

# 免耕轮作对西北荒漠绿洲小麦、玉米产量和光合特性的影响

杨彩红<sup>1</sup>,耿艳香<sup>1</sup>,伏星舟<sup>1</sup>,严长庚<sup>1</sup>,赵宇浩<sup>1</sup>,罗永忠<sup>1</sup>,柴强<sup>2</sup>

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**针对我国西北荒漠绿洲区传统精耕细作土地沙化和生产力水平低的农业生产现状,于 2016—2018 年在甘肃省武威市凉州区设小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米、小麦→玉米 3 种轮作模式,小麦免耕留茬和传统耕作两种耕作模式,研究了免耕轮作对作物光合特性、叶绿素含量和产量性状的影响。结果表明:不同耕作方式之间,小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米和小麦→玉米 3 种轮作模式在不同年份间变化不一致,总体表现为免耕条件下作物的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度有所下降,但各处理间差异不显著,免耕并未显著影响 3 种轮作模式作物的光合特性;不同种植模式之间,小麦-冬油菜→玉米的光合速率较小麦/玉米→小麦/玉米和小麦→玉米增幅分别为-3.85%~4.91%和 1.44%~2.31%,蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的增幅分别为-13.01%~4.20%、9.60%~29.36%、-0.48%~1.83%和 17.10%~34.66%、-4.58%~7.07%、-5.11%~7.41%。随着种植年限的增长,免耕作物叶片叶绿素含量和小麦、玉米产量性状表现出一定的优势,2018 年度,免耕处理小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米、小麦→玉米的作物叶片叶绿素含量分别较相应传统耕作处理增加了 1.60%、3.14%、5.22%。在不同年度,免耕各处理小麦的小穗数、穗粒数、千粒重分别较传统耕作增加了 1.52%~5.08%、0.44%~2.84%、1.88%~3.82%,传统耕作小麦/玉米处理间作玉米的穗位高、穗长、单株穗粒数及百粒重较其他处理的增幅为-1.80%~4.83%、-0.46%~4.55%、1.96%~11.10%和 5.16%~7.32%。不同种植模式之间,小麦-冬油菜→玉米种植模式的光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度高于小麦/玉米→小麦/玉米和小麦→玉米处理,小麦/玉米表现出一定的产量优势。小麦-冬油菜→玉米轮作模式在免耕留茬条件下有助于增强作物地上光合物质生产能力,延缓叶片衰老,提高作物叶片水分利用效率。

**关键词:**免耕;轮作;间作;小麦;玉米;光合特性;产量性状;荒漠绿洲

**中图分类号:**S344;S512.1;S513 **文献标志码:**A

## Effects of no tillage and crop rotation on yield and photosynthetic characteristics of wheat and maize in desert oasis of northwest China

YANG Caihong<sup>1</sup>, GENG Yanxiang<sup>1</sup>, FU Xingzhou<sup>1</sup>, YAN Changgeng<sup>1</sup>,  
ZHAO Yuhao<sup>1</sup>, LUO Yongzhong<sup>1</sup>, CHAI qiang<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;  
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science/ College of Agronomy,  
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to explore more effective filed cropping patterns and increase crop production to achieve effective utilization of land and ecological environmental protection in oasis irrigation region of northwestern China. A field experiment was carried out to examine the effects of no tillage and crop rotation on photosynthetic characteristics, leaf chlorophyll content and yield traits in wheat/maize intercropping→wheat/maize intercropping, wheat-winter rape→maize and wheat→maize rotation in oasis region of Hexi Corridor, Gansu Province in 2016–2018. The change of every index in each treatment was not consistent in different years among differ-

ent tillage methods. There was a decline in photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration, but there was no significant difference among different treatments. No tillage had no significant differences on photosynthetic characteristic. Photosynthetic rate of wheat-winter rape→maize treatment was increased by -3.85%~4.91% and 1.44%~2.31% than wheat/maize intercropping→wheat/maize intercropping and wheat→maize rotation treatment respectively. Transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration were increased by -13.01%~4.20%, 9.60%~29.36%, -0.48%~1.83% and 17.10%~34.66%, -4.58%~7.07%, -5.11%~7.41% respectively. No tillage treatments showed some advantages in leaf chlorophyll content and yield traits of wheat and maize. The leaf chlorophyll content of wheat/maize intercropping→wheat/maize intercropping, wheat-winter rape→maize and wheat→maize rotation with no tillage was increased by 1.60%, 3.14% and 5.22% in 2018. The spikelet number, grain number per spike and 1000-grain weight of wheat in wheat/maize intercropping→wheat/maize intercropping, wheat-winter rape→maize and wheat→maize rotation with no tillage were increased by 1.52%~5.08%, 0.44%~2.84% and 1.88%~3.82%, respectively. The ear height, ear length, grain number per spike and 100-grain weight of maize in wheat/maize intercropping→wheat/maize intercropping with conventional tillage was increased by -1.80%~4.83%、-0.46%~4.55%、1.96%~11.10% and 5.16%~7.32%, respectively. The photosynthetic rate, stomatal conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration of wheat-winter rape→maize were higher than that of wheat/maize intercropping→wheat/maize intercropping and wheat→maize rotation, while wheat/maize intercropping showed higher yield advantage. The results suggest that wheat-winter rape→maize with no tillage improve the photosynthesis characteristics and dry matter accumulation in single plant and delay the leaf senescence, thus improve leaf water use efficiency.

**Keywords:** no tillage; crop rotation; intercropping; wheat; maize; photosynthetic characteristics; yield traits; desert oasis of northwest China;

西北绿洲灌区光热资源丰富、适合发展间作套种,然而传统间作套种由于耗水量过大及区域内资源性缺水严重影响到该种植模式的应用<sup>[1]</sup>。传统的精耕细作加剧了土地沙化和生产力水平的降低<sup>[2,3]</sup>,严重影响了农业的进一步发展。基于少动土、少裸露、少污染、高保蓄、高效益原理的保护性耕作<sup>[4]</sup>,在尽量减少农田养分的非生产性消耗同时可提高作物水分利用效率、有效减少农田扬尘、改善生态环境<sup>[5-7]</sup>。合理利用少耕、秸秆覆盖及少耕结合秸秆覆盖的保护性耕作技术,能够有效保护农业生态环境<sup>[8]</sup>、提高作物叶绿素含量和光合速率<sup>[9]</sup>、提高作物产量<sup>[10]</sup>、改善土壤性状<sup>[11-14]</sup>,是实现生态环境脆弱区作物增产、稳产和生态环境保护的可行措施之一。如何充分利用现有的耕地资源、减少由于深度耕作引起的土壤质量下降,在现有耕地面积的基础上提高土地生产力、开发荒漠绿洲区的农业生产潜力已成为我国农业可持续发展的重大课题。以提高农田周年产出、促进生态安全为主要目标,在总结间套复合种植研究与实践经验的基础上<sup>[15]</sup>,为最大限度规避不恰当的耕作方式对生态脆弱区自然环境的进一步破坏,开展荒漠绿洲区长期轮作模式下不同耕作对当地多熟种植农田生态环境效果方面的研究。本研究通过开展不同耕作

模式下作物群体的光合特性、叶片叶绿素含量及产量性状等影响的差异,旨在筛选免耕留茬耦合轮作的最佳模式,以期构建河西荒漠绿洲区生态保护与高产高效栽培提供理论依据与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2016—2018 年在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学校地联合绿洲农业科研教学基地进行。试验基地位于河西走廊东端(102°64'E, 37°30'N),属典型的内陆荒漠季风气候区,海拔 1 506 m,年均气温约 7.2℃,年均降水量约为 156 mm,多年平均无霜期 156 d,年均蒸发量约为 2 400 mm,≥0℃的积温为 3 513.4℃、≥10℃的积温为 2 985.4℃,年太阳辐射总量 504~630 kJ·cm<sup>-2</sup>,麦收后≥10℃有效积温 1 350℃,属于典型的两季不足、一季有余绿洲农业生产区。试区土壤为厚层荒漠土,2016 年试验开始前 0~20 cm 土层土壤容重为 1.57 g·cm<sup>-3</sup>,土壤有机质含量为 12.50 g·kg<sup>-1</sup>,全氮、全磷分别为 0.68、1.42 g·kg<sup>-1</sup>,pH 值 8.2。

### 1.2 试验设计

田间定位试验开始于 2016 年 3 月,试验设种植模式和耕作方式 2 个因子,共计 6 个处理,每个处理

3 次重复,田间随机排列,18 个小区,小区面积 110 m<sup>2</sup>,具体试验设计见表 1,包括小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米、小麦→玉米 3 种轮作模式和免耕留茬、传统耕作两种耕作方式。

表 1 不同试验处理设置

Table 1 Experimental design for different treatment

| 处理<br>Treatment | 耕作方式<br>Tillage method                                  | 种植模式 Cropping pattern              |                                    |                                    |
|-----------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                 |                                                         | 2016                               | 2017                               | 2018                               |
| NT1             | 免耕留茬<br>No-tillage with<br>straw covering               | 小麦/玉米<br>Wheat/maize intercropping | 小麦/玉米<br>Wheat/maize intercropping | 小麦/玉米<br>Wheat/maize intercropping |
| NT2             |                                                         | 小麦-冬油菜 Wheat-winter rape           | 玉米 Sole maize                      | 小麦-冬油菜 Wheat-winter rape           |
| NT3             |                                                         | 小麦 Sole wheat                      | 玉米 Sole maize                      | 小麦 Sole wheat                      |
| CT1             | 传统耕作<br>Conventional tillage<br>without straw retention | 小麦/玉米<br>Wheat/maize intercropping | 小麦/玉米<br>Wheat/maize intercropping | 小麦/玉米<br>Wheat/maize intercropping |
| CT2             |                                                         | 小麦-冬油菜 Wheat-winter rape           | 玉米 Sole maize                      | 小麦-冬油菜 Wheat-winter rape           |
| CT3             |                                                         | 小麦 Sole wheat                      | 玉米 Sole maize                      | 小麦 Sole wheat                      |

注:N-免耕留茬,C-传统耕作,T-种植模式,1、2、3 为 3 种不同的种植模式,“-”为年内轮作符号。  
Note: N-no tillage, C-conventional tillage, T-cropping pattern, 1, 2 and 3 represent three kinds of cropping pattern, “-” means yearly rotation.

供试春小麦品种为宁春 4 号,单作播种密度为 675 万粒·hm<sup>-2</sup>,行距 12 cm;间作播种密度为 375 万粒·hm<sup>-2</sup>,带宽 80 cm,种 6 行,行距 12 cm。播种时间分别为 2016 年 3 月 29 日、2017 年 3 月 25 日、2018 年 3 月 28 日,收获时间分别为 2016 年 7 月 20 日、2017 年 7 月 26 日、2018 年 7 月 17 日。小麦收获后于 8 月中、下旬复种冬油菜,冬油菜品种为陇油 6 号,开沟条播,播深 4 cm 左右,深浅一致,行距 20 cm,株距 10 cm,播后及时沿播种沟镇压保墒,此后常规管理;试验中冬油菜只起到冬季覆盖的作用,不计产,下季作物播种前收获冬油菜,直接将冬油菜翻耕还田。供试玉米品种为先玉 335,覆膜,单作播种密度 82 500 株·hm<sup>-2</sup>,行距 40 cm,株距 30 cm,间作密度 52 500 株·hm<sup>-2</sup>,行距 40 cm、株距 24 cm,播种时间分别为 2016 年 4 月 23 日、2017 年 4 月 22 日、2018 年 4 月 15 日,收获时间分别为 2016 年 9 月 15 日、2017 年 9 月 27 日、2018 年 9 月 26 日。单作小麦及间作小麦带施纯 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg·hm<sup>-2</sup>,全做基肥;复种冬油菜于返青期施纯氮 225 kg·hm<sup>-2</sup>;单作和间作玉米施纯 N 360 kg·hm<sup>-2</sup>,按基肥:大喇叭追肥:灌浆期追肥=3:6:1 分次施入,纯 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 225 kg·hm<sup>-2</sup>,全做基肥。各处理冬灌水均为 1 200 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,生育期内,小麦苗期、孕穗期、灌浆期分别补灌 750、900、750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>;玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、开花期、灌浆期分别补灌 900、750、900、750、750 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。

1.3 测定指标与测定方法

1.3.1 光合参数 采用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 型便携式光合系统测定仪,分别于小麦灌浆期、玉米吐丝期选择晴朗无风的天气,在 9:00—

11:00 自然光照下测定作物叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )。小麦在各处理小区中间位置随机选取 15 株小麦旗叶测定,玉米在各小区中间随机选取 5 株玉米穗位叶进行测定。

1.3.2 叶绿素含量 分别在小麦灌浆期、玉米吐丝期,用手持叶绿素测定仪 YLS-501 测定叶绿素含量<sup>[16]</sup>。

1.3.3 产量 小麦、玉米成熟后,实收测产,3 个重复。分别在各小区选取 20 株小麦进行室内考种,调查小麦穗长、小穗数、穗粒数、千粒重;选取 10 株玉米,调查其穗位高、穗长、秃尖长、穗粗、穗粒数、百粒重。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 整理、汇总数据,采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 免耕轮作对作物叶片光合气体交换参数的影响

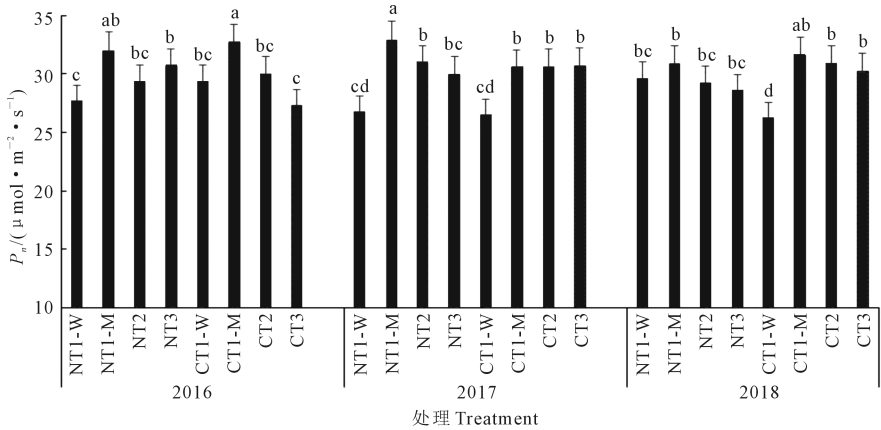
2.1.1 净光合速率( $P_n$ )及蒸腾速率( $T_r$ ) 从图 1 可以看出,2016—2018 年,不同耕作方式间作物叶片的净光合速率( $P_n$ )差异不明显;与相应的传统耕作相比,NT1-W、NT1-M、NT2、NT3 处理叶片净光合速率的增幅分别为-6.08%~11.22%、-2.13%~7.07%、-5.73%~0.96%、-5.86%~10.84%。不同种植模式之间,间作玉米叶片的  $P_n$  相对高于其他处理,小麦/玉米(T1)和小麦-冬油菜→玉米(T2)处理叶片  $P_n$  在 2016、2017、2018 年较小麦→玉米(T3)的增幅分别为 4.92%、-0.39%、-0.17% 和 2.31%、

1.44%、2.26%,T2 处理叶片  $P_n$  高于其他两种种植模式。可见,作物叶片  $P_n$  在免耕处理与传统耕作间无明显差异,这说明免耕并未使作物叶片的净光合速率发生明显下降。

从图 2 可以看出,不同处理作物蒸腾速率在不同年份间变化趋势大致相同,但各处理间由于作物类型的不同有所差异。不同耕作方式之间,除 2017 年 NT1-W 和 2018 年 NT1-M 处理的  $T_r$  分别高于相应的传统耕作处理外,其余各处理表现为免耕处理的  $T_r$  低于相应的传统耕作处理,这可能与间作群体作物的生长特性有关。不同种植模式之间,T1 和 T2 处理作物叶片的  $T_r$  明显高于 T3 处理,2016 年和 2017 年,T1、T2 处理作物叶片的  $T_r$  分别较 T3 处理增加了 4.19%、34.66%和 3.41%、17.10%,这可为作物轮作倒茬同时进行免耕处理、减少奢侈蒸腾、提

高作物的水分利用效率提供了理论基础。

2.1.2 气孔导度( $G_s$ )及胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ ) 气孔既是光合作用吸收空气中  $CO_2$  的入口,也是水蒸气逸出叶片的出口,它在控制碳的吸收和水分损失的平衡中起着重要的作用。如图 3 所示,不同年份不同处理间变化不一致,且差异不显著;不同处理作物叶片  $G_s$  在 2016、2017 年间的变化无明显规律;与相应传统耕作处理相比,2018 年 NT1-W、NT1-M、NT2、NT3 处理叶片  $G_s$  的降幅分别为 41.08%、10.14%、-10.18%、15.57%,除 T1 处理外,其他处理的差异未达到显著水平。不同种植模式之间,除 2018 年 T2 处理低于 T3 处理外,T2 处理叶片  $G_s$  均高于 T1 和 T3 处理,2016、2017、2018 年,T2 处理叶片  $G_s$  分别较 T1 和 T3 处理增加了 29.36%、22.27%、9.61%和 4.78%、7.07%、-4.58%。



注:W-小麦,M-玉米;图柱上不同小写字母表示处理间差异达到 5%显著水平,下同。  
Note: W-wheat, M-maize. Different lowercase letters on the columns indicate that significant differences between treatments at 5% levels, the same in the following figures.

图 1 不同处理下作物叶片净光合速率的变化

Fig.1 Variation of photosynthetic rate under different treatments

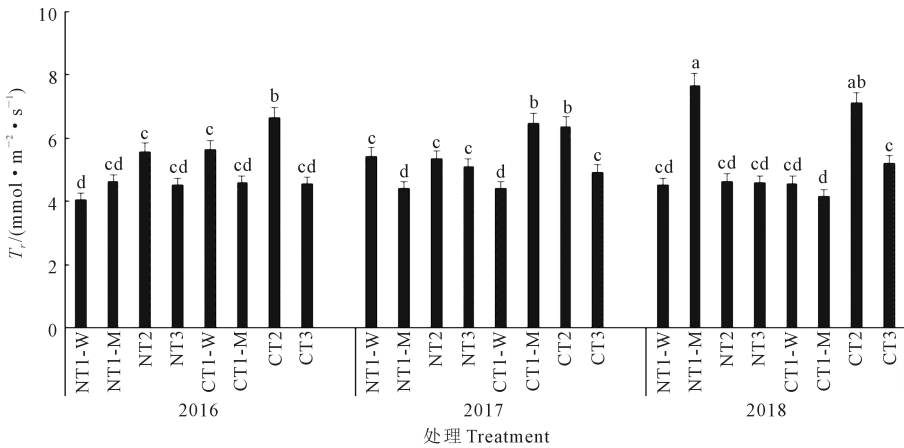


图 2 不同处理下作物叶片蒸腾速率的变化

Fig.2 Variation of transpiration rate under different treatments



田间条件下,空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度往往不能满足植物旺盛光合作用的需要,CO<sub>2</sub> 的供应成为光合作用的一个重要限制因素。如图 4 所示,不同年份不同种植模式之间的差异变化不一致,其中,不同耕作方式之间,除 2018 年 T2 和 T3 处理外,免耕处理作物叶片的  $C_i$  均低于相应的传统耕作处理。2016—2018 年,NT1-W、NT1-M、NT2、NT3 处理叶片的  $C_i$  较相应传统耕作处理的降幅分别为 1.56%~2.27%、1.74%~5.53%、2.77%~23.64%、0.01%~5.11%,差异未达到显著水平。

2.1.3 叶片水分利用效率 ( $WUE$ ) 从图 5 可以看出,不同耕作方式下,小麦间作玉米叶片水分利用效率较高,以 2017 年免耕和 2018 年传统耕作间作玉米的叶片水分利用效率最高;其中,2017 年 NT1-M 处理玉米叶片的水分利用效率 ( $WUE$ ) 分别较 NT2、NT3 处理增加了 22.56%、21.06%;2018 年 CT1-M 处理作物叶片  $WUE$  分别较 CT2、CT3 处理增加了 42.52%、23.41%。不同耕作方式之间,2017 年各处理之间变化不一致;2016、2018 年,除 NT1-M 处理外,NT1-W、NT2、NT3 处理叶片  $WUE$  较相应传统

耕作处理的增幅分别为 23.96%、14.03%、11.55% 和 12.50%、30.96%、7.08%,表明免耕对作物具有一定的节水效应。

2.2 免耕轮作对作物叶片叶绿素含量的影响

从图 6 可以看出,不同耕作方式之间,除 2016 年 CT3 处理低于免耕处理外,前两年其他处理传统耕作叶片叶绿素含量均高于相应的免耕处理;随着种植年限的增长,2018 年,除 CT1-M 处理外,其他处理叶片的叶绿素含量则表现为免耕高于传统耕作处理,NT1-W、NT1-M、NT2、NT3 处理叶片叶绿素含量较相应传统耕作处理的增幅分别为 3.59%、-0.40%、3.14%、5.22%。不同种植模式间,小麦-冬油菜→玉米 (T2) 中作物叶片的叶绿素含量相对高于小麦/玉米→小麦/玉米 (T1) 和小麦→玉米 (T3) 处理;2016—2018 年,与 T2 处理相比,T1-W、T1-M、T3 处理作物叶片叶绿素含量的降幅分别为 1.35%~9.12%、2.78%~15.07%、-1.30%~15.85%。说明免耕轮作处理尤其是小麦-冬油菜→玉米可提高作物叶片叶绿素含量,延缓其衰老,有利于作物灌浆期的光合生产。

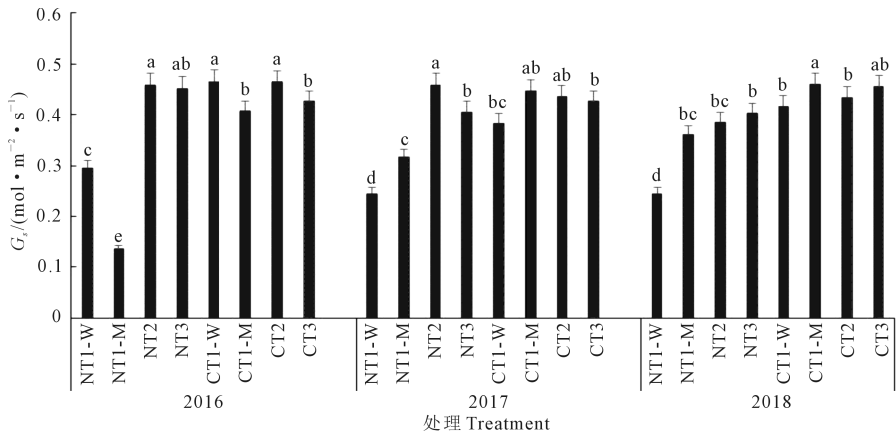


图 3 不同处理下作物叶片气孔导度的变化  
Fig.3 Variation of stomatal conductance under different treatments

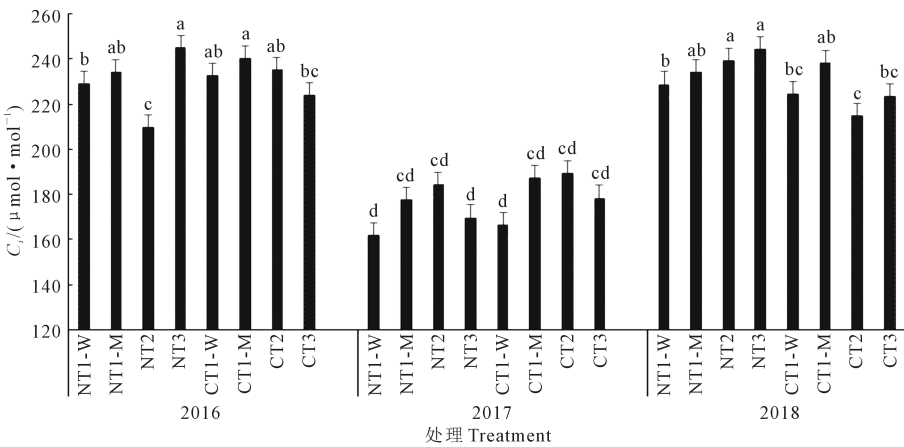


图 4 不同处理下作物叶片胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的变化  
Fig.4 Variation of intercellular CO<sub>2</sub> concentration under different treatments

2.3 免耕轮作对作物产量及产量性状的影响

2.3.1 小麦产量及产量性状 由表 2 可以看出, 2016 年,除千粒重外,传统耕作各项产量性状均高于免耕处理;与相应传统耕作处理相比,NT1 处理小麦的穗长、小穗数、穗粒数分别降低了 1.15%、4.32%、1.62%, NT2 处理的各指标分别降低了 5.91%、8.72%、1.03%, NT3 处理分别降低了 5.06%、9.28%、5.09%; NT1、NT2、NT3 处理的千粒重则分别较相应传统耕作处理增加了 9.91%、5.44%、6.93%。2018 年度,随着种植年限的增长,不同处理小麦产量性状发生了变化,其中,NT1 处理小穗数、穗粒数、千粒重分别较 CT1 增加 5.08%、0.44%、2.03%, NT2 和 NT3 分别较相应传统耕作处理增加了 1.52%、2.22%、1.88%和 3.52%、2.84%、3.82%。不同种植模式之间,2016 年, T1 处理小麦的穗长、小穗数、穗粒数、千粒重分别较 T2 和 T3 处理增加了 11.28%、13.58%、8.29%、4.05%和 5.16%、6.81%、8.89%、-3.36%; 2018 年, T1 处理间作小麦的穗长、小穗数、穗粒数、千粒重分别较 T2 和 T3 处理增加了2.06%、

0.45%、-9.01%、-1.40%和 0.73%、0.76%、0.39%、-5.45%。不同处理小麦的产量表现为,除 2016 年度 T1 处理外,其余年度免耕各处理产量均高于相应传统耕作处理, T1、T2、T3 各处理小麦产量较相应传统耕作处理的增幅分别为 12.52%和 14.90%、3.74%和 11.60%、5.35%和 19.89%。

2.3.2 玉米产量及产量性状 不同处理玉米产量性状随耕作方式和种植模式变化而表现出不同的趋势(表 3)。2016、2018 年,与相应的传统耕作处理相比,NT1 处理玉米的穗位高、穗长、秃尖长、穗粗、穗粒数的增幅分别为 3.08%、7.47%、2.67%、3.21%、-1.54%和 5.53%、-6.14%、4.49%、-7.24%、5.29%; 2017 年,NT2 处理玉米的穗位高、穗长、秃尖长、穗粗、穗粒数、百粒重分别较 CT2 的增加了 4.43%、4.24%、3.17%、0.51%、1.41%、1.68%,差异不显著。不同种植模式之间,2017 年 T1 处理玉米的穗位高、穗长、秃尖长、穗粗、穗粒数、百粒重分别较 T2 和 T3 处理的增幅为 1.32%、1.11%、-4.89%、-1.38%、9.58%、2.36%和-1.04%、-0.90%、15.35%、

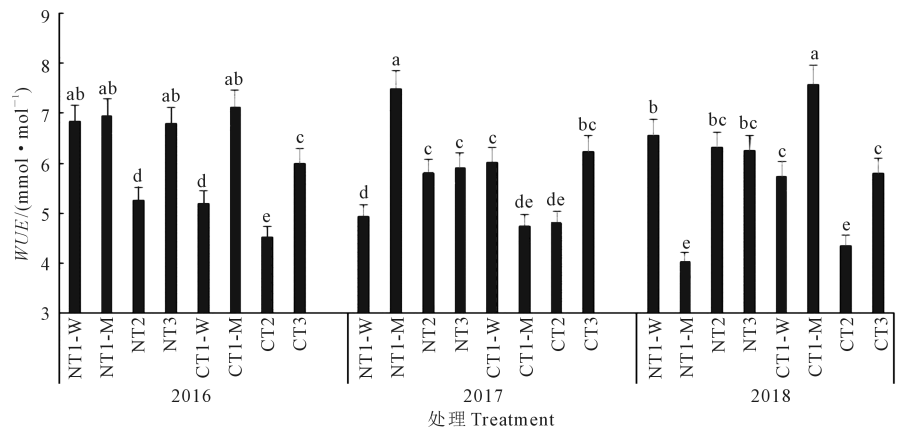


图 5 不同处理下作物叶片水分利用效率的变化

Fig.5 Variation of leaf water use efficiency under different treatments

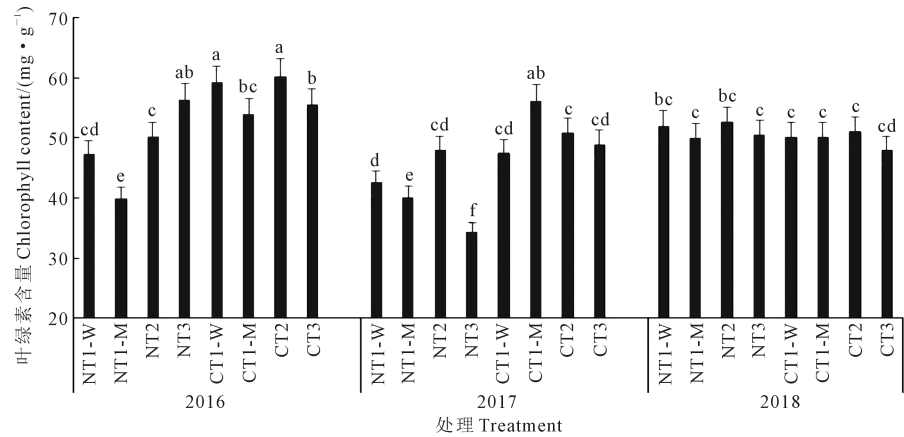


图 6 不同处理下作物叶片叶绿素含量的变化

Fig.6 Variation of leaf Chlorophyll content under different treatments

表 2 免耕轮作对小麦产量及产量性状的影响  
Table 2 Effects of no tillage and rotation on wheat yield and yield component

| 年份<br>Year | 处理<br>Treatment | 穗长/cm<br>Spike length | 小穗数<br>Spikelet number<br>per spike | 穗粒数<br>Grain number<br>per spike | 千粒重<br>1000-grain weight/g | 产量<br>Yield<br>/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|------------|-----------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| 2016       | NT1             | 10.31±0.38            | 15.52±0.15b                         | 41.85±0.49bc                     | 46.52±1.05c                | 10463.21±22.48b                        |
|            | NT2             | 8.92±0.27c            | 13.09±0.09d                         | 38.25±0.41c                      | 43.61±1.16cd               | 9887.35±18.32bc                        |
|            | NT3             | 9.58±0.39b            | 14.07±0.11c                         | 37.44±0.46c                      | 47.34±1.11c                | 11253.62±20.15ab                       |
|            | CT1             | 10.43±0.34ab          | 16.22±0.16a                         | 42.54±0.51bc                     | 41.91±1.09d                | 12873.54±22.01a                        |
|            | CT2             | 9.48±0.51bc           | 14.34±0.08c                         | 38.65±0.44c                      | 41.24±1.24d                | 9517.36±15.58c                         |
|            | CT3             | 10.09±0.46b           | 15.51±0.08b                         | 39.45±0.41bc                     | 44.06±0.99cd               | 10651.37±16.43b                        |
| 2017       | NT1             | 9.34±0.27bc           | 15.58±0.17b                         | 30.95±0.37d                      | 55.02±1.87b                | 10540.17±17.22b                        |
|            | CT1             | 10.01±0.31b           | 16.85±0.19a                         | 40.65±0.54bc                     | 61.79±1.25a                | 9220.34±16.91d                         |
| 2018       | NT1             | 11.32±0.52a           | 16.14±0.15a                         | 45.05±0.55b                      | 51.86±0.97bc               | 10804.53±10.50b                        |
|            | NT2             | 11.15±0.58a           | 15.78±0.18ab                        | 49.55±0.61a                      | 52.55±1.05bc               | 11765.64±15.68ab                       |
|            | NT3             | 10.61±0.34            | 15.89±0.14ab                        | 45.42±0.56b                      | 55.19±1.14b                | 11532.17±17.31ab                       |
|            | CT1             | 10.53±0.45ab          | 15.32±0.16bc                        | 44.85±0.49b                      | 50.81±1.07c                | 9194.34±16.33d                         |
|            | CT2             | 10.25±0.61b           | 15.54±0.17b                         | 48.45±0.46a                      | 51.56±1.21bc               | 10401.39±12.09b                        |
|            | CT3             | 11.08±0.57a           | 15.33±0.12bc                        | 44.13±0.47b                      | 53.08±1.52bc               | 9237.86±13.65d                         |

注:不同小写字母表示处理间差异达  $P<0.05$  显著水平,下同。  
Note: Values followed by different letters between treatments are significantly different at  $P<0.05$ , the same below.

表 3 免耕轮作对玉米产量及产量性状的影响  
Table 3 Effects of no tillage and rotation on maize yield and yield component

| 年份<br>Year | 处理<br>Treatment | 穗位高<br>Ear position | 穗长/cm<br>Ear length | 秃尖长<br>Bald head length | 穗粗<br>Ear perimeter | 穗粒数<br>Grain number<br>per spike | 百粒重<br>100-grain<br>weight/g | 产量<br>Yield<br>/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|
| 2016       | NT1             | 126.31±3.74cd       | 20.88±0.68bc        | 3.75±0.16a              | 17.13±0.20cd        | 533.88±10.05c                    | 47.72±0.57bc                 | 10321.65±12.17bc                       |
|            | CT1             | 122.42±2.88d        | 19.32±0.34c         | 3.65±0.15a              | 16.58±0.24d         | 542.11±9.57c                     | 49.41±0.62b                  | 12651.57±10.55ab                       |
| 2017       | NT1             | 132.21±3.56c        | 20.94±0.61bc        | 2.98±0.07b              | 17.14±0.28cd        | 626.64±8.66ab                    | 49.24±0.41b                  | 9340.74±8.64cd                         |
|            | NT2             | 135.24±4.32b        | 21.45±0.34b         | 3.16±0.16b              | 17.64±0.31c         | 576.33±9.15                      | 49.56±0.38bb                 | 11423.37±11.33b                        |
|            | NT3             | 132.55±2.98c        | 21.22±0.62bc        | 2.04±0.21c              | 16.98±0.07d         | 597.68±9.21b                     | 49.33±0.52                   | 11660.51±12.71b                        |
|            | CT1             | 135.82±3.56b        | 21.52±0.48b         | 2.95±0.09b              | 17.57±0.41c         | 639.14±10.07a                    | 53.13±0.15a                  | 13000.78±15.32a                        |
|            | CT2             | 129.25±4.19cd       | 20.54±0.55bc        | 3.06±0.08b              | 17.55±0.38c         | 568.21±7.64bc                    | 50.39±0.32b                  | 10781.24±12.09bc                       |
|            | CT3             | 138.27±6.30ab       | 21.62±0.24b         | 2.98±0.14b              | 18.96±0.18ab        | 596.88±5.98b                     | 49.67±0.43b                  | 9504.61±10.57c                         |
| 2018       | NT1             | 143.29±2.98a        | 21.34±0.49bc        | 3.12±0.11b              | 18.24±0.22b         | 461.23±8.62d                     | 32.65±0.35c                  | 9818.91±9.83c                          |
|            | CT1             | 135.36±5.35b        | 22.65±0.47a         | 2.98±0.13b              | 19.56±0.31a         | 436.84±9.33d                     | 26.67±0.33d                  | 12150.28±14.71ab                       |

-3.54%、5.63%、3.29%。前两个年度,免耕间作玉米(NT1)的产量较传统耕作有所下降;2017年,NT2、NT3处理玉米的产量分别较相应传统耕作处理增加5.62%、18.49%;2018年,NT2处理较相应传统耕作处理增加20.47%。

3 讨 论

前人通过对玉米-花生<sup>[17]</sup>、苜蓿-冬小麦<sup>[18]</sup>、稻-麦<sup>[19]</sup>等不同轮作模式的研究表明,轮作模式有利于诱导穗位叶片对光能的吸收,提高叶片的净光合速率,表现出良好的经济效益和环境效应,且免耕处理作物叶片的光合特性、叶绿素含量和周年产量要优于传统翻耕<sup>[9]</sup>,然而也有研究认为翻耕能促进根系生长、增加叶片叶绿素含量、提高作物净光合速率<sup>[20-22]</sup>。本试验对河西荒漠绿洲区免耕条件下小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米、小麦→玉米3种模式的研究表明,免耕轮作可以提高作物叶片的净光合速率、叶绿素含量、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度,与许菁等<sup>[9]</sup>的研究结果一致,其中,

2017年免耕间作玉米轮作模式作物叶片净光合速率较同年其他处理的增幅为5.95%~19.45%。因为气孔影响着叶片蒸腾、光合等生理过程,气孔导度与胞间CO<sub>2</sub>浓度的升高对作物叶片光合效率和CO<sub>2</sub>同化的调控作用<sup>[23]</sup>,使得作物对强光的适应能力增强。由于作物植株光合作用的强弱受叶肉细胞光合能力和气孔导度的双重作用,本试验中,不同年度各处理变化趋势有所不同,相比之下,2017年小麦/玉米→小麦/玉米、小麦→玉米处理作物叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度降低,表现出相反的变化趋势。

叶绿素作为植物体内重要的光合色素,负责光能的吸收、传递和转化,在植物光合作用中起着关键性作用<sup>[24]</sup>。本试验条件下,随着种植年限的增长,2018年免耕小麦-冬油菜→玉米处理的作物叶片叶绿素含量平均高于其他处理1.14%~8.76%,说明免耕小麦-冬油菜→玉米处理有利于增强作物叶片PSII反应中心的能量捕获和光化学电子传递效率,改善群体对高光环境的适应及利用能力,这与前人在水稻<sup>[25]</sup>等作物上的研究结果一致。因为免

耕有利于农田土壤蓄水保墒,提高土壤水分利用率,进而延缓叶片衰老,改善叶片光合特性。关于免耕条件下不同轮作模式作物叶片光合能力的提高还可能与光合酶活性、叶绿体超微结构、荧光动力学参数和光合基因表达<sup>[26-28]</sup>有关,对此还需进一步深入研究。

作物产量是单位土地面积上所有植株个体繁殖输出的总和,属于种群水平上的一个生物学指标<sup>[29]</sup>。干物质积累与分配是“源库”协调的动态变化过程,追求单位面积上最大产量即是实现最佳的“源库”平衡。本试验中,将免耕与不同种植模式下年、年际轮作作物相结合,受作物轮作、种间竞争、系统资源等的多重影响,免耕小麦/玉米→小麦/玉米轮作模式可提升群体“库”容量,以确保充足“源”条件下的源/库比例协调,提高经济产值。有研究表明,麦豆轮作条件下麦秸还田,麦秸还田后种植大豆、小麦,大豆平均增产 5.27%,小麦与对照持平,多年的产量与不还田比差异不显著<sup>[30]</sup>。本研究表明,免耕小麦/玉米间作处理小麦的穗长、小穗数、单株粒重和千粒重较其他两种种植模式的增幅分别为 1.50%~13.48%、0.06%~15.65%、-9.98%~10.53%和-6.42%~11.35%,本研究中免耕增加了小麦的穗长和小穗数,成为免耕小麦/玉米间作实现高产的关键;传统耕作玉米的穗位高、穗长、单株穗粒数及百粒重较其他处理的增幅为-1.80%~4.83%、-0.46%~4.55%、1.96%~11.10%和 5.16%~7.32%,产量构成要素的上升有利于植株获得高产,小麦/玉米增产效果较大,这可能与小麦/玉米模式小麦、玉米的良好植株形态和适宜的农田土壤微环境具有直接关系。由于作物产量受气候、土壤、降雨、施肥、灌溉等多种因素影响,合理的耕作与种植模式是实现作物高产、改善土壤性状的重要措施,因此,在干旱荒漠绿洲区,还需要进一步优化耕作措施及其相关配套条件。

## 4 结 论

甘肃河西荒漠绿洲区,在小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米和小麦→玉米 3 种轮作种植模式下,免耕留茬对小麦、玉米植株叶片光合特性、叶绿素和产量性状均有一定的影响。免耕条件下作物叶片的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度有所下降,但各处理间差异不显著。随着种植年限的增长,免耕条件下作物叶绿素和产量性状表现出一定的优势,2018 年,免耕小麦/玉米→小麦/玉米、小麦-冬油菜→玉米、小麦→玉米处理的

叶绿素含量较相应的传统耕作处理分别增加了 1.60%、3.14%、5.22%,免耕各处理小麦的小穗数、穗粒数、千粒重分别增加 1.52%~5.08%、0.44%~2.84%、1.88%~3.82%。不同种植模式之间,小麦-冬油菜→玉米的光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度高于小麦/玉米→小麦/玉米和小麦→玉米,小麦/玉米表现出一定的产量优势。综合得出,小麦-冬油菜→玉米轮作模式在免耕留茬条件下有助于增强作物地上光合物质生产能力,延缓叶片衰老,提高作物叶片的水分利用效率,而小麦/玉米→小麦/玉米免耕可以获得较高的产量。

## 参 考 文 献:

- [1] 包兴国,舒秋萍,李全福,等.小麦/玉米免耕处理对产量及土壤水分和风蚀的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(2):78-82.  
BAO X G, SHU Q P, LI Q F, et al. Effects of no-tillage treatments on crop yield of *Triticum aestivum*/*Zea mays* and soil moisture and soil erosion by wind[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(2): 78-82.
- [2] PARSCH L D, KEISLING T C, SAUER P A, et al. Economic analysis of conservation and conventional tillage cropping systems on clayey soil in eastern Arkansas [J]. Agronomy Journal, 2001, 93(6): 1296-1304.
- [3] KAFESU N, CHIKOWO R, MAZARURA U, et al. Comparative fertilization effects on maize productivity under conservation and conventional tillage on sandy soils in a smallholder cropping system in Zimbabwe [J]. Field Crops Research, 2018, 218: 106-114.
- [4] 高旺盛.论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J].中国农业科学,2007,40(12):2702-2708.  
GAO W S. Development trends and basic principles of conservation tillage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702-2708.
- [5] REN Y J, GAO C, HAN H F, et al. Response of water use efficiency and carbon emission to no-tillage and winter wheat genotypes in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1102-1109.
- [6] PI H W, SHARRATT B, SCHILLINGER W F, et al. Wind erosion potential of a winter wheat-summer fallow rotation after land application of biosolids [J]. Aeolian Research, 2018, 32: 53-59.
- [7] FRANZLUEBBERS A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth [J]. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 197-205.
- [8] RUSU T. Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2014, 2(4): 42-49.
- [9] 许菁,贺贞昆,冯倩倩,等.耕作方式对冬小麦—夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):101-109.  
XU J, HE Z K, FENG Q Q, et al. Effect of tillage method on photosynthetic characteristics and annual yield formation of winter wheat-summer maize cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(1): 101-109.
- [10] 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.
- [11] DONG W Y, LIU E K, YAN C R, et al. Impact of no tillage vs. conventional tillage on the soil bacterial community structure in a winter wheat cropping succession in northern China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 80: 35-42.
- [12] PI H W, HUGGINS D R, SHARRATT B. Dry aggregate stability of soils influenced by crop rotation, soil amendment, and tillage in the Columbia Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2019, 40: 65-73.
- [13] PANDEY D, AGRAWAL M, BOHRA J S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 51-60.
- [14] CRITTENDEN S J, DE GOEDE R G M. Integrating soil physical and biological properties in contrasting tillage systems in organic and conventional farming [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 77: 26-33.
- [15] GHOSH P K, TRIPATHI A K, BANDYOPADHYAY K K, et al. Assessment of nutrient competition and nutrient requirement in soybean/sorghum intercropping system [J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1): 43-50.
- [16] 何如,张双羽,杨彩红,等.绿洲灌区不同耕作模式对土壤性质的影响[J].*生态学杂志*, 2020, 39(11): 3890-3902.
- HE R, ZHANG S Y, YANG C H, et al. Effects of tillage and cropping modes on soil properties in oasis irrigation area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(11): 3890-3902.
- [17] CHI B J, ZHANG Y J, ZHANG D M, et al. Wide-strip intercropping of cotton and peanut combined with strip rotation increases crop productivity and economic returns [J]. *Field Crops Research*, 2019, 243: 107617.
- [18] 张晓琳,陈梦恬,翟鹏辉,等.增水和施肥对苜蓿—冬小麦轮作系统冬小麦叶片光合速率和叶绿素含量的影响[J].*山西农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(4): 40-46.
- ZHANG X L, CHEN M T, ZHAI P H, et al. Effects of water and fertilizer addition on photosynthetic rate and chlorophyll content of winter wheat leaves in alfalfa/winter wheat rotation system [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(4): 40-46.
- [19] 丁锦峰,黄正金,袁毅,等.稻—麦轮作下 9000 kg · hm<sup>-2</sup> 产量水平扬麦 20 的群体质量及花后光合特征[J].*作物学报*, 2015, 41(7): 1086-1097.
- DING J F, HUANG Z J, YUAN Y, et al. Population quality and photosynthetic characteristics after anthesis in Yang-mai 20 with yield potential of 9000 kg · hm<sup>-2</sup> in rice-wheat rotation system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(7): 1086-1097.
- [20] 唐海明,肖小平,李超,等.不同土壤耕作模式对双季水稻生理特性与产量的影响[J].*作物学报*, 2019, 45(5): 740-754.
- TANG H M, XIAO X P, LI C, et al. Effects of different soil tillage systems on physiological characteristics and yield of double-cropping rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5): 740-754.
- [21] 谷子寒,王元元,帅泽宇,等.土壤耕作方式对水稻产量形成特性的影响初探[J].*作物研究*, 2017, 31(2): 103-109.
- GU Z H, WANG Y Y, SHUAI Z Y, et al. Preliminary study about the effects of soil tillage ways on the yield formation characteristics of rice[J]. *Crop Research*, 2017, 31(2): 103-109.
- [22] 吴建富,曾研华,赵新帆,等.耕作方式对双季机插水稻产量和土壤理化性质的影响[J].*湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(6): 581-585.
- WU J F, ZENG Y H, ZHAO X F, et al. Effects of tillage methods on yield of double cropping rice with machine-transplanted and soil physical chemical properties[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2017, 43(6): 581-585.
- [23] 滕菲,李盛有,饶德民,等.超高产大豆砧木对不同年代育成品种光合生理指标和产量性状的影响[J].*中国农业科学*, 2016, 49(23): 4531-4543.
- TENG F, LI S Y, RAO D M, et al. Effects of super-high-yield soybean cultivars as rootstock on some physiological and yield traits of cultivars released in different decades [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(23): 4531-4543.
- [24] 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.
- [25] 李思平,丁效东,曾路生,等.秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(2): 208-215.
- LI S P, DING X D, ZENG L S, et al. Effects of straw returning and chemical fertilizer reduction on growth index and photosynthetic parameters of rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 208-215.
- [26] 尚丽娜,陈新龙,米胜南,等.水稻温敏型叶片白化转绿突变体 *tsa2* 的表型鉴定与基因定位[J].*作物学报*, 2019, 45(5): 662-675.
- SHANG L N, CHEN X L, MI S N, et al. Phenotypic identification and gene mapping of temperature-sensitive green-reversible albino mutant *tsa2* in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(5): 662-675.
- [27] 张稳,孟淑君,王琪月,等.玉米 pTAC2 影响苗期叶片叶绿素合成的转录组分析[J].*中国农业科学*, 2020, 53(5): 874-889.
- ZHANG W, MENG S J, WANG Q Y, et al. Transcriptome analysis of maize pTAC2 effects on chlorophyll synthesis in seedling leaves [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 874-889.
- [28] 孔维萍,程鸿,岳宏志.镉胁迫对甜瓜幼苗叶片叶绿体超微结构及光合色素质量分数的影响[J].*西北农业学报*, 2020, 29(6): 935-941.
- KONG W P, CHENG H, YUE H Z. Effects of cadmium stress on leaf chloroplast ultrastructure and chlorophyll mass fraction of three melon varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(6): 935-941.
- [29] 宫香伟,李境,马洪驰,等.黄土高原旱作区糜子—绿豆带状种植农田小气候特征与产量效应[J].*应用生态学报*, 2018, 29(10): 3256-3266.
- GONG X W, LI J, MA H C, et al. Field microclimate and yield for proso millet intercropping with mung bean in the dryland of Loess Plateau, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10): 3256-3266.
- [30] 王秋菊,姜宇,周鑫,等.豆麦轮作区麦秸长期还田对作物产量及土壤化学性质的影响[J].*农业工程学报*, 2019, 35(24): 121-128.
- WANG Q J, JIANG Y, ZHOU X, et al. Effects of long-term wheat straw returned to field on crop yield and soil chemical properties in soybean-wheat rotation areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 121-128.