DOI: 10.5846/stxb201309182308
任媛媛,王志梁,王小林,张岁岐. 黄土塬区玉米大豆不同间作方式对产量和经济收益的影响及其机制. 生态学报,2015,35(12):4168-4177.
Ren Y Y, Wang Z L, Wang X L, Zhang S Q. The effect and mechanism of intercropping pattern on yield and economic benefit on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica,2015,35(12):4168-4177.

黄土塬区玉米大豆不同间作方式对产量和经济收益的影响及其机制

任媛媛[1,2],王志梁[3],王小林[1,2],张岁岐[1,3,*]

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: 利用不同玉米品种(郑单 958 和豫玉 22)和大豆品种(中黄 24 和中黄 13)在单作和两种(2∶2 和 2∶4)间作方式下,研究品种、间作方式对间作系统产量和经济效益的影响,探讨其潜在的作用过程和机制,以期为旱区农业高产高效服务。实验结果表明:(1)两种间作方式的土地当量比(LER),相对拥挤系数(*K*)都高于单作,表明玉米、大豆在两种间作方式下较单作具有显著的间作优势,玉米间作相比单作增产显著。*K*、实际产量损失(AYL)、侵占力(*A*)和竞争比率(*CR*)的变化规律均表明在间作栽培条件下,玉米相对于大豆为竞争优势物种;郑单 958 相对于豫玉 22,中黄 24 相对于中黄 13 均占有一定竞争优势。郑单 958 与中黄 24 以 2∶4 比例间作的间作优势(*IA*)及货币优势指数(MAI)值最高。(2)相比单作,间作种植模式下玉米的水分利用效率明显增加,而且玉米 大豆以 2∶4 间作的水分利用效率显著高于 2∶2。郑单 958 与中黄 24 在 2∶4 间作方式下的产量和经济效益都最高,适合在当地应用和推广。

关键词: 干物质积累; 土地当量比; 间作优势; 玉米大豆间作

The effect and mechanism of intercropping pattern on yield and economic benefit on the Loess Plateau

REN Yuanyuan[1,2], WANG Zhiliang[3], WANG Xiaolin[1,2], ZHANG Suiqi[1,3,*]

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

Abstract: One of the tasks of agricultural ecologist is to increase agricultural yield. How to improve agricultural practice is the biggest challenge in drought and barren environments on the Loess Plateau. Many studies have attempted to increase yield through the integration of plant population density, water and fertilizer use efficiency in this region. Intercropping, which is the simultaneous growing of two (or more) crop species in the same field, is a good solution to resolve this problem. Especially under low input conditions, the high yield attributes to resource complementarity in the intercropped system in which the component crops use the resources efficiently by dynamically balancing the different absorbing time, space-occupying or phenology. Maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.) are important crops in China selected as the inter-planted crops. A field experiment was conducted to investigate the yield and economic benefit in the intercrops

基金项目:国家高技术研究(863)发展计划项目(2011AA100504);高等学校学科创新引智计划资助(B12007)
收稿日期:2013-09-18; 网络出版日期:2014-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

of maize (Zhengdan 958 and Yuyu 22) with soybean (Zhonghuang 24 and Zhonghuang 13) in two planting patterns (2∶2 and 2∶4) respectively on the Loess Plateau, and the sole crops set as controls. Based on the interrelation between varied components and planting patterns as well as their relation to crop yield, competition indices, economic indices and water use efficiency under intercropped, we look forward to understanding potential regulation and mechanisms of maize/soybean intercropped system and serving for the agricultural production. The aboveground biomass, grain yield and water use efficiency were surveyed in each planting pattern. Several indices of competition and economic were calculated and used to evaluate the intercropped systems and analyze the competitive relationships between intercropped components. The results showed that the land equivalent ratio (LER) and relative crowding coefficient (*K*) were greater in maize-soybean intercropping than that in sole crop, indicating an advantage of intercropping. Yield of maize in maize-soybean intercropping was higher than that in single crop. The actual yield loss (AYL), aggressivity (*A*) and competitive ratio (*CR*) indicated that maize was the dominant species in maize/soybean intercropped system. Zhengdan 958 and Zhonghuang 24 showed more competitiveness on the water than the other two varieties in intercropping cultivation. The highest values of monetary advantage index (MAI) and intercropping advantage (*IA*) were recorded by the intercropping pattern of Zhengdan 958 and Zhonghuang 24 (with 2∶4). The highest water use efficiency of maize was in intercropping pattern of 2∶4, followed by intercropping pattern of 2∶2, and sole crop was the lowest. As mentioned above, maize and soybean intercropped system had an obvious advantage in enhancing yield. The increases in biomass, yield and water use efficiency were caused by different varieties interaction and plant patterns significantly. Zhengdan 958 intercropped with soybean (Zhonghuang 24 and Zhonghuang 13) had advantage, indicating that Zhenggdan 958 is able to improve intercropping advantage. Zhengdan 958 and Zhonghuang 24 intercropped in patterns of 2∶4 obtained the highest yield and water use efficiency among all treatments. Therefore, we suggest that Zhengdan 958 and Zhonghuang 24 intercropped in patterns of 2∶4 had the highest economic benefit than the other patterns and thus may be adopted and popularized by farmers.

Key Words: dry matter accumulation; land equivalent ratio; intercropping advantage; maize-soybean intercropping

间作即在同一块土地上种植两种或多种作物,其在农业生产中已经延用了数个世纪[1]。作为一种非常重要的农业实践,间作广泛应用于世界的各个地方,特别是发展中国家。在中国,约 1/3 可耕作土地采用多物种模式,却贡献了中国所有农作物总产量的一半[2]。然而对于间作相比单作能够提高作物产量的真正认识至今才三十几年时间[3]。目前关于间作提高产量的最为常见的一种解释是间作作物在一定程度上对于生长所需资源的不同利用。与单作相比,间作作物由于在时间和空间上能更有效地利用一种或多种资源,因而能增加单位土地面积上的总产量[4]。Zhang 和 Li[5] 认为“竞争-恢复产量”的综合作用决定了间作优势,但是非常有限的资源(如水分)可能改变间作组成物种间的竞争关系从而影响间作优势。因此在资源非常有限的环境下,不同品种间的间作优势不仅取决于其自身的特性同时也取决于限制性的环境因子。

间作系统中,豆科/禾本科作物间作是传统农业中应用最为成功的一个组合[6]。一般认为禾本科植物相对豆科植物具有竞争优势,而且禾本科植物的竞争优势决定了间作系统的群体质量。然而目前关于在资源(如水分)受限条件下,不同品种(玉米和大豆)以及种植模式对于间作系统的群体质量以及间作优势的研究比较少。因此针对限制性生态位,间作组成的不同品种间的反应以及如何影响间作系统的机制尚不清晰。

作物对于光、水分和营养元素的竞争不仅发生在作物的地上部分还发生于地下部分。大多数研究集中于地上部分的光竞争[7-8]。作物根系生长对于营养元素和水分的竞争研究较少。根系系统的形态和时空分布为确定作物地下部分竞争强度的关键因子。Bray[9] 研究表明,土壤中水分和氮的活性对于作物地下部分的种间竞争至关重要。然而根系系统可变复杂的几何特性以及营养资源的复杂分布使得有关种间竞争的植物性状研究更加困难。

黄土塬区为我国以生产小麦、玉米为主的古老旱作农区,光、热资源丰富,但水源缺乏。因此,高效合理地

利用水分等限制性资源为农业间作的应用提供了契机。本文主要探讨下面几个问题:(1)哪些品种的玉米大豆组合相比各自单作增加的产量最高;(2)间作系统组成物种的竞争能力与间作优势的关系;(3)不同间作系统的土壤水分利用效应。因此本文通过研究中国黄土塬区不同玉米大豆间作模式对于产量形成、经济效益的影响,以及不同间作系统种间竞争力对产量形成的影响机理,为中国黄土塬区多元化农业以及旱作玉米增产潜力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于中国科学院水利部水土保持研究所长武生态农业试验站进行。试验站位于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 584.1 mm,且多集中于 7—9 月份;年均气温 9.1 ℃,无霜期 171 d,作物种植多为一年一季;田间持水量年均值在 20% 左右,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,是黄土高原沟壑区典型性土壤。

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料

玉米品种:郑单 958(抗旱指数为 0.995;隶属度为 0.906),属强抗旱品种[10],紧凑型株型;豫玉 22(抗旱指数为 0.421;隶属度为 0.296),属不抗旱品种[10],平展型株型。

大豆品种:中黄 24,属抗旱型,无限结荚习性品种;中黄 13,属干旱敏感型,有限结荚习性品种[11-13]。

1.2.2 试验设计

试验于 2012 年 4—10 月进行。采用双因素(品种、种植模式)试验,以品种为主区,品种采用玉米“郑单 958”和“豫玉 22”,大豆“中黄 24”和“中黄 13”;以种植方式为副区,玉米 大豆 = 2∶2(即 2 行玉米 2 行大豆隔行间作),玉米 大豆 = 2∶4(即 2 行玉米 4 行大豆隔行间作)两种间作方式,以玉米、大豆单作为对照;共 12 个处理,3 次重复,36 个小区,小区面积为 6 m × 4 m,完全随机区组排列。玉米种植密度为 9 万株/ hm^2,大豆种植密度为 21 万株/ hm^2。采用 50 cm 等行距覆膜种植,播前施用底肥 N 90 kg /hm^2、P_2O_5 150 kg /hm^2,玉米分别于大喇叭口期和吐丝期各追施氮肥 45 kg /hm^2,农田管理与当地相同,试验作物生育期内的气候数据由图 1 所示。

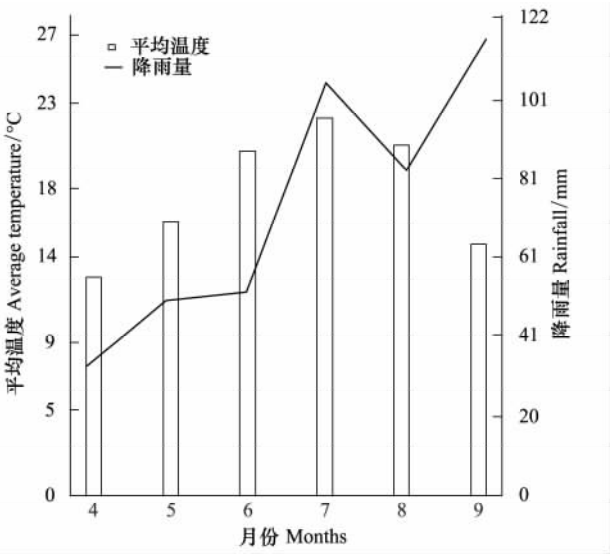

图 1 试验作物生育期内的月降雨量和平均气温

Fig. 1 Monthly rainfall and mean air temperature of the growing season of the experimentation

1.2.3 测定指标及计算方法

(1) 生物量及测产

玉米、大豆成熟后,玉米各处理随机选择代表性植株 3 棵,大豆各处理随机选择代表性植株 6 棵,于 105 ℃杀青 0.5 h,然后在 80 ℃烘至恒重并称量。每小区选取 6 m^2进行测产。

(2) 水分利用效率

水分利用效率 WUE:作物产量 Y(kg/hm^2)与农田耗水量 ET(mm)的比值,即 WUE = Y/ET,根据农田水量平衡原理可计算出 ET 值:$ET = W_{播前} - W_{收获} + I + P + G$,其中 $W_{播前}$为播前土壤贮水量,$W_{收获}$为收获期土壤贮水量,I 为生育期灌水量(mm);P 为生育期降水量;G 为作物利用地下水量(mm)。试验地无灌溉条件,因此 $I = 0$,研究区地下水深 70 m,因此 $G = 0$[14]。

(3) 竞争指数

估计多物种系统生产力优势的一种方法是计算土地当量比(LER)[15]。LER 为两种或多种物种间作产量与相应单作产量比值的总和。其结果说明两种或多种物种混种时所需土地与每个物种单种时所需土地的比值。如果 LER > 1 说明存在间作优势; 相反,说明间作产量不会增加。计算公式如下:

$$LER = (LER_1 + LER_2),\ LER_1 = \frac{Y_{1i}}{Y_1},\ LER_2 = \frac{Y_{2i}}{Y_2}$$

式中,Y_1和 Y_2分别为物种 1 和物种 2 的单作产量,Y_{1i}和 Y_{2i}分别为物种 1 和物种 2 的间作产量。

相对拥挤系数(K): 衡量物种 1 相对物种 2 竞争优势的指标[16]。当 $K_1 > K_2$时,表明物种 1 竞争力较强,当 $K_1 = K_2$,表明不存在竞争,当 $K_1 < K_2$,表明物种 1 资源利用效率较低从而导致相对产量损失。具体计算如下:

$$K = K_1K_2,\ K_1 = \frac{Y_{1i}Z_{2i}}{(Y_1 - Y_{1i})Z_{1i}},\ K_2 = \frac{Y_{2i}Z_{1i}}{(Y_2 - Y_{2i})Z_{2i}}$$

式中,Z_{1i},Z_{2i}分别为间作中物种 1、物种 2 的种植比例。

侵占力(A) 常用于表征间作物种 1 的相对产量增长大于物种 2 产量增长的程度大小[17]。具体计算如下:

$$A_1 = \left(\frac{Y_{1i}}{Y_1Z_{1i}}\right) - \left(\frac{Y_{2i}}{Y_2Z_{2i}}\right),\ A_2 = \left(\frac{Y_{2i}}{Y_2Z_{2i}}\right) - \left(\frac{Y_{1i}}{Y_1Z_{1i}}\right)$$

式中,A_1代表间作物种 1 的侵占力,而 A_2代表间作物种 2 的侵占力,如果 $A_1 = 0$,表明这两种作物的竞争力相同; $A_1 > 0$,表明物种 1 占据优势的; 相反,物种 2 占据优势。

竞争比率(CR): 评价物种之间竞争的一种指标[18]。具体计算如下:

$$CR_1 = \left(\frac{LER_1}{LER_2}\right)\left(\frac{Z_{2i}}{Z_{1i}}\right),\ CR_2 = \left(\frac{LER_2}{LER_1}\right)\left(\frac{Z_{1i}}{Z_{2i}}\right)$$

其弥补了土地当量比未能考虑种植比例的缺陷,能够较好地测量物种竞争能力,优于侵占力和相对拥挤系数。

实际产量损失(AYL) 基于单株产量。相比单作,实际产量损失指数表示在种植比例下的相对产量损失或增加[19]。计算公式如下:

$$AYL = AYL_1 + AYL_2,\ AYL_1 = \left(\frac{Y_{1i}/Z_{1i}}{Y_1/Z_1}\right) - 1,\ AYL_2 = \left(\frac{Y_{2i}/Z_{2i}}{Y_2/Z_2}\right) - 1$$

AYL 的正负情况表示有无间作优势。

系统生产力指数(SPI),从优势作物(如玉米) 方面统一伴作物(如大豆) 的产量从而评价间作的一个指数[17]。计算公式如下:

$$SPI = \left(\frac{\bar{Y}_1}{\bar{Y}_2}\right)\bar{Y}_{2i} + \bar{Y}_{1i}$$

式中,$\bar{Y}_{1i}$和 $\bar{Y}_{2i}$代表物种 1 和物种 2 间作的平均产量,而 $\bar{Y}_1$ 和 $\bar{Y}_2$ 代表单作中物种 1 和物种 2 的平均产量。

(4) 经济指数

货币优势指数(MAI) 和间作优势(IA) 从经济方面描述是否存在间作优势[16,18]。计算公式如下:

$$IA = IA_1 + IA_2,\ IA_1 = AYL_1P_1,\ IA_2 = AYL_2P_2$$

$$MAI = (Y_{1i}P_1 + Y_{2i}P_2) \times \frac{LER - 1}{LER}$$

式中,P_1为物种 1 经济价格,P_2为物种 2 经济价格(目前所考虑地区玉米大豆价格分别为 2.2 元/kg 和 4.4 元/kg)。

1.2.4　数据分析

数据采用 Microsoft excel 2007 整理,采用 SigmaPlot 12.0 作图,采用 SPSS 17.0 进行分析。

2 结果

2.1 经济产量和地上部生物量

试验结果表明,所考虑玉米和大豆品种间单作产量没有显著差异。郑单 958 在 2∶2 间作方式下经济产量显著高于豫玉 22($P<0.001$),地上生物量无显著差异;在 2∶4 间作方式下经济产量无显著差异,但地上生物量显著小于豫玉 22($P<0.001$)。大豆品种在两种间作方式下经济产量和地上生物量都没有显著差异。玉米单作和间作经济产量和地上生物量的平均结果显示玉米两种间作方式的经济产量和地上生物量都显著高于单作($P<0.001$)。2∶4 间作的玉米经济产量显著大于 2∶2 间作的玉米经济产量($P<0.05$)。大豆单作经济产量显著高于 2∶2 间作经济产量($P<0.05$)。而地上生物量在不同间作方式间没有显著差别(表 1)。

表 1 不同品种及间作方式对经济产量和地上生物量的影响(平均值 ± 标准差)

Table 1 Effect of variety and intercropping pattern on yield and aboveground biomass (mean ± SD)

间作方式 Intercropping pattern	经济产量 Yield/(Mg/hm^2)			地上生物量 Aboveground biomass/(Mg/hm^2)		
	玉米 Maize	大豆 Soybean	总和 Total	玉米 Maize	大豆 Soybean	总和 Total
A	12.47 ± 0.45a		12.47 ± 0.45a	20.40 ± 4.65ab		20.40 ± 4.65abcd
B	12.54 ± 1.11a		12.54 ± 1.11ab	27.45 ± 2.06a		27.45 ± 2.06a
C		2.54 ± 0.30a	2.54 ± 0.30g		6.99 ± 1.68a	6.99 ± 1.68e
D		2.68 ± 0.26a	2.68 ± 0.26g		5.54 ± 1.75abd	5.54 ± 1.75e
A2C2	10.03 ± 0.79b	1.02 ± 0.09d	11.05 ± 0.85abd	16.11 ± 0.95b	2.52 ± 0.60ce	18.63 ± 1.67bc
A2D2	9.88 ± 0.33b	1.10 ± 0.05cd	10.99 ± 0.32bd	13.89 ± 2.29bcd	2.52 ± 1.11de	16.41 ± 3.24bcd
B2C2	7.37 ± 1.42c	1.08 ± 0.09cd	8.45 ± 1.46def	15.45 ± 3.01bc	2.56 ± 1.10bcde	18.01 ± 3.00bcd
B2D2	7.78 ± 0.64c	1.36 ± 0.20bcd	9.14 ± 0.45ce	23.23 ± 1.94a	2.39 ± 0.84e	25.62 ± 2.70a
A2C4	7.37 ± 0.39c	1.76 ± 0.22b	9.13 ± 0.51ce	9.95 ± 1.22d	3.39 ± 0.67de	13.44 ± 0.55d
A2D4	6.80 ± 0.82c	1.76 ± 0.17b	8.56 ± 0.65cef	11.29 ± 2.45cd	3.56 ± 0.54bcde	14.85 ± 1.98cd
B2C4	6.40 ± 0.95c	1.37 ± 0.19bc	7.77 ± 0.77ef	16.10 ± 0.38b	3.57 ± 0.82bcde	19.67 ± 0.51b
B2D4	6.26 ± 0.80c	1.43 ± 0.26bcd	7.69 ± 0.59f	14.32 ± 1.87bc	4.29 ± 1.63abcde	18.61 ± 3.22bc

A、B、C、D 分别表示郑单 958、豫玉 22、中黄 24 及中黄 13;A2C2、A2D2、B2C2、B2D2 分别表示郑单 958 与中黄 24、中黄 13,豫玉 22 与中黄 24、中黄 13 以 2∶2 方式种植;A2C4、A2D4、B2C4、B2D4 分别表示郑单 958 与中黄 24、中黄 13,豫玉 22 与中黄 24、中黄 13 以 2∶4 方式种植;同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 不同间作方式下的竞争指数特征

2.2.1 土地当量比(LER)与相对拥挤系数(K)

不同品种的间作土地当量比试验结果表明,玉米郑单 958 间作处理 LER 值高于豫玉 22 间作处理。中黄 24 间作处理 LER 高于中黄 13 间作,但与豫玉 22 以 2∶2 间作的中黄 13 的 LER 值高于相应的中黄 24。间作方式影响土地当量比结果说明所有间作的 LER 均显著高于单作,其中 A2C4 和 A2C2 的 LER 最高分别是 1.291 和 1.211,方差分析表明,除 B2C2 和 B2C4 间作 LER 有所增加但无显著性差异外,其它差异显著。玉米 2∶2 间作的 LER 高于 2∶4 间作的 LER,大豆的 LER 结果与玉米相反,即 2∶4 间作的 LER 高于 2∶2 间作。

品种和间作方式对 K 的影响与 LER 的相似,其中 A2C4 最高,其次为 A2D2,分别为 3.886,3.068,K 值反映的所考虑品种间的差异与 LER 一致。间作方式通过 K 值仍表现出无显著性差异(表 2)。

2.2.2 侵占力(A)与竞争比率(CR)

玉米的侵占力均为正值且在 A2C2 时为最高,其次为 A2D2,表明在所考虑的间作中,玉米均表现为竞争优势种。品种间的侵占力比较结果说明郑单 958 相比豫玉 22 侵占力更强,中黄 24 的侵占力强于中黄 13。同样 CR 值表现出相同的趋势(表 3)。

表 2　品种和间作方式对 LER 和 *K* 的影响(平均值 ± 标准差)

Table 2　Effect of variety and intercropping pattern on LER and *K* (mean ± SD)

间作方式 Intercropping pattern	土地当量比 Land equivalent ratio			相对拥挤系数 Relative crowding coefficient		
	LER_m	LER_s	LER	K_m	K_s	*K*
A	1.000 ± 0.00a	0	1.000 ± 0.00d	1.000 ± 0.00c	—	1.000 ± 0.00d
B	1.000 ± 0.00a	0	1.000 ± 0.00d	1.000 ± 0.00c	—	1.000 ± 0.00d
C	0	1.000 ± 0.00a	1.000 ± 0.00d	—	1.000 ± 0.00a	1.000 ± 0.00d
D	0	1.000 ± 0.00a	1.000 ± 0.00d	—	1.000 ± 0.00a	1.000 ± 0.00d
A2C2	0.805 ± 0.07b	0.405 ± 0.02d	1.211 ± 0.05a	4.489 ± 1.57a	0.683 ± 0.06c	3.011 ± 0.33a
A2D2	0.794 ± 0.05b	0.414 ± 0.05d	1.208 ± 0.10ab	4.102 ± 1.48a	0.714 ± 0.14c	3.068 ± 0.53ab
B2C2	0.585 ± 0.08c	0.427 ± 0.04cd	1.012 ± 0.06cd	1.461 ± 0.44bc	0.752 ± 0.13bc	1.062 ± 0.14cd
B2D2	0.627 ± 0.11bc	0.512 ± 0.12bcd	1.139 ± 0.07a	1.867 ± 0.98abc	1.129 ± 0.50abc	1.832 ± 0.21a
A2C4	0.592 ± 0.04c	0.699 ± 0.10b	1.291 ± 0.14ab	2.942 ± 0.50a	1.267 ± 0.49abc	3.886 ± 0.63ab
A2D4	0.545 ± 0.05c	0.664 ± 0.13b	1.208 ± 0.08ab	2.424 ± 0.45ab	1.206 ± 0.85abc	2.679 ± 0.46ab
B2C4	0.518 ± 0.13c	0.540 ± 0.01b	1.058 ± 0.11abcd	2.365 ± 1.27abc	0.588 ± 0.03c	1.367 ± 0.47abcd
B2D4	0.499 ± 0.04c	0.531 ± 0.05bc	1.030 ± 0.01bc	2.013 ± 0.37ab	0.575 ± 0.12c	1.129 ± 0.05bc

LER_m,LER_s分别表示玉米和大豆的土地当量比(Land equivalent ratio, LER) ; K_m,K_s分别表示玉米和大豆的相对拥挤系数(Relative crowding coefficient, *K*)

表 3　品种和间作方式对 *A* 和 *CR* 的影响(平均值 ± 标准差)

Table 3　Effect of variety and intercropping pattern on *A* and *CR* (mean ± SD)

间作方式 Intercropping pattern	侵占力 Aggressivity		竞争比率 Competitive ratio	
	A_m	A_s	CR_m	CR_s
A2C2	0.800 ± 0.17a	−0.800 ± 0.17b	1.996 ± 0.26ab	0.507 ± 0.07a
A2D2	0.760 ± 0.04a	−0.760 ± 0.04b	1.924 ± 0.11a	0.521 ± 0.03a
B2C2	0.315 ± 0.23b	−0.315 ± 0.23a	1.388 ± 0.31b	0.746 ± 0.17a
B2D2	0.229 ± 0.44ab	−0.229 ± 0.44ab	1.304 ± 0.55ab	0.850 ± 0.30a
A2C4	0.729 ± 0.04a	−0.729 ± 0.04b	1.709 ± 0.14ab	0.588 ± 0.05a
A2D4	0.638 ± 0.34ab	−0.638 ± 0.34ab	1.698 ± 0.44ab	0.620 ± 0.18a
B2C4	0.742 ± 0.39ab	−0.742 ± 0.39ab	1.924 ± 0.51ab	0.544 ± 0.14a
B2D4	0.700 ± 0.21ab	−0.700 ± 0.21ab	1.905 ± 0.38ab	0.538 ± 0.10a

A_m, A_s分别表示玉米和大豆的侵占力(Aggressivity,) ; CR_m,CR_s分别表示玉米和大豆的竞争比率(Competitive ratio)

2.2.3　实际产量损失(AYL) 与体系生产力指数(SPI)

所有间作方式的 AYL 均为正值表明所考虑的间作系统均存在间作优势,其中 A2C4、A2D4 最高(0.825 和 0.630) 。玉米 AYL 均为正值,表明相对单作所有间作方式玉米产量均有所增加,而大豆的 AYL 除 B2D2 和 A2C4 外,其余都为负值,表明间作时大豆产量有所减少。与 LER,*K*,*A* 和 *CR* 结果一致,郑单 958 间作的 AYL 显著高于豫玉 22。SPI 的结果说明,A2C4 的 SPI 最高,其次为 A2C2 和 A2D2,品种间的 SPI 比较结果与前面的指数结果一致(表 4) 。

2.3　经济指数

所考虑的玉米大豆间作方式除豫玉 22 与中黄 24 以 2∶2 间作外,其他处理均具有经济优势(*IA* 为正值) ,其中 A2C4 的 *IA* 值最高,其次为 A2D4。玉米大豆间作中玉米具有明显的间作优势(IA_m为正值) ,而大豆的间作优势不显著。A2D4 和 A2C2 间作的经济优势最为明显。与郑单 958 间作的 *IA* 高于与豫玉 22 间作,品种和间作方式对玉米 *IA* 有影响但没有显著性变化,其中 A2C4 的间作优势最为明显; 对于大豆的 *IA* 而言,也表现为 A2C4 的间作优势最为明显。MAI(正值) 表现为玉米大豆间作优势相同的趋势,其中 A2C4 MAI 最高,其次为 A2C2,与郑单 958 间作的 MAI 明显高于与豫玉 22 间作的 MAI(表 5) 。

表 4 品种和间作方式对 AYL 和 SPI 的影响(平均值 ± 标准差)

Table 4 Effect of variety and intercropping pattern on AYL and SPI(mean ± SD)

间作方式 Intercropping pattern	实际产量损失 Actual yield loss			系统生产力指数 System productivity index
	AYL_m	AYL_s	AYL	SPI
A2C2	0.611 ± 0.13ab	−0.189 ± 0.05a	0.421 ± 0.10bc	15.1
A2D2	0.588 ± 0.10ab	−0.172 ± 0.09a	0.416 ± 0.20abc	15.0
B2C2	0.169 ± 0.15c	−0.145 ± 0.08a	0.024 ± 0.07d	12.7
B2D2	0.254 ± 0.21bc	0.025 ± 0.23a	0.278 ± 0.10c	14.1
A2C4	0.777 ± 0.13a	0.048 ± 0.15a	0.825 ± 0.28ab	16.0
A2D4	0.634 ± 0.14ab	−0.004 ± 0.20a	0.630 ± 0.06a	14.9
B2C4	0.553 ± 0.37abc	−0.190 ± 0.02a	0.363 ± 0.36abcd	13.2
B2D4	0.497 ± 0.13ab	−0.204 ± 0.08a	0.293 ± 0.05bc	12.9

AYL_m, AYL_s 分别表示玉米和大豆的实际产量损失(Actual yield loss)

表 5 品种和间作方式对 *IA* 和 MAI 的影响(平均值 ± 标准差)

Table 5 Effect of variety and intercropping pattern on *IA* and MAI (mean ± SD)

间作方式 Intercropping pattern	间作优势 Intercropping advantage			货币优势指数 Monetary advantage index
	IA_m	IA_s	*IA*	MAI
A2C2	1.343 ± 0.58ab	−0.834 ± 0.10a	0.509 ± 0.51ab	+4632 ± 1.20E3a
A2D2	1.293 ± 0.46ab	−0.756 ± 0.21a	0.537 ± 0.66ab	+4581 ± 1.85E3ab
B2C2	0.372 ± 0.66c	−0.639 ± 0.18a	−0.267 ± 0.48b	+531 ± 1.13E3cd
B2D2	0.558 ± 0.94bc	0.109 ± 0.51a	0.666 ± 0.52ab	+3048 ± 1.14E3ad
A2C4	1.710 ± 0.57a	0.211 ± 0.33a	1.920 ± 0.90a	+5403 ± 2.44E3ab
A2D4	1.395 ± 0.63a	−0.019 ± 0.43a	1.375 ± 0.21ab	+3911 ± 1.05E3a
B2C4	1.216 ± 1.66abc	−0.834 ± 0.04a	0.382 ± 1.61ab	+1298 ± 2.04E3abc
B2D4	1.093 ± 0.57ab	−0.896 ± 0.18a	0.197 ± 0.40b	+809 ± 0.27E3bc

IA_m, IA_s 分别表示玉米和大豆的间作优势(Intercropping advantage)

2.4 不同间作模式的水分利用效率

玉米的水分利用效率远远高于大豆。大豆品种中黄 24 和中黄 13 在水分利用效率方面没有显著差异。间作方式对于大豆水分利用效率的影响除中黄 24 单作小于 2∶4 间作外,其他处理方式均没有显著性差异,但表现为单作的水分利用效率高于间作。玉米品种对水分利用效率没有显著区别,郑单 958 在间作方式下水分利用效率显著高于豫玉 22。玉米两种间作方式的水分利用效率都显著高于单作($P < 0.05$)。间作 2∶4 的水分利用效率显著高于间作 2∶2(表 6)。

3 讨论

3.1 玉米和大豆间作系统中经济产量和地上生物量的品种互作效应

在所考虑的间作系统中,玉米经济产量均低于相应单作的经济产量,而且降低的幅度受到间作增加的大豆种植比例的影响。2∶2 间作的降低程度低于 2∶4 间作的降低程度。间作对郑单 958 籽粒产量相对豫玉 22 影响较小。玉米地上生物量改变与经济产量的变化趋势相同。大豆经济产量和地上生物量同样低于相应单作的产量,但其降低程度受种植比例影响与玉米相反。

Osman 和 Nersoyan [20] 表明豆科-禾本科间作的最高产量来自于豆科所占比例最高的间作模式(66∶33)。然而其他研究说明豆科-禾本科间作的产量改变不受种植比例的影响 [21]。研究结果说明由于种间竞争豆科禾本科间作的产量低于单作的产量 [22]。Bedoussac 和 Justes [23] 发现豌豆-小麦间作的地上生物量相比各自单作增加 20% 和 120%,但他们的试验处于不同的氮水平。大豆对于经济产量和地上生物量的贡献率的降低可

能归因于玉米大豆的种间竞争,特别在干旱条件下对水分的竞争。

表 6　不同处理的水分利用效率(平均值 ± 标准差)

Table 6　Water use efficiency under different treatment(mean ± SD)

间作方式 Intercropping pattern	玉米 Maize		大豆 Soybean	
	耗水量/mm Water use	水分利用效率 Water use efficiency/(kg hm^{-2} mm^{-1})	耗水量/mm Water use	水分利用效率 Water use efficienc/(kg hm^{-2} mm^{-1})
A	359.3 ± 6.74ab	34.6 ± 0.60d		
B	361.1 ± 6.36ab	34.7 ± 2.79d		
C			365.4 ± 6.54abc	6.94 ± 0.85abcdef
D			359.1 ± 6.30abc	7.47 ± 0.68ac
A2C2	369.8 ± 2.95a	54.2 ± 3.86abc	362.7 ± 2.80abc	5.64 ± 0.45ef
A2D2	365.0 ± 4.28a	54.1 ± 2.35abc	370.0 ± 4.24ac	5.97 ± 0.31bcdef
B2C2	366.4 ± 3.99a	40.3 ± 8.10cd	365.1 ± 3.90ac	5.90 ± 0.46def
B2D2	340.4 ± 8.72c	45.8 ± 3.91bc	365.4 ± 8.68abc	7.42 ± 1.07abcdf
A2C4	365.5 ± 0.73a	60.5 ± 3.28a	356.2 ± 0.70bc	7.41 ± 0.95abcd
A2D4	354.4 ± 4.50bc	57.6 ± 6.90ab	356.1 ± 9.21c	7.41 ± 0.70ac
B2C4	359.8 ± 7.42ab	53.3 ± 7.14abc	368.5 ± 7.00ac	5.60 ± 0.86f
B2D4	367.0 ± 11.0ab	51.1 ± 6.19abc	362.9 ± 9.84abc	5.92 ± 1.10cdef

3.2　竞争指数

所考虑间作方式的 LER 和 K 均高于单作(1.00) ,且 LER 为 1.012—1.291,即单作需增加 1.2%—29.1% 土地面积才能达到与间作同等的产量,表现出明显的间作优势和土地利用效率[19,24]。所考虑的间作方式,此结果与前人研究结果一致。Lithourgidis 等[25]研究豌豆与禾本科(小麦、黑麦和黑小麦) 的间作结果 LER 为 1.08—1.19; Dhima 等[18]研究荒野豌豆与禾本科(小麦、黑小麦和燕麦) 的间作 LER 为 1.05—1.09,但相比前人研究,本文研究环境为水资源相对不足的黄土塬区,品种抗旱性可能为决定间作产量增加及其程度的关键因子。

LER 值不能定量反映由不同间作方式或品种导致的作物产量增加或损失,但 AYL 值可弥补此不足。AYL 值结果表明郑单 958 在所考虑间作方式中经济产量增加幅度相比豫玉 22 显著高 43.6%($P<0.05$) 。玉米在郑单 958 与中黄 24(2∶4) 间作方式下实现 77.7% 最大增产 ($AYL_m = +0.777$) 。大豆除 B2D2、A2C4 间作方式产量稍微增加之外,其他间作方式均表现为产量损失,但不同品种间产量损失没有显著区别。结果说明所考虑间作方式增产的主要因子在于玉米增产且品种抗旱性发挥了相当重要的作用。

K、A、CR 为普遍采用表明间作物种竞争能力高低的研究指标。其结果表明在所考虑间作方式中两玉米品种都为优势物种。但只有 K 值表明所有考虑间作方式中郑单 958 竞争能力均显著高于豫玉 22。其他指标均表明 2∶2 间作方式下,郑单 958 竞争能力显著高于豫玉 22,而 2∶4 间作方式下,两者竞争力差别不显著。结果说明除水分竞争外,土壤氮竞争可能很大程度地影响间作作物间相互作用。

SPI 为表征间作系统生产力和稳定性的一种指标,其结果表明所考虑间作系统均具有较高的稳定性。郑单 958 间作系统稳定性显著高于豫玉 22 间作系统。其他研究发现,豌豆黑小麦和豌豆小麦 80∶20 间作比其他间作方式具有较高的生产力和稳定性[25]。

黄土塬区热资源丰富,水资源匮乏,属雨养性农业。抗旱性因此成为农作物在当地推广的重要指标之一,结荚习性是大豆主要株型形状之一,株型也是决定作物产量潜力的重要因素。因此,抗旱性和株型的选择有助于提高作物的适应能力和作物产量。我们的研究结果显示,郑单 958 的 LER、K、AYL 和 SPI 均高于豫玉 22,表明紧凑型株型以及抗旱性的玉米品种相比平展型株型及非抗旱品种在黄土塬区更居竞争优势。限制性资源,特别是水资源的竞争力可能为决定黄土塬区间作作物产量的主导因素。郑单 958 由于更好的利用各种

资源而在土地使用效率和系统生产力上表现出优于豫玉 22 的潜力。

3.3 货币指数

除豫玉 22 与中黄 24 以 2∶2 间作外,其他处理间作的 *IA* 均为正值,表明间作比单作具有一定经济优势。*IA* 和 MAI 表明间作系统经济收益的可行性及品种与间作方式结合的间作优势。其中郑单 958 与中黄 24 以 2∶4行比间作具有最大的 *IA* 和 MAI 值,此结果与 LER 及其他竞争指数结果一致。

3.4 水分利用效率

研究结果表明玉米的水分利用效率远远高于大豆。作物根系的空间分布对于水分竞争非常重要[26]。有研究表明,玉米根系相比大豆水平分布范围较大,而且在水分胁迫环境下,玉米根系不仅分布于间作条带行间,而且生长到大豆条带的行间[27]。研究发现郑单 958 间作的水分利用效率高于豫玉 22,这与前面竞争指数的研究结果一致,同时说明对于水分的竞争能力可能决定了黄土塬区间作作物的优劣。间作水分利用效率明显高于单作的研究结果与前人一致,Lu 等发现同粮食单作相比,间作种植模式土壤水分含量明显增加,粮食作物水分利用效率明显提高[28]。

4 结论

与单作相比,玉米和大豆间作能够更好的利用资源,具有间作优势。不同玉米大豆品种及间作方式对间作地上生物量和产量的影响不同。玉米郑单 958 与大豆(中黄 24 和中黄 13)间作优于豫玉 22 与大豆间作,在干旱半干旱的黄土塬区,抗旱性的玉米品种——郑单 958 有利于提高间作优势。玉米大豆间作系统中,玉米为优势物种:玉米的水分利用效率远远高于大豆,而且间作方式的水分利用效率明显高于单作。郑单 958 与中黄 24 以 2∶4 间作方式在产量,经济收益方面都优于其他的间作方式,能够最大化地提高农民的经济效益,应该被广泛采用和推广。

参考文献(References):

[1] Jurik T W, Van K. Microenvironment of a corn-soybean-oat strip intercrop system. Field Crops Research, 2004, 90(2/3): 335-349.

[2] 佟屏亚. 我国耕作栽培技术成就和发展趋势. 耕作与栽培,1994,4:1-5,20.

[3] Natarajan M, Willey R W. Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. The Journal of Agricultural Science, 1980, 95(1): 59-65.

[4] Zhang L, Van der Werf W, Zhang S, Li B, Spiertz J. Growth, yield and quality of wheat and cotton in relay strip intercropping systems. Field Crops Research, 2007, 103(3): 178-188.

[5] Zhang F S, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. Plant and Soil, 2003, 248(1/2): 305-312.

[6] Ogindo H O, Walker S. Comparison of measured changes in seasonal soil water content by rainfed maize-bean intercrop and component cropping systems in a semi-arid region of southern Africa. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(11): 799-808.

[7] Keating B A, Carberry P S. Resource capture and use in intercropping: solar radiation. Field Crops Research, 1993, 34(3/4): 273-301.

[8] Faurie O, Soussana J F, Sinoquet H. Radiation interception, partitioning and use in grass-clover mixtures. Annals of Botany, 1996, 77(1): 35-46.

[9] Bray R H. A nutrient mobility concept of Soil-Plant relationships. Soil Science, 1954, 78(1): 9-22.

[10] 张仁和. 玉米品种抗旱生理特性与氮素调控机制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.

[11] 蒲伟凤, 李桂兰, 张敏, 王丹, 王卢平, 纪展波, 代波, 乔亚科. 干旱胁迫对野生和栽培大豆根系特征及生理指标的影响. 大豆科学, 2010, 29(4): 615-622.

[12] 祁旭升, 刘章雄, 关荣霞, 王兴荣, 苟作旺, 常汝镇, 邱丽娟. 大豆成株期抗旱性鉴定评价方法研究. 作物学报, 2012, 38(4): 665-674.

[13] 姜妍. 光周期对大豆花序分化的影响及 *AGAMOUS* 基因的表达 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.

[14] Hillel D. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, 1998.

[15] Mead R, Willey R W. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. Experimental Agriculture, 1980, 16(3): 217-228.

[16] Ghosh P K. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. Field

Crops Research, 2004, 88: 227-237.

[17] Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. Yield performance and land-use efficiency of barley and faba bean mixed cropping in Ethiopian highlands. European Journal of Agronomy, 2006, 25(3): 202-207.

[18] Dhima K V, Lithourgidis A S, Vasilakoglou I B, Dordas C A. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. Field Crops Research, 2007, 100(2/3): 249-256.

[19] Banik P, Sasmal T, Ghosal P K, Bagchi D K. Evaluation of mustard (Brassica compestris Var. Toria) and legume intercropping under 1: 1 and 2: 1 Row-Replacement series systems. Journal of Agronomy and Crop Science, 2000, 185(1): 9-14.

[20] Osman A E, Nersoyan N. Effect of the proportion of species on the yield and quality of forage mixtures, and on the yield of barley in the following year. Experimental Agriculture, 1986, 22(4): 345-351.

[21] Carr P M, Martin G B, Caton J S, Poland W W. Forage and nitrogen yield of Barley-Pea and Oat-Pea intercrops. Agronomy Journal, 1998, 90(1): 79-84.

[22] Caballero R, Goicoechea E L, Hernaiz P J. Forage yields and quality of common vetch and oat sown at varying seeding ratios and seeding rates of vetch. Field Crops Research, 1995, 41(2): 135-140.

[23] Bedoussac L, Justes E. Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat-winter pea intercrop. Plant and Soil, 2010, 330(1/2): 37-54.

[24] Awal M A, Koshi H, Ikeda T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 139(1/2): 74-83.

[25] Lithourgidis A S, Vlachostergios D N, Dordas C A, Damalas C A. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. European Journal of Agronomy, 2011, 34(4): 287-294.

[26] Li L, Sun J H, Zhang F S, Guo T W, Bao X G, Smith F A, Smith S E. Root distribution and interactions between intercropped species. Oecologia, 2006, 147(2): 280-290.

[27] Gao Y, Duan A, Qiu X, Liu Z, Sun J, Zhang J, Wang H. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 199-212.

[28] 路海东, 贾志宽, 杨宝平, 李永平, 刘世新. 宁南旱区坡地不同粮草间作模式下产量和土壤水分利用效应. 草地学报, 2010, 18(2): 242-246.