

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0251

简忠领, 赵丽丽, 王家豪, 王飞, 黄佳熊. 喀斯特地区不同行距玉米 || 白三叶间作对玉米光合、产量及土壤呼吸的影响. 草业科学, 2019, 36(2): 480-489.

JIAN Z L, ZHAO L L, WANG J H, WANG F, HUANG J X. Effect of intercrop of maize || white clover on maize photosynthesis, yield, and soil respiration with different row spacing in a Karst area. Pratacultural Science, 2019, 36(2): 480-489.

## 喀斯特地区不同行距玉米 || 白三叶间作对玉米 光合、产量及土壤呼吸的影响

简忠领<sup>1</sup>, 赵丽丽<sup>1</sup>, 王家豪<sup>1</sup>, 王飞<sup>1</sup>, 黄佳熊<sup>2</sup>

(1. 贵州大学动物科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省大方县农牧局, 贵州 大方 551600)

**摘要:** 为探究不同行距下玉米 (*Zea mays*) || 白三叶 (*Trifolium repens*) 间作效应, 在贵州喀斯特地区设置 30、50、70 cm 玉米行距, 监测玉米 || 白三叶间作以及玉米单作下玉米叶片光合特性、土壤呼吸、玉米穗性状和产量情况。结果表明, 除 50 cm 行距处理光合速率日变化呈单峰型变化外, 各试验组及对照组玉米叶片光合速率日变化均呈双峰型。50 cm 行距处理下玉米叶片胞间 CO<sub>2</sub> 浓度日均值最低, 对 CO<sub>2</sub> 利用率最高, 光合速率日均值最高, 玉米产量显著提高 ( $P < 0.05$ ); 30 和 50 cm 行距处理鲜秸秆产量、全株总产量显著提高 ( $P < 0.05$ ); 70 cm 行距处理玉米产量、鲜秸秆产量、全株总产量最低 ( $P < 0.05$ )。不同处理对玉米叶片气孔导度、蒸腾速率、穗轴上玉米粒行数、穗长无显著影响 ( $P > 0.05$ )。本研究设置的间作处理对土壤呼吸抑制效果不明显, 而不同行距对土壤呼吸有影响且 30 cm 行距抑制效果最佳, 达到碳减排效果, 50 cm 行距抑制效果次之。因此, 贵州喀斯特地区在以鲜秸秆为收获对象时, 采用 30 cm 或者 50 cm 行距玉米 || 白三叶间作最适宜; 以玉米籽粒或以籽粒和秸秆同时为收获对象时, 采用 50 cm 行距玉米 || 白三叶间作最适宜。

**关键词:** 白三叶; 间作; 行距; 玉米; 产量; 土壤呼吸; 光合特性

中图分类号: S816; S505 文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2019)02-0480-10

### Effect of intercrop of maize || white clover on maize photosynthesis, yield, and soil respiration with different row spacing in a Karst area

JIAN Zhongling<sup>1</sup>, ZHAO Lili<sup>1</sup>, WANG Jiahao<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, HUANG Jiaxiong<sup>2</sup>

(1. Department of Grassland Science, College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

2. Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Dafang County, Guizhou Province, Dafang 551600, Guizhou, China)

**Abstract:** To explore the effect of maize || white clover intercropping under different row spacing in the Karst area of Guizhou, maize || white clover intercropping and a corn monoculture were grown using 30, 50, and 70 cm row spacing. Photosynthetic characteristics, maize ear characters, yield, and rhizosphere soil respiration were monitored. The results showed that except for the 50 cm row spacing treatment, the diurnal variation in the photosynthesis rate of maize leaves in each test group and control group exhibited a double peak curve. The lowest daily mean of intercellular CO<sub>2</sub> concentration in maize leaves, the highest utilization rate of CO<sub>2</sub>, and the highest daily average photosynthetic rate were under the 50 cm row spacing treatment. Under this treatment, the corn yield was significantly increased ( $P < 0.05$ ). Line spacing processing of 30

收稿日期: 2018-04-27 接受日期: 2018-09-05

基金项目: 贵州省科技计划重大专项 (黔科合重大专项字 [2014]6007 号); 贵州省农业攻关计划项目 (黔科合 NY 字 [2014]3048 号、黔科合支撑 [2016]2516 号)

第一作者: 简忠领 (1991-), 男, 贵州水城人, 在读硕士生, 主要从事草种质资源及育种。E-mail: jzhongling@qq.com

通信作者: 赵丽丽 (1981-), 女, 内蒙古通辽人, 副教授, 博士, 主要从事草种质资源及育种。E-mail: zhaolili\_0508@163.com

and 50 cm increased the fresh straw yield, and the whole plant total yield significantly increased ( $P < 0.05$ ). Corn yield, fresh straw yield, and total yield of whole plants were the lowest in the 70 cm row spacing treatment ( $P < 0.05$ ). Different treatments had no effect on stomatal conductance, transpiration rate, grain number on the cob, and ear length ( $P > 0.05$ ). The effects of intercropping on soil respiration inhibition was not obvious; however, different row spacing planting modes influenced soil respiration. The 30 cm row spacing planting mode had the best effect on soil respiration inhibition, which reduced carbon emission, followed by the 50 cm row spacing planting treatment. Therefore, 30 cm or 50 cm row spacing maize || white clover intercropping was the most suitable for harvesting fresh straw in the Guizhou Karst area. The 50 cm row spacing maize || white clover intercropping was the most suitable when corn seeds or seed and straw were harvested at the same time.

**Keywords:** white clover; intercropping; spacings; maize; output; soil respiration; photosynthetic characteristics

**Corresponding author:** ZHAO Lili E-mail: [zhaolili\\_0508@163.com](mailto:zhaolili_0508@163.com)

近年贵州提出建立生态畜牧大省的目标, 饲草料短缺和生态脆弱成了实现这一目标急需攻克的难题。贵州是世界上喀斯特地貌发育最典型的地区, 有“喀斯特博物馆”之称<sup>[1]</sup>, 石漠化较严重, 水土流失严重, 土壤瘠薄, 可耕地面积小, 使得贵州种植业、畜牧业发展受到很大限制<sup>[2-7]</sup>。目前, 贵州种植业仍以粮食为主导, 饲用作物较少<sup>[8]</sup>, 种植模式多为饲草单作或禾本科饲草与粮食作物间作, 豆科牧草与粮食作物间作缺乏。由于传统的单一作物连续种植会加重水土流失, 导致土壤养分流失<sup>[9]</sup>、病虫害流行、土壤板结和质量变低等问题, 最终使作物减产<sup>[10]</sup>。因此, 寻找一种既能提高或稳定粮食产量, 又能增加饲草产量, 还能保护生态环境的适于贵州的饲草与粮食作物种植模式迫在眉睫。间作可以提高生物多样性, 减少病虫害的流行, 促进植物光合作用, 提高产量<sup>[11-14]</sup>, 改善土壤性质<sup>[15]</sup>, 减少水土流失和土壤养分流失<sup>[16-18]</sup>, 进而提高经济效益, 促进农业与畜牧业的发展; 而且不同行距间作还能抑制土壤呼吸, 有显著碳减排作用<sup>[19-21]</sup>。但由于间作体系中, 植物行距可改变种间的互作效应、种间竞争, 直接影响间作体系生产力, 故寻找合适的行距, 对于提高间作体系整体生产力尤为重要<sup>[22-23]</sup>。玉米 (*Zea mays*) 是我国最主要粮食作物之一, 可供人食用, 亦可作饲料, 玉米秸秆是重要饲草料, 在贵州大面积种植。白三叶 (*Trifolium repens*) 是豆科优良牧草, 具有很强固氮能力。将玉米与白三叶进行间作是否能促进玉米生长? 能否促进土壤 CO<sub>2</sub> 减排? 是否影响玉米的光合特性、产量? 如果有影响, 多大的行距合适? 这些都有待探索。为此, 本研究在

贵州喀斯特地区对不同行距单作和间作下玉米光合特性、田间土壤呼吸、玉米产量、秸秆产量、玉米穗性状等进行监测, 探索玉米||白三叶的间作效应, 确定最佳玉米||白三叶间作行距, 以期为贵州喀斯特地区玉米||白三叶种植模式及农牧业发展提供实践指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于贵州省贵阳市花溪区麦坪乡, 地处 106°27'–106°52' E, 26°11'–26°34' N, 海拔 1 100 m, 是典型的喀斯特地区, 年平均总降水量为 1 129.5 mm, 年平均日照时数为 1 148.3 h。试验区土壤常年种植燕麦 (*Avena stauva*)、黑麦草 (*Lolium perenne*)、玉米等作物。耕层土壤有机质含量 37.92 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮含量 1.75 g·kg<sup>-1</sup>, 破解氮含量 132.00 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷含量 20.67 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾含量 70.00 mg·kg<sup>-1</sup>, 土壤 pH 为 5.73。

### 1.2 试验设计

设置 30、50、70 cm 行距下玉米||白三叶间作为处理组, 分别记为 J<sub>30</sub>、J<sub>50</sub>、J<sub>70</sub>, 以相应行距玉米单播为对照组, 分别记为 D<sub>30</sub>、D<sub>50</sub>、D<sub>70</sub>。种植时, 按照两行玉米, 间隔种植两行白三叶, 再种植两行玉米的方式进行, 玉米与白三叶间距为 30 cm, 两行白三叶之间间距也为 30 cm; 对照组设定相应的 3 个行距单种玉米。3 次重复, 共 18 个小区, 每小区面积 5 m × 4 m。于 2015 年 4 月, 在整理好的试验小区上开沟, 采用种子直播。播种当天, 施 N、P、K 比例为 15 : 15 : 15 的复合肥

300 kg·hm<sup>-2</sup>；待玉米苗长到30~40 cm时，追肥尿素一次，施肥量300 kg·hm<sup>-2</sup>。玉米采用“新糯1号”，种子来自重庆市永旺种子有限公司，白三叶选用“海发”，种子来自贵州众智恒生态科技有限公司。

### 1.3 测定指标和方法

2015年7月25日(晴天)，采用翼鬃麒科技(北京)有限公司生产的YZQ-100E多叶室动态光合仪，在玉米灌浆期测量光合速率；采用YZQ-201A土壤动态呼吸仪，测定10 cm深处土壤呼吸速率。测量前，在每个小区选取3株长势良好且相近玉米做标记，选取无遮光的同一位置叶片，每隔2 h测其光合速率，同一时段测玉米和白三叶之间的土壤呼吸。在玉米秸秆尚青绿时，各小区分别选取面积为1 m<sup>2</sup>，收获整株玉米称鲜重，去掉玉米穗称重作为鲜秸秆产量；待玉米完全熟透后，收获玉米后测其穗长、穗上玉米粒行数，将玉米穗带穗轴风

干称重作为玉米产量指标。

### 1.4 数据处理

试验数据采用SPSS19.0作方差分析，采用LSD法和Duncan法进行多重比较，光合、土壤呼吸指标及植物性状指标数据用均值±标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同行距的玉米||白三叶间作对玉米叶片光合指标日动态的影响

#### 2.1.1 光合速率日动态

J<sub>30</sub>、D<sub>30</sub>、J<sub>70</sub>和D<sub>70</sub>处理的玉米叶片光合速率日动态均呈双峰型，峰值出现在10:00和16:00，14:00其光合速率下降到低谷，且10:00峰值高于16:00(图1)。J<sub>50</sub>处理的玉米叶片光合速率日动态呈单峰型，上午08:00逐渐上升并在16:00达峰值，为109.54 μmol·(m<sup>2</sup>·s)<sup>-1</sup>，随后逐渐下降。D<sub>50</sub>处理

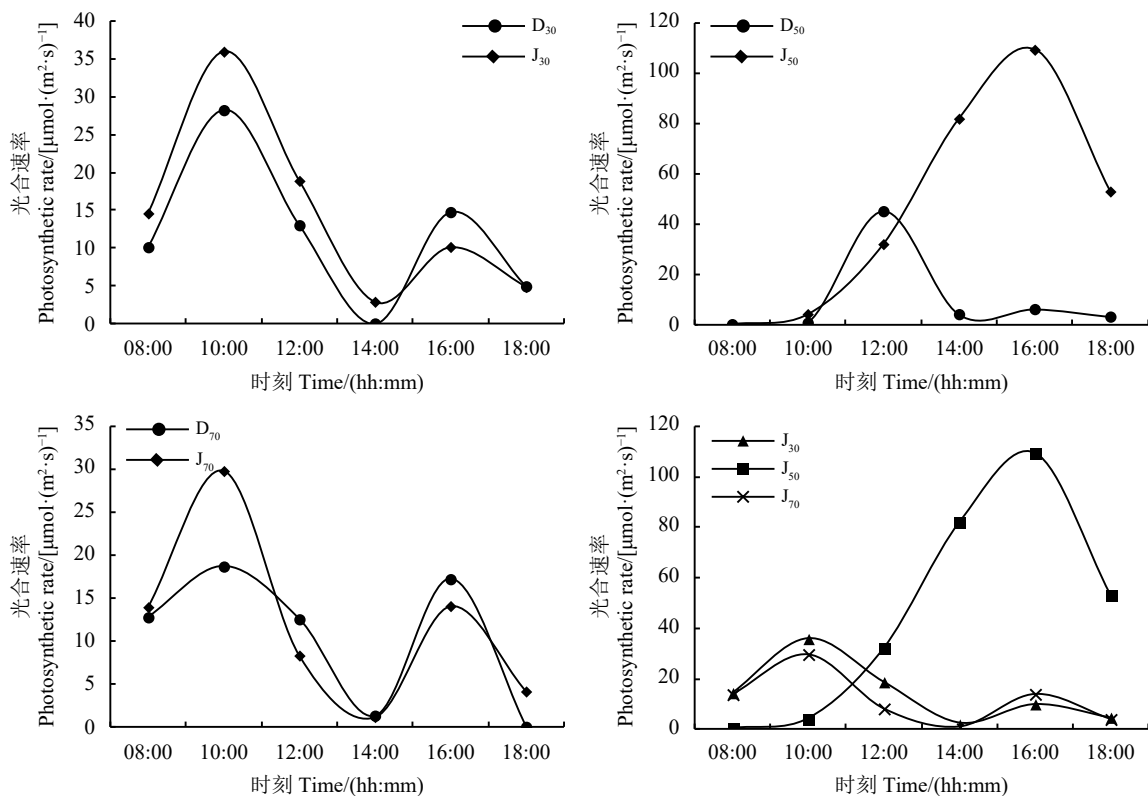


图1 不同行距下玉米||白三叶玉米叶片的光合速率日变化

Figure 1 Diurnal variation in photosynthetic rate in maize leaves under white clover || maize intercropping with different row spacing

J<sub>30</sub>、J<sub>50</sub>、J<sub>70</sub>分别表示30、50、70 cm行距处理玉米||白三叶；D<sub>30</sub>、D<sub>50</sub>、D<sub>70</sub>分别表示30、50、70 cm行距处理下玉米单播。下同。

J<sub>30</sub>, J<sub>50</sub>, and J<sub>70</sub> respectively represent 30, 50, and 70 cm spacing treatment of corn || white clover intercropping, and D<sub>30</sub>, D<sub>50</sub>, and D<sub>70</sub> indicate that the maize was unicast with the row spacing of 30, 50, and 70 cm; similarly for the following figures and tables.

的玉米叶片光合速率日动态呈不明显双峰型，第 1 峰值后移到 12:00，第 2 峰值不明显 (图 1)。对比间作白三叶下不同行距玉米叶片光合速率发现， $J_{30}$ 、 $J_{70}$  处理的变化趋势相近， $J_{50}$  处理则与前两者不同 (图 1)。除  $J_{50}$  处理外，各处理组的玉米叶片光合日动态在 14:00 时出现低谷，有午休现象。说明 50 cm 行距的间作使光合日变化趋势发生改变。

### 2.1.2 气孔导度日动态

各处理下，玉米叶片气孔导度日动态在 16:00 后均下降，而 50 cm 行距下其变化趋势与其他处理不同； $J_{30}$  和  $J_{70}$  处理的玉米叶片气孔导度日动态均为先升后降变化，而  $J_{50}$  处理总体呈逐渐上升趋势 (图 2)。这说明，50 cm 行距间作影响了玉米气孔导度日变化。

### 2.1.3 胞间 $CO_2$ 浓度日动态

$J_{30}$ 、 $D_{30}$ 、 $D_{70}$ 、 $J_{70}$  和  $D_{50}$  处理下，玉米叶片胞间  $CO_2$  浓度日动态均呈双峰型。其中， $J_{30}$  处理的峰值出现在 08:00 和 14:00，12:00 降到低谷； $D_{30}$  处理在 10:00 出现第 1 峰值，12:00 降到低谷，14:00 出现第 2 峰值； $D_{70}$  处理在 08:00 出现第 1 个峰值，14:00 时降到最低，16:00 出现第 2 峰值；

$J_{70}$  处理在 10:00 出现第 1 个峰值，12:00 降到最低，14:00 出现第 2 个峰值； $D_{50}$  处理峰值在 08:00 和 16:00。而  $J_{50}$  处理的玉米叶片胞间  $CO_2$  浓度日动态则呈单峰型，在 16:00 达到峰值，之后均逐渐下降 (图 3)。对比间作白三叶下不同行距玉米叶片胞间  $CO_2$  浓度发现， $J_{30}$ 、 $J_{70}$  处理趋势相近，且高于  $J_{50}$  处理。

### 2.1.4 蒸腾速率日动态

$J_{30}$ 、 $J_{50}$  处理的玉米叶片蒸腾速率呈单峰型，其余处理均呈双峰型；除  $J_{50}$  处理外，各处理叶片蒸腾速率均在 10:00–12:00 时段出现峰值 (图 4)。对比间作白三叶下不同行距玉米叶片蒸腾速率发现， $J_{30}$ 、 $J_{70}$  处理变化趋势相近， $J_{50}$  处理则与前两者不同 (图 4)。另外，除  $J_{50}$  处理外，各处理的叶片蒸腾速率均在 12:00 时较高，14:00 时均降低。

## 2.2 不同行距的玉米 || 白三叶间作对玉米光合指标日均值的影响

不同处理下玉米叶片光合指标日均值监测结果显示， $J_{50}$  处理下玉米叶片光合速率日均值最高，为  $46.93 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ，显著高于其余处理 ( $P <$

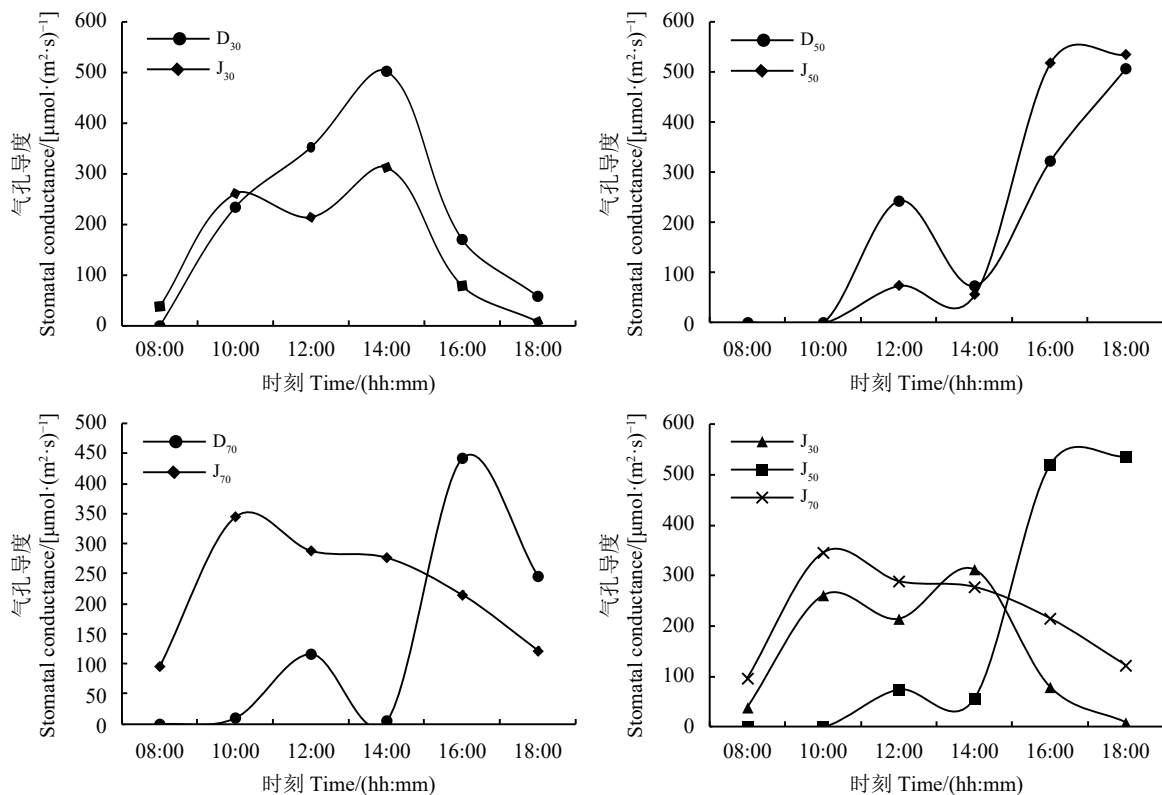


图 2 不同行距下玉米 || 白三叶玉米叶的片气孔导度变化  
Figure 2 Change of stomatal conductance in maize leaves under white clover || maize intercropping with different row spacing

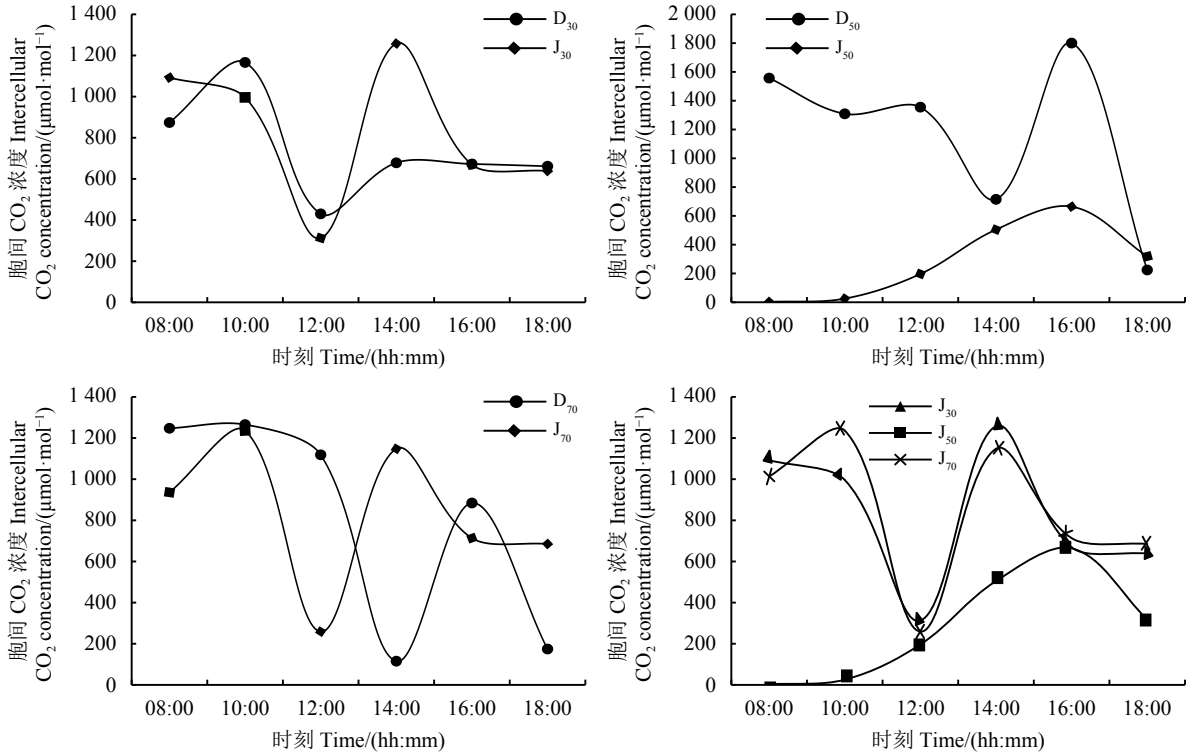


图 3 不同行距下玉米 || 白三叶玉米叶片的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度变化

Figure 3 Change of intercellular CO<sub>2</sub> concentration in maize leaves under white clover || maize intercropping with different row spacing

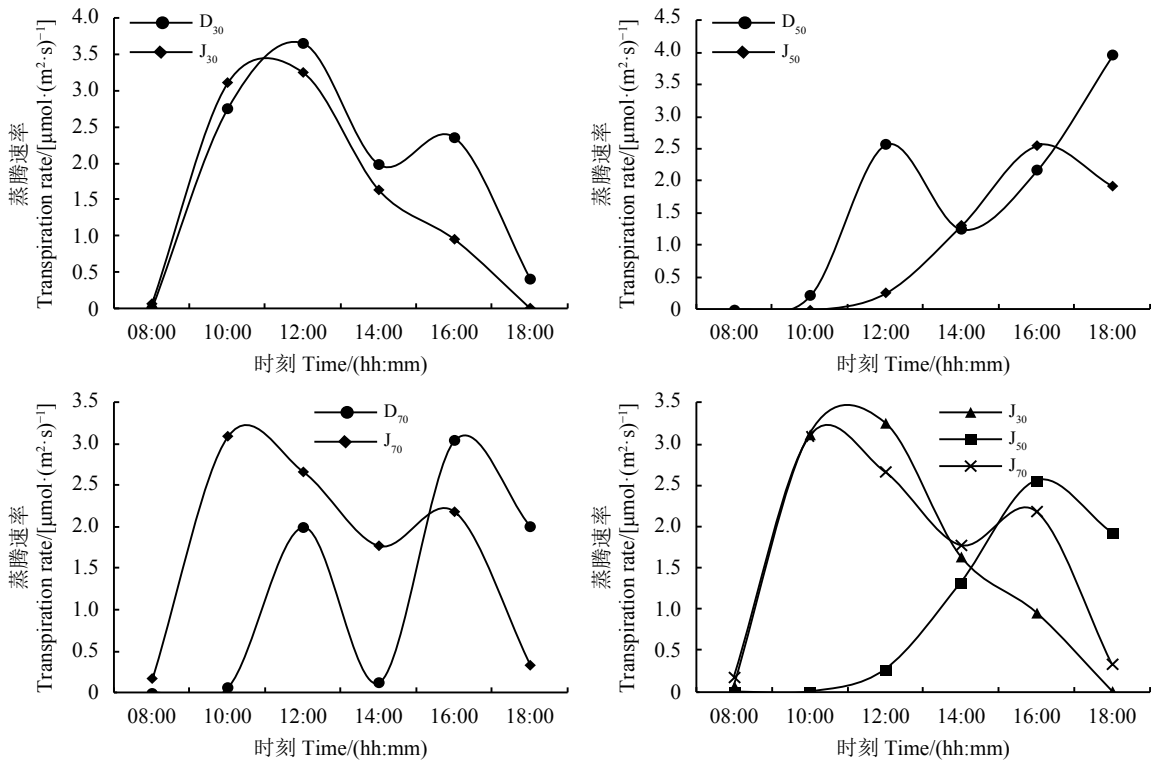


图 4 不同行距下玉米 || 白三叶玉米叶片的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度变化

Figure 4 Change of intercellular CO<sub>2</sub> concentration in maize leaves under white clover || maize intercropping with different row spacing

0.05)，其余处理之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。玉米叶片的气孔导度和蒸腾速率日均值均在不同处理之间无差异 ( $P > 0.05$ )。D<sub>50</sub> 处理的玉米叶片胞间

CO<sub>2</sub> 浓度日均值显著高于其他处理，为 1 160.16  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ，J<sub>50</sub> 处理胞间 CO<sub>2</sub> 浓度日均值显著低于其他处理 ( $P < 0.05$ )，为 285.28  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (表 1)。

表 1 行距与间作处理对玉米光合指标日均值的影响  
Table 1 Effect of row spacing and intercropping on daily mean of photosynthetic index in maize leaves

处理 Treatment	光合速率 Photosynthetic rate/ $[\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}]$	气孔导度 Stomatal conductance/ $[\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}]$	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> Concentration/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	蒸腾速率 Transpiration rate/ $[\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}]$
J <sub>30</sub>	14.55 ± 0.83b	152.40 ± 21.51a	827.78 ± 35.66b	1.51 ± 0.20a
D <sub>30</sub>	11.84 ± 0.93b	219.68 ± 15.55a	747.09 ± 46.33b	1.86 ± 0.21a
J <sub>50</sub>	46.93 ± 0.27a	197.79 ± 24.43a	285.28 ± 16.03c	1.01 ± 0.09a
D <sub>50</sub>	10.04 ± 1.96b	191.24 ± 22.21a	1 160.16 ± 63.50a	1.70 ± 0.17a
J <sub>70</sub>	11.91 ± 1.00b	224.37 ± 16.30a	842.43 ± 38.23b	1.71 ± 0.10a
D <sub>70</sub>	10.42 ± 0.96b	137.14 ± 11.39a	800.90 ± 83.09b	1.47 ± 0.09a

不同小写字母表示不同处理下差异显著 ( $P < 0.05$ )。图5和表2同。

Different lowercase letters indicate significant differences under different treatments at the 0.05 level. similarly for Figure 5 and Table 2.

### 2.3 不同行距的玉米||白三叶间作对土壤呼吸速率的影响

玉米灌浆期，D<sub>70</sub> 和 J<sub>70</sub> 处理的土壤呼吸速率最高，分别为 0.20 和 0.19  $\text{mmol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ，均与 D<sub>30</sub>、J<sub>30</sub> 处理差异显著 ( $P < 0.05$ )，J<sub>30</sub> 处理最低，与 J<sub>50</sub>、D<sub>50</sub>、J<sub>70</sub> 和 D<sub>70</sub> 处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。说明，30 cm 行距较 70 cm 行距能显著抑制土壤呼吸 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 不同行距的玉米||白三叶间作对玉米产量和性状的影响

J<sub>50</sub> 处理玉米产量、全株总产量显著高于 D<sub>30</sub>、D<sub>50</sub>、J<sub>70</sub>、D<sub>70</sub> ( $P < 0.05$ )；D<sub>70</sub> 处理玉米产量、鲜秸秆产量、全株总产量最低，与 J<sub>50</sub>、J<sub>30</sub> 差异显著 ( $P < 0.05$ )。J<sub>30</sub> 处理的玉米鲜秸秆产量、全株总产

量显著高于除 J<sub>50</sub> 外的其他处理 ( $P < 0.05$ )。不同处理对新糯 1 号玉米粒在穗轴上的行数及玉米穗长无影响 ( $P > 0.05$ ) (表 2)。

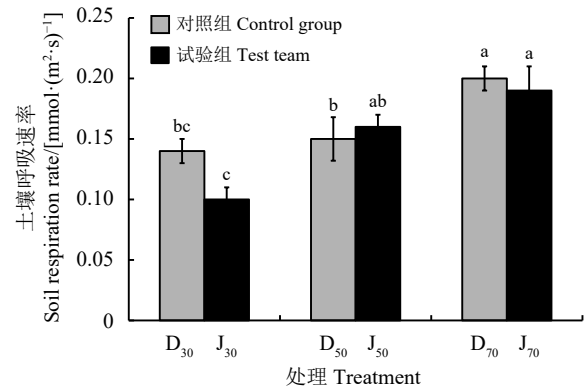


图 5 不同处理对土壤呼吸速率的影响

Figure 5 Effect of different treatments on soil respiration rate

表 2 不同处理对玉米产量和性状的影响  
Table 2 Effect of different treatments on yield and characters of maize

处理 Treatment	玉米产量 Fresh corn yield/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	鲜秸秆产量 Fresh straw yield/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	全株总产量 Whole plant total yield/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	玉米籽粒行数 Corn grain row number	穗长 Spike length/cm
J <sub>30</sub>	25.00 ± 3.23ab	58.73 ± 5.84a	57.73 ± 1.53a	12.67 ± 0.66a	16.27 ± 1.31a
D <sub>30</sub>	20.80 ± 0.12bc	45.59 ± 0.65ab	45.79 ± 1.50b	12.67 ± 0.66a	13.80 ± 2.95a
J <sub>50</sub>	30.10 ± 1.39a	56.70 ± 0.94a	58.38 ± 0.37a	12.67 ± 0.66a	15.33 ± 2.87a
D <sub>50</sub>	20.50 ± 1.67bc	42.53 ± 1.76ab	42.53 ± 5.48b	12.67 ± 0.66a	13.80 ± 0.70a
J <sub>70</sub>	21.50 ± 1.10bc	48.43 ± 4.29ab	47.77 ± 2.18b	12.67 ± 0.66a	15.63 ± 0.64a
D <sub>70</sub>	18.10 ± 1.96c	34.87 ± 3.06b	34.87 ± 1.96c	12.67 ± 0.66a	16.47 ± 1.46a

### 3 讨论

自然条件下植物光合速率日变化呈单峰型或双峰型<sup>[24-26]</sup>，本研究中，除 J<sub>50</sub> 处理的玉米叶片光合速率日动态呈单峰型外，其他各处理均呈双峰型；且除 50 cm 行距外，各处理的玉米叶片光合速率日动态均在 10:00 和 16:00 出现峰值，有午休现象，这与前人结果研究一致<sup>[27]</sup>。这是由于 10:00 后光照过强，光合速率开始下降，中午过后的高温强光照，使玉米叶片的光合速率在 14:00 各处理降到低谷，14:00 以后光照逐渐减弱，出现了另一峰值，而 16:00 以后随温度的降低，光照较弱，所有处理的光合速率均逐渐下降。此外，J<sub>50</sub> 处理的玉米叶片气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率日变化与其他处理不同，其可能是由于此行距处理下，植物地上地下生态位优势明显，引起玉米植株形态结构发生变化，冠层结构优化<sup>[28]</sup>，生态位上的分离和互补以及种间促进作用明显，使得植物对光、温度、空气中 CO<sub>2</sub> 等资源协调利用和分配得到优化，土壤养分、水分等资源分配更合理，土壤理化性质，土壤酶活性等朝着良性的方向变化<sup>[29-32]</sup>，较好地满足植物生长及籽粒灌浆期需求，有利于产量提高。

本研究中，J<sub>50</sub> 处理的玉米产量、鲜秸秆产量、全株总产量显著提高，这与前人研究结果一致<sup>[33-34]</sup>。而 J<sub>30</sub> 处理的玉米鲜秸秆产量和全株总产量高于其他处理，D<sub>70</sub> 处理最低，可能是由于 J<sub>30</sub> 处理较高的种植密度，且间作使其对资源及空间的利用得到优化，单位面积内的植株数较多，秸秆产量高，而 D<sub>70</sub> 处理种植密度低且为单作，单位面积植株少，单作使其对资源及空间的利用较差。因此，在以玉米秸秆为收获对象时，种植密度不易过小，合理的种植密度才能获得较高产

量，这与魏永鹏等<sup>[35]</sup>的结果一致。

本研究中，不同处理对玉米叶片的气孔导度和蒸腾速率无影响，这与任金虎等<sup>[36]</sup>的研究结果有差异；其可能原因与所设置的行距及间作植物不同有关。本研究得出不同处理下新糯 1 号玉米粒行数相同的结果，与段宏凯等<sup>[37]</sup>的报道不一致，可能由于所种植的玉米品种不同所导致。

间作能抑制土壤呼吸，有显著的碳减排作用<sup>[19-21]</sup>。本研究发现，间作对土壤呼吸抑制效果不明显，而不同行距种植方式对土壤呼吸有影响且 30 cm 行距抑制效果最佳，50 cm 行距抑制效果次之，这与前人报道的“间作有显著的碳减排作用”的结果有一定差异<sup>[19-21]</sup>。这是由于土壤呼吸与土壤温度通常呈指数关系<sup>[38]</sup>，行距不同使得土壤接受阳光辐射不同，30 cm 行距由于遮阴土壤接受阳光辐射较少，土壤微生物活动降低，土壤呼吸减弱，行距对土壤呼吸的影响超过了间作影响所致。

### 4 结论

除 50 cm 行距处理的玉米叶片光合速率呈单峰型外，各处理的玉米叶片光合速率日变化均呈双峰型。50 cm 行距处理显著提高玉米叶片的光合速率和玉米产量。30 和 50 cm 行距处理显著提高了玉米的鲜秸秆产量、全株总产量。不同行距的玉米||白三叶间作对新糯 1 号玉米穗轴上玉米粒行数、穗长无显著影响。间作对土壤呼吸抑制效果不明显，而不同行距种植模式对土壤呼吸有影响且 30 cm 行距抑制效果最佳，达碳减排效果。在贵州喀斯特地区，以玉米鲜秸秆为收获对象时，采用 30 或 50 cm 行距的玉米||白三叶间作最适宜；以玉米籽粒或以籽粒和秸秆同时为收获对象时，采用 50 cm 行距玉米||白三叶间作最适宜。

### 参考文献 References:

- [1] 李宗发. 贵州喀斯特地貌分区. *贵州地质*, 2011, 28(3): 177-181.  
LI Z F. Division of Karst landform in Guizhou. *Guizhou Geology*, 2011, 28(3): 177-181.
- [2] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 刘洋. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质. *生态学报*, 2015, 35(2): 434-448.  
SHENG M Y, XIONG K N, CUI G Y, LIU Y. Plant diversity and soil physical-chemical properties in Karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 434-448.

- [3] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 76-84.  
YAO Y H. Progress and prospect of Karst rocky desertification research in southwest China. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 76-84.
- [4] 安国英, 周璇, 温静, 童立强. 西南地区石漠化分布、演变特征及影响因素. *现代地质*, 2016, 30(5): 1150-1159.  
AN G Y, ZHOU X, WEN J, TONG L Q. Analysis of characteristics and reason of rocky desertification occurrence and evolution in Karst areas of Southwestern China. *Geoscience*, 2016, 30(5): 1150-1159.
- [5] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(2): 317-326.  
CHEN H S, NIE Y P, WANG K L. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in Karst regions: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 317-326.
- [6] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展. *地理科学*, 2002, 22(3): 365-370.  
LI Y B, HOU J J, XIE D T. The recent development of research on Karst ecology in southwest China. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3): 365-370.
- [7] 莫本田, 罗天琼, 王普昶, 孙秋, 吴佳海, 赵明坤, 崔巍. 贵州牧草产业现状及发展对策. *贵州农业科学*, 2010, 38(6): 165-167.  
MO B T, LUO T Q, WANG P C, SUN Q, WU J H, ZHAO M K, CUI W. Present situation and development countermeasure of forage industry in Guizhou Province. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2010, 38(6): 165-167.
- [8] 岑慧连, 唐祈林. 中国西南地区草牧业概况及其发展趋势分析. *草业科学*, 2016, 33(3): 535-539.  
CEN H L, TANG Q L. Plant and animal farming development in the southwest China. *Pratacultural Science*, 2016, 33(3): 535-539.
- [9] 杨艳生, 史德明, 吕喜玺. 长江三峡区土壤退化的研究. *水土保持学报*, 1991, 5(3): 53-62.  
YANG Y S, SHI D M, LYU X X. Research on soil deterioration in the Yangtze Three-Gorge region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(3): 53-62.
- [10] BRUSSAARD L, RUITER P C, BROWN G G. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121: 233-244.
- [11] ZHU Y, CHEN H, FAN J, WANG Y, LI Y, CHEN J, FAN J, YANG S, HU L, LEUNG H, MEW T W, TENG P S, WANG Z, MUNDT C C. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, 406: 718.
- [12] REN L X, SU S M, YANG X M, XU Y C, HUANG Q W, SHEN Q R. Intercropping with aerobic rice suppressed *Fusarium* wilt in watermelon. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 40(3): 834-844.
- [13] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 付国占, 尹飞, 徐国伟, 李增嘉. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响. *生态学报*, 2013, 33(14): 4324-4330.  
JIAO N Y, NING T Y, YANG M K, FU Z G, YIN F, XU G W, LI Z J. Effects of maize||peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4324-4330.
- [14] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 江学海, 赵其国. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(22): 7082-7090.  
ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, JIANG X H, ZHAO Q G. Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7082-7090.
- [15] 张萌萌, 敖红, 李鑫, 张景云, 王宁, 鞠成梅, 王佳, 蔡敦江, 孙广玉. 桑树/苜蓿间作对根际土壤酶活性和微生物群落多样性的影响. *草地学报*, 2015, 23(2): 302-309.  
ZHANG M M, AO H, LI X, ZHANG J Y, WANG N, JU C M, WANG J, CAI D J, SUN G Y. Effects of intercropping between mulberry and alfalfa on soil enzyme activities and microbial community diversity in rhizosphere. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(2): 302-309.
- [16] 路海东. 坡地粮草带状间作模式的水土保持效果与作物的生理生态效应. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2010.  
LU H D. Effects of strip intercropping forage cropping on soil and water conservation and on eco-physiological characteristics of crop under sloping field. PhD Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [17] 王永刚, 陈娟. 坡耕地玉米马铃薯间作产量及水土保持效益研究. *云南农业*, 2015(3): 40-43.



- WANG Y G, CHEN J. Study on yield and soil and water conservation benefit of maize and potato intercropping in slope farmland. *Yunnan Agriculture*, 2015(3): 40-43.
- [18] 段舜山, 蔡昆争. 鹤山赤红壤坡地幼龄果园间作牧草的水土保持效应. *草业科学*, 2000, 17(6): 12-17.  
DUAN Y S, CAI K Z. Effect of the soil and water conservation on intercropping grasses and forages in a young-fruit-garden of crinson soil slopeland in Heshan. *Pratacultural Science*, 2000, 17(6): 12-17.
- [19] 殷文, 史倩倩, 郭瑶, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 柴强. 秸秆还田、一膜两年用及间作对农田碳排放的短期效应. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 716-724.  
YIN W, SHI Q Q, GUO Y, FENG F X, ZHAO C, YU A Z, CAI Q. Short-term response of farmland carbon emission to straw return, two-year plastic film mulching and intercropping. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 716-724.
- [20] 赵财, 陈桂平, 柴强, 文玉良. 不同种植模式对农田土壤呼吸速率的影响. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51(6): 24-29.  
ZHAO C, CHEN G P, CHAI Q, WENG Y L. Effects of different cropping systems on farmland soil respiration. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2016, 51(6): 24-29.
- [21] 秦安振. 绿洲典型间作模式的土壤呼吸特征及其成因. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2013.  
QIN A Z. Mechanism of characteristics in soil respiration under typical intercropping systems on oasis arid land. PhD Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [22] 赵建华, 孙建好, 李隆, 李伟琦. 改变玉米行距种植对豌豆/玉米间作体系产量的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1451-1456.  
ZHAO J H, SUN J H, LI L, LI W Q. Effect of maize row spacing on yield of pea/maize intercropping system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1451-1456.
- [23] 贾有余, 骆秀梅, 张永亮. 氮肥与行距对不同生育期藜草产量与品质的调控效应. *草业科学*, 2016, 33(11): 2312-2318.  
JIA Y Y, LUO X M, ZHANG Y L. Regulating effect of nitrogen fertilizer and row spacing on yield and quality of *Phalaris arundinacea* at different growth stages. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11): 2312-2318.
- [24] JIANG D, LU Q, WENG X, ZHANG B, XI H. Role of key enzymes for photosynthesis in the diurnal changes of photosynthetic rate in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27: 301-307.
- [25] YANG J D, LIU Z M. Study on field-grown maize introduced into tibetan plateau: Some characteristics of diurnal variation of photosynthesis. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(4): 475-479.
- [26] 张治安, 杨福, 陈展宇, 徐克章. 菰叶片净光合速率日变化及其与环境因子的相互关系. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 502-509.  
ZHANG Z A, YANG F, CHEN Z Y, XU K Z. Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and environmental factors in leaves of *Zizania latifolia*. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 502-509.
- [27] 郭春明, 李大勇, 姚渝丽, 任景全, 李建平, 崔金虎, 耿艳秋. 不同生长状况下玉米叶片的光合特征研究. *黑龙江农业科学*, 2016(10): 23-27.  
GUO C M, LI D Y, YAO Y L, REN J Q, LI J P, CUI J H, GENG Y Q. Study on photosynthetic characteristics of different growth of maize leaves. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(10): 23-27.
- [28] 段震宇, 王婷, 桑志勤, 王友德, 陈树宾, 郭斌, 李玉梅, 张小伟. 不同栽培模式下青贮玉米的农艺性状. *草业科学*, 2018, 35(4): 891-899.  
DUAN Z Y, WANG T, SANG Z Q, WANG Y D, CHEN S B, GUO B, LI Y M, ZHANG X W. Effect of different planting patterns on agronomic traits of silage maize. *Pratacultural Science*, 2018, 35(4): 891-899.
- [29] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 罗明珠. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1597-1602.  
ZHANG J E, GAO A X, XU H Q, LUO M Z. Effects of maize/peanut intercropping on rhizosphere soil microbes and nutrient contents. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1597-1602.
- [30] 郝艳如, 劳秀荣, 孟庆强, 赵新峰. 玉米/小麦间作对根际土壤和养分吸收的影响. *中国农学通报*, 2002, 18(4): 20-23.  
HAO Y R, LAO X R, MENG Q Q, ZHAO X F. Effect of wheat/maize intercropping on rhizosphere soil and nutrient absorption. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2002, 18(4): 20-23.

- [31] 匡石滋, 田世尧, 李春雨, 易干军, 彭群. 香蕉间作模式和香蕉茎秆堆沤还田对土壤酶活性的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 617-621.  
KUANG S C, TIAN S Y, LI C Y, YI G J, PENG Q. Effect of banana intercropping pattern and straw compost-return on soil enzyme activity. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 617-621.
- [32] 董楠. 不同作物组合间作优势和时空稳定性的生态机制. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2017.  
DONG N. The ecological mechanism of yield advantage and spatio-temporal stability in different crop combinations. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [33] 程玉柱, 李龙, 周琴, 郭拿, 邢邯, 江海东. 玉米/大豆不同配置下的玉米生长和产量形成研究. *南京农业大学学报*, 2016, 39(1): 34-39.  
CHENG Y Z, LI L, ZHOU Q, GUO N, XING H, JIANG H D. Growth and yield formation of maize under different maize/soybean intercropping patterns. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(1): 34-39.
- [34] 高亚男, 曹庆军, 韩海飞, 崔金虎, 王洪预. 不同行距对春玉米产量和光合速率的影响. *玉米科学*, 2010, 18(2): 73-76.  
GAO Y N, CAO Q J, HAN H F, CUI J H, WANG H Y. Effect of different row spacings on yield and chloroplast rates of spring maize. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(2): 73-76.
- [35] 魏永鹏, 南丽丽, 于闯, 付双军. 种植密度和行距配置对紫花苜蓿群体产量及品质的影响. *草业科学*, 2017, 34(9): 1898-1905.  
WEI Y P, NAN L L, YU C, FU S J. Effect of row spacing and planting density on the yield and quality of *Medicago sativa*. *Pratacultural Science*, 2017, 34(9): 1898-1905.
- [36] 任金虎, 谢军红, 李玲玲, Lamprey Shirley, Stephen Yeboah, 张明君, 高海强. 种植模式对旱地玉米光合特性和产量的影响. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(5): 8-13.  
REN J H, XIE J H, LI L L, LAMPREY S, STEPHEN Y, ZHANG M J, GAO H Q. Effects of planting patterns on photosynthetic characteristics and grain yield of maize in dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5): 8-13.
- [37] 段宏凯, 李卫东, 王锦慧, 杜天庆, 唐嫣然, 梁李涛, 曹恒伟, 王荣, 刘健伟, 莫婷, 韩琼玉, 刘慧琴. 密度与行距对玉米‘协玉 3 号’穗部性状及产量的影响. *中国农学通报*, 2015, 31(24): 78-85.  
DUNA H K, LI W D, WANG J H, DU T Q, TANG Y R, LIANG L T, CAO H W, WANG R, LIU J W, MO T, HAN Q Y, LIU H Q. Effects of row spacing and planting density on panicle shape and maize yield of ‘Xieyu 3’. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(24): 78-85.
- [38] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, WALLACE L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622-625.

(责任编辑 王芳)