑单 958”和半紧凑型品种“沈单 16 号”, 是黄土塬区普遍种植、株型不同的高产玉米品种。两个品种生育期相近, 适应范围广, 耐密植, 抗倒性强, 高抗病性。适宜种植密度“郑单 958”为  $6.00\sim 8.25 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ , “沈单 16 号”为  $5.25\sim 6.75 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

### 1.2.2 试验设计

试验于 2011 年 4—10 月进行。“郑单 958”(A) 和“沈单 16 号”(B) 进行两个密度层次(1 代表密度  $4.5 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 2 代表密度  $7.5 \text{ 万株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 的隔行间作试验。不同密度、不同品种的间作为主试验, 共 4 个处理(A1B1, A2B1, A1B2, A2B2), 3 次重复, A 与 B 间作行比 1:1, 采用 50 cm 等行距覆膜种植; 不同品种、不同密度单作为对照试验, 4 个处理(CK-A1, CK-A2, CK-B1, CK-B2), 50 cm 等行距覆膜种植, 小区面积为  $15 \text{ m}^2$ , 不同试验处理采取随机区组试验。播前施用底肥 N  $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$   $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$   $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  并结合有机肥(牛粪)  $1500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 各处理于拔节期雨后追施 N  $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其余操作皆于当地农户相同。

### 1.2.3 产量构成指标的测定

收获时, 各间作处理下两个玉米品种分别采取连续植株 10 棵成熟穗(去除边际效应), 风干后测定穗长、穗粗、秃尖长和穗行数, 然后分别剥下籽粒, 测定穗粒数和产量。间作处理的产量计算依据公式: 间作处理产量=(A 产量+B 产量) $\times 50\%$ 。

### 1.2.4 茎叶比、穗位比和根冠比的测定

分别于大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、乳熟期和蜡熟期, 不同处理每个重复随机选择代表性植株 3 棵, 将叶片、茎秆分别采集, 于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青 0.5 h, 并在  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘至恒重, 称量统计, 计算茎叶比。在收获前, 分别于不同处理每个重复随机选择两间作品种代表性植株 3 棵, 测定株高、穗位高度; 采用土钻取根法, 各间作处理内两玉米品种 100 cm 深度每 10 cm 为一层分别取根系样品, 清洗, 烘干, 称量; 地上部干物质在同样的温度下, 烘干、称重。

$$\text{茎叶比}(SLR)=\text{茎干重}/\text{叶干重} \quad (1)$$

$$\text{穗位比}(SHR)=\text{穗位高度}/\text{株高} \quad (2)$$

$$\text{根冠比}(RSR)=\text{根系干重}/\text{地上部干重} \quad (3)$$

$$\text{收获指数}(HI)=\text{籽粒产量}/\text{地上部干重} \quad (4)$$

竞争系数:

$$CR_a = \left( \frac{LER_A}{LER_B} \right) \left( \frac{Z_{Bi}}{Z_{Ai}} \right) \quad CR_b = \left( \frac{LER_B}{LER_A} \right) \left( \frac{Z_{Ai}}{Z_{Bi}} \right) \quad (5)$$

土地当量比:

$$LER_A = \frac{Y_{Ai}}{Y_A} \quad (6)$$

$$LER_B = \frac{Y_{Bi}}{Y_B} \quad (7)$$

式中,  $CR_{a/b}$  为竞争系数,  $LER_{A/B}$  为土地利用当量比,  $Z_{Ai/Bi}$  为间作种比例。

## 1.3 数据分析

表格中数据皆为平均值 $\pm$ 标准误, 数据整理采用 Microsoft excel 2003; 将不同间作组合数据分别与单作进行对比, SPSS 17.0 进行单因素显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 品种间作对玉米茎叶比的影响

茎叶比(SLR)作为植株营养生长阶段同化物分配规律的指标, 可用来描述作物生长过程中有机物积累分配的变化。从表 1 可知, 不同间作处理下, 玉米 SLR 各生育期表现规律相似, 呈现低密度间作增加 SLR, 高密度间作显著减小 SLR。低密度间作在抽雄期的 SLR 较单作显著增加, 且低密度间作大于高密度间作; 高密度间作时, 相互竞争效应促使间作 SLR 显著小于单作。各处理 SLR 最大值多数出现在灌浆期和乳熟期, 随着生殖生长转为主要的生命活动, SLR 逐渐降低, 间作与单作的 SLR 差异逐渐减小消失; 间作竞争对“郑单 958”茎叶比的影响更加显著; “沈单 16”在高密度间作栽培下变化较明显。

### 2.2 品种间作竞争对玉米穗位比、根冠比的影响

品种间作对玉米穗位比(SHR)的影响因种植密度不同而不同(表 2), 穗位高度随间作密度的增加而增加。低密度间作 SHR 降低, 品种“沈单 16 号”间作 SHR 显著低于单作, “郑单 958”SHR 随“沈单 16 号”间作密度的增加而明显增加; 高密度间作竞争下, SHR 较单作有所增加, 且随密度增加差异程度呈增加趋势, 同样“沈单 16”间作显著高于单作; 根冠比(RSR)受养分、光线和竞争的影响, RSR 可以反映作物养分吸收与利用的能力。玉米根冠比在间作模式下较小(表 2), 随间作密度增加 RSR 显著降低; 低密度间作模式之间 RSR 具有显著差异, 较单作无显著变化; 对应间作品种密度增加会显著降低另一品种 RSR; 高密度间作模式之间无显著差异, 较单作都

表 1 不同间作处理下玉米茎叶比的生育期变化

Table 1 Changes of maize stem to leaf ratio at different growth stages under different intercropping treatments

处理 Treatment	大喇叭口期 Flare opening stage	抽雄期 Teaseling stage	灌浆期 Filling stage	乳熟期 Milk stage	蜡熟期 Waxy stage
A1B1-A1	0.92±0.01aA	1.46±0.03aA	2.27±0.04A	2.27±0.14a	2.30±0.06a
A1B2-A1	0.82±0.06aA	2.49±0.04bB	2.62±0.06B	2.21±0.10a	2.01±0.12ab
CK-A1	1.06±0.04bB	1.44±0.05aA	1.81±0.05C	2.36±0.07a	1.80±0.09b
A1B1-B1	0.75±0.03a	1.69±0.15aAB	2.01±0.04a	2.72±0.22aA	1.66±0.11a
A2B1-B1	0.81±0.01a	1.89±0.02bA	2.17±0.04a	2.57±0.07aA	1.63±0.07a
CK-B1	0.86±0.02a	1.48±0.03cB	1.98±0.09a	1.96±0.05bB	1.64±0.05a
B1A2-A2	0.63±0.02A	1.60±0.02aA	1.82±0.01aA	2.34±0.08a	1.58±0.08a
B2A2-A2	0.63±0.03A	1.88±0.08bB	1.68±0.05bA	2.17±0.06a	1.50±0.05a
CK-A2	0.81±0.02B	1.60±0.04aA	2.00±0.02cB	2.23±0.39a	1.92±0.13b
B2A1-B2	0.65±0.03A	1.54±0.04aA	1.82±0.03aA	1.99±0.02ab	1.74±0.06A
B2A2-B2	0.97±0.04B	1.75±0.05bB	2.05±0.08bB	1.78±0.07aA	1.78±0.10A
CK-B2	0.86±0.02B	1.84±0.07bB	2.17±0.03bB	2.40±0.03bB	2.71±0.16B

处理栏 A 指“郑单 958”, B 指“沈单 16 号”, 1 代表密度 4.5 万株·hm<sup>-2</sup>, 2 代表密度 7.5 万株·hm<sup>-2</sup>, A1B1-A1、A1B2-A1 和 CK-A1 为一个处理组, 分别表示两品种不同间作模式下及单作下的“郑单 958”, 其种植密度为 4.5 万株·hm<sup>-2</sup>, 其他处理相同; 不同小、大写字母分别表示一个处理组不同处理间在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平差异显著; 下同。“A” represents “ZD958”, “B” represents “SD16”, “1” represents planting density of 45 000 plants·hm<sup>-2</sup>, and “2” represents planting density of 75 000 plants·hm<sup>-2</sup>. “A1B1-A1”, “A1B2-A1”, “CK-A1” is a group of three treatments, and represent intercropped and monocropped “ZD958”, and its planting density is 45 000 plants·hm<sup>-2</sup>, the others had the same meaning. Different small and capital letters within the group of three treatments indicate significant differences at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels among treatments. The same below.

表 2 不同间作处理对玉米穗位比、根冠比的影响

Table 2 Effects of different intercropping treatments on the spike height to plant height rate and root to shoot rate of maize

处理 Treatment	穗位高 Spike height (cm)	株高 Plant height (cm)	穗位比 Spike height to plant height rate	根系干重 Root biomass (g)	茎秆干重 Stem biomass (g)	根冠比 Root to shoot rate
A1B1-A1	95.13	240.27	0.40±0.01a	18.62	368.84	0.05a
A1B2-A1	98.27	233.93	0.42±0.01a	15.18	348.17	0.04b
CK-A1	96.00	231.83	0.41±0.01a	19.85	384.53	0.05a
A1B1-B1	82.80	243.07	0.34±0.01a	18.19	400.58	0.05a
A2B1-B1	97.33	263.17	0.37±0.00ab	15.84	364.30	0.04b
CK-B1	104.47	254.00	0.41±0.01b	20.17	416.54	0.05a
A2B1-A2	102.57	241.67	0.42±0.02a	8.82	319.10	0.03a
A2B2-A2	113.07	248.60	0.45±0.02a	9.57	301.64	0.03a
CK-A2	100.83	234.50	0.43±0.00a	11.17	319.06	0.04b
A1B2-B2	105.93	249.17	0.43±0.01a	10.24	315.18	0.03a
A2B2-B2	98.40	244.57	0.40±0.01ab	8.88	314.95	0.03a
CK-B2	95.27	255.67	0.37±0.01b	11.46	304.14	0.04b

呈显著降低; 品种间  $RSR$  无显著差异性。间作竞争抑制根系的冗余生长, 根冠合理分配, 有利于有机物的合成、积累。

### 2.3 品种间作对玉米产量构成和收获指数的影响

品种间作竞争对玉米穗长、穗粗和秃尖长都有明显作用(表 3), 间作竞争会减小穗长、穗粗, 但与间作密度无显著关联; 间作栽培可有效缩短秃尖长, “郑单 958”和“沈单 16 号”都有明显变化, “沈单 16 号”秃尖长随种植密度增加而增加, 而品种间作明显缩短了秃尖长度, 但随间作密度的增加, 秃尖长度无显著性变化; 穗行数随间作密度的增加逐渐减小, 但较单作差异不显著; 随穗粗的减小, 穗行数表现相同的降低规律; 间作处理行粒数较单作呈减小趋

势, 与间作密度无显著关联, 低密度间作“沈单 16 号”行粒数较单作差异明显, 高密度间作“郑单 958”穗粒数较单作差异明显; 在低密度间作产量增加不明显, 高密度间作产量显著增加。

间作竞争主要通过影响作物群体的地上部与地下部的生长变化, 来促进作物对光能和养分的高效利用(表 3)。间作明显提高了玉米的收获指数( $HI$ ), 随间作密度的增加  $HI$  呈缓慢增长; 低密度间作  $HI$  较单作增加明显; 不同密度间作下, “沈单 16 号”表现更加突出, 品种间作显著提高  $HI$ , 高密度间作增幅最大; “郑单 958”的  $HI$  变化不稳定, 低密度间作增长明显, 高密度时表现为  $B1A2-A2 < CK-A2 < A2B2-A2$ , 差异显著。

表 3 不同间作处理下玉米的产量结构和收获指数  
Table 3 Yield structure and harvest index of maize under different intercropping treatments

处理 Treatment	穗长 Ear length (cm)	穗粗 Ear thick (cm)	秃尖长 Barren tip length (cm)	穗行数 Ear rows	行粒数 Grains per row	产量 Yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	收获指数 Harvest index
A1B1-A1	19.52±0.23a	57.83±0.91a	0.35±0.29a	16.13±0.46a	116.67±2.54a	91 143.0a	1.46a
A1B2-A1	18.76±0.28a	57.87±0.97a	0.19±0.10b	16.20±0.53a	115.43±2.48a	87 840.0a	1.63b
CK-A1	19.51±0.81a	58.50±1.14a	0.42±0.27a	16.13±0.12a	118.03±5.33a	90 882.0a	1.31a
A1B1-B1	22.41±1.00a	60.10±2.43a	1.37±0.27b	16.10±0.95a	125.37±3.11a	91 507.5a	1.46a
A2B1-B1	21.35±0.86a	59.10±0.78a	1.92±0.85a	15.80±0.35a	118.43±8.31b	84 132.0a	1.55a
CK-B1	21.96±0.53a	58.67±1.10a	1.87±0.41a	16.10±0.66a	120.47±2.61ab	91 134.0a	1.22b
A2B1-A2	18.24±0.25ab	56.20±0.26a	0.60±0.10b	16.50±0.10a	109.57±0.55ab	140 737.5b	1.55a
A2B2-A2	17.69±0.55a	56.20±0.92a	0.57±0.27b	16.27±0.31a	108.10±1.14a	124 942.5a	2.00b
CK-A2	18.89±0.39b	56.50±0.60a	0.70±0.09a	16.77±0.06a	114.97±2.48b	141 345.0b	1.80c
A1B2-B2	20.09±0.41a	57.47±1.42a	2.18±0.68a	15.60±0.40a	110.23±3.90a	131 670.0a	1.63a
A2B2-B2	20.20±0.78a	55.77±3.61a	2.35±0.66a	15.86±0.12a	112.60±2.27a	137 760.0a	2.00b
CK-B2	20.26±0.85a	55.67±0.67a	2.47±0.41a	15.73±1.10a	110.37±3.26a	121 180.0b	1.52a

收获指数为两个品种间作栽培(A1B1, B2A1, A2B1, A2B2)整体的数据结果。The harvest index is calculated with the data of two intercropping crops of the whole cultivation systems (A1B1, B2A1, A2B1, A2B2).

利用间作与单作的相对产量, 结合间作比例推算出竞争系数(CR), 用于描述作物整个生育期过程中的竞争结果(图 1)。不同生育期不同玉米品种 CR 表现不同, 从大喇叭口期、抽雄期到灌浆期两个品种 CR 差异逐渐增加, 灌浆期 CR 最大; 乳熟期到成熟期 CR 逐渐降低, 趋于平缓; 竞争力随密度的增加逐渐减小, 在 A1B2 和 A2B1 间作模式下, “郑单 958”和“沈单 16 号”表现出激烈的竞争效应, 灌浆期和乳熟期 CR 最大; 而高密度间作竞争强度在灌浆期之前较大, 后期平稳缓和, “郑单 958”竞争力较强于“沈单 16 号”; 不同密度间作, 低密度品种具有竞争优势。

的生态过程, 在植物特征组分变化中起着决定性作用<sup>[16]</sup>。间作竞争中, 作物个体形态及群体特征都会发生相应的变化, 种内和种间都会出现植株间的相互抑制作用, 主要表现在植物地上部分和地下部分对可利用资源和空间的竞争<sup>[17]</sup>。作物的根、冠大小可明显调控其对水分的利用<sup>[18]</sup>, 最终影响产量的形成。强大的根系是玉米获得高产的生理基础, 关键在于根系生长与地上部生长的相互协调<sup>[19]</sup>。茎叶比可以反映植株生长过程中养分的转化和积累规律, 营养生长进入生殖生长过程中, 叶片光合产物会不断向茎秆和籽粒转移<sup>[20]</sup>, 施氮、灌溉、密度都对生物量和茎叶比有显著影响<sup>[21]</sup>。本试验结果表明, 低密度间作会增加茎叶比, 茎秆较粗, 生长空间充足, 相互竞争效应较弱; 而高密度间作, 种间种内竞争

### 3 讨论

植物竞争是农业和自然生态系统一个非常重要

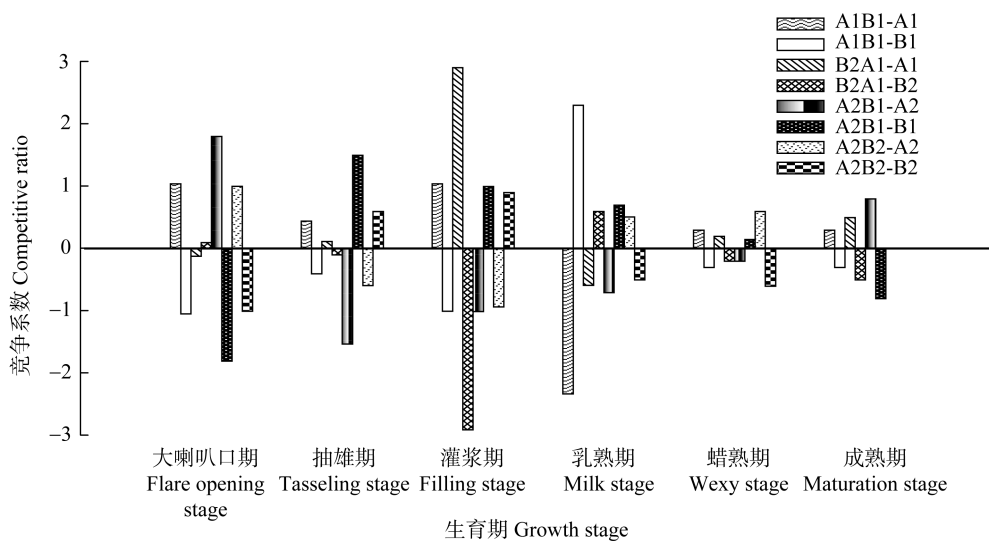


图 1 不同间作处理玉米各生育期竞争系数的变化

Fig. 1 Variation of competitive index at different growth stages of maize under different intercropping treatments

都相对较激烈,导致茎叶比减小,叶片相对干物质质量较大,有利于有机物的同化。进入生殖阶段后,茎叶比会继续降低,茎秆干物质积累减少,相对提高了有机物向籽粒运输的比率。

竞争是不同植物间对限制性资源需求的一种相互关系,竞争强度与资源的供需比和作物本身性能紧密相关<sup>[17]</sup>。养分资源的吸收同时受到外界生长环境的影响<sup>[22-23]</sup>。黄迪等<sup>[24]</sup>研究认为,在一定土壤养分供给内提高植株冠层的大气湿度,能增加植株干重。王宗明等<sup>[25]</sup>试验证明水分结合施磷水平,对玉米根系生长有明显的促进作用。而且随水分条件的改善,玉米的根冠比明显增加,氮、磷对玉米根冠比有不同的影响<sup>[24-25]</sup>。不同施肥时期也会对玉米生长和产量形成造成影响<sup>[26]</sup>。具有耐性,强大的根系活力,合理的根冠生长,都是玉米提高产量的保障<sup>[27]</sup>。不同密度处理下,玉米单株根系的根长、根干重、根体积、根系表面积以及根系活跃吸收面积,都表现出不同的变化规律<sup>[19]</sup>,根冠协调生长尤为重要。本试验表明,间作下根冠比明显降低,且随间作密度的增加根冠比降低幅度也增加。地上部生物量与根系大小都会影响整株的生长性能,过大或过小的根冠生长均会降低作物的整体生理功能水平。玉米的根冠比随生育进程的推进不断减小,但间作的竞争效应始终保持着一定影响力,根冠比的变化是根系和地上部共同作用的结果。

在植物竞争理论中,最受重视的是植物生长能力,而植物生殖能力通常被忽视<sup>[16]</sup>。收获指数是作物经济产量与地上部总生物产量的比值<sup>[28]</sup>,可以准确地从生长和生殖两方面反映作物的竞争能力。玉米的收获指数非常不稳定,主要受品种、作物管理、生长季节和其他相关因子的影响<sup>[29]</sup>。不同品种间作除了要考虑品种生育期、品质等方面的相对一致性以外,更重要的是株高、形态、抗性等方面必备的差异性和协调性<sup>[15]</sup>。随着玉米品种改良和栽培技术改进,作物收获指数不断提高<sup>[28]</sup>。通过间作的合理搭配,使高秆品种利用空间优势充分发挥其增产潜力,同时矮秆品种又不至于减产<sup>[15]</sup>,实现在增加生物产量基础上同步提高收获指数,能更大程度地增产和提高资源利用效率<sup>[28]</sup>。Echarte等<sup>[30]</sup>认为,收获指数及其稳定性是作物产量的根本保障,追求高的收获指数,应根据不同作物特性和农业产品来适当调整<sup>[31-32]</sup>。本研究结果说明,间作可以显著提高品种的收获指数,并且随间作密度的增加而增加,“沈单16号”变化更加显著,“郑单958”在间作下收获指数增加比较明显。间作密度的增加,形成密集的竞争环境,促进植株生长向更加合理的方向

发展。间作品种特性对间作体系收获指数的增加贡献较大。

竞争系数能定量地表示竞争能力的大小<sup>[6]</sup>,其大小随品种和种植密度比例变化而变化。在玉米品种间种混种栽培中,不同品种具有不同竞争力,相互协调补充具有一定的增产效应<sup>[33]</sup>。本试验显示,低密度间作,灌浆期和乳熟期竞争明显,竞争系数差异较大;而高密度间作在大喇叭口期和抽雄期竞争明显,生殖生长后期竞争系数趋于平稳缓和;不同密度品种间作中,高密度品种竞争系数较大。营养生长期竞争也不容忽视。总之,“郑单958”具有较强的资源竞争力和利用率。

#### 4 结论

品种间作的竞争效应可以改变间作种群的产量构成,减小穗长和穗粗,提高玉米授粉率,明显缩短秃尖长;随着生育期的延伸,茎叶比增长之后逐渐稳定,生育后期间作竞争降低了茎叶比,密度效应不显著但有一定的作用;根冠比显著降低,间作竞争抑制了根系的冗余生长,节约了土壤养分和有机物的消耗,形成根系与冠层比较合理的配比;穗位比、收获指数随间作密度的增加而增加,高穗位有助于苞叶的光合作用和穗位上部叶片光合产物迅速运输至籽粒;收获指数的变化规律说明品种间作促进了作物生长发育过程中的物质积累、分配向有利于增产方向发展,竞争系数变化规律说明间作栽培可以有效利用竞争效应,在籽粒孕育期促进光合产物的有效转化,提高玉米增产潜力。“郑单958”具有较强的竞争力,而“沈单16号”具有更加强大的增产潜力。由于品种选择、密度制定的不成熟,本试验对间作竞争机制阐述还不够明确,间作增产理论还有待完善,今后需进行更深入细致的研究。

#### 参考文献

- [1] 刘琳. 两个品种的冬小麦对水分胁迫和竞争的反应[D]. 咸阳: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 中国科学院水利部水土保持研究所, 2007  
Liu L. Respond to water stress and competition of two sequence-replaced winter wheats[D]. Xianyang: The Research Central of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Science, the Ministry of Education; Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, The Ministry of Water Resource, 2007
- [2] 尹力初, 张杨珠, 周卫军. 光照强度与氮肥施用水平对麦田杂草婆婆纳和离子草的生长及其竞争关系的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(10): 1285-1288  
Yin L C, Zhang Y Z, Zhou W J. Effects of light intensity and nitrogen application rate on the growth and competition of

- wheat weeds *Veronica agrestis* and *Chorispora tenella*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(10): 1285-1288
- [3] 张荣, 孙国钧, 李凤民, 等. 两春小麦品种竞争能力、水分利用效率及产量关系的研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 27-34  
Zhang R, Sun G J, Li F M, et al. A study on the relationship of competitive ability, water using efficiency and yield of two spring wheat varieties[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(2): 27-34
- [4] 胡冀宁, 孙备, 李建东, 等. 植物竞争及在杂草科学中的应用[J]. 作物杂志, 2007(2): 12-15  
Hu J N, Sun B, Li J D, et al. Plant competition and application in the weeds sciences[J]. Crops, 2007(2): 12-15
- [5] 秦先燕, 谢永宏, 陈心胜. 湿地植物间竞争和促进互作的研究进展[J]. 生态学报, 2010, 29(1): 117-123  
Qin X Y, Xie Y H, Chen X S. Competition and facilitation among wetland plants: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(1): 117-123
- [6] 唐永金. 混种密度比例对小麦品种竞争系数的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 534-536  
Tang Y J. Influence of density ratios in mixed planting on competitive indexes of wheat varieties[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(2): 534-536
- [7] 巩攀柱. 水分胁迫与种植模式对小麦根源信号、竞争能力及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006  
Gong Q Z. Effects of water stress and planting model on root-sourced signal and capability of competition and yield in wheat[D]. Yangling: The Northwest A & F University, 2006
- [8] 张荣, 张大勇, 原保忠, 等. 半干旱区春小麦品种竞争能力与产量关系的研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(3): 14-19  
Zhang R, Zhang D Y, Yuan B Z, et al. A study of the relationship between competitive ability and productive performance of spring wheat in semi arid regions of Loess Plateau[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1999, 23(3): 14-19
- [9] 杨慎骄, 徐炳成, 马守臣, 等. 大豆品种竞争能力和籽粒产量关系研究[J]. 生态经济, 2009(9): 30-33  
Yang S J, Xu B C, Ma S C, et al. Comparison of competition ability and grain yield of two soybeans (*Glycine Max*)[J]. Ecological Economy, 2009(9): 30-33
- [10] 唐永金. 混种栽培作物竞争的数学分析[J]. 生物数学学报, 1998, 13(2): 215-218  
Tang Y J. Mathematical analyses on crop competition in mixed cropping[J]. Journal of Biomathematics, 1998, 13(2): 215-218
- [11] 刘天学, 王振河, 董鹏飞, 等. 玉米间作系统的生理生态效应研究进展[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 114-116, 124  
Liu T X, Wang Z H, Dong P F, et al. Research progress of physiological and ecological effects in maize intercropping system[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(5): 114-116, 124
- [12] 朱敏, 史振声, 李凤海, 等. 不同基因型玉米混作研究初报[J]. 中国种业, 2010(8): 63-65  
Zhu M, Shi Z S, Li F H, et al. The preliminary research of different genotypes maize intercropped[J]. China Seeds, 2010(8): 63-65
- [13] 史振声, 朱敏, 李凤海, 等. 玉米不同品种间作的增产效果研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 107-109  
Shi Z S, Zhu M, Li F H, et al. Research on yield-increasing of different kinds of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(2): 107-109
- [14] 刘天学, 李潮海, 付景, 等. 不同基因型玉米间作的群体质量[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6302-6309  
Liu T X, Li C H, Fu J, et al. Population quality of different Maize (*Zea mays* L.) genotypes intercropped[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6302-6309
- [15] 史振声, 朱敏, 李凤海, 等. 玉米不同品种间作增产机制[J]. 种子, 2008, 27(12): 1-4  
Shi Z S, Zhu M, Li F H, et al. Mechanism of yield-increasing in different height maize cultivars inter-planting system[J]. Seeds, 2008, 27(12): 1-4
- [16] 蒋智林, 刘万学, 万方浩, 等. 植物竞争能力测度方法及其应用评价[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 985-992  
Jiang Z L, Liu W X, Wan F H, et al. Measurements of plant competition ability and their applications: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(6): 985-992
- [17] 田宏, 刘洋, 蔡化, 等. 草地植物竞争的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(28): 8945-8947  
Tian H, Liu Y, Cai H, et al. The research progress on competition of pasture plants[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(28): 8945-8947
- [18] 张岁岐. 根冠关系对作物水分利用的调控[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001  
Zhang S Q. Regulation of root-shoot relations to crop water use[D]. Yangling: The Northwest A & F University, 2001
- [19] 管建慧. 玉米根系生长发育特性及与地上部关系的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007  
Guan J H. Study on characteristics of root system growth and relationship between root and upland parts of maize[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007
- [20] 张杰, 贾志宽, 韩清芳. 不同养分对苜蓿茎叶比和鲜干比的影响[J]. 西北农业学报, 2007, 16(4): 121-125  
Zhang J, Jia Z K, Han Q F. The effect of different fertilization on stem/leaf ratio and FW/DW ratio of alfalfa[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2007, 16(4): 121-125
- [21] 黄杰, 黄平, 左海涛. 栽培管理对荻生长特性及生物质成分的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(6): 646-651  
Huang J, Huang P, Zuo H T. Effect of cultivation management on the growth characteristics and biomass components of *Miscanthus sacchariflorus*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(6): 646-651
- [22] 郭超, 牛文全. 根际通气对盆栽玉米生长与根系活力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1194-1198  
Guo C, Niu W Q. Effects of rhizosphere ventilation on growth and root activity of potted maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1194-1198
- [23] Asch F, Bahrun A, Jensen C R. Root-shoot communication of field-grown maize drought-stressed at different rates as modified by atmospheric conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(5): 678-687
- [24] 黄迪, 张佳宝, 张丛志, 等. 不同大气湿度与氮肥水平对夏玉米苗期水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(1): 123-127  
Huang D, Zhang J B, Zhang C Z, et al. Effects of different atmosphere humidity and nitrogen levels on water use effi-

- ciency of summer maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(1): 123-127
- [25] 王宗明, 梁银丽. 氮磷营养对夏玉米水分敏感性及其生理参数的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 751-757  
Wang Z M, Liang Y L. The effects of nitrogen and phosphorus on the water sensitivity and physiological parameters of summer maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 751-757
- [26] Gahoonia T S, Nielsen N E, Lyshede O B. Phosphorus (P) acquisition of cereal cultivars in the field at three levels of P fertilization[J]. *Plant and Soil*, 1999, 211(2): 269-281
- [27] 齐伟, 张吉旺, 王空军, 等. 干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 48-52  
Qi W, Zhang J W, Wang K J, et al. Effects of drought stress on the grain yield and root physiological traits of maize varieties with different drought tolerance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 48-52
- [28] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(1): 1-8  
Xie G H, Han D Q, Wang X Y, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8
- [29] Hay R K M, Gilbert R A. Variation in the harvest index of tropical maize: evaluation of recent evidence from Mexico and Malawi[J]. *Annals of Applied Biology*, 2001, 138(1): 103-109
- [30] Echarte L, Andrade F H. Harvest index stability of Argentinian maize hybrids released between 1965 and 1993[J]. *Field Crops Research*, 2003, 82(1): 1-12
- [31] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(1): 75-83
- [32] Fang Y, Xu B C, Turner N C, et al. Grain yield, dry matter accumulation and remobilization, and root respiration in winter wheat as affected by seeding rate and root pruning[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(4): 257-266
- [33] 石培春, 石国亮, 陈亚楠, 等. 混种密度比例对小黑麦品种竞争系数的影响[J]. *石河子大学学报: 自然科学版*, 2011, 29(3): 265-268  
Shi P C, Shi G L, Chen Y N, et al. Influence of density ratios in mixed planting on competitive indexes of Triticale cultivars[J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2011, 29(3): 265-268