

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180850

任旭灵, 滕园园, 王一帆, 殷文, 柴强. 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 860-869

REN X L, TENG Y Y, WANG Y F, YIN W, CHAI Q. Response of interspecific competition and complementarity of maize/pea intercropping to reduced tillage and high-density planting[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 860-869

## 玉米间作豌豆种间竞争互补对少耕密植的响应\*

任旭灵, 滕园园, 王一帆, 殷文, 柴强\*\*

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院 兰州 730070)

**摘要:**通过对种间关系的研究,确定玉米间作豌豆中能否集成少耕和密植效应,对进一步优化间作技术具有理论指导意义。2016—2017年,本研究在河西绿洲灌区,以玉米间作豌豆为研究对象,设传统耕作、少耕两种耕作措施和低、中、高3种玉米密度,研究不同处理对玉米间作豌豆种间竞争力和豌豆收获后间作玉米恢复效应的影响,揭示种间关系与间作产量的相关关系。结果表明,不同间作处理的土地当量比均大于1,说明本试验条件下的间作处理均具有增产优势;与传统耕作相比,少耕使玉米间作豌豆产量提高5.79%;少耕条件下,中密度间作产量较低密度、高密度处理显著提高8.37%、9.09%,说明玉米间作豌豆集成少耕和中密度具有进一步增产的优势。少耕结合中密度强化了间作豌豆对玉米的竞争力,较低密度、高密度处理的竞争力分别高36.56%、20.17%,形成间作玉米恢复效应强化的基础;豌豆收获后,少耕间作玉米具有明显的恢复生长效应,较传统耕作高10.30%~47.11%。间作群体的籽粒产量与豌豆相对于玉米全生育期内的平均竞争力呈二次曲线相关关系,当竞争力在0.25时利于间作获得高产。因此,玉米间作豌豆模式中集成少耕和密植技术,通过调控种间关系进一步挖掘间作增产潜力,少耕结合玉米中密度可作为绿洲灌区玉米间作豌豆增产的理想措施。

**关键词:** 绿洲灌区; 玉米间作豌豆; 少耕; 种植密度; 种间竞争力; 恢复效应

**中图分类号:** S529; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)06-0860-10

## Response of interspecific competition and complementarity of maize/pea intercropping to reduced tillage and high-density planting\*

REN Xuling, TENG Yuanyuan, WANG Yifan, YIN Wen, CHAI Qiang\*\*

(Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Through the study of an interspecific relationship, the effects of reduced tillage and high-density planting was analyzed in a maize/pea intercropping system. The research could provide a theoretical basis for further optimization of intercropping technology. The study, conducted in 2016–2017 in the Hexi Oasis Irrigation Area, used a maize/pea intercropping system as the research setup. Two tillage patterns were measured: conventional tillage and reduced tillage. Simultaneously, maize was planted at low, medium and high density to study the effects of different treatments on the competitiveness of maize/pea intercropping systems. Also, the recovery ability of maize after the pea harvest was analyzed to reveal the interspecies relationship and the correlation with intercropping pro-

\* 国家现代农业绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G-12)、国家自然科学基金项目(31771738)和国家“万人计划”项目资助

\*\* 通信作者: 柴强, 主要从事多熟种植、节水农业和循环农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

任旭灵, 主要研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: renxl1020@163.com

收稿日期: 2018-09-17 接受日期: 2018-11-15

\* This study was supported by the National Modern Agricultural Green Manure Industry Technology System of China (CARS-22-G-12), the National Natural Science Foundation of China (31771738) and the National Ten-thousand Talents Program of China.

\*\* Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

Received Sep. 17, 2018; accepted Nov. 15, 2018

duction. The results showed that the land equivalent ratio of different intercropping treatments was higher than 1, indicating that these intercropping treatments resulted in an increased yield. Compared with conventional tillage, reduced tillage increased the yield of maize/pea intercropping system by 5.79%. Under reduced tillage conditions, the yield of intercropping system at medium density was considerably increased by 8.37% and 9.09% relative to low-density and high-density conditions, respectively. This observation indicates that combining reduced tillage with a medium-density plantation further increased the yield of a maize/pea intercropping system. Reduced tillage combined with a medium-density plantation enhanced the competitiveness of maize/pea intercropping: the competitiveness was 36.56% and 20.17% higher relative to the low-density and high-density treatment, respectively. The enhanced competitiveness formed the basis of the enhanced maize intercropping recovery effect. After the pea harvest under reduced tillage conditions, maize displayed a significant recovery growth effect, which was 10.30%–47.11% higher than that under conventional tillage conditions. The correlation between the grain yields of intercropping system and the average competitiveness of pea relative to maize during the whole growth period was quadratic function. The integration of reduced tillage and a medium-density planting technology in the maize/pea intercropping model provides the potential for an intercropping system to increase the yield by regulating the interspecific relationship.

**Keywords:** Oasis irrigation area; Maize/pea intercropping; Reduced tillage; Planting density; Interspecific competitiveness; Recovery effect

间作指在同一个生长季节、同一块土地上种植两种或两种以上作物<sup>[1]</sup>, 是一种基于生态多样性的种植模式<sup>[2]</sup>。该模式可提高单位耕地总产量和资源利用效率, 是作物高效生产和低碳农业协调发展的种植模式<sup>[3-5]</sup>。生产实践中, 禾豆间作是应用最为广泛的间作模式<sup>[6]</sup>, 增效、稳产效果显著<sup>[7]</sup>。研究表明, 优化种间关系是提高间作效应的生态学基础<sup>[8]</sup>, 作物搭配<sup>[9]</sup>、空间结构改变<sup>[10]</sup>、肥水管理<sup>[11-12]</sup>、密度调整<sup>[13-14]</sup>等是调控种间关系的常用手段, 其中, 密植是间作增产的最重要机制之一<sup>[15]</sup>, 而密植效应的发挥必须建立在一定的资源供给基础之上, 特定管理技术只有配置适宜的密度才能充分发挥间作优势。另一方面, 随作物生产对资源减投和环境友好要求的增强, 资源减投型间作理论和技术亟待深入。在诸多资源减投和环境友好型技术中, 保护性耕作可改善农田生态微环境<sup>[16-18]</sup>、影响作物生长发育<sup>[19]</sup>。其中玉米少耕试验研究表明, 该技术具有保持土壤肥力、缓冲土壤反应、改善土壤生态环境的作用, 并对玉米生长发育具有显著影响<sup>[20-22]</sup>。纵观现有研究, 将少耕集成在间作中的研究十分薄弱<sup>[12]</sup>, 使得生产实践中缺乏利用保护性耕作技术提升间作优势的理论依据。河西绿洲灌区气候条件适合发展间作, 以玉米(*Zea mays* L.)间作豌豆(*Pisum sativum* L.)为代表的间作模式应用广泛, 但该模式采用的传统翻耕技术投入大, 且参考小麦(*Triticum aestivum* L.)间作玉米设置的玉米密度使得密植效应未能充分发挥。为此, 本研究以玉米间作豌豆为参试对象, 设置不同耕作措施和玉米密度, 探讨不同处理对玉米间作豌豆种间关系动态的影响, 揭示种间关系与间作产量的相关关系, 以期利用保护性耕作和密植技术优化间作物种间关系, 进一步发挥间作优势提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学绿洲农业科研教学基地(37°30'N, 103°5'E)进行。该地位于河西走廊东端, 属寒温带干旱气候区, 海拔 1 581 m; 年降水量约 160 mm, 蒸发量高于 2 000 mm, 日照时数 2 968.2 h,  $\geq 0$  和  $\geq 10$  的有效积温分别为 3 646 和 3 149 , 年太阳辐射总量 504~630 kJ·cm<sup>-2</sup>。玉米间作豌豆是该地区主要的间作种植模式, 传统栽培采用翻耕、玉米带每年地膜覆盖栽培。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为‘先玉 335’, 豌豆品种为‘陇豌 1 号’。2015 年为预试验, 2016 年和 2017 年进行正式试验。设玉米间作豌豆、单作玉米和单作豌豆 3 种植模式; 在单作玉米和玉米间作豌豆中设两种耕作方式, 分别为少耕(即在当年玉米收获后不耕作, 保留地膜翌年直接进行播种)和传统耕作(即当年玉米收获后进行秋季翻耕, 翌年播前覆新膜); 玉米设低、中、高 3 个密度梯度, 间作玉米、间作豌豆带宽分别为 110 cm、80 cm, 详细试验代码及处理见表 1。试验共 13 个处理, 每处理重复 3 次。小区面积 5.7 m×10 m。2016 年玉米于 4 月 25 日播种, 9 月 27 日收获; 豌豆于 3 月 21 日播种, 7 月 6 日收获。2017 年玉米于 4 月 27 日播种, 9 月 25 日收获; 豌豆地 3 月 19 日播种, 7 月 9 日收获。单作豌豆及间作豌豆带施纯 N 135 kg·hm<sup>-2</sup>, 纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 67.5 kg·hm<sup>-2</sup>, 全作基肥一次性施入; 单作玉米及间作玉米带施纯 N 450 kg·hm<sup>-2</sup>, 按基肥 大喇叭口期追肥 灌浆期追肥=3 6 1 分施, 纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 225 kg·hm<sup>-2</sup>, 全部作基肥。

表 1 试验代码及处理  
Table 1 Codes of different treatments

处理 Treatment	耕作方式 Tillage method	种植方式 Planting pattern	种植密度 Planting density ( $10^4$ plant·hm <sup>-2</sup> )		处理 Treatment	年际间耕作措施试验操作说明 Experiments on interannual tillage measures		
			玉米 Maize	豌豆 Pea		2015	2016	2017
CTM1	传统耕作	单作玉米	7.80	—	CTM→RTM	单作玉米 Sole maize	单作玉米, 传统耕作 Sole maize, conventional tillage	单作玉米, 少耕耕作 Sole maize, reduced tillage
CTM2	Conventional tillage	Sole maize	10.35	—				
CTM3			12.90	—				
RTM1	少耕		7.80	—	RTM→CTM	单作玉米 Sole maize	单作玉米, 少耕耕作 Sole maize, reduced tillage	单作玉米, 传统耕作 Sole maize, conventional tillage
RTM2	Reduced tillage		10.35	—				
RTM3			12.90	—				
CTI1	传统耕作	玉米间作豌豆	4.50	10	CTI→RTI	玉米/豌豆 Maize/pea intercropping	玉米/豌豆, 传统耕作 Maize/pea intercropping, conventional tillage	玉米/豌豆, 少耕耕作 Maize/pea intercropping, reduced tillage
CTI2	Conventional tillage	Maize/pea intercropping	6.00	10				
CTI3			7.50	10				
RTI1	少耕		4.50	10	RTI→CTI	玉米/豌豆 Maize/pea intercropping	玉米/豌豆, 少耕耕作 Maize/pea intercropping, reduced tillage	玉米/豌豆, 传统耕作 Maize/pea intercropping, conventional tillage
RTI2	Reduced tillage		6.00	10				
RTI3			7.50	10				
P			—	24	P	单作豌豆 Pea	单作豌豆 Pea	单作豌豆 Pea

### 1.3 测定指标及计算方法

干物质质量: 自玉米苗期, 每隔 15 d 随机选取长势均匀的玉米植株 5 株、豌豆 10 株, 于 105 °C 下杀青, 80 °C 烘干至恒重后称量计算单位面积下的地上干物质累积量。

籽粒产量: 玉米、豌豆成熟后, 按小区收获测产, 测定其籽粒产量与生物产量。

间作优劣势: 采用土地当量比(LER)衡量间作优劣势:

$$LER=(Y_{IM}/Y_{SM})+(Y_{IP}/Y_{SP}) \quad (1)$$

式中:  $Y_{IM}$  和  $Y_{IP}$  分别代表间作玉米和间作豌豆籽粒产量,  $Y_{SM}$  和  $Y_{SP}$  代表单作玉米和单作豌豆籽粒产量。当  $LER>1$  时, 表示间作优势; 当  $LER<1$  时, 表示间作劣势。

种间竞争能力: 作物竞争能力表示豌豆相对玉米的竞争能力<sup>[14]</sup>:

$$A_{PM}=Y_{IP}/Y_{SP} \times P_P - Y_{IM}/Y_{SM} \times P_M \quad (2)$$

式中:  $P_M$  和  $P_P$  分别代表玉米和豌豆所占土地比例, 本研究中  $P_M=0.58$ ,  $P_P=0.42$ ;  $Y_{IM}$  和  $Y_{IP}$  分别代表间作玉米和间作豌豆生物产量;  $Y_{SM}$  和  $Y_{SP}$  代表单作玉米和单作豌豆生物产量。当  $A_{PM}>0$  时, 表示豌豆竞争能力强于玉米; 当  $A_{PM}<0$  时, 表示豌豆竞争能力弱于玉米。

玉米恢复效应: 恢复效应表示早熟作物收获后晚熟作物生长发育恢复程度, 同一时期间作玉米的干物质积累速率( $CGR_I$ )与单作玉米干物质积累速率( $CGR_M$ )的比值  $R>1$ , 说明间作具有恢复效应,  $R<1$ ,

说明间作无恢复效应。

$$CGR=(W_2-W_1)/(t_2-t_1) \quad (3)$$

$$R=CGR_I/CGR_M \quad (4)$$

式中:  $W_2$  和  $W_1$  分别表示豌豆收获后, 玉米在不同测定时期积累的生物量( $kg \cdot hm^{-2}$ ),  $t_2$  和  $t_1$  分别表示 2 个测定时期。

### 1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 17.0 软件对数据进行整理、分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米间作豌豆的群体产量表现及土地利用效率

#### 2.1.1 不同间作处理的土地当量比

不同间作处理的土地当量比(LER)如图 1 所示, 两年的土地当量比均 $>1$ , 说明玉米间作豌豆具有增产效应。2016 年传统耕作低、中、高密度处理下 LER 较少耕耕作下低、中、高密度处理分别降低 5.18%、18.00%、19.48%; 2017 年传统耕作下低、中、高 3 个密度较少耕耕作处理下低、中、高 3 个密度的土地当量比分别降低 0.87%、5.52%、7.65%。不同玉米密度对两年的 LER 影响无明显规律。由此说明, 玉米间作豌豆较单作豌豆、单作玉米具有增产优势, 且在少耕条件下优势明显。

#### 2.1.2 玉米间作豌豆群体产量表现

间作少耕密植处理下产量如表 2 所示, 生物产量变化与籽粒产量一致, 间作群体籽粒产量较单作豌豆增产 140.7%~229.4%, 较单作玉米降低 5.4%~22.0%, 均

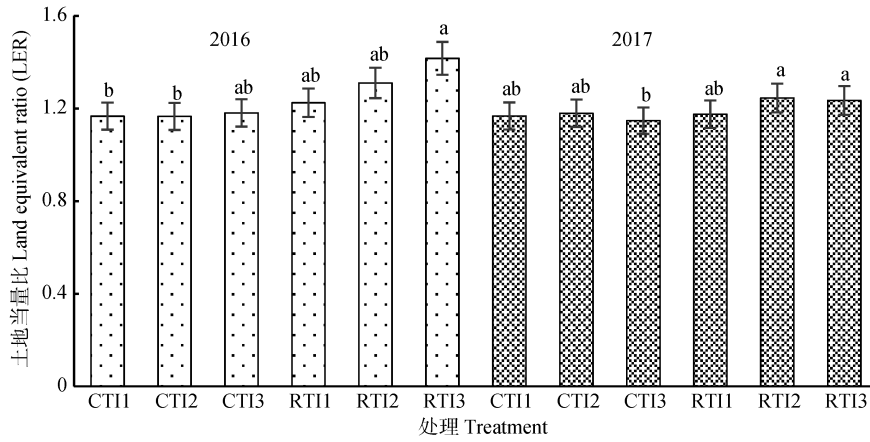


图 1 2016—2017 年玉米/豌豆间作系统不同耕作措施和玉米密度处理的土地当量比

Fig. 1 Land equivalent ratios of maize/pea intercropping system under different tillage measures and maize densities in 2016 and 2017  
 不同小写字母表示同一年份各处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。图中 CT 代表传统耕作, RT 代表少耕, I 代表间作, 1、2、3 代表玉米低密度、中密度、高密度。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same year at  $P < 0.05$ . CT: conventional tillage; RT: reduced tillage; I: intercropping; 1: low density; 2: medium density; 3: high density.

表 2 2016 年和 2017 年少耕密植处理下玉米/豌豆间作系统的产量表现

Table 2 Yield of maize/pea intercropping system under different tillage measures and maize densities in 2016 and 2017  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield			生物产量 Biological yield		
		豌豆 Pea	玉米 Maize	总产量 Total	豌豆 Pea	玉米 Maize	总产量 Total
2016	CTM1	—	12 059±292b	12 059±292b	—	26 175±4 024b	26 175±4 024b
	CTM2	—	12 695±221a	12 695±221a	—	27 859±370ab	27 859±370ab
	CTM3	—	12 151±551b	12 151±551b	—	27 907±775ab	27 907±775ab
	RTM1	—	12 214±1 477b	12 214±1 477b	—	26 712±3 047b	26 712±3 047b
	RTM2	—	12 682±195a	12 682±195a	—	28 357±1 081a	28 357±1 081a
	RTM3	—	12 027±643b	12 027±643b	—	27 878±1 860ab	27 878±1 860ab
	CTI1	2 085±167d	8 412±419f	10 498±434e	4 995±1 152d	17 841±598e	22 837±933e
	CTI2	2 105±90d	8 543±721ef	10 648±731e	5 094±1 009d	18 550±614cd	23 645±977d
	CTI3	2 052±196d	8 710±872ef	10 763±1 039de	5 162±932cd	18 236±857d	23 399±1 215de
	RTI1	2 238±216c	8 808±1 045de	11 047±992d	4 789±228d	18 004±1 630de	22 794±1 656e
	RTI2	2 397±128b	9 699±1 007c	12 097±1 069b	5 639±531b	18 939±1 748c	24 579±1 587c
	RTI3	2 339±231b	9 041±1 271d	11 380±1 375c	5 354±334c	18 689±1 917cd	24 044±1 878cd
	P	4 452±229a	—	4 452±229f	8 910±83a	—	8 910±83f
	2017	CTM1	—	13 251±375c	13 251±375cd	—	26 882±1816bc
CTM2		—	14 460±251b	14 460±251b	—	29 236±799ab	29 236±799ab
CTM3		—	13 785±580bc	13 785±580bc	—	28 083±822bc	28 083±822bc
RTM1		—	14 205±360b	14 205±360bc	—	26 701±1 583c	26 701±1 583cdef
RTM2		—	15 977±1 744a	15 977±1 744a	—	31 278±1 880a	31 278±1 880a
RTM3		—	13 693±2 597bc	13 693±2 597bc	—	30 734±824a	30 734±824a
CTI1		2 155±173c	8 936±840e	11 091±903f	4 450±178d	16 578±795f	21 028±716h
CTI2		2 358±100bc	9 408±332de	11 765±232ef	4 944±305cd	18 354±924e	23 299±1 041fgh
CTI3		2 281±218bc	8 670±83e	10 952±296e	5 540±224bc	20 438±414d	25 978±543cdef
RTI1		2 255±218bc	9 363±386de	11 618±595ef	5 653±483b	16 675±843f	22 329±840gh
RTI2		2 471±1121b	9 987±334d	12 458±5 047de	6 043±235b	19 368±882d	25 412±1 079def
RTI3		2 326±727bc	8 809±957e	11 134±1 665f	5 773±77b	18 522±808de	24 294±771efg
P		4 511±591a	—	4 511±591g	12 627±403a	—	12 627±403i

同列不同小写字母表示同一年份各处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。表中 CT 代表传统耕作, RT 代表少耕, I 代表间作, 1、2、3 代表玉米低密度、中密度、高密度。Different lowercase letters mean significant differences among different treatments in the same year at  $P < 0.05$ . CT: conventional tillage; RT: reduced tillage; I: intercropping; 1: low density; 2: medium density; 3: high density.

达显著水平。间作系统中,不同耕作措施与同一玉米密度处理下,2016年少耕较传统耕作在低密度、中密度、高密度处理下分别增产 5.23%、11.13%、5.73%,但 2017 年差异不显著;同一耕作措施与不同密度处理下,玉米密度对传统耕作条件下玉米/豌豆群体籽粒产量影响不显著,2016 年和 2017 年少耕条件下,中密度较低密度、高密度分别增产 9.51%、6.29%和 7.23%、11.89%,说明少耕结合中密度有助于间作增产。

同一耕作措施与玉米密度处理下,单位面积间作玉米籽粒产量较单作玉米显著增产 7.97%~32.10%,说明间作具有提高玉米籽粒产量的作用。间作玉米中,不同耕作措施同一玉米密度处理下,2016 年少耕较传统耕作在低密度、中密度、高密度下分别增加 4.70%、10.47%、3.80%,达显著水平,2017 年增产不显著;同一耕作措施不同密度处理下,间作玉米籽粒产量在传统耕作下不同密度间差异均不显著,2016 年和 2017 年少耕耕作条件下中密度较低密度、高密度平均增产 8.39%、10.33%,达到显著水平,说明少耕具有提高间作玉米籽粒产量的作

用,且在中密度下优势明显。同一耕作措施相同玉米密度处理下,单位面积间作豌豆籽粒产量较单作豌豆显著增产 9.50%~30.10%,说明间作提高了豌豆籽粒产量。间作豌豆中,不同耕作措施同一玉米密度处理下,2016 年少耕较传统耕作在低密度、中密度、高密度下分别增产 7.38%、13.91%、13.95%,达显著水平,2017 年增产不显著;玉米密度对间作豌豆籽粒产量影响不显著。可见,间作具有增产优势,主要是通过提高间作玉米、间作豌豆籽粒产量来获取群体增产的优势,少耕结合中密度使得玉米间作豌豆增产优势明显。

主效应分析如表 3 所示,年际间作物群体籽粒产量差异显著,种植模式、耕作措施、玉米密度对群体籽粒产量影响显著,年际与种植模式、年际与玉米密度、种植模式与耕作措施、耕作措施与玉米密度对群体籽粒产量的互作效应显著,年际、耕作措施、玉米密度三者的互作对作物群体籽粒产量的互作效应显著,种植模式、耕作措施、玉米密度三者的互作效应显著,其余处理的互作效应不显著。

表 3 少耕密植处理对玉米/豌豆间作系统籽粒产量和生物产量的主效应分析

Table 3 Analysis of main effect of tillage measure and maize density on grain yield and biological yield of maize/pea intercropping system

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield			生物产量 Biological yield		
	豌豆 Pea	玉米 Maize	总产量 Total	豌豆 Pea	玉米 Maize	总产量 Total
年际 Year	0.061	0.000**	0.000**	0.351	0.155	0.101
种植模式 Planting pattern	—	0.000**	0.000**	—	0.000**	0.000**
耕作措施 Tillage measure	0.050*	0.674	0.483	0.043	0.289	0.111
玉米密度 Maize density	0.026	0.001**	0.000**	0.199	0.001**	0.000**
年际×种植模式 Year × planting pattern	—	0.000**	0.000**	0.176	0.124	0.203
年际×耕作措施 Year × tillage measure	0.018*	0.260	0.149	0.881	0.752	0.497
年际×玉米密度 Year × maize density	0.251	0.505	0.449	0.312	0.215	0.202
种植模式×耕作措施 Planting pattern × tillage measure	—	0.060	0.036*	—	0.323	0.679
种植模式×玉米密度 Planting pattern × maize density	—	0.640	0.879	—	0.626	0.786
耕作措施×玉米密度 Tillage measure × maize density	0.408	0.024*	0.039*	0.589	0.716	0.585
年际×种植模式×耕作措施 Year × planting pattern × tillage measure	—	0.691	0.985	—	0.324*	0.544
年际×种植模式×玉米密度 Year × planting pattern × maize density	—	0.394*	0.558	—	0.766	0.696
年际×耕作措施×玉米密度 Year × tillage measure × maize density	0.750	0.030*	0.036*	0.509	0.791	0.842
种植模式×耕作措施×玉米密度 Planting pattern × tillage measure × maize density	—	0.049*	0.041*	—	0.639	0.525
年际×种植模式×耕作措施×玉米密度 Year × planting pattern × tillage measure × maize density	—	0.141*	0.172*	—	0.407	0.276*

\*\*和\*指  $P<1\%$ 和  $P<5\%$ 水平上显著。 \*\* and \* mean significant levels at 1% and 5% levels, respectively.

## 2.2 玉米间作豌豆种间关系对少耕密植的响应

### 2.2.1 玉米间作豌豆共生期内种间竞争力动态变化

由图 2 可知,不同处理中豌豆相对于玉米处于

竞争优势地位。全生育期豌豆相对玉米的竞争力 ( $A_{PM}$ ),少耕较传统耕作在低、高密度下分别低 16.05%、8.53%,达显著水平,中密度处理下差异不

显著, 说明在低、高密度处理下少耕具有降低豌豆对玉米的竞争力的作用; 少耕中密度较低、高密度分别显著提高 36.56%、20.17%, 说明在少耕条件下适宜增大密度提高豌豆对玉米的竞争力。豌豆孕蕾期(5 月 19 日)之前, 传统耕作处理豌豆相对玉米的竞争力增加幅度高于少耕耕作, 此时期中密度处理下差异不显著, 低、高密度下传统耕作较少耕分别高 43.88%、13.42%; 豌豆灌浆期(6 月 21 日), 豌豆对玉米竞争力均最大, 此时期少耕中密度较低、高

密度分别高 20.43%、25.78%, 达显著水平, 说明此时期少耕中密度处理显著影响豌豆对玉米的竞争力; 直至收获期(7 月 6 日), 少耕处理下豌豆对玉米的竞争力下降幅度低于传统耕作, 此时期传统耕作较少耕在中、高密度分别低 5.72%、11.70%, 均达显著水平, 低密度处理下差异不显著。由此说明, 在玉米间作豌豆共生期间, 少耕耕作中密度处理有利于提高豌豆对玉米的竞争力, 且可将豌豆灌浆期(6 月 21 日)作为调控豌豆相对玉米种间竞争力的关键时期。

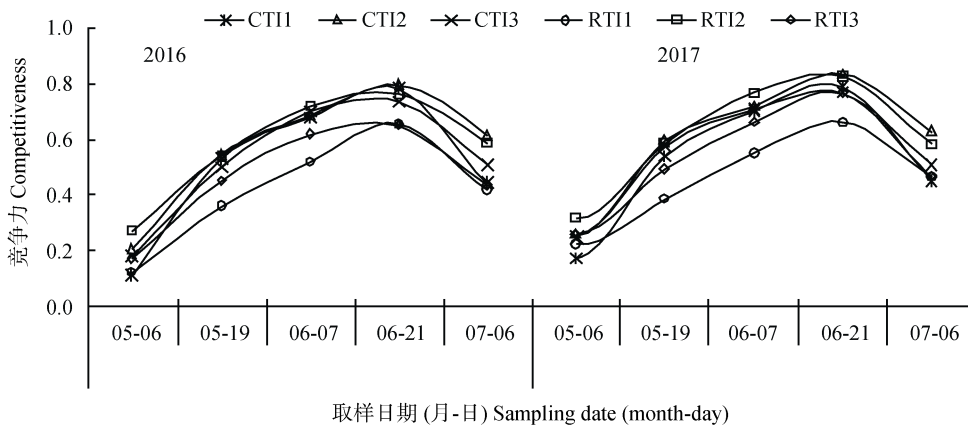


图 2 2016 年和 2017 年不同耕作措施和玉米密度下玉米/豌豆间作系统中豌豆相对于玉米竞争力的动态

Fig. 2 Dynamics of competitiveness of pea to maize in maize/pea intercropping system under different tillage measures and maize densities in 2016 and 2017

图中 CT 代表传统耕作, RT 代表少耕, I 代表间作, 1、2、3 代表玉米低密度、中密度、高密度。CT: conventional tillage; RT: reduced tillage; I: intercropping; 1: low density; 2: medium density; 3: high density.

### 2.2.2 间作玉米的生长恢复效应

豌豆收获后, 间作玉米不同生育时期恢复效应见表 4。年际、耕作措施、玉米密度对间作玉米的恢复效应影响显著, 年际与耕作措施对间作玉米的恢复效应影响不显著, 年际与玉米密度对玉米灌浆至收获期(8 月 27 日—9 月 19 日)的恢复效应影响显著, 其余时期影响不显著, 耕作措施与玉米密度的交互效应对间作玉米的恢复效应影响显著, 三者的交互效应对间作玉米的恢复效应影响不显著。少耕显著提高间作玉米的恢复效应(R), 少耕较传统耕作高 10.30%~47.11%; 少耕处理下, 中密度较低、高密度显著提高 15.35%、38.09%, 说明少耕结合中密度更能进一步发挥间作玉米的恢复效应。由此说明, 间作中集成少耕可显著提高玉米的恢复效应, 且少耕中密度处理具有更大的优势。

### 2.3 间作产量与种间竞争力的相关性

玉米间作豌豆共生期内, 豌豆相对玉米平均竞争力与间作群体籽粒产量呈二次相关关系, 具有显著相关性(图 3)。当豌豆相对玉米竞争力在 0.13~0.25 范围内时随平均竞争力的增大间作群体产量呈持续增加趋势, 平均竞争力为 0.25 时群体产量最大,

超过 0.25 时复合群体产量随竞争力的增大反而下降, 说明间作群体中保持适宜大小的竞争力有利于提高间作群体产量。因此, 在玉米间作豌豆中, 通过优化农艺措施调控豌豆对玉米竞争力是获取高产的一种可行途径。

## 3 讨论

### 3.1 少耕密植处理下玉米间作豌豆群体产量表现

间作作物增产的主要原因是比单作更能充分利用养分、水分等自然资源<sup>[8,12,23]</sup>。本试验两年研究中玉米/豌豆间作系统的土地当量比均大于 1, 单位面积下间作玉米、间作豌豆产量均显著高于单作玉米、单作豌豆, 说明间作具有增产优势。赵财等<sup>[24]</sup>研究发现, 玉米间作豌豆下少耕在低灌溉水平下增产显著; 魏欢欢等<sup>[25]</sup>研究表明, 年降雨量 500 mm 地区少耕具有增产作用。本研究发现, 少耕集成于玉米间作豌豆中具有增产作用, 2016 年少耕较传统耕作处理在低、中、高密度下间作群体产量显著提高, 而 2017 年增产不显著, 这可能是由于年际间的气候差异所致。适宜范围内提高密度是间作增产的手段之一<sup>[13]</sup>, 研究发现玉米/豌豆间作集成密植效应更能发

表 4 2016 年和 2017 年玉米/豌豆间作系统中不同耕作措施和玉米密度处理下豌豆收获后玉米的恢复效应

Table 4 Recovering effect of maize after pea harvest in maize/pea intercropping system under different tillage measures and maize densities in 2016 and 2017

年际 Year	处理 Treatment	日期(月-日) Date (month-day)			
		07-07—07-22	07-23—08-11	08-12—08-26	08-27—09-27
2016	CT11	0.81±0.07c	1.48±0.16b	2.95±0.16c	1.16±0.11c
	CT12	1.46±0.11ab	1.56±0.14b	3.98±0.31a	1.49±0.08ab
	CT13	0.40±0.06c	1.89±0.12a	3.14±0.27bc	1.09±0.09c
	RT11	1.01±0.09bc	2.02±0.18a	3.97±0.35a	1.71±0.11a
	RT12	1.65±0.13a	1.89±0.12a	4.38±0.34a	1.64±0.11a
	RT13	0.72±0.08c	1.83±0.16a	3.43±0.24b	1.25±0.15bc
2017	CT11	0.85±0.06cd	1.52±0.12d	3.22±0.24d	1.44±0.16c
	CT12	1.56±0.09ab	1.87±0.22cd	4.34±0.43ab	2.54±0.15a
	CT13	0.47±0.05d	2.03±0.23bc	3.41±0.32cd	1.47±0.11c
	RT11	1.12±0.07bc	2.46±0.14ab	4.06±0.42b	2.05±0.13b
	RT12	1.87±0.17a	2.88±0.22a	4.62±0.29a	2.34±0.24ab
	RT13	0.79±0.11cd	2.04±0.13bc	3.86±0.31bc	1.45±0.23c

## 主效应分析 Main effects analysis

年际 Year	—	0.023*	0.003**	0.010**	0.000**
耕作措施 Tillage measure	—	0.000**	0.000**	0.000**	0.015*
玉米密度 Maize density	—	0.000**	0.402	0.000**	0.000**
年际×耕作措施 Year × tillage measure	—	0.440	0.086	0.805	0.331
年际×玉米密度 Year × maize density	—	0.608	0.174	0.766	0.009**
耕作措施×玉米密度 Tillage measures × maize density	—	0.659	0.014*	0.035*	0.010**
年际×耕作措施×玉米密度 Year × tillage measures × maize density	—	0.842	0.524	0.749	0.585

\*\*和\*指  $P < 1\%$  和  $P < 5\%$  水平上显著。表中 CT 代表传统耕作, RT 代表少耕, I 代表间作, 1、2、3 代表玉米低密度、中密度、高密度。  
\*\* and \* mean significant levels at 1% and 5% levels, respectively. CT: conventional tillage; RT: reduced tillage; I: intercropping; 1: low density; 2: medium density; 3: high density.

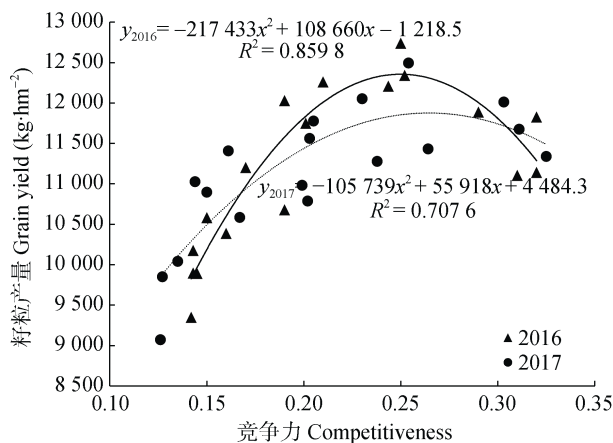


图 3 2016 年和 2017 年玉米/豌豆间作系统全生育期豌豆相对于玉米的平均竞争力与籽粒产量的相关性

Fig. 3 Relationship between competitiveness of pea to maize during whole growth period and grain yield of maize/pea intercropping system in 2016 and 2017

挥间作增产潜力<sup>[15]</sup>。本研究中玉米密度显著影响少耕措施下间作群体籽粒产量, 中密度较低密度、高密度分别增产 8.4%、10.3%。可见, 玉米间作豌豆模式中集成少耕、玉米中密度种植可充分发挥其增产优势。

## 3.2 玉米间作豌豆种间关系对少耕密植的响应

作物种间竞争与互补共同决定间作的优劣势<sup>[26-27]</sup>。两者的相对大小及其重要性随作物的生长发育进程而改变, 共生期内, 资源供给一定, 间作作物之间发生竞争, 当短生育期作物收获后, 短生育期作物造成的竞争胁迫消失, 长生育期作物会发生恢复性生长<sup>[28-29]</sup>。本研究中作物共生期内, 豌豆对玉米的竞争力少耕中密度的竞争力最大, 显著高于低密度和高密度, 说明间作少耕条件下, 适当增加密度强化了种间竞争。植物在一定的水分、温光、土壤养分胁迫以

及动物取食或机械损伤后, 植物通常会在形态和生理上发生相应改变, 在条件改善时会出现不同程度的补偿效应<sup>[30]</sup>。本试验中, 豌豆收获后, 间作玉米均发生不同程度的补偿, 且少耕处理间作玉米的恢复程度较传统耕作提高 10.30%~47.11%, 说明少耕形成了间作玉米恢复效应提高的基础, 强化了间作玉米的恢复能力, 这一结论与诸多学者在玉米间作小麦体系中得到的结果相一致<sup>[12]</sup>。少耕中密度处理下间作玉米的恢复效应最高, 符合赵明等<sup>[30]</sup>提出的通过减小个体生长冗余以增加群体数量, 最终实现高产的理论, 这也可能是因为少耕中密度强化了豌豆对玉米的竞争力, 形成了豌豆收获后玉米恢复效应增强的基础。因此玉米间作豌豆中配置合理的耕作措施和玉米密度, 是实现间作增产优势的基础。

### 3.3 玉米间作豌豆群体籽粒产量与种间竞争的相关关系

本研究中豌豆对玉米全生育期内的平均竞争力与间作混合籽粒产量均呈二次相关关系, 具有显著相关性。在作物共生期内, 作物间的竞争关系大于互补关系时, 群体对资源利用效率下降, 表现出间作劣势, 反之, 表现出间作优势<sup>[29]</sup>。本研究中, 豌豆和玉米共生期间, 豌豆灌浆期(6月21日)之前, 豌豆对玉米的竞争力呈增大趋势, 之后呈下降趋势, 总体上间作豌豆对间作玉米的竞争力( $A_{PM}$ )大于 0, 间作豌豆表现出间作优势; 当平均竞争力超过 0.25 时, 间作混合籽粒产量随之下降。赵建华等<sup>[9]</sup>研究发现, 在玉米行距 20~60 cm 之间, 增大行距时玉米相对豌豆的竞争力也随之增大, 且在豌豆玉米间作群体的管理中, 适当增大豌豆对玉米的竞争力, 是获取较高产量的可行途径之一<sup>[10]</sup>。本研究间作系统中, 豌豆对玉米的竞争力决定了豌豆收获后间作玉米的恢复程度。因此, 可将少耕中密度作为调控玉米间作豌豆系统种间关系的适宜农艺措施, 并为该系统获取高产提供有力保障。

## 4 结论

本研究中玉米/豌豆间作系统的土地当量比均大于 1, 说明玉米间作豌豆在本试验配置的品种、田间结构、施肥和灌溉制度下具有增产优势。少耕能充分发挥间作增产优势, 较传统耕作增产 5.79%(2016年)、4.10%(2017年), 其中 2016 年增产显著, 少耕结合中密度更能发挥间作增产潜力, 较低、高密度分别显著增产 8.37%、9.09%。少耕结合中密度提高了豌豆对玉米的竞争力, 较低、高密

度的竞争力分别高 36.56%、20.17%。豌豆收获后, 少耕使间作玉米具有明显的恢复生长效应, 较传统耕作高 10.30%~47.11%, 且中密度更有利于发挥间作玉米的恢复效应。间作群体籽粒产量与豌豆相对于玉米全生育期内的平均竞争力呈二次曲线相关关系, 当竞争力为 0.25 时利于间作获得高产。因此, 在玉米间作豌豆模式中集成少耕和密植技术, 可通过调控种间关系进一步挖掘间作优势, 少耕结合玉米中密度是绿洲灌区玉米间作豌豆增产的理想措施。

## 参考文献 References

- [1] YAN S, DU X Q, WU F, et al. Proteomics insights into the basis of interspecific facilitation for maize (*Zea mays*) in faba bean (*Vicia faba*)/maize intercropping[J]. Journal of Proteomics, 2014, 109: 111-124
- [2] TAKIM F O. Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices[J]. Journal of Agriculture and Biodiversity Research, 2012, 1(4): 53-59
- [3] 杨友琼, 吴伯志. 作物间套作种植方式间作效应研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 192-196  
YANG Y Q, WU B Z. Research of intercropping benefit of crop intercropping systems[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11): 192-196
- [4] LI L, SUN J H, ZHANG F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123-137
- [5] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. Nature, 2002, 418(6898): 671-677
- [6] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 豆科/禾本科间作系统中氮营养研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(6): 44-49  
XIAO Y B, LI L, ZHANG F S. An outlook of the complementary nitrogen nutrition in the legume//graminaceae system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(6): 44-49
- [7] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 间作种植模式对玉米和大豆干物质积累与产量组成的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 214-222  
GAO Y, DUAN A W, LIU Z G, et al. Effect of intercropping patterns on dry matter accumulation and yield components of maize and soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(2): 214-222
- [8] 张恩和, 黄高宝. 间套种植复合群体根系时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1301-1304  
ZHANG E H, HUANG G B. Temporal and spatial distribution characteristics of the crop root in intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1301-1304



- [9] 赵建华, 孙建好, 李隆, 等. 改变玉米行距种植对豌豆/玉米间作体系产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1451–1456  
ZHAO J H, SUN J H, LI L, et al. Effect of maize row spacing on yield of pea/maize intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(11): 1451–1456
- [10] 刘淑梅, 黄鹏, 柴强, 等. 空间布局对玉米/豌豆种间竞争力及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(2): 61–65  
LIU S M, HUANG P, CHAI Q, et al. Effect of spatial arrangement on aggressivity and grain yield of maize/pea intercropping system[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014, 49(2): 61–65
- [11] 张训忠, 李伯航. 高肥力条件下夏玉米大豆间混作互补与竞争效应研究[J]. 中国农业科学, 1987, 20(2): 34–42  
ZHANG X Z, LI B H. A study on the complementarity and competition effects induced by inter-and mixed-cropping of maize-soybean on fertile land[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1987, 20(2): 34–42
- [12] 樊志龙, 陶志强, 柴强, 等. 少耕秸秆覆盖对小麦间作玉米产量和水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 109–112  
FAN Z L, TAO Z Q, CHAI Q, et al. Yield and water use efficiency of wheat corn intercropping with reduced tillage and wheat straw mulching[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 109–112
- [13] 高慧, 朱倩, 张荣, 等. 不同种植密度下玉米与豌豆间作对群体总产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3548–3558  
GAO H, ZHU Q, ZHANG R, et al. Effects of maize and pea intercropping on the total grain yield of community under different planting densities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3548–3558
- [14] 王利立, 朱永永, 殷文, 等. 大麦/豌豆间作系统种间竞争力及产量对地下作用和密度互作的响应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 265–273  
WANG L L, ZHU Y Y, YIN W, et al. Competitiveness and yield response to belowground interaction and density in barley-pea intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 265–273
- [15] 赵洋, 冯福学, 赵财, 等. 绿洲灌区玉米间作豌豆的产量密植效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(1): 37–43  
ZHAO Y, FENG F X, ZHAO C, et al. Yield performance of maize/pea intercropping system under high planting density in Hexi oasis irrigated area[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(1): 37–43
- [16] 张婧, 张仁陟, 左小安. 保护性耕作对黄土高原农田土壤理化性质的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 137–143  
ZHANG J, ZHANG R Z, ZUO X A. Effects of conservative tillage on physical and chemical characteristics under a pea-wheat rotation system in the loess plateau[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 137–143
- [17] HU F L, CHAI Q, YU A Z, et al. Less carbon emissions of wheat-maize intercropping under reduced tillage in arid areas[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 701–711
- [18] 殷文, 冯福学, 赵财, 等. 秸秆还田及地膜对间作农田环境效应的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 77–84  
YIN W, FENG F X, ZHAO C, et al. Effects of straw returning and plastic film mulching on environmental effect in intercropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(S2): 77–84
- [19] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1914–1924  
XIE R Z, LI S K, LI X J, et al. The analysis of conservation tillage in china-conservation tillage and crop production: Reviewing the evidence[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1914–1924
- [20] 何奇镜, 佟培生, 边少锋, 等. 长期少耕对玉米产量与土壤生态环境的影响(1983~2002)[J]. 玉米科学, 2004, 12(S1): 99–102  
HE Q J, TONG P S, BIAN S F, et al. The influence of long-term minimum tillage on corn yield and soil ecological surroundings (1983–2002)[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(S1): 99–102
- [21] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 等. 深松少耕技术对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2009, (5): 32–34  
GONG X J, QIAN C R, YU Y, et al. Effects of subsoiling and fewer-tillage on soil physical characters and the yield[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2009, (5): 32–34
- [22] MONNEVEUX P, QUILLÉROU E, SANCHEZ C, et al. Effect of zero tillage and residues conservation on continuous maize cropping in a subtropical environment (Mexico)[J]. Plant and Soil, 2006, 279(1/2): 95–105
- [23] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 等. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1597–1602  
ZHANG J E, GAO A X, XU H Q, et al. Effects of maize/peanut intercropping on rhizosphere soil microbes and nutrient contents[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1597–1602
- [24] 赵财, 柴强, 冯福学, 等. 不同灌水水平下一膜两年覆盖间作农田耗水特征及经济效益研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 744–752  
ZHAO C, CHAI Q, FENG F X, et al. Characteristics and economic benefits of water consumption in intercropping fields with one plastic film mulching for 2 years and different irrigation levels[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 744–752
- [25] 魏欢欢, 王仕稳, 杨文稼, 等. 免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用效率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(3): 461–477  
WEI H H, WANG S W, YANG W J, et al. Meta analysis on

- impact of no-tillage and subsoiling tillage on spring maize and winter wheat yield and water use efficiency on the loess plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3): 461–477
- [26] DAPAAH H K, ASAFU-AGYEI J N, ENNIN S A, et al. Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2003, 140(1): 73–82
- [27] NDAKIDEMI P A. Manipulating legume/cereal mixtures to optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2006, 5(25): 2526–2533
- [28] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 31–34  
QI W H, CHAI Q. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 31–34
- [29] 殷文, 赵财, 于爱忠, 等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(4): 633–641  
YIN W, ZHAO C, YU A Z, et al. Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(4): 633–641
- [30] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. *作物学报*, 2006, 32(10): 1566–1573  
ZHAO M, LI J G, ZHANG B, et al. The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(10): 1566–1573