

# 连作西瓜光合特性及抗病性对小麦伴生的响应\*

徐伟慧<sup>1,2</sup> 吴凤芝<sup>1\*\*</sup> 王志刚<sup>2</sup> 孙国雁<sup>2</sup> 徐红红<sup>2</sup>

(1. 东北农业大学园艺学院 哈尔滨 150030; 2. 齐齐哈尔大学生命科学与农林学院 齐齐哈尔 161006)

**摘要** 连作障碍是限制设施西瓜栽培的重要因素,利用植物间化感作用的伴生栽培模式是解决连作障碍的有效手段。为探讨小麦品种‘D<sub>125</sub>’伴生对连作西瓜生长的效应,采用连作西瓜土壤进行盆栽试验,设置西瓜单作和小麦伴生西瓜2个处理,研究连作西瓜光合特性及抗病性对小麦伴生的响应。结果表明,西瓜定植40 d时,伴生小麦与单作相比,西瓜叶片光合速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度分别提高32.2%、28.5%、7.8%,叶片叶绿素总量、叶绿素a含量和叶绿素a/b分别增加7.5%、8.4%和3.2%,且差异显著;西瓜定植60 d时,伴生小麦与单作相比,西瓜叶片净光合速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度分别提高52.9%、116.7%、33.8%,叶片叶绿素总量、叶绿素a含量和叶绿素a/b分别提高5.8%、7.1%、4.9%,均达到差异显著水平。但两个处理间的初始荧光、可变荧光、PSII最大光化学效率、PSII实际光化学效率及光化学猝灭系数无显著差异;西瓜白粉病病情指数降低6.3%。西瓜定植40 d后,伴生小麦与单作相比,西瓜叶片MDA含量和PAL活性分别降低44.43%和8.68%,SOD和PPO活性升高17.3%和84.5%;西瓜定植60 d,叶片PAL活性显著高于单作,MDA含量、SOD和PPO活性无显著差异。可见连作西瓜对伴生小麦产生了积极的响应,伴生小麦具有提高连作西瓜净光合速率,减缓西瓜叶片衰老,延长光合功能期的作用,提升了连作西瓜的抗病性。

**关键词** 连作障碍 西瓜 小麦伴生 光合特性 抗病性

**中图分类号:** S627 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2014)06-0655-06

## Response of photosynthetic characteristics and disease resistance of watermelon to companion with wheat

XU Weihui<sup>1,2</sup>, WU Fengzhi<sup>1</sup>, WANG Zhigang<sup>2</sup>, SUN Guoyan<sup>2</sup>, XU Honghong<sup>2</sup>

(1. Department of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Department of Life Sciences and Agroforestry, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

**Abstract** Watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum and Nakai] is an important fruit that is commonly eaten all over the world. However, studies have shown that continuous cropping of watermelon on the same field could lead to serious problems, including poor plant growth, reduced production and low disease resistance called soil sickness. It has also been noted that intercropping or rotating watermelon with wheat, a process known as companion wheat, could reduce soil sickness disease. To further explore companion wheat ‘D<sub>125</sub>’ effect on the growth of watermelon, pot experiments were conducted to investigate the response of photosynthetic characteristics and disease resistance in watermelon to companion with wheat ‘D<sub>125</sub>’. The two treatments were monoculture watermelon (the control) and watermelon in companion with wheat. The tested soil was planted with watermelon for three consecutive years. The results showed that photosynthetic rate, stomatal conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration of watermelon in companion with wheat were significantly higher than those of monoculture watermelon by 32.2%, 28.5% and 7.8%, respectively. Chlorophyll (chl a + chl b, chl a, and chl a/b) contents of watermelon in companion with wheat were also significantly higher than those in monoculture watermelon on the 40<sup>th</sup> day after transplanting by 7.5%, 8.4% and 3.2%, respectively. Similar results were obtained on the 60<sup>th</sup> day after transplanting for photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration and chlorophyll (chl a + chl b, chl a, and chl a/b) contents of watermelon in companion with wheat, all of which were significantly higher than those in monoculture watermelon by 52.9%, 116.7%, 33.8%, 5.8%, 7.1% and 4.9%, respectively. No

\* 黑龙江省教育厅科学技术研究项目资助

\*\* 通讯作者: 吴凤芝, 主要从事设施园艺与蔬菜生理生态研究。E-mail: fzwu2006@aliyun.com

徐伟慧, 专业方向为蔬菜生理生态。E-mail: xwh800206@163.com

收稿日期: 2014-02-06 接受日期: 2014-04-11

significant differences in  $F_o$ ,  $F_v$ ,  $F_v/F_m$ ,  $\Phi PS$  and  $qP$  were noted between the two cropping systems. Powdery mildew disease index of watermelon leaf decreased by 6.3% in companion cropping system, compared with monoculture watermelon on the 40<sup>th</sup> day after transplanting watermelon. Also compared with monoculture cropping, MDA content and PAL activity of watermelon leaf in companion cropping system decreased by 44.43% and 8.68%, respectively. The activities of SOD and PPO in watermelon leaf increased by 17.3% and 84.5%, respectively. On the 60<sup>th</sup> day after transplanting watermelon, PAL activity of watermelon in companion with wheat was higher than that in monoculture watermelon. No significant differences were noted in MDA content and SOD and PPO activities between the two cropping systems. The results of the study suggested that watermelon had a positive response to wheat 'D<sub>125</sub>' as a companion crop. The companion of watermelon with wheat 'D<sub>125</sub>' was also beneficial for improving photosynthetic characters, increasing disease resistance of watermelon under continuous cropping system.

**Keywords** Successive cropping obstacle; Watermelon; Companion with wheat; Photosynthetic characters; Disease resistance (Received Feb. 6, 2014; accepted Apr. 11, 2014)

近年来,我国设施农业迅速发展,至2010年底设施园艺面积约达到466.7万hm<sup>2</sup>,成为世界设施农业生产面积最大的国家<sup>[1]</sup>。西瓜[Citrullus lanatus (Thunb.) Matsum & Nakai]作为设施园艺的主要栽培作物之一,栽培面积不断扩大,连作栽培不可避免,因此常发生植株生育迟缓、生长势下降、品质变劣、病虫害大量发生等连作障碍现象<sup>[2]</sup>。白粉病是西瓜的常见病害,在设施重茬栽培中发生较重。利用植物间的化感作用合理安排间、轮、套作、伴生等是解决连作障碍的有效手段<sup>[3-7]</sup>。植物的化感作用是指植物(含微生物)通过释放化学物质到环境中而产生对其他植物直接或间接的有害或有利的作用<sup>[8]</sup>。伴生植物是指经过特殊挑选的具有某种相生相克性状的植物,其本身不以收获为目的<sup>[9]</sup>。利用植物间的化感作用,在主栽作物一侧种植伴生植物,而不以伴生植物为主要收获目的的栽培模式称为伴生栽培,伴生栽培在缓解作物连作障碍方面具有广阔的应用前景。

小麦(*Triticum aestivum* L.)是典型的化感型作物,主要通过根系分泌及残体分解等方式影响自身或邻近植物的生长发育。不同的小麦品种具有不同的化感潜力<sup>[10-11]</sup>。研究表明,小麦与黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)轮作可以显著提高土壤微生物多样性指数,改善土壤微生物区系组成,提高黄瓜产量<sup>[12-13]</sup>。不同小麦品种根系分泌物对西瓜种子萌发和幼苗生长存在差异,小麦品种'D<sub>125</sub>'根系分泌物对西瓜幼苗株高、茎粗、全株干鲜重具有促进作用<sup>[14]</sup>。然而,'D<sub>125</sub>'小麦伴生能否对连作西瓜生长产生影响,目前尚少见报道。本研究以连作西瓜3年的土壤为基质,通过盆栽试验,研究连作西瓜光合参数、荧光参数、病情指数及抗氧化酶对小麦品种'D<sub>125</sub>'伴生的响应,为小麦与西瓜伴生栽培模式的应用及其相关研究提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自哈尔滨市光明村,西瓜连作3年。基本理化性质为:有机质41.9 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮147.9 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷238.6 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾152.4 mg·kg<sup>-1</sup>,EC 0.632 mS·cm<sup>-1</sup>,土壤pH 6.67。

供试小麦品种为'D<sub>125</sub>'<sup>[14]</sup>,由东北农业大学园艺学院蔬菜生理生态实验室提供。西瓜品种为'京欣1号',其种子购买于北京金种子公司。

### 1.2 试验方法

试验设两个处理:西瓜单作和'D<sub>125</sub>'小麦伴生西瓜。土壤过6 mm筛后装入盆(30 cm×25 cm)中,每盆含有充分混匀的8.8 kg土和1.2 kg腐熟的鸡粪,置于日光温室中备用。西瓜正常育苗,待西瓜长至4叶1心时移栽至盆中,单作处理每盆种植1株西瓜苗,伴生处理每盆1株西瓜苗,在距植株5 cm处点播20~30粒小麦种子,当小麦长至20 cm左右时留5 cm茬口割掉,以不影响西瓜生长为准。每个处理重复30盆,完全随机排列。试验期间不喷洒任何药剂,其余按正常管理。西瓜定植40 d和60 d分别测定西瓜第12片和第17片叶的光合参数、荧光参数和叶绿素含量,并取西瓜功能叶片用液氮迅速冷冻,保存于-80 °C用于丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)、多酚氧化酶(PPO)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性测定。

### 1.3 测定项目

#### 1.3.1 西瓜白粉病的调查及分析

发病初期采取随机取样,每个处理调查7株全部叶片,根据分级方法记录不同处理的病级,计算病情指数,计算公式为:病情指数(%)=∑(各级病叶数×相对级数值)/(调查总叶数×9)×100。

西瓜白粉病分级标准<sup>[15]</sup>:0级,叶片无病斑;1级,病斑面积占整个叶面积的5%以下;3级,病斑面积占整个叶面积的6%~10%;5级,病斑面积占整个叶面

积的 11%~20%; 7 级, 病斑面积占整个叶面积的 21%~40%; 9 级, 病斑面积占整个叶面积的 41% 以上。

### 1.3.2 叶绿素含量及光合特性指标的测定

叶绿素含量测定采用 Arnon 的方法<sup>[16]</sup>。西瓜定植 40 d 和 60 d 时(均为晴天), 上午 9:00—11:00, 采用美国 Li-COR 公司的 LI-6400 便携式光合测定仪, 每个处理选择 9 棵植株, 分别测定西瓜从下往上数第 12 和 17 完全展开叶片的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $Tr$ )等光合参数。采用荧光仪测定光适应下最大荧光( $F_m'$ )和最小荧光( $F_o'$ )、光适应下的稳态荧光( $F_s$ )和暗适应 30 min 后的最大荧光( $F_m$ )、初始荧光( $F_o$ )。计算 PS II 的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、实际光化学效率( $\Phi PS II$ )和光化学淬灭系数( $qP$ )公式分别为:

$$F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_m \quad (1)$$

$$qP = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_o') \quad (2)$$

$$\Phi PS II = (F_m' - F_s) / F_m' \quad (3)$$

### 1.3.3 生理生化指标测定

MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[17]</sup>,

SOD 活性测定采用氮蓝四唑光还原法, PPO 和 PAL 活性测定参照 Qin 等<sup>[18]</sup>的方法。

### 1.4 数据统计分析

数据处理采用 Microsoft Excel 2003 软件, 差异显著性分析采用 SAS 9.0 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 西瓜光合特性对伴生小麦的响应

#### 2.1.1 光合参数的响应

由表 1 可知, 西瓜定植 40 d, 伴生小麦的西瓜叶片光合速率、气孔导度和胞间  $CO_2$  浓度分别比西瓜单作提高 32.2%、28.5%、7.8%, 差异均达到显著水平; 西瓜定植 60 d, 伴生小麦的西瓜叶片净光合速率、气孔导度和胞间  $CO_2$  浓度分别较西瓜单作提高 52.9%、116.7%、33.8%, 均达到差异显著水平。这表明, 伴生小麦提高了西瓜净光合速率, 减缓西瓜叶片衰老, 延长其光合功能期。但是伴生小麦对西瓜叶片蒸腾速率影响不明显。

表 1 定植 40 d 和 60 d 西瓜叶片光合参数对小麦伴生的响应

Table 1 Response of watermelon leaves photosynthesis indexes to companion wheat at 40<sup>th</sup> and 60<sup>th</sup> day of transplant

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 ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		胞间 $CO_2$ 浓度 Intercellular $CO_2$ concentration [ $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mol}^{-1}$ ]		蒸腾速率 Transpiration rate [ $\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	
	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d
	CK	6.49±0.55b	10.15±0.83b	0.07±0.01b	0.12±0.01b	142.50±4.5b	171.40±32.6b	3.12±0.38a
D <sub>125</sub>	8.58±2.20a	15.52±1.90a	0.09±0.02a	0.26±0.05a	153.60±8.7a	229.30±19.1a	3.53±0.80a	6.57±0.96a

CK: 西瓜单作; D<sub>125</sub>: 'D125'小麦与西瓜伴生; 同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ); 下同。CK: monocultured watermelon; D<sub>125</sub>: 'D125' wheat accompanied watermelon. The data with different letters in a column are significantly different by LSD test at  $P < 0.05$ . The same below.

#### 2.1.2 叶绿素含量的响应

叶绿素在植株体内负责光能的吸收、传递和转化, 在光合作用中起着非常重要的作用<sup>[19-20]</sup>。由表 2 可以看出, 在西瓜定植 40 d 时, 与西瓜单作相比, 小麦伴生栽培下西瓜叶片叶绿素含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 a/b 分别增加 7.5%、8.4%、3.2%, 差异均达到显著水平; 西瓜定植 60 d 时, 伴生小麦西瓜叶片叶绿素含量、叶绿素 a、叶绿素 a/b 分别较对照提高 5.8%、7.1%、4.9%。这说明伴生栽培模式下西瓜通过提高叶绿素 a 含量和叶绿素 a/b 促进光能的吸收, 提高光合效率。

#### 2.1.3 荧光参数的响应

初始荧光( $F_o$ )是植物叶片暗适应后光合系统 PS

中心完全开放时的荧光强度, 反映 PS 天线色素受激发后的电子密度; 可变荧光( $F_v$ )是植物在暗适应过程中的最大可变荧光强度, 反映了质体醌类(QA)的还原情况<sup>[16,21]</sup>; PS 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )是 PS 最大的(潜在)光化学量子效率, 反映开放的 PS 反应中心的能量捕获效率; PS 实际光化学效率( $\Phi PS II$ )是作用光存在时 PS 实际的光化学量子效率, 反映了被用于光化学途径激发能占进入 PS 总激发能的比例, 是植物光合能力的一个重要指标; 光化学淬灭系数( $qP$ )反映 PS 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额。由表 3 可知, 'D<sub>125</sub>'小麦伴生西瓜叶片的  $F_o$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $qP$  与西瓜单作相比, 差异不明显。这表明, 小麦伴生栽培

表 2 定植 40 d 和 60 d 西瓜叶片叶绿素含量对伴生小麦的响应

Table 2 Response of chlorophyll contents in watermelon leaves to companion wheat at 40<sup>th</sup> and 60<sup>th</sup> day of transplant

处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )		叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )		叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )		叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	
	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d
	CK	2.28±0.18b	2.07±0.09b	1.67±0.13b	1.56±0.06b	0.60±0.07a	0.51±0.02a	2.78±0.09b
D <sub>125</sub>	2.45±0.08a	2.19±0.08a	1.81±0.06a	1.67±0.05a	0.63±0.02a	0.52±0.02a	2.87±0.08a	3.21±0.08a

表 3 定植 40 d 和 60 d 西瓜叶片荧光参数对小麦伴生的响应

Table 3 Response of fluorescence parameters of watermelon leaves to companion wheat at 40<sup>th</sup> and 60<sup>th</sup> day of transplant

处理 Treatment	初始荧光 Initial fluorescence (F <sub>0</sub> )		可变荧光 Variable fluorescence (F <sub>v</sub> )		PS 最大光化学效率 Maximal photochemical efficiency of PS (F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub> )		PS 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency of PS (ΦPS <sub>2</sub> )		光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient (qP)	
	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d
	CK	157.80±8.31a	149.90±8.50a	691.50±31.13a	619.00±36.72a	0.81±0.02a	0.80±0.01a	0.23±0.02a	0.22±0.04a	0.57±0.05a
D <sub>125</sub>	161.94±3.50a	150.91±10.51a	681.60±16.80a	605.50±34.71a	0.81±0.01a	0.81±0.01a	0.25±0.03a	0.23±0.02a	0.62±0.04a	0.65±0.03a

模式下,西瓜叶片光合速率的提高不是由于叶片光能传递、转化效率的提高引起的。

## 2.2 西瓜抗病性对伴生小麦的响应

### 2.2.1 西瓜白粉病的响应

西瓜定植 40 d 时感染了白粉病。调查发现,小麦伴生和单作处理的西瓜植株发病率均为 100%,‘D<sub>125</sub>’小麦伴生病情指数为 7.1%±1.49%,西瓜单作的病情指数为 13.4%±1.88%,小麦伴生西瓜白粉病病情指数比西瓜单作降低 6.3%,且差异显著。

### 2.2.2 叶片 MDA 含量和防御酶活性的响应

表 4 表明,西瓜定植 40 d,感染了白粉病,伴生小麦处理的西瓜叶片 MDA 含量和 PAL 活性均显著低于单作,分别比单作西瓜降低 44.43%、8.68%;而伴生小麦处理的西瓜叶片 SOD 和 PPO 活性均显著高于单作,分别比单作提高 17.3%和 84.5%。西瓜定植 60 d 时,白粉病症状加重,伴生小麦处理的西瓜叶片 MDA 含量、SOD 活性和 PPO 活性与西瓜单作无显著差异,而 PAL 活性显著高于西瓜单作。

表 4 定植 40 d 和 60 d 西瓜叶片中 MDA 及保护酶活性对小麦伴生的影响

Table 4 Response of malondialdehyde content and defensively enzymatic activity in watermelon leaves to companion wheat at 40<sup>th</sup> and 60<sup>th</sup> day of transplant

处理 Treatment	MDA 含量 Malondialdehyde content [μmol·g <sup>-1</sup> (FW)]		SOD 活性 Superoxide dismutase activity [U·g <sup>-1</sup> (FW)]		PPO 活性 Polyphenol oxidase activity [U·mg <sup>-1</sup> (FW)·min <sup>-1</sup> ]		PAL 活性 Phenylalanine ammonialyase activity [U·mg <sup>-1</sup> (FW)·h <sup>-1</sup> ]	
	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d	40 d	60 d
	CK	24.49±4.01a	31.74±5.30a	169.51±4.10b	225.60±13.21a	1.16±0.15b	2.27±0.20a	6.34±0.17a
D <sub>125</sub>	13.61±2.62b	30.42±1.01a	198.80±7.50a	223.42±24.33a	2.14±0.33a	2.76±0.65a	5.79±0.26b	6.51±0.29a

## 3 讨论与结论

本研究表明,在小麦与西瓜伴生体系中,‘D<sub>125</sub>’小麦伴生提高了西瓜叶片叶绿素 a 含量和叶绿素 a/b 值,有伴生小麦时,西瓜通过提高叶片叶绿素 a 含量来增加光反应中心,吸收较多的光能进行光反应,从而促进净光合速率的提高<sup>[22]</sup>。小麦伴生西瓜的叶片净光合速率、气孔导度和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度较西瓜单作显著提高,但是 PS 的最大光化学量子效率和实际光化学量子效率没有明显变化,说明 PS 反应中心被用于光化学途径激发能占进入 PS 总激发能的比例没有提高<sup>[20]</sup>。小麦伴生体系中,西瓜叶片气孔导度和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度显著高于单作西瓜,有助于光合效率的提高<sup>[23]</sup>,这可能是小麦伴生体系西瓜叶片光合速率提高的原因之一。

根据不同作物化感作用的性质和特点,充分利用化感作用中的相生效应,是农业可持续发展的新思路<sup>[24]</sup>。小麦是典型的化感型作物,会影响黄瓜、莴苣、棉花以及田间杂草的生长<sup>[25-27]</sup>,小麦-黄瓜间作能够显著降低黄瓜白粉病病情指数<sup>[28]</sup>。当植物受到病原菌侵染时,会产生一系列的生理生化反应,

MDA 含量及 SOD、PPO 和 PAL 等防御酶活性发生变化<sup>[29-31]</sup>。本试验中,选择根系分泌物对西瓜幼苗具有促进作用的小麦品种‘D<sub>125</sub>’与西瓜伴生<sup>[14]</sup>,发现西瓜定植 40 d 时,受到白粉病菌的侵染,‘D<sub>125</sub>’小麦伴生显著降低了西瓜白粉病的病情指数和西瓜叶片 MDA 含量,并提高了西瓜叶片 SOD 活性,说明伴生小麦通过提高 SOD 活性消除体内多余的超氧阴离子自由基,降低膜脂过氧化程度,增加西瓜生物膜的稳定性。PPO 活性有助于形成对植株具有保护作用的酚类物质、醌类物质以及木质素等,从而抑制病原菌的破坏和保护自身的生长和代谢<sup>[32]</sup>,伴生小麦体系显著提高了西瓜叶片 PPO 活性,说明伴生小麦栽培提升了西瓜抵制病原菌侵染的能力。徐敬华等<sup>[33]</sup>报道, PAL 活性与植物的抗病性呈正相关,本试验表明,西瓜感病期间,伴生小麦处理的西瓜叶片 PAL 活性高于西瓜单作,说明伴生小麦体系中西瓜叶片受白粉病原菌侵染的程度低。

综上所述,‘D<sub>125</sub>’小麦伴生提升了西瓜叶片的光合性能,提高了西瓜叶片 SOD、PPO 和 PAL 酶活性,降低了叶片 MDA 含量,降低了连作西瓜白粉病病情指数。因此,‘D<sub>125</sub>’小麦伴生西瓜的栽培模式有助

于西瓜的生长, 有明显的抗病优势, 但连作西瓜与小麦伴生抗白粉病的内在机制还需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 喻景权. “十一五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望[J]. 中国蔬菜, 2011(2): 11–23  
Yu J Q. Progress in protected vegetable production and research during ‘The Eleventh Five-Year Plan’ in China[J]. China Vegetables, 2011(2): 11–23
- [2] Zhou X G, Everts K L. Suppression of *Fusarium* wilt of watermelon by soil amendment with hairy vetch[J]. Plant Disease, 2004, 88(12): 1357–1365
- [3] Held D W, Gonsiska P, Potter D A. Evaluating companion planting and non-host masking odors for protecting roses from the Japanese beetle (*Coleoptera: Scarabaeidae*)[J]. Journal of Economic Entomology, 2003, 96(1): 81–87
- [4] Ren L X, Su S M, Yang X M, et al. Intercropping with aerobic rice suppressed *Fusarium* wilt in watermelon[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 834–844
- [5] Finch S, Billiard H, Collier R H. Companion planting-do aromatic plants disrupt host-plant finding by the cabbage root fly and the onion fly more effectively than non-aromatic plants?[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2003, 109(3): 183–195
- [6] 于高波, 吴凤芝, 周新刚. 小麦、毛苕子与黄瓜轮作对土壤微生态环境及产量的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 175–184  
Yu G B, Wu F Z, Zhou X G. Effects of rotations of cucumber with wheat and hairy vetch on soil micro-ecological environment and its yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 175–184
- [7] Xu W H, Wu F Z, Chang C L, et al. Effects of wheat as companion cropping on growth, soil enzymes and disease resistance of watermelon[J]. Allelopathy Journal, 2013, 32(2): 267–278
- [8] Rice E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press, 1974: 1–50
- [9] 孙文浩, 余叔文. 相生相克效应及其应用[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(2): 81–87  
Sun W H, Yu S W. Allelopathy and its potential application[J]. Plant Physiology Communications, 1992, 28(2): 81–87
- [10] 左胜鹏, 马永清, 稻永忍, 等. 不同基因型小麦麦茬对杂草的化感抑制作用[J]. 植物保护学报, 2005, 32(2): 195–200  
Zuo S P, Ma Y Q, Dao Y R, et al. Allelopathic effect of wheat stubbles with different genotypes on weed suppression[J]. Acta Phytologica Sinica, 2005, 32(2): 195–200
- [11] 张晓珂, 梁文举, 姜勇. 东北地区不同小麦品种对黑麦草的化感作用[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1191–1195  
Zhang X K, Liang W J, Jiang Y. Allelopathic potentials of different wheat varieties in Northeast China against ryegrass[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(7): 1191–1195
- [12] 吴凤芝, 王学征. 黄瓜与小麦和大豆轮作对土壤微生物群落物种多样性的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(6): 1543–1546  
Wu F Z, Wang X Z. Effect of soybean-cucumber and wheat-cucumber rotation on soil microbial community species diversity[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(6): 1543–1546
- [13] 吴凤芝, 王学征, 潘凯. 小麦和大豆茬口对黄瓜土壤微生物生态特征的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 794–798  
Wu F Z, Wang X Z, Pan K. Effects of wheat and soybean stubbles on soil microbial ecological characteristics in cucumber field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 794–798
- [14] 孙丛丛, 刘守伟, 吴凤芝. 不同品系小麦根系分泌物对西瓜幼苗生长的化感效应[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 628–633  
Sun C C, Liu S W, Wu F Z. Allelopathy effects of root exudates from different wheat cultivars on watermelon seeding growth[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(5): 628–633
- [15] 陈宗贤, 郑伟, 何宗平. 62.25%代森锰锌-腈菌唑可湿性粉剂防治西瓜白粉病[J]. 植物医生, 2008, 21(3): 37–38  
Chen Z X, Zheng W, He Z P. 62.25% Mancozeb-myclobutanil wettable powder control powdery mildew of watermelon[J]. Plant Doctor, 2008, 21(3): 37–38
- [16] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiology, 1949, 24(1): 1–15
- [17] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004  
Hao Z B, Cang J, Xu Z. Plant Physiology Experiment[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004
- [18] Qin G Z, Tian S P. Enhancement of biocontrol activity of *Cryptococcus laurentii* by silicon and the possible mechanisms involved[J]. Phytopathology, 2005, 95(1): 69–75
- [19] Zhang J H, Ma Y Y, Wang Z N, et al. Research on the improvement of photosynthesis indices of maize in the intercropping system[J]. Journal of Maize Sciences, 2006, 14(4): 104–106
- [20] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248–1254  
Gao Y, Duan A W, Liu Z G, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1248–1254
- [21] Li X, Feng W, Zeng X C. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(10): 2186–2196
- [22] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4324–4330  
Jiao N Y, Ning T Y, Yang M K, et al. Effects of maize/peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4324–4330
- [23] 肖关丽, 龙雯虹, 赵鹏, 等. 玉米-甘薯间作的光合效应及产量研究[J]. 云南农业大学学报, 2013, 28(1): 52–55  
Xiao G L, Long W H, Zhao P, et al. Photosynthetic characteristics and yield of corn and sweet potato in monoculture and intercropping[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2013, 28(1): 52–55
- [24] 阎飞, 杨振明, 韩丽梅. 论农业持续发展中的化感作用[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 633–635  
Yan F, Yang Z M, Han L M. Allelopathy in sustainable de-

- velopment of agriculture[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 633-635
- [25] 孙磊, 陈兵林, 周治国. 麦棉套作系统中小麦根区化感物质对棉苗生长的影响[J]. 棉花学报, 2006, 18(4): 213-217  
Sun L, Chen B L, Zhou Z G. Effect of allelopathic substance from wheat root zones on the growth of cotton seedling in wheat-cotton interplanting system[J]. Cotton Science, 2006, 18(4): 213-217
- [26] 孙红艳, 林瑞余, 叶陈英, 等. 化感小麦种质资源的筛选与评价[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 894-899  
Sun H Y, Lin R Y, Ye C Y, et al. Screening and evaluating allelopathic potential of wheat germplasm[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4): 894-899
- [27] 马亚飞, 杨平, 吴凤芝. 不同品系小麦根系分泌物对黄瓜化感作用的初步研究[J]. 中国蔬菜, 2011(10): 23-27  
Ma Y F, Yang P, Wu F Z. Primary studies about root exudates from different wheat cultivars on cucumber allelopathy[J]. China Vegetables, 2011(10): 23-27
- [28] 吴凤芝, 周新刚. 不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 899-906  
Wu F Z, Zhou X G. Effect of intercropping of cucumber with different crops on cucumber diseases and soil microbial community diversity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 899-906
- [29] 闫芝芳, 马春红, 魏建昆. 稻瘟病菌致病毒素对水稻雄性不育细胞质的专化性致病机理[J]. 中国农业科学, 1998, 31(6): 56-61  
Yan Z F, Ma C H, Wei J K. The specific pathogeny of toxins from *pyricularia oryzae* 90-2 strain to cytoplasmic male sterile in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1998, 31(6): 56-61
- [30] Gechev T, Willekens H, Van Montagu M, et al. Different responses of tobacco antioxidant enzymes to light and chilling stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(5): 509-515
- [31] 周艳虹, 喻景权, 钱琼秋, 等. 低温弱光对黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 921-924  
Zhou Y H, Yu J Q, Qian Q Q, et al. Effects of chilling and low light on cucumber seedlings growth and their antioxidative enzyme activities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 921-924
- [32] 苏世鸣, 任丽轩, 霍振华, 等. 西瓜与旱作水稻间作改善西瓜连作障碍及对土壤微生物区系的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 704-712  
Su S M, Ren L X, Huo Z H, et al. Effects of intercropping watermelon with rain fed rice on *Fusarium* wilt and the microflora in the rhizosphere soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(3): 704-712
- [33] 徐敬华, 黄丹枫, 支月娥. PAL 活性与嫁接西瓜枯萎病抗性传递的相关性[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2004, 22(1): 12-16  
Xu J H, Huang D F, Zhi Y E. Relationship of PAL activity and transfer of resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* in grafted watermelon[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2004, 22(1): 12-16