

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170698

王小林, 徐伟洲, 张雄, 张岁岐. 黄土塬区夏玉米物质生产及水分利用对品种间作竞争的响应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(3): 377-387

WANG X L, XU W Z, ZHANG X, ZHANG S Q. Responses of dry matter distribution and water use of summer maize (*Zea mays* L.) to intercropped cultivars competition on the Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 377-387

黄土塬区夏玉米物质生产及水分利用对 品种间作竞争的响应*

王小林^{1,2}, 徐伟洲^{1,2}, 张雄¹, 张岁岐^{3**}

(1. 榆林学院生命科学学院 榆林 719000; 2. 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室 榆林 719000; 3. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100)

摘要: 品种间作竞争具有优化作物个体形态特征和生物量分配的生态效应。综合干旱环境、密度和降雨年际变化影响下的品种间作生物量分配机制研究, 可为旱区作物增产增效栽培提供理论依据。试验于2011年(降雨量645.0 mm, 湿润年份)和2012年(降雨量497.1 mm, 干旱年份)调查了两个玉米品种(‘郑单958’和‘沈单16号’)、两种密度(4.5万株·hm⁻²和7.5万株·hm⁻²)隔行间作处理下, 地上部生物量和地下部根系形态特征, 并分析了品种间作下生物量分配策略、根系竞争机制与产量、水分利用效率的关系。结果显示: 1) 干旱显著降低玉米根系表面积(SA), 低密度间作下‘沈单16号’扬花期SA显著降低而‘郑单958’显著增加, 高密度间作‘郑单958’的SA显著下降25.3%, 间作下根系对于水资源的竞争随种植密度的增加而加剧; 两个种植密度和两个不同降雨年份, 间作系统0~20 cm土层根长密度(RLD)显著增加, 增加种植密度和雨水亏缺, 刺激根系向深层土壤生长, 导致30~40 cm土层RLD的增加, 且‘郑单958’的RLD增加幅度远高于‘沈单16号’。2) 间作竞争下生物量积累具有品种差异, ‘郑单958’集中在营养生长期, 而‘沈单16号’集中在生殖生长期; 且随种植密度的增加, 间作栽培下单株生物量显著降低。3) 群体收获指数(HI)在高密度间作下, 两个不同降雨年份出现平均6.0%的增加幅, 雨水充足促进群体HI的提升; 根冠比因降雨和种植密度而变, 雨水充足、低密度间作下根冠比较大, 干旱和高密度下资源竞争造成‘郑单958’根冠比显著下降。4) 干旱年份玉米品种间作增产优势显著, 高、低密度间作增产率分别为10.3%和21.4%, 水分利用效率(WUE)分别增加28.2%和42.0%; 且‘郑单958’增产和增效能力分别较‘沈单16号’高17.6%和50.0%。综上所述, 品种间作栽培下‘郑单958’具有更合理的地上部生物量分配和响应机制, 其根系通过减少冗余生长, 降低资源消耗来应对土壤干旱, 高效的根系自我调节能力和生物量分配机制在间作系统产量形成和WUE提升中起到了关键作用。

关键词: 夏玉米; 品种间作; 生物量分配; 资源竞争; 水分利用效率; 半干旱地区; 黄土塬区

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)03-0377-11

Responses of dry matter distribution and water use of summer maize (*Zea mays* L.) to intercropped cultivars competition on the Loess Plateau of China*

WANG Xiaolin^{1,2}, XU Weizhou^{1,2}, ZHANG Xiong¹, ZHANG Suiqi^{3**}

(1. College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shanbei

* 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B01)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室特别资助项目(A314021403-C5)、陕西省科技厅创新团队项目(2013KCT-29)及陕西省教育厅专项(17JK0904)资助

** 通信作者: 张岁岐, 主要从事植物水分生理生态研究。E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

王小林, 主要从事水分生理生态和高产高效生物学基础研究。E-mail: wangx10915@yulinu.edu.cn

收稿日期: 2017-07-31 接受日期: 2017-09-13

* This work was supported by the National Key Technologies R&D Program of China (2015BAD22B01), the Special Funds of Scientific Research Programs of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau of China (A314021403-C5), Shaanxi Provincial Science and Technology Innovation Group Fund (2013KCT-29) and the Special Project of Education Department of Shaanxi Province (17JK0904).

** Corresponding author, E-mail: sqzhang@ms.iswc.ac.cn

Received Jul. 31, 2017; accepted Sep. 13, 2017

Mining Area, Yulin 719000, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: On the Loess Plateau, maize morphological structure and yield performance are restricted by low rainfall and limited soil nutrient. Resource competition in intercropped cultivation have a positive effect on individual establishment and biomass allocation of maize cultivars. It was necessary to research root morphology and biomass allocation of maize under the combined effect of rainfall, planting density and intercropping for exploring effects of intercropping models on grain yield and water use efficiency (WUE) of maize in the Loess Plateau. To this end, a field experiment was conducted at Changwu Agri-ecological Station in the Loess Plateau, Chinese Academy of Science which is located in the classic dry farming region in the semi-arid region of the Loess Plateau in Northwest China. Two maize cultivars ('Z958' and 'S16') were intercropped under two planting densities (45 000 plants·hm⁻² and 75 000 plants·hm⁻²) with 1 : 1 lines ratio. The aboveground and belowground growth and biomass accumulation were investigated at different growth stages of maize in two rainfall year types, 2011 with rainfall of 647 mm and 2012 with rainfall 497 mm. The study also measured and analyzed the correlation among biomass allocation, root distribution, grain yield and WUE. The results showed that: 1) soil water deficiency had a negative effect on root surface area (SA) of 'S16' at flowering stage under low intercropped planting density. Also while SA of 'Z958' decreased by 30.5% under high intercropping density, WUE increased with increasing intercropping density. After two years of experimentation, root length density (RLD) in the 0–20 cm soil layer significantly increased under 'Z958' and 'S16' intercropping. Also with increasing planting density, rainwater deficiency led to deeper root growth to enhance water uptake. This in turn enhanced root competition for water and eventually obviously increased RLD in the 30–40 cm soil layer. Root distribution of 'Z958' was higher than that of 'S16' for the two planting densities. 2) Biomass accumulation under two cultivars intercropping was genotypically different, with enhanced 'Z958' growth during vegetative period and enhanced 'S16' growth during reproductive period. The individual biomass of two maize cultivars decreased with increasing intercropping density. The increase in dry weight at reproductive growth period was higher for 'S16' than for 'Z958' in 2011 under low intercropped planting density. With high density and drought condition, individual biomass accumulation decreased under maize cultivars intercropping after flowering. 3) There was on average 6.0% increase in harvest index (HI) under high intercropping density and HI increased with increasing rainfall. Root and shoot growth was normal due to light competition under sufficient precipitation and low planting density. Soil drought and high intercropping density resulted in significant decrease in root to shoot rate (RSR) of 'Z958' as root competition for water increased. 4) In drought year (2011), competitive advantage was fully apparent in the two cultivars intercropping system, with yield and WUE increases of respectively 10.3% and 21.4%, 28.2% and 42.0% under two intercropping densities. Furthermore, yield and WUE of intercropped 'Z958' were 17.6% and 50.0% higher than that of 'S16' for the two-year experimental period. Finally, 'Z958' showed rational biomass distribution and response to soil drought when intercropped with 'S16' via reducing redundant root growth and decreasing excessive resources use. Effective root morphological adjustment and biomass distribution of 'Z958' were responsible for the yield and WUE increase.

Keywords: Summer maize; Cultivar intercropping; Dry matter distribution; Resource competition; Water use efficiency; Semi-arid region; Loess highland

黄土旱塬植物根系高效汲取土壤水分和养分并合理调整光合产物分配,是植物适应土壤干旱、提高资源利用效率的关键。不同作物品种间作可改善作物复合群体冠层结构,使不同形态作物能够多层次利用光能辐射、土壤水分和养分资源^[1]。玉米(*Zea mays*)高矮品种间作形成的波浪式冠层结构,可增加群体受光面积,改善冠层内部通气状况,提高群体内CO₂浓度,间作优势还可体现在叶片光合速率、植株形态发育和生物量分配等各个方面,实现光合产物积累和分配的有效调节^[2]。朱敏等^[3]研究认为,间作玉米品种生长特性形成互补,可增强植株对逆境的适应性和抗性,并有效防止由于品种单一而产生的防御机制脆弱现象。间作系统中,品种特征的一

致性和差异性相统一,高秆品种的增产潜力与矮秆品种的稳产性相结合,品种抗性、形态可塑性、系统发育等方面的协调互补对群体的增产、稳产至关重要^[4]。刘天学等^[5]指出:合理的间作模式,应由不同形态特征、生育期资源需求不同的作物,组合形成时空生态位互补的复合群体,通过增强农田生态系统的稳定性、提高作物群体对逆境胁迫的抗性,来实现光、热、水、肥、土、气等自然资源的高效利用。目前,品种间作模式研究多集中于群体质量、光合生理和抗性方面的研究,而品种间作根系形态发育、单株生物量积累和分配与产量形成的关系研究较少。

Weiner^[6]研究认为通过适当改变植物根、冠生物

量分配,可实现有限光照、水分和养分资源的高效利用,提高植物适应能力和竞争力。相对于直接的外界环境因素而言,植物内在基因差异也会影响其生物量的分配规律^[2-3]。植物通过根、茎、叶生物量的差异性分配来适应土壤水分时空异质性、光照强度层次分布等外部环境差异;植株生长和物质分配的异速增长规律,集中反映了环境因子、遗传因子、植物生长调控和物质分配间的协调适应策略^[7]。基于遗传适应和环境调控的作物间作栽培系统对有限资源的有益竞争,必然形成较强的群体特异性^[1],表现为产量的增加或资源利用效率的提升^[7]。不同基因型玉米品种生长特性的互补式间作,可显著优化群体复合结构,形成高效的冠层形态结构,提高光能截获率和作物光合速率;根系相互交错,提高单位体积土壤的根系分布,实现产量增加的同时,可以保证作物对水肥资源的高效利用^[8-9]。间作植物地上和地下部分的竞争强度是随环境不断变化的,两者之间的动态平衡,赋予植物更强的表型可塑性和环境适应性^[7-8]。间作竞争导致的生物量分配可塑性变化贯穿植物的整个生活史,决定着植物在不同环境中获取和利用资源的能力^[10-11],品种竞争能力的加强是以资源消耗和产量降低为代价的,竞争能力增强势必影响养分的再分配和有效利用,制约产量的形成^[1,5,12]。所以,在黄土旱地雨养农业区,科学合理利用作物(品种)形态可塑性及环境适应性特征,通过间作栽培实现种间竞争的产量和水分利用正向效应具有重要的现实意义。

在黄土旱地雨养农业区,品种间作竞争对玉米单株根冠形态发育的影响研究有待深入,生物量积累和分配规律还不清楚。群落生产效率的提升空间和潜力必须建立在单株生产能力提升的基础之上,本试验从干物质生产角度出发,以不同的年份降雨为环境背景,通过分析生物量分配与品种间作竞争效应的关联性,阐明品种间作模式下水分利用与产量提升的形态学规律,可为旱地玉米栽培、产量和水分利用提升提供理论依据和实践参考。

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所长武黄土高原农业生态试验站进行。试验站位于黄土高原中南部陕甘交界处的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区,光照充足,昼夜温差较大;年均降雨量 584.1 mm,且多集中于 7—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,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,0~200 cm 土壤容重均值为 1.4 g·cm⁻³;土壤有机质含量 11.6 g·kg⁻¹,全氮 0.8 g·kg⁻¹,碱解氮 52.5 mg·kg⁻¹,全磷 0.7 g·kg⁻¹,速效磷 11.2 mg·kg⁻¹,速效钾 154.9 mg·kg⁻¹,是黄土高原沟壑区典型性土壤。长武生态农业试验站玉米生育期降雨量分布和温度变化见图 1。试验区域 50 年(1960—2010 年)平均降雨量为 578 mm。试验期间,玉米生育期降雨量表现为:2011 年降雨量高出 50 年平均值 11.6%,而 2012 年降雨量低于 50 年平均值 14.0%,两个试验年份降雨差异明显,为探讨品种间作的水分利用优势提供良好的自然条件。

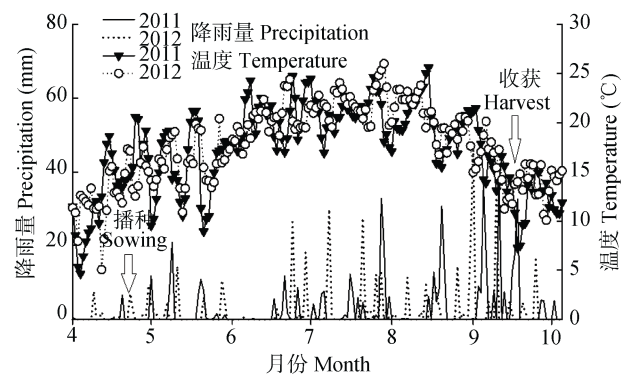


图 1 试验区长武生态农业试验站 2011—2012 年玉米生育期降雨与日平均温度的变化

Fig. 1 Changes of precipitation and daily temperature during maize growth period in 2011 and 2012 at the experiment site in Changwu Eco-agricultural Experimental Station, Chinese Academy of Sciences

1.2 试验设计及处理

试验选用黄土塬区普遍种植、株型不同的高产玉米品种:紧凑型‘郑单958’和半紧凑型‘沈单16号’。两个品种生育期相近,适应范围广、耐密植、抗倒伏和抗病性,适宜种植密度‘郑单958’为 6.00~7.50 万株·hm⁻²,‘沈单16号’为 5.25~7.25 万株·hm⁻²。

试验分别于 2011 年和 2012 年的 4—10 月进行。‘郑单958’(A)和‘沈单16号’(B)进行两个密度[4.5 万株·hm⁻²(1)和 7.5 万株·hm⁻²(2)]的双行间作试验。两个密度、两个品种间作处理 2 个(A1B1, A2B2),间作行比 1:1,采用 50 cm 等行距覆膜种植;两个密度下品种单作为对照,共 4 个处理(CK-A1, CK-A2, CK-B1, CK-B2)。小区面积 15 m²,各处理均采用随机区组试验设计,3 次重复。播前施用底肥 N180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²和 K₂O 90 kg·hm⁻²;各处理于拔节期雨后追施 N180 kg·hm⁻²,其余田间管理皆与当地农户

相同。

1.3 取样方法及数据分析

地上部生物量：分别于6叶期(V6)、12叶期(V12)、抽雄期(VT)、灌浆期(R1)、乳熟期(R3)、蜡熟期(R5)和成熟期(R6)，各处理随机选择代表性植株3棵，于地面上5 cm处切断，室内切段分装，于105 °C杀青0.5 h，并在80 °C烘至恒重，称量统计。

根系形态：在玉米扬花期利用根钻法(根钻规格：直径9 cm×高度15 cm)进行根系形态取样，取样位置如图2所示，分别在行间(P1)、株上(P2)和株间(P3)每小区抽样3株，0~100 cm每10 cm深度取样1次，土样直径9 cm，高度10 cm；土样分装在标注好的塑料袋中，利用尼龙网筛去除大部分土壤，然后在缓流水柱下清洗，洗出根系样本防水信封中保存。利用Epson Perfection V700 (Seiko Epson Crop, Suwa, Japan)室内进行根系扫描，根系长度、根表面积利用WinRHIZO (Regent Instrument Inc., Quebec, Canada)软件分析获得。

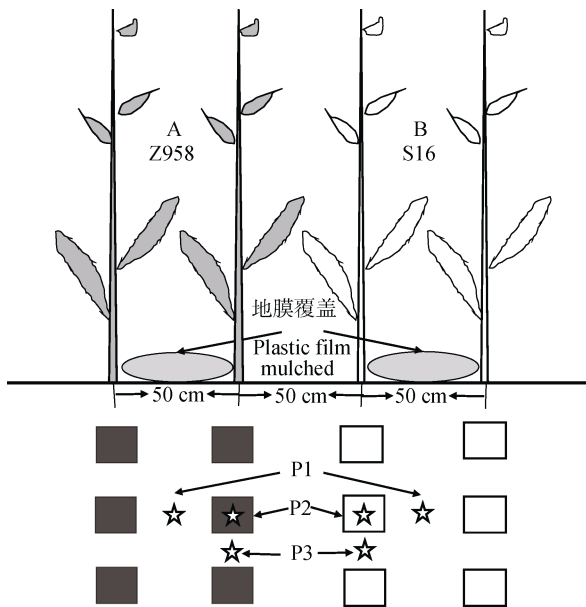


图2 玉米品种‘郑单 958’(Z958)和‘沈单 16 号’(S16)间作模式及根系取样点(P1, P2, P3)位置

Fig. 2 Sketch map of mixed cropping pattern of maize varieties ‘Z958’ and ‘S16’ and positions (P1, P2, P3) of root sampling

产量测定：2011年和2012年分别在9月15日和20日进行籽粒收获，选择各处理小区中间4行，长度为2 m的连续玉米植株，两玉米品种分别摘取所有成熟雌穗，去除苞叶，装入专用测产网袋，风干至15%含水量，进行籽粒产量测定。单株全部籽粒分别装袋放置80 °C下烘干至恒重，结合收获期地上部干物

质量，利用公式(1)计算收获指数(HI)：

$$HI = \frac{GB}{GB+SB} \quad (1)$$

式中：GB为籽粒干重，SB为地上部营养器官干重。

耗水量测定：土壤含水量分别在播前和收获期利用土钻法测定，于不同品种相邻的两行间选取3处样点，0~100 cm土层每10 cm取样1次，100~200 cm土层每20 cm取样1次，利用烘干法测定土壤含水量，水量平衡法计算土壤储水量差值。生育期降雨量利用长武生态农业试验站气象观测场连续监测获得，耗水量利用农田水量平衡法计算，产量和耗水量计算水分利用效率(WUE)。间作产量根据测定的混作品种各自产量，结合间作比例，得出间作模式产量：

$$Y_i = Y_{ai} \times Z_{ai} + Y_{bi} \times Z_{bi} \quad (2)$$

$$ET = \Delta SWS + P \quad (3)$$

$$WUE = Y_i / ET \quad (4)$$

式中： Y_i 为间作产量， Y_{ai} 为间作模式下品种A的产量， Y_{bi} 为间作模式下品种B的产量， Z_{ai} 为品种A的间作面积占比， Z_{bi} 为品种B间作面积占比，ET为耗水量， ΔSWS 为播前、收后土壤储水量差， P 为降雨量，WUE为水分利用效率。

1.4 数据分析

不同处理间平均值比较利用SPSS Statistics 17单因素方差分析(ANOVA, $P < 0.05$)；间作系统间显著性分析采用最小显著差法(LSD, $P < 0.05$)进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 品种间作下玉米单株生物量积累规律

随生育期延伸，单株生物量呈增加趋势。品种间作模式下，种间资源相互竞争抑制单株生物量积累(图3)。营养生长期，间作栽培对单株生物量无显著影响，但两玉米品种呈现出此消彼长的现象。营养生长期降雨充足有利于‘郑单 958’生物量积累；生殖生长阶段，间作竞争显著降低‘郑单 958’生物量分配。‘沈单 16 号’低密度间作下生殖生长迅速，降雨量欠缺时，间作‘沈单 16 号’生殖生长期生物量高于‘郑单 958’及其单作栽培。相对于同密度单作而言，扬花期是生物量间作优势消失的转折点，扬花期之前，间作栽培下两品种生物量积累呈正相关关系，增长幅度为‘郑单 958’明显大于‘沈单 16 号’。灌浆期伊始，两玉米品种生物量积累都受到间作竞争的限制，‘沈单 16 号’尤为显著。

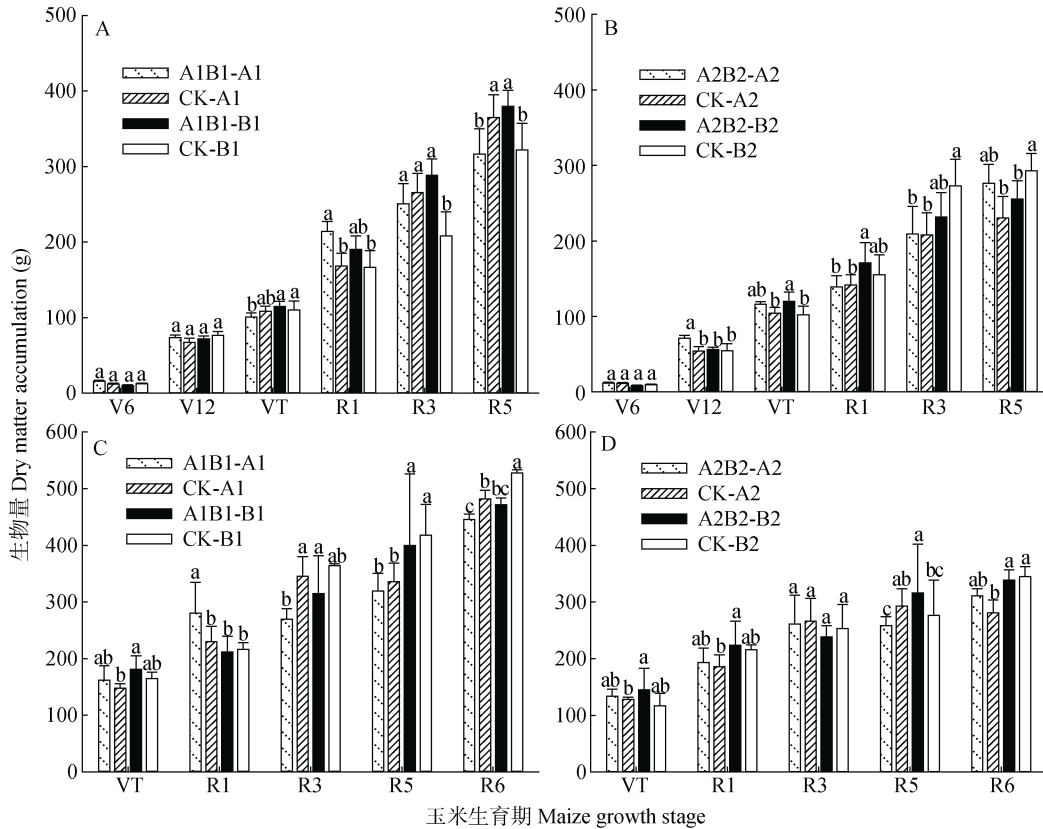


图 3 2011 年(A, B)和 2012 年(C, D)不同种植密度下品种间作对玉米生育期单株生物量积累的影响

Fig. 3 Effect of two maize cultivars intercropping on dry matter accumulation per plant at different maize growth stages in 2011 (A, B) and 2012 (C, D)

A1B1-A1(B1)表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)低密度(1, 45 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); A2B2-A2(B2)表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)高密度(2, 75 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); CK-A1(B1, A2, B2)分别表示两种密度下的两玉米品种的单作。柱状图上不同小写字母表示相同生育期不同处理间差异显著(P<0.05)。V6: 6 叶期; V12: 12 叶期; VT: 抽穗期; R1: 灌浆期; R3: 乳熟期; R5: 蜡熟期; R6: 成熟期。A1B1-A1(B1) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with low planting density (1, 45 000 plants·hm⁻²). A2B2-A2 (B2) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping systems of ‘Z958’ and ‘S16’ with high planting density (2, 75 000 plants·hm⁻²). CK-A1(B1) and CK-A2(B2) indicate monoculture of ‘Z958’(‘S16’) under low (1, 45 000 plants·hm⁻²) and high (2, 75 000 plants·hm⁻²) planting densities, respectively. V6: 6-leaf stage; V12: 12-leaf stage; VT: tasseling stage; R1: pustulation stage; R3: milking stage; R5: dough stage; R6: mature stage. Different lowercase letters above histograms at the same growth stage indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

2.2 品种间作下玉米收获指数(HI)的变化

玉米收获指数(HI)反映籽粒干重与地上部生物量积累之间的关系。间作品种的地上、地下部资源竞争, 总体有助于间作体系 HI 的提升, 即营养、生殖生物量优化配置, 有助于光合产物向籽粒转移、积累。从图 4 可以看出, 2011 年两玉米品种间作具有增加 HI 的趋势, 但与单作及两种密度间作无显著差异; 两个年份高密度间作和单作无显著差异; 年份间降雨量差异显著影响两玉米品种低密度间作下的 HI。

2.3 品种间作对玉米扬花期根系总表面积(SA)的影响

在雨水充足的 2011 年, 玉米品种高密度间作显著降低‘郑单 958’扬花期根系总表面积(SA); 干旱年份(2012), 低密度间作显著降低‘沈单 16 号’的根系 SA;

雨水充足年份, ‘郑单 958’高密度间作 SA 较同密度单作显著降低了 20.8%, ‘沈单 16 号’降低 9.2%, 无显著差异。降雨较少的 2012 年, 玉米扬花期 SA 较 2011 年显著降低, 低密度间作下‘沈单 16 号’的 SA 较单作显著降低 16.2%, 而‘郑单 958’则显著增加 21.1%; 高密度间作‘郑单 958’的 SA 较同密度单作显著降低 25.3%, 而‘沈单 16 号’的 SA 增加不显著(图 5)。间作体系中, ‘沈单 16 号’的 SA 两个降雨年份都无显著变化, 而‘郑单 958’的 SA 显著降低。

2.4 品种间作对玉米扬花期根长密度(RLD)的影响

玉米品种间作竞争和土壤水分时空异质性具有调节玉米根长密度(RLD)垂直分布的综合效应。年际间降雨差异引起土壤含水量的差异性分布, 显著影响间作玉米品种 0~40 cm 土层 RLD 分布。图 6 表明,

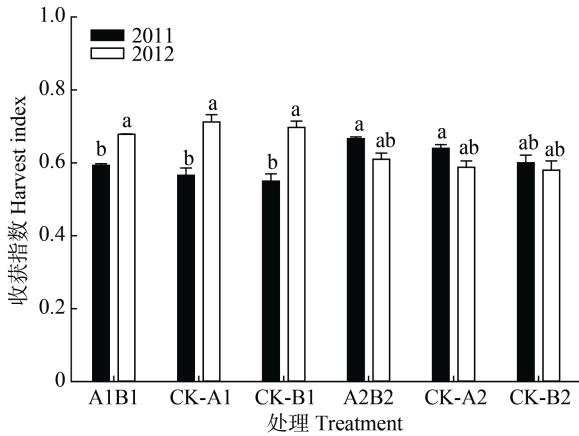


图 4 2011 年和 2012 年间作下玉米收获指数(HI)的变化
Fig. 4 Changes of harvested index (HI) of maize cultivars intercropping systems in 2011 and 2012

A1B1、A2B2 表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)低密度(1, 45 000 株·hm⁻²)和高密度(2, 75 000 株·hm⁻²)间作; CK-A1(B1, A2, B2)分别表示两种密度下的两玉米品种的单作。柱状图上不同小写字母表示不同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A1B1 and A2B2 represent maize cultivars ‘Z958’ and ‘S16’ intercropping systems with low (1, 45 000 plants·hm⁻²) and high (2, 75 000 plants·hm⁻²) planting densities. CK-A1(B1) and CK-A2(B2) indicate mono-cultured ‘Z958’(‘S16’) under low (1, 45 000 plants·hm⁻²) and high (2, 75 000 plants·hm⁻²) planting densities, respectively. Different lowercase letters above histograms indicate significant differences among treatments in different years at 0.05 level.

湿润年份(2011 年), 低密度间作水资源竞争相对缓和, ‘郑单 958’和‘沈单 16 号’的 RLD 在 0~20 cm 土层显著增加(11.1%~47.6%), 30~40 cm 土层呈显著降低趋势(-15.1%~-24.5%); 干旱年份(2012 年), 根系对水分的竞争较为激烈, 造成低密度间作下 RLD 在 0~30 cm 土层相对于单作显著增加(36.8%~119.7%), 且 40 cm 深度 RLD 呈增加趋势。高密度间作体系中, 对土壤水分的竞争程度更加激烈, 尤其是降雨较少的年份; 雨水充足的年份, ‘郑单 958’和‘沈单 16 号’高密度间作下 RLD 在 0~40 cm 土层显著增加(16.4%~49.7%), 且‘沈单 16 号’增加幅度大于‘郑单 958’; 在雨水亏缺年份, 高密度间作下品种根系对水分竞争强度增加, RLD 较单作只有在 0~20 cm 浅层土壤呈显著增加趋势(7.4%~45.5%), 且‘郑单 958’的增加幅度 16.3%~45.5%远大于‘沈单 16 号’的 7.4%~22.9%; 在 30~40 cm 土层 RLD 呈减少现象, ‘郑单 958’的 RLD 减少幅度达 18.6%。

2.5 品种间作下玉米植株根冠比(RSR)的差异

品种间作玉米植株根冠比(RSR)受品种根系生长特性和生育期降雨量的综合影响(图 7)。湿润年份(2011 年)两品种间作下 RSR 都呈降低趋势, 且高密

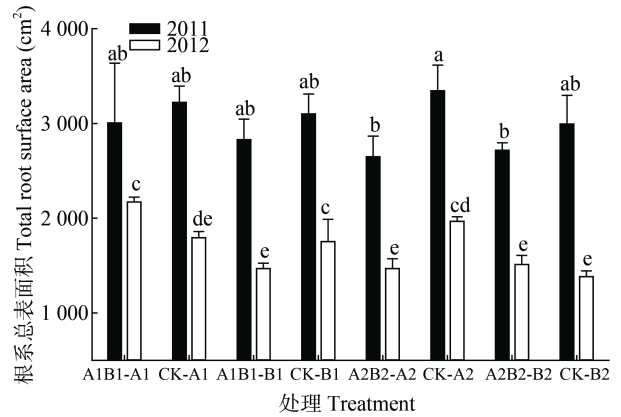


图 5 2011 年和 2012 年品种间作下玉米扬花期总根系表面积
Fig. 5 Root surface areas of maize cultivars in intercropping systems at maize flowering stage in 2011 and 2012

A1B1-A1(B1)表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)低密度(1, 45 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); A2B2-A2(B2)表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)高密度(2, 75 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); CK-A1(B1, A2, B2)分别表示两种密度下的两玉米品种的单作。柱状图上不同小写字母表示不同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A1B1-A1(B1) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with low planting density (1, 45 000 plants·hm⁻²). A2B2-A2(B2) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with high planting density (2, 75 000 plants·hm⁻²). CK-A1(B1) and CK-A2(B2) indicate mono-cultured ‘Z958’(‘S16’) under low (1, 45 000 plants·hm⁻²) and high (2, 75 000 plants·hm⁻²) planting densities, respectively. Different lowercase letters above histograms indicate significant differences among treatments in different years at 0.05 level.

度间作下‘沈单 16 号’较单作显著降低; 两品种间作 RSR 随密度的增加, 降低幅度增加, ‘郑单 958’降低幅度为 2.1%、9.4%, ‘沈单 16 号’为 6.2%、25.2%。干旱年份(2012 年)两品种间作下 RSR 表现出品种差异: ‘郑单 958’RSR 较单作降低, 低密度降低 13.0%, 高密度显著降低 28.4%; ‘沈单 16 号’低密度下 RSR 显著增加 53.5%, 高密度增加幅度为 12.3%, 变化不显著。品种根系生长特性随降雨时空分布而发生自我调节现象, 尤其是‘郑单 958’。

2.6 品种竞争下玉米间作系统产量形成和水分利用效率变化

品种间作玉米产量和 WUE 的增加受到生育期降雨量、品种特性及栽培密度的综合影响。湿润年份(2011 年), 低密度玉米品种间作产量和 WUE 与单作间无显著差异; 高密度间作在土壤水充足条件下, 产量和 WUE 出现降低现象(-2.0%和-0.2%, 表 1)。干旱年份(2012 年), 品种间作竞争起到积极的增产增效作用, 产量在高、低密度间作下较单作分别显著增加 10.3%和 21.4%, WUE 在高、低密度

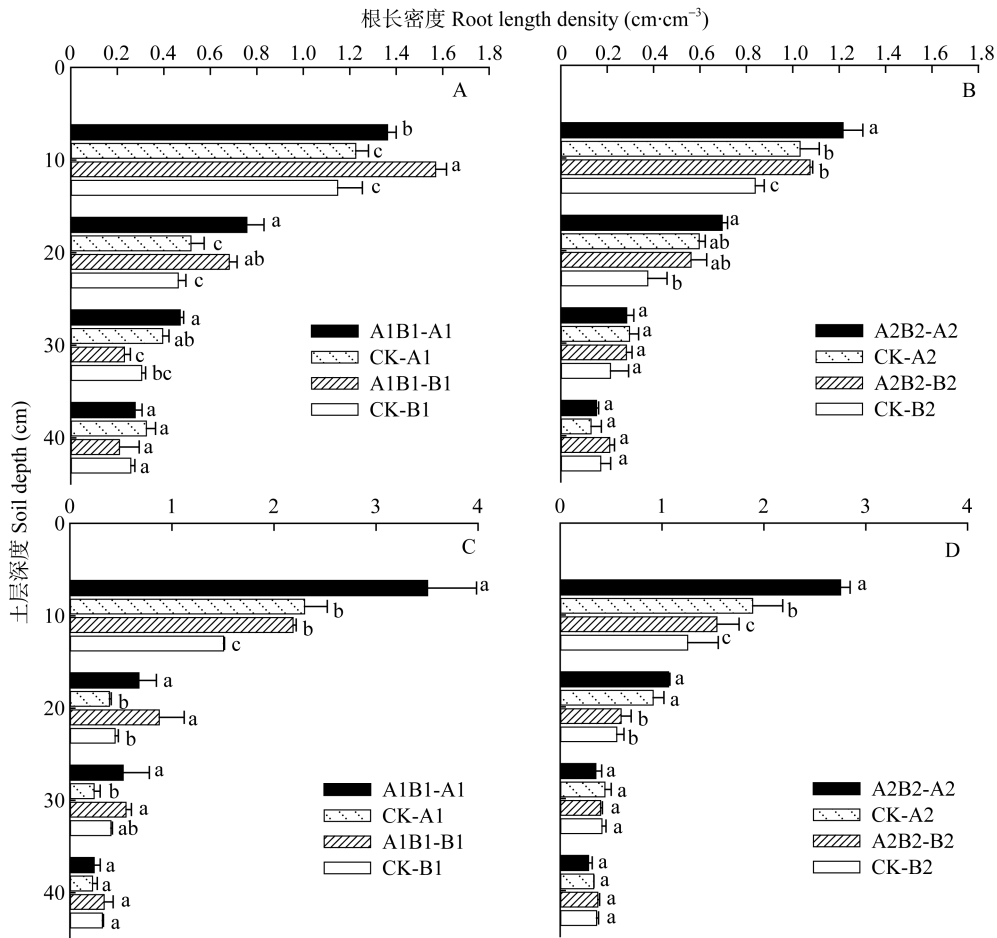


图 6 2011 年(A, B)和 2012 年(C, D)两品种间作下玉米扬花期根长密度(RLD)的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of root length density (RLD) of maize cultivars in intercropping systems at maize flowering stage in 2011 (A, B) and 2012 (C, D)

A1B1-A1(B1)表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)低密度(1, 45 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); A2B2-A2(B2)表示两玉米品种(A, ‘郑单 958’; B, ‘沈单 16 号’)高密度(2, 75 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); CK-A1(B1, A2, B2)分别表示两种密度下的两玉米品种的单作。柱状图上不同小写字母表示相同土层不同处理间差异显著($P < 0.05$)。A1B1-A1(B1) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with low planting density (1, 45 000 plants·hm⁻²). A2B2-A2(B2) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with high planting density (2, 75 000 plants·hm⁻²). CK-A1(B1) and CK-A2(B2) indicate monocultured ‘Z958’(‘S16’) under low (1, 45 000 plants·hm⁻²) and high (2, 75 000 plants·hm⁻²) planting densities, respectively. Different lowercase letters above histograms for the same soil depth indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

间作下较单作分别增加 28.8%和 42.0%, 且在两种间作密度下‘郑单 958’的 WUE 增加幅度较‘沈单 16 号’高 17.6%和 50.0%; WUE 在品种间作下的增长率大于产量增长率; 干旱年份, ‘郑单 958’具有更强的间作增产增效优势。

3 讨论

植物如何协调形态发育与功能之间的资源配置和利用, 即植物在生长过程中如何调节根、茎、叶各器官生物量分配来实现有限资源的高效利用, 是植物适应逆境胁迫环境的自我调节策略^[13-14]。本试验两年间降雨量差异较大, 形成年际间土壤含水量的鲜明对比, 对黄土旱区玉米生物量积累和分配造

成不同程度的影响。土壤干旱降低单株生物量, 增加根系生物量和生长深度, 群体收获指数有所提升, 适度干旱有助于生物量向籽粒积累, 但受栽培密度和栽培模式的综合影响。

植物生物量分配与功能发挥存在密切的关联性, 植物获取资源的能力与该植物直接向吸收该资源营养器官的能量投入呈正相关^[15-16]。较高大的植株或具有较大叶面积指数的群体, 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、养分竞争能力^[12]。基于上述原理, 黄土旱区玉米品种间作模式下, 影响植株生物量积累和分配的因素, 如品种特性和资源现状, 可以作为激发间作竞争正效应的客观依据。本试验结果表明, 玉米品种间作竞争抑

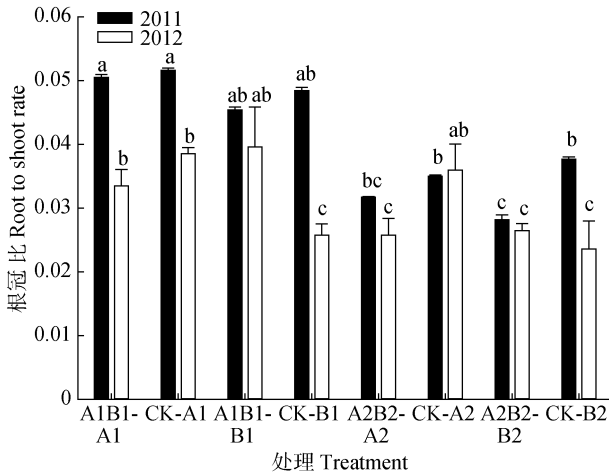


图 7 2011 年和 2012 年两玉米品种间作下根冠比的变化
Fig. 7 Root to shoot ratio (RSR) of maize cultivars in intercropping systems in 2011 and 2012

A1B1-A1(B1)表示两玉米品种(A, 郑单 958; B, 沈单 16 号)低密度(1, 45 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); A2B2-A2(B2)表示两玉米品种(A, 郑单 958; B, 沈单 16 号)高密度(2, 75 000 株·hm⁻²)间作下的‘郑单 958’(‘沈单 16 号’); CK-A1(B1, A2, B2)分别表示两种密度下的两玉米品种的单作。柱状图上不同小写字母表示不同年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A1B1-A1(B1) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with low planting density (1, 45 000 plants·hm⁻²). A2B2-A2(B2) represents maize cultivar ‘Z958’(‘S16’) in intercropping system of ‘Z958’ and ‘S16’ with high planting density (2, 75 000 plants·hm⁻²). CK-A1(B1) and CK-A2(B2) indicate mono-cultured ‘Z958’(‘S16’) under low (1, 45 000 plants·hm⁻²) and high (2, 75 000 plants·hm⁻²) planting densities, respectively. Different lowercase letters above histograms indicate significant differences among treatments in different years at 0.05 level.

制单株总生物量的积累,但在不同的降雨年份和发育阶段,表现出明显的品种差异:湿润年份,‘沈单 16 号’在低密度间作时具有较高的生物量积累速率,与其株型特点和生长习性相关;而‘郑单 958’在高密度间作和干旱年份,生殖生长后期具有较强的生物量积累能力。收获指数(HI)可以有效反映籽粒形成与地上部生物量积累之间的关系,在间作竞争环境下,高密度间作 HI 总体呈增加趋势,但较单作和低密度间作无显著差异;缺水年份(2012)低密度间作下 HI 显著高于平水年份(2011),但较单作出现降低现象,原因可能为竞争正效应弱于水分胁迫负效应,干旱激发了品种间作系统的资源互补现象^[12,15]。从生物量分配角度分析,相对于‘沈单 16 号’而言,间作下‘郑单 958’具有更强的自我调节和资源利用能力,而且干旱年份自我调节能力更加明显,植株通过降低营养器官资源消耗比例,提高籽粒生物量转化积累,尤其在籽粒灌浆期对有限资源的适应和调配更加稳定高效。

根系是最先感知土壤水分变化的功能构件,是连接土壤和植物地上部构件的桥梁^[8],间作栽培营造复杂多样的根际环境,提升不同植物间根系的相互作用和物质交流^[17]。当土壤水分含量或养分含量较低时,植物发育容易受到水分、养分的限制,植物分配至根系的生物量会增加,以获取更多的土壤水肥资源^[18];相反,当土壤水分和养分充足时,植物将更多的生物量分配至地上部分以增加光合作用能力^[9]。玉米品种间作系统中根系生物量、侧根长对于局部土壤水分、养分存在显著的互作效应^[19],间作竞争会增强此效应。本研究结果显示,玉米品种间作下根系形态特征与品种生长习性和间作密度紧密相关。低密度间作显著降低两玉米品种 0~30 cm 土层根长密度(RLD),高密度间作则显著降低 0~10 cm 土层 RLD,干旱条件下增加植株 RLD 的同时,加剧间作与单作栽培之间的 RLD 差异;干旱年份,‘郑单 958’在 0~20 cm 土层 RLD 增加幅度大于‘沈单 16 号’,且 30~40 cm 土层 RLD 降低幅度大于‘沈单 16 号’;湿润年份,低密度间作 0~20 cm 土层 RLD 显著降低,而高密度间作显著性差异发生在 0~10 cm 土层;根系总表面积(SA)两个降雨年份间差异较大,湿润年份品种间作降低 SA,高密度下‘郑单 958’降低显著;干旱年份,两玉米品种 SA 此消彼长,低密度间作‘沈单 16 号’显著降低而‘郑单 958’显著增高;高密度间作下‘郑单 958’的 SA 显著降低。说明‘郑单 958’在应对土壤干旱时具有更灵活的根系生长自我调节能力。史振声等^[2]研究也认为,在干旱年份,低密度间作下玉米单株水资源占有率有限,所以竞争力增加,根系分布在 0~40 cm 较单作显著增加;随着间作密度的增加,单株水分资源获得率降低、土壤水资源有效性减弱,两者同时限制根系的伸长生长,而在耕层土壤中的根系分布就会尽最大可能吸收土壤水分,导致 0~20 cm 土层 RLD 显著增加,以缓解土壤缺水造成植株生长受限。‘郑单 958’充分体现了竞争环境下根系应对土壤相对干旱的灵活性和高效性,是间作体现增产增效的主要贡献者。

根系与冠层构成了作物的整体功能系统,二者结构和功能的最优匹配对提高作物水分利用效率具有重要意义,根冠比可充分表征植物生物量在地下部和地上部器官中的分配策略^[20]。Hammer 等^[21]认为在美国玉米品种更替过程中,对产量有直接影响的是根系构型的优化,而非冠层结构的改变。因此,在我国黄土旱地农业区,可以通过栽培模式调节根

表 1 不同密度品种间作下玉米产量、耗水量(ET)和水分利用效率(WUE)的差异

Table 1 Differences in yield, water consumption (ET) and water use efficiency (WUE) between monoculture and intercropping of two maize cultivars under two planting densities

处理 Treatment	产量 Yield				耗水量 Water consumption (ET) (mm)		水分利用效率 Water use efficiency (WUE)			
	数值 Value (t·hm ⁻²)	增长率 Increasing rate (%)	数值 Value (t·hm ⁻²)	增长率 Increasing rate (%)			数值 Value (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	增长率 Increasing rate (%)	数值 Value (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	增长率 Increasing rate (%)
	2011		2012		2011	2012	2011		2012	
A1B1	9.13c	0.7	13.85c	21.4	353.14ab	345.34c	25.84c	1.0	40.10ab	42.0
A2B2	12.92b	-2.0	15.42a	10.3	352.87ab	351.01bc	36.62ab	-0.2	43.93a	28.8
CK-A1	9.09c		11.45d		347.99b	361.49b	26.12c		32.69d	
CK-B1	9.11c		12.57c		360.06a	373.98ab	25.31c		33.61d	
CK-A2	14.13a		14.35b		368.47a	383.10a	38.36a		37.45c	
CK-B2	12.12b		14.99b		345.14b	380.48a	35.11ab		39.39bc	
密度 Density (D)		**			NS			*		
年份 Year (Y)		**			NS			*		
D × Y		*			NS			*		

同列不同字母表示间作与单作处理间差异显著($P < 0.05$); 增长率表示相同年份、相同密度下间作产量和水分利用效率(WUE)相对于单作的增长率(%); *和**表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著; NS 表示不显著。Different letters in the same column mean significant differences between intercropping system and monoculture at 0.05 level. The increase rate of yield and WUE is increase of intercropping system compared with monoculture in the same year and under the same density. * and ** indicate significant effects at $P < 0.05$ and $P < 0.01$; NS indicates non-significant effect.

系发育和控制营养器官生长, 改变生物量在营养器官和生殖器官间的分配比例, 实现产量增加和水资源高效利用^[22-23]。本研究结果显示, 间作玉米品种根冠比(RSR)存在明显差异, 随间作密度的增加, 根、冠生长对资源竞争加剧, RSR 显著降低; 但在干旱年份‘沈单 16 号’低密度间作 RSR 显著增加, 湿润年份高密度间作显著降低; 而‘郑单 958’的 RSR 在两个降雨年份皆是高密度间作下显著降低, 反映了品种在竞争环境下地上部、地下部生物量分配策略存在显著差异: ‘沈单 16 号’低密度竞争下牺牲地上部生物量来增加根系的资源获取能力, 高密度时根系竞争力减弱, 根系生物量远小于冠层生物量; ‘郑单 958’通过调节根系冗余生长, 降低资源的过渡消耗来保障冠层功能和最终产量的形成。在不同的土壤水分条件下, 植物通过调整地上和地下部器官生物量的分配产生形态可塑性生长^[24], 当光合产物向某一功能器官分配增加时, 势必导致向其他功能分配的减少, 也就是说, 个体竞争能力的提高将极有可能导致生殖功能分配的减少, 这样对群体高产来说是不利的^[25]。但是, 在间作栽培模式下, 只要个体因资源竞争而获得的收益大于为此而付出的代价, 那么优化个体生物量分配模式的间作竞争将有利于作物群体产量和资源利用效率的提升^[2,26]。

资源竞争对于不同植物在生物量分配上的影响存在差异^[20]。营养生长与繁殖生长的分异现象在竞争环境下变化更加多样和复杂, 禾本科植物燕麦

(*Avena sativa*)繁殖器官生物量分配比例随资源竞争强度的增加呈上升趋势, 根生物量分配则逐渐减少; 物质转移过程也随着竞争环境的变化, 差异性集中体现在生殖生长期即籽粒形成阶段^[22]。生物量分配在营养器官和生殖器官中的比例, 最终影响光合产物转移和籽粒形成^[27]。增加间作密度降低根系自身对有限资源的损耗, 同时提升单根资源吸收和运输能力, 显著增加间作优势和地下部贡献率, 地上部、地下部器官合理竞争可提高群体干物质生产力, 从而弥补单株生产力的下降, 有利于密植效应充分发挥^[28]。本研究结果得出, 干旱年份, 间作竞争可有效提高玉米产量和水分利用效率(WUE), 高、低密度间作增产率分别为 10.3%和 21.4%, WUE 分别提高 28.2%和 42.0%; 且‘郑单 958’增产和增效能力分别较‘沈单 16 号’高 17.6%和 50.0%, 干旱环境下‘郑单 958’具有更强的间作增产、增效优势得益于‘郑单 958’灵活、高效的根系自我调控能力和器官间物质合理配置机制。

4 结论

间作栽培模式下, 玉米品种单株生物量较单作普遍降低; ‘郑单 958’在高密度间作下籽粒灌浆后期生物量积累较大; 低密度间作下随生育期的延伸, 单株生物量逐渐减小, 降雨年份间差异不明显; 降雨量对‘沈单 16 号’影响较大, 在低密度间作下单株生物量显著增加, 干旱年份和高密度间作显著制约‘沈单 16 号’单株生物量积累; 地上部生物量变化与

根系形态紧密相关, 干旱年份低密度间作‘沈单 16 号’扬花期根系总表面积显著降低, 两个降雨年份高密度间作下‘郑单 958’的根系总表面积都显著下降, 可有效调节土壤水分、养分吸收运输, 降低资源无效消耗; 密度增加和降雨亏缺都会加剧间作品种根系对土壤水肥的竞争, 造成间作体系中 0~20 cm 土层两个玉米品种根长密度显著增加, 雨水亏缺加强间作竞争对根长密度的促进作用, 并造成 20~40 cm 土层根长密度的增加, 且表层土壤中‘郑单 958’的根长密度增加幅度远高于‘沈单 16 号’; 干旱和间作密植造成‘郑单 958’根冠比显著下降, 体现出‘郑单 958’减少根系冗余和资源无效损耗的自我调节机制; 干旱和低密度间作竞争有利于群体收获指数的提高, 主要取决于土壤水分分布与品种竞争强度的互相权衡; 干旱年份产量和 WUE 增长显著, 品种高、低密度间作下产量和 WUE 增加幅度分别相差 11.1%和 11.8%, 高、低密度间作增幅差异显著; 群体密度增加和干旱环境充分激发了品种对资源的获取能力, 更强的根系自我调节和灵活的生物量分配机制, 是高密度品种间作充分发挥品种特性和间作竞争优势的关键。

参考文献 References

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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. Research on mixed cropping of different maize hybrids[J]. China Seed Industry, 2010, (8): 63-65
- [4] 李潮海, 苏新宏, 孙敦立. 不同基因型玉米间作复合群体生态生理效应[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2096-2103
LI C H, SU X H, SUN D L. Ecophysiological characterization of different maize (*Zea mays* L.) genotypes under mono- or inter-cropping conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2096-2103
- [5] 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
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
- [6] WEINER J. Allocation, plasticity and allometry in plants[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2004, 6(4): 207-215
- [7] 贾风勤, 张娜, 纳森巴特. 干旱地区不同生境庭芥生物量的分布研究[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(2): 128-134
JIA F Q, ZHANG N, NASEN BATE. Study on biomass distribution of *Alyssum desertorum* under different habitats in arid area[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, 37(2): 128-134
- [8] 王小林, 张岁岐. 黄土塬区不同玉米品种间作的竞争力表现[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1403-1410
WANG X L, ZHANG S Q. Competitiveness of intercropped maize cultivars in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1403-1410
- [9] 谢然, 陶冶, 常顺利. 四种一年生荒漠植物构件形态与生物量间的异速生长关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 648-655
XIE R, TAO Y, CHANG S L. Allometric relationship between modular morphology and biomass of four annuals in the Gurbatunggut Desert, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 648-655
- [10] 刘文辉, 张英俊, 师尚礼, 等. 高寒地区燕麦(*Avena sativa* L.)人工草地生物量分配对施肥和混播措施的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 398-407
LIU W H, ZHANG Y J, SHI S L, et al. Effect of variety, fertilization and mixture sowing on oat biomass allocation in the alpine cultivated pasture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2): 398-407
- [11] 王杨, 徐文婷, 熊高明, 等. 櫟木生物量分配特征[J]. 植物生态学报, 2017, 41(1): 105-114
WANG Y, XU W T, XIONG G M, et al. Biomass allocation patterns of *Loropetalum chinense*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(1): 105-114
- [12] 王小林, 张岁岐, 王淑庆. 不同密度下品种间作对玉米水分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 171-178
WANG X L, ZHANG S Q, WANG S Q. Effects of cultivars intercropping on maize water balance under different planting densities[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 171-178
- [13] 赵春玲. 双基因型玉米间作品种组合及行比模式研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010: 32-34
ZHAO C L. Study on model of variety combination and row ratio for maize intercropping with double-genotypes[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010: 32-34
- [14] 罗永开, 方精云, 胡会峰. 山西芦芽山 14 种常见灌木生物量模型及生物量分配[J]. 植物生态学报, 2017, 41(1): 115-125
LUO Y K, FANG J Y, HU H F. Biomass estimation models and allocation patterns of 14 shrub species in Mountain Luya, Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(1): 115-125
- [15] 张继, 杨晓绒, 贾娜尔·阿汗, 等. 新疆伊犁河岸小叶白蜡复叶构件生物量分配[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 114-119
ZHANG W, YANG X R, JIANAER AHAN, et al. Biomass allocation among components of compound leaves of *Fraxinus sogdiana* in Yili River Reaches, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 114-119

- [16] FUJITA Y, VENTERINK H O, VAN BODEGOM P M, et al. Low investment in sexual reproduction threatens plants adapted to phosphorus limitation[J]. *Nature*, 2014, 505(7481): 82–86
- [17] 陈哲, 伊霞, 陈范骏, 等. 玉米根系对局部氮磷供应响应的基因型差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 83–90
CHEN Z, YI X, CHEN F J, et al. Differential response of maize roots to heterogeneous local nitrogen and phosphorus supply and genotypic differences[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 83–90
- [18] 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]. *Seed*, 2008, 27(12): 1–4
- [19] 廖荣伟, 刘晶森, 白月明, 等. 玉米生长后期的根系分布研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(3): 284–291
LIAO R W, LIU J M, BAI Y M, et al. Spatial distribution and temporal variation of maize root in the soil under field conditions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(3): 284–291
- [20] 杨弦, 郭焱培, 安尼瓦尔·买买提, 等. 中国北方温带灌丛生物量的分布及其与环境的关系[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 22–30
YANG X, GUO Y P, MOHHAMOT ANWAR, et al. Distribution of biomass in relation to environments in shrublands of temperate China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(1): 22–30
- [21] HAMMER G L, DONG Z S, MCLEAN G, et al. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. Corn Belt?[J] *Crop Science*, 2009, 49(1): 299–312
- [22] 赵宏魁, 马真, 张春辉, 等. 种植密度和施氮水平对燕麦生物量分配的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(2): 249–258
ZHAO H K, MA Z, ZHANG C H, et al. The reproductive allocation of *Avena sativa* under different planting densities and nitrogen addition treatments[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(2): 249–258
- [23] 刘梅, 吴广俊, 路笃旭, 等. 不同年代玉米品种氮素利用效率与其根系特征的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 71–82
LIU M, WU G J, LU D X, et al. Improvement of nitrogen use efficiency and the relationship with root system characters of maize cultivars in different years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 71–82
- [24] 徐军, 陈海玲, 李清河, 等. 土壤水分含量对白刺幼苗表型可塑性生长的影响[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 101–105
XU J, CHEN H L, LI Q H, et al. Phenotypic plasticity of *Nitraria tangutorum* response to water change[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 101–105
- [25] 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): 205–210
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 Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3): 205–210
- [26] 冯萌, 于成, 林丽果, 等. 灌溉和施氮对河西走廊紫花苜蓿生物量分配与水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(12): 1623–1632
FENG M, YU C, LIN L G, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer on biomass distribution and water use efficiency of alfalfa (*Medicago sativa*) in Hexi Corridor[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(12): 1623–1632
- [27] 王一帆, 秦亚洲, 冯福学, 等. 根间作用与密度协同作用对小麦间作玉米产量及产量构成的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(5): 754–762
WANG Y F, QIN Y Z, FENG F X, et al. Synergistic effect of root interaction and density on yield and yield components of wheat/maize intercropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5): 754–762
- [28] 宋振伟, 齐华, 张振平, 等. 春玉米中单 909 农艺性状和产量对密植的响应及其在东北不同区域的差异[J]. *作物学报*, 2012, 38(12): 2267–2277
SONG Z W, QI H, ZHANG Z P, et al. Effects of plant density on agronomic traits and yield in spring maize Zhongdan 909 and their regional differences in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(12): 2267–2277