

网络出版时间: 2026-04-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260415.1309.004>

## 二系杂交小麦光合特性研究及杂种优势分析

孙辉, 侯起岭, 苑少华, 岳洁茹, 郝小聪, 陈津赛, 白秀成, 秦志列, 张风廷

(北京市农林科学院杂交小麦研究所/杂交小麦分子遗传北京市重点实验室, 北京 100097)

**摘要:** 为了探索不同二系杂交小麦组合及其亲本光合特性与杂种优势表现, 以 4 个小麦光温敏不育系、4 个恢复系及其对应的 16 个杂交小麦组合和常规小麦品种中麦 175(对照)为研究材料, 在大田种植条件下测定小麦叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ )等光合特性指标, 调查成熟期农艺性状, 分析杂交小麦光合特性、农艺性状的杂种优势和相关性。结果表明, 不育系、恢复系、杂交组合和对照间  $T_r$  和  $C_i$  存在极显著差异,  $P_n$ 、 $G_s$  和  $F_v/F_m$  差异不显著。不育系和杂交组合光合特性从孕穗到花后 20 d 的变化趋势比较接近, 不育系、恢复系、杂交组合的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  均在抽穗期出现最高值。光合特性超中亲优势组合比例为 56.25%~93.75%, 超高亲优势组合比例为 31.25%~81.25%, 超对照优势组合比例为 12.50%~93.75%,  $T_r$  和  $G_s$  超高亲和超对照优势最显著。农艺性状超中亲优势组合比例为 50.00%~100.00%, 超高亲优势组合比例为 18.75%~75.00%, 超对照优势组合比例为 18.75%~100.00%, 每平方米穗数和产量超高亲和超对照优势最显著。杂交小麦  $G_s$  与  $C_i$  呈极显著正相关,  $P_n$  与  $G_s$  呈显著正相关; 杂交小麦与恢复系  $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  呈显著负相关, 与中亲值  $T_r$ 、 $G_s$  和  $F_v/F_m$  呈显著负相关; 杂交小麦穗长与旗叶面积、穗粒数与旗叶面积、穗粒数与穗长、产量与千粒重均呈显著正相关; 杂交小麦  $P_n$ 、 $G_s$  和  $C_i$  与千粒重呈显著正相关,  $G_s$  和  $C_i$  与产量呈显著正相关,  $T_r$  与旗叶面积呈显著正相关,  $F_v/F_m$  与穗长呈极显著负相关。由此说明, 二系杂交小麦光合特性和农艺性状均表现出显著的杂种优势, 部分光合特性指标与产量性状呈正相关, 可用于指导高产高光效杂交小麦组合的选育。

**关键词:** 二系杂交小麦; 光合特性; 杂种优势

中图分类号: S512.1; S330

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)05-0613-10

## Study on Photosynthetic Characteristics of Two-Line Hybrid Wheat and Analysis of Heterosis

SUN Hui, HOU Qiling, YUAN Shaohua, YUE Jieru, HAO Xiaocong, CHEN Jinsai,  
BAI Xiucheng, QIN Zhilie, ZHANG Fengting

(Institute of Hybrid Wheat, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Beijing Key Laboratory of Molecular Genetics in Hybrid Wheat, Beijing 100097, China)

**Abstract:** To explore the photosynthetic characteristics and hybrid vigor of different two-line hybrid wheat combinations and their parental lines, this study utilized four wheat photo-thermal sensitive male sterile lines, four restoring lines, and the corresponding sixteen hybrid wheat combinations, along with a conventional wheat variety Zhongmai 175, as research materials. Under field planting conditions, we measured various photosynthetic parameters of wheat leaves, including net photosynthetic rate( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), and chlorophyll fluorescence parameters( $F_v/F_m$ ). We also investigated agronomic traits at maturity and analyzed the hybrid vigor and correlations between the photosynthetic characteristics and

收稿日期: 2025-11-11

修回日期: 2026-03-12

基金项目: 国家小麦产业技术体系项目(CARS-03-3); 北京市乡村振兴农业科技课题(NY2401050224)

第一作者 E-mail: sunhui802@163.com(孙辉)

通讯作者 E-mail: qinzh\_lbj@126.com(秦志列); lyezh@163.com(张风廷)

agronomic traits of hybrid wheat. The results indicated that there were significant differences in  $T_r$  and  $C_i$  among the male sterile lines, restoring lines, hybrid combinations, and the control, while differences in  $P_n$ ,  $G_s$ , and  $F_v/F_m$  were not significant. The trends in photosynthetic characteristics of the male sterile lines and hybrid combinations were relatively similar from the booting stage to 20 days post-anthesis, with the highest values of  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  observed at the heading stage for the male sterile lines, restoring lines, and hybrid combinations. The proportion of super-parental hybrid vigor combinations for photosynthetic characteristics ranged from 56.25% to 93.75%, with super-high parental vigor combinations ranging from 31.25% to 81.25%, and super-control vigor combinations from 12.50% to 93.75%, with  $T_r$  and  $G_s$  showing the most significant super-high parental and super-control advantages. For agronomic traits, the proportion of super-parental hybrid vigor combinations ranged from 50.00% to 100.00%; that of super-high parental vigor combinations and super-control vigor combinations ranged from 18.75% to 75.00%, and from 18.75% to 100.00%, respectively, with the spikes number per square meter and yield exhibiting the most significant super-high parental and super-control advantages. There was a highly significantly positive correlation between  $G_s$  and  $C_i$  in hybrid wheat, and a significantly positive correlation between  $P_n$  and  $G_s$ . Hybrid wheat showed a significantly negative correlation with  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  of restoring lines, as well as a significantly negative correlation with  $T_r$ ,  $G_s$ , and  $F_v/F_m$  of mid-parent values. Additionally, significantly positive correlations were found between ear length and flag leaf area, number of grains per ear and flag leaf area, number of grains per ear and ear length, yield, and thousand-grain weight.  $P_n$ ,  $G_s$ , and  $C_i$  of hybrid wheat were significantly positively correlated with thousand-grain weight, while  $G_s$  and  $C_i$  were significantly positively correlated with yield;  $T_r$  was significantly positively correlated with flag leaf area, and  $F_v/F_m$  was significantly negatively correlated with ear length. These findings demonstrate that the photosynthetic characteristics and agronomic traits of two-line hybrid wheat exhibited significant hybrid vigor, and some photosynthetic parameters are positively correlated with yield traits, which can be used to guide the breeding of high-yielding and high-photosynthetic efficiency hybrid wheat combinations.

**Keywords:** Two-line hybrid wheat; Photosynthetic characteristics; Heterosis

杂交小麦的研究与应用一直是国际小麦科学研究和种业发展的重点攻关内容,被认为是大幅度提高小麦产量、保障粮食安全的首选途径。中国自主创新的“二系杂交小麦应用技术体系”逐步完善,杂交小麦的研究与应用取得重大突破,目前已审定杂交小麦新品种40余个,进入快速示范应用阶段,使中国小麦杂种优势利用跃居国际领先地位<sup>[1]</sup>。增强小麦的光合作用可提高小麦产量<sup>[2]</sup>,因此探明杂交小麦双亲光合特性对杂交种的影响以及与产量的相关性,可指导高产高光效杂交小麦组合的选育,对二系法小麦杂种优势利用具有重要意义。

小麦光温敏雄性不育系是二系法杂交小麦应用的核心,短日低温不育可实现杂交种生产,长日高温可育可进行自我繁殖。但在不育系进行杂交种生产过程中,杂交种籽粒饱满度差、杂交小麦组

合育性恢复不彻底等问题限制了二系杂交小麦的快速应用<sup>[1]</sup>。光合作用是植物生长发育和产量形成至关重要的因素,提高叶片光合效率是提高籽粒饱满度的有效方法<sup>[3-4]</sup>。小麦籽粒产量90%~95%来源于花后的光合产物,由于旗叶所处生长发育时期和位置的特殊性,小麦旗叶的光合性能基本上代表了冠层光合的趋势,提高小麦旗叶光合特性有利于提高小麦籽粒产量<sup>[5-6]</sup>。目前对小麦旗叶光合作用在小麦产量形成中的作用、影响因素等方面有很多研究。Fischer等<sup>[7]</sup>报道了小麦增产与更高的气孔导度及光合速率相关。高温、弱光可显著降低小麦旗叶 $P_n$ 及 $F_v/F_m$ <sup>[8]</sup>。低温可以通过气孔关闭来抑制光合作用<sup>[9-10]</sup>。追氮时期对小麦叶面积、叶绿素含量、 $P_n$ 和产量影响显著,且随着施氮量的增加,小麦旗叶 $P_n$ 总体呈先增后趋于平稳的趋势, $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 以及产量总

体呈先增后降的趋势<sup>[11-12]</sup>。耐低氮胁迫小麦品种较高的籽粒产量均以较高的  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  为生理基础<sup>[13]</sup>。小麦旗叶  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  随着遮荫程度的增加均逐渐降低,而  $C_i$  呈增大趋势<sup>[14]</sup>。宽行距和低密度有利于小麦个体的生长发育,增加生育后期的  $P_n$ <sup>[15]</sup>。播期会影响小麦旗叶叶绿素含量及光合能力,合理的播期能够提高小麦叶片的  $P_n$  和  $G_s$ ,延长叶片光合功能期,积累更多的光合产物<sup>[16-17]</sup>。在光合作用遗传规律方面,小麦光合速率属于数量性状遗传,通过品种间杂交,能够选育出光合速率较高的后代材料<sup>[18]</sup>。在光合作用杂种优势研究方面,杂交小麦不仅具有较强的光合碳同化作用,而且光合产物的光呼吸消耗也较多,其旗叶具有较高的  $P_n$ <sup>[19]</sup>。杂交小麦苗期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  均表现出显著的超高亲优势<sup>[20]</sup>。杂种小麦  $T_r$  和  $G_s$  的杂种优势在开花期最弱,灌浆中期最强<sup>[21]</sup>。较高的光合能力可能是小麦产量杂种优势的重要生理基础之一<sup>[22]</sup>。籼型杂交稻剑叶光合性状与亲本间存在极显著差异,其中  $P_n$  和  $G_s$  具有正向超高亲优势<sup>[23]</sup>。高粱杂交种的叶片光合代谢能力显著高于亲本,且其光合优势显著<sup>[24]</sup>。

目前,关于小麦光合特性的研究很多,但基本上是以常规小麦品种为研究对象,而对二系杂交小麦光合特性及其杂种优势的研究报道较少。因此,本研究拟从改良二系杂交小麦组合光合特性的角度提高杂交小麦籽粒饱满度和优异杂交组合选育效率。本研究对象为杂交小麦组合及其亲本,在孕穗至灌浆的关键时期检测光合参数,分析这些参数的杂种优势及其与产量的相关性,更全面地了解双亲选择对强优势杂交小麦组合选育的作用,为更好地培育出高光效优异杂交小麦新品种提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试材料为北京市农林科学院杂交小麦研究所选育的 BS 型小麦光温敏雄性不育系 BS107(S1)、BS237(S2)、BS416(S3)、BS1453(S4),恢复系 07Y 花 91-13(R1)、13GF8457(R2)、GC1587(R3)、73064-1(R4),以及对应的 16 个杂交小麦组合 S1×R1、S1×R2、S1×R3、S1×R4、S2×R1、S2×R2、S2×R3、S2×R4、S3×R1、S3×R2、S3×R3、S3×R4、S4×R1、S4×R2、S4×R3、S4×R4。

以常规小麦品种中麦 175 为对照。

### 1.2 试验设计

2024—2025 年小麦生长季,在北京顺义进行田间试验。播种时期为 10 月 10 日。行长 1.5 m,行距 25 cm,株距 3 cm,每个材料种 10 行,设 3 次重复。

### 1.3 测定项目与方法

小麦孕穗后,每个处理随机选取叶龄一致的 10 个植株,选取受光方向一致的旗叶。利用光合作用测量系统(Li-6400XT,美国 Li-Cor 公司),在晴朗无风天气的上午 9:00—11:00,测定小麦孕穗期、抽穗期、开花期及花后 10 和 20 d 旗叶中部的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$ ,重复测定 3 次。光强为  $1\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,流量为  $500\ \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,大气  $\text{CO}_2$  浓度为  $380\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在光合参数测定当日,利用叶绿素荧光仪(OS-30p,美国 Opti-Sciences 公司)测定叶绿素荧光参数( $F_0$  和  $F_m$ ),计算光系统 II(PS II)最大光化学效率( $F_v/F_m$ ,  $F_v = F_m - F_0$ ),每个品种取上述相同 10 个植株叶片,重复测定 10 次,取平均值。

### 1.4 田间农艺性状及产量构成调查

每个材料测量上述相同 10 个植株小麦旗叶的长和宽,叶面积=叶长×叶宽×0.7<sup>[25]</sup>。

每个处理取 20 株(含上述测定的 10 株)进行室内考种,调查株高、穗长、小穗数、穗粒数,计算千粒重、每平方米穗数和产量。

### 1.5 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件进行相关分析。杂种优势计算方法按公式计算,超中亲优势  $\text{HM}(\%) = (F_1 - \text{PA}) / \text{PA} \times 100\%$ ,PA 为双亲平均值;超高亲优势  $\text{HH}(\%) = (F_1 - P) / P \times 100\%$ ,P 为较优亲本值;超对照优势  $\text{HK}(\%) = (F_1 - \text{CK}) / \text{CK} \times 100\%$ ,CK 为对照值。

## 2 结果与分析

### 2.1 杂交小麦及亲本间光合特性比较

由表 1 可知,不育系、恢复系、杂交组合和对照间  $T_r$  和  $C_i$  存在极显著差异, $P_n$ 、 $G_s$  和  $F_v/F_m$  差异不显著。R1 的  $P_n$  值最高,为  $24.97\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;S3 的  $P_n$  值最低,为  $20.29\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。S1×R2 的  $T_r$  值最高,为  $7.89\ \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;R4 的  $T_r$  值最低,为  $4.09\ \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。S1 的  $G_s$  值最高,为  $0.48\ \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;R3、R4 和 S4×R3 的  $G_s$  值最低,为  $0.31\ \text{mmol} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。S1×R4 的  $C_i$  值最高,为 280.73  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;S4×R3 的  $C_i$  值最低,为 219.88  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。R4、S2×R4、S4×R2 和 S4×R3 的  $F_v/F_m$  值最高,为 0.81;S3、R1、R2 和 S3×R1 的  $F_v/F_m$  值最低,为 0.78。

从  $P_n$  的动态变化看,不育系、杂交组合和对照变化趋势相同,从孕穗至花后 20 d,表现为上升—下降—再下降—再下降。恢复系表现为下降—快速上升—快速下降—缓慢下降。不育系抽穗期  $P_n$  出现最高值,花后 20 d 恢复系和杂交组合的  $P_n$  值较高,对照最低(图 1A)。从  $T_r$  的动态变化看,不育系和杂交组合的变化趋势相同,从孕穗

至花后 20 d,表现为上升—下降—再上升—再下降。恢复系表现为下降—快速下降—快速上升—维持不变。对照表现为上升—下降—再下降—再上升。杂交组合抽穗期  $T_r$  出现最高值,花后 20 d 不育系  $T_r$  值最低(图 1B)。从  $G_s$  的动态变化看,不育系、杂交组合和对照的变化趋势相同,从孕穗至花后 20 d,表现为上升—下降—再下降—再下降。恢复系表现为下降—再下降—再上升—缓慢下降。不育系抽穗期  $G_s$  出现最高值,花后 20 d 恢复系的  $G_s$  值最高(图 1C)。从  $C_i$  的动态变化看,不育系、恢复系、杂交组合和对照在孕穗、抽穗、花后 10 d 和 20 d 的值相差不大;在开花期相

表 1 杂交小麦和亲本光合特性比较  
Table 1 Comparison of photosynthetic characteristics in hybrid wheat and its parents

| 材料及指标<br>Material and item      | $P_n/$<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $T_r/$<br>( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $G_s/$<br>( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $C_i/$<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) | $F_v/F_m$ |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------|
| S1                              | 22.77                                                                 | 6.49                                                                | 0.48                                                                | 278.65                                              | 0.79      |
| S2                              | 23.38                                                                 | 5.88                                                                | 0.38                                                                | 247.83                                              | 0.80      |
| S3                              | 20.29                                                                 | 5.22                                                                | 0.41                                                                | 271.46                                              | 0.78      |
| S4                              | 22.93                                                                 | 4.87                                                                | 0.36                                                                | 246.60                                              | 0.79      |
| R1                              | 24.97                                                                 | 5.67                                                                | 0.38                                                                | 241.12                                              | 0.78      |
| R2                              | 23.61                                                                 | 5.55                                                                | 0.36                                                                | 242.89                                              | 0.78      |
| R3                              | 22.52                                                                 | 4.79                                                                | 0.31                                                                | 235.18                                              | 0.80      |
| R4                              | 21.33                                                                 | 4.09                                                                | 0.31                                                                | 227.24                                              | 0.81      |
| S1×R1                           | 23.64                                                                 | 7.08                                                                | 0.36                                                                | 256.04                                              | 0.79      |
| S1×R2                           | 21.85                                                                 | 7.89                                                                | 0.40                                                                | 259.61                                              | 0.80      |
| S1×R3                           | 24.53                                                                 | 6.82                                                                | 0.47                                                                | 268.51                                              | 0.80      |
| S1×R4                           | 22.48                                                                 | 5.85                                                                | 0.47                                                                | 280.73                                              | 0.80      |
| S2×R1                           | 23.94                                                                 | 7.15                                                                | 0.38                                                                | 245.52                                              | 0.80      |
| S2×R2                           | 24.09                                                                 | 7.74                                                                | 0.44                                                                | 262.10                                              | 0.79      |
| S2×R3                           | 23.49                                                                 | 5.92                                                                | 0.47                                                                | 277.71                                              | 0.79      |
| S2×R4                           | 23.51                                                                 | 5.86                                                                | 0.44                                                                | 266.24                                              | 0.81      |
| S3×R1                           | 22.64                                                                 | 5.01                                                                | 0.40                                                                | 243.22                                              | 0.78      |
| S3×R2                           | 24.65                                                                 | 7.01                                                                | 0.47                                                                | 269.64                                              | 0.79      |
| S3×R3                           | 23.27                                                                 | 7.11                                                                | 0.43                                                                | 261.13                                              | 0.79      |
| S3×R4                           | 20.81                                                                 | 5.88                                                                | 0.40                                                                | 254.61                                              | 0.80      |
| S4×R1                           | 24.45                                                                 | 7.38                                                                | 0.40                                                                | 253.12                                              | 0.80      |
| S4×R2                           | 22.10                                                                 | 5.98                                                                | 0.32                                                                | 222.11                                              | 0.81      |
| S4×R3                           | 20.50                                                                 | 5.75                                                                | 0.31                                                                | 219.88                                              | 0.81      |
| S4×R4                           | 20.99                                                                 | 6.39                                                                | 0.41                                                                | 251.23                                              | 0.80      |
| 中麦 175 Zhongmai 175             | 22.15                                                                 | 5.12                                                                | 0.41                                                                | 273.57                                              | 0.79      |
| 均值 Mean                         | 22.84                                                                 | 6.10                                                                | 0.40                                                                | 254.24                                              | 0.80      |
| 标准差 SD                          | 0.40                                                                  | 0.60                                                                | 0.03                                                                | 13.31                                               | 0.00      |
| 变异系数 CV/%                       | 1.74                                                                  | 9.92                                                                | 7.25                                                                | 5.24                                                | 0.39      |
| 组间差异 Difference in combinations | 0.41                                                                  | 85.23 **                                                            | 5.15                                                                | 60.68 **                                            | 0.07      |

\* :  $P<0.05$ ; \* \* :  $P<0.01$ . The same in tables 7—10.

差较大,对照开花期  $C_i$  出现最高值,其次是杂交组合和不育系,恢复系的  $C_i$  值最低(图 1D)。

2.2 杂交小麦的杂种优势分析

2.2.1 杂交小麦光合特性杂种优势分析

对 16 个组合光合特性杂种优势(表 2)进行分析,5 个性状( $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $F_v/F_m$ )超中亲优势均值均为正,且超中亲优势组合比例为 56.25%~93.75%;3 个性状( $T_r$ 、 $G_s$ 、 $F_v/F_m$ )超高亲优势均值均为正, $P_n$  和  $C_i$  均为负,超高亲优势组合比例为 31.25%~81.25%;3 个性状( $P_n$ 、 $T_r$ 、 $F_v/F_m$ )超对照优势均值均为正, $G_s$  和  $C_i$  均为负,超对照优势组合比例为 12.50%~93.75%。由此说明,光合特性指标均有一定的杂种优势,但不同光合特性指标杂种优势差异较大,其中  $T_r$  在杂交小

麦组合中超中亲、超高亲 and 超对照优势占比组合数量均为最高。

从超高亲优势组合(表 3)看, $S2 \times R2$ 、 $S2 \times R3$ 、 $S3 \times R2$  和  $S4 \times R1$  中 4 个光合特性具有超高亲优势; $S2 \times R4$ 、 $S3 \times R3$  和  $S4 \times R4$  中 3 个光合特性具有超高亲优势; $S3 \times R1$  没有超高亲优势。从超对照优势组合(表 3)看, $S1 \times R4$  中 5 个光合特性均具有超对照优势; $S1 \times R3$ 、 $S2 \times R3$  和  $S2 \times R4$  中 4 个光合特性具有超对照优势; $S3 \times R1$  只有  $P_n$  有超对照优势。就同一光合性状超高亲优势看, $S1 \times R3$  的  $P_n$  超高亲优势最高(7.70%), $S3 \times R3$  的  $T_r$  超高亲优势最高(36.37%), $S2 \times R3$  的  $G_s$  超高亲优势最高(23.11%), $S2 \times R3$  的  $C_i$  超高亲优势最高(12.06%), $S4 \times R2$  的  $F_v/F_m$  超高

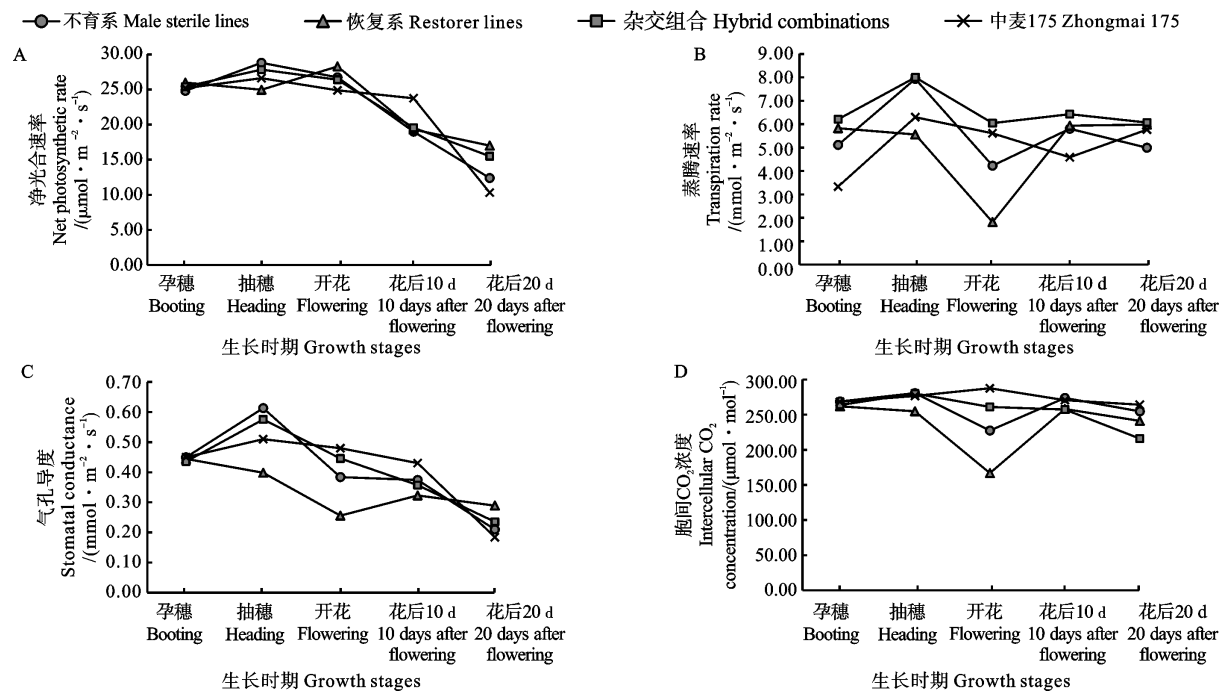


图 1 不同材料光合特性比较

Fig. 1 Comparison of photosynthetic characteristics of different materials

表 2 杂交小麦光合特性杂种优势表现

Table 2 Performance of heterosis for photosynthetic characters in hybrid wheat

| 性状<br>Trait | 超中亲优势 HM/% |              |             | 超高亲优势 HH/% |              |             | 超对照优势 HK/% |              |             |
|-------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------|
|             | 均值<br>Mean | 范围<br>Range  | 占比<br>Ratio | 均值<br>Mean | 范围<br>Range  | 占比<br>Ratio | 均值<br>Mean | 范围<br>Range  | 占比<br>Ratio |
| $P_n$       | 0.89       | −9.79~11.98  | 56.25       | −2.44      | −10.60~7.70  | 37.50       | 3.54       | −7.43~11.30  | 68.75       |
| $T_r$       | 23.50      | −7.93~42.64  | 93.75       | 14.38      | −11.63~36.37 | 81.25       | 27.95      | −2.10~54.05  | 93.75       |
| $G_s$       | 9.27       | −17.07~34.61 | 75.00       | 1.25       | −25.27~23.11 | 50.00       | −0.23      | −23.97~15.45 | 43.75       |
| $C_i$       | 2.14       | −9.25~14.99  | 68.75       | −1.93      | −10.83~12.06 | 37.50       | −6.53      | −19.63~2.62  | 12.50       |
| $F_v/F_m$   | 0.83       | −1.25~3.18   | 68.75       | 0.01       | −1.25~2.53   | 31.25       | 0.95       | −1.27~2.53   | 62.50       |

HM: Heterosis over mid-parent; HH: Heterosis over high-parent; HK: Heterosis over check. The same in tables 3—6.

亲优势最高(2.53%)。就同一光合性状超对照优势看,S3×R2的 $P_n$ 超对照优势最高(11.30%),S1×R2的 $T_r$ 超对照优势最高(54.05%),S1×R3的 $G_s$ 超对照优势最高(15.45%),S1×R4的 $C_i$ 超对照优势最高(2.62%),S2×R4、S4×R2和S4×R3的 $F_v/F_m$ 超对照优势最高(2.53%)。综上分析, $T_r$ 和 $G_s$ 的超高亲和超对照优势最显著。

2.2.2 杂交小麦农艺性状杂种优势分析

对16个组合农艺性状杂种优势的分析(表4)显示,8个性状超中亲优势均值为正值,超中亲

优势组合比例为50.00%~100.00%,其中株高和产量超中亲优势组合比例最高为100.00%;产量超高亲优势均值为正值,超高亲优势组合比例为18.75%~75.00%,其中产量超高亲优势组合比例最高(75%),变化范围为-21.92%~108.35%;7个性状超对照优势均值为正值,穗粒数均值为负值,超对照优势组合比例为18.75%~100.00%,其中小穗数超对照优势组合比例最高为100.00%(表4)。由此说明,农艺性状指标均有一定的杂种优势,但不同农艺性状杂种优势差异较大,其中产量在杂交小麦组合中超中亲占比100%,超高

表 3 杂交小麦光合特性的超高亲优势和超对照优势

Table 3 Overhigh-parent heterosis and over check heterosis of photosynthetic characters in hybrid wheat

| 组合名称<br>Combination | 超高亲优势 HH/% |        |        |        |           | 超对照优势 HK/% |       |        |        |           |
|---------------------|------------|--------|--------|--------|-----------|------------|-------|--------|--------|-----------|
|                     | $P_n$      | $T_r$  | $G_s$  | $C_i$  | $F_v/F_m$ | $P_n$      | $T_r$ | $G_s$  | $C_i$  | $F_v/F_m$ |
| S1×R1               | -5.33      | 9.09   | -25.27 | -8.11  | 0.00      | 6.73       | 38.29 | -13.13 | -6.41  | 0.00      |
| S1×R2               | -7.44      | 21.52  | -16.45 | -6.83  | 1.27      | -1.36      | 54.05 | -2.88  | -5.10  | 1.27      |
| S1×R3               | 7.70       | 5.01   | -0.68  | -3.64  | 0.00      | 10.74      | 33.11 | 15.45  | -1.85  | 1.27      |
| S1×R4               | -1.29      | -9.81  | -0.82  | 0.75   | -1.23     | 1.49       | 14.33 | 15.30  | 2.62   | 1.27      |
| S2×R1               | -4.13      | 21.54  | 0.79   | -0.93  | 0.00      | 8.08       | 39.66 | -7.31  | -10.25 | 1.27      |
| S2×R2               | 2.07       | 31.52  | 17.68  | 5.76   | -1.25     | 8.78       | 51.12 | 8.22   | -4.19  | 0.00      |
| S2×R3               | 0.47       | 0.66   | 23.11  | 12.06  | -1.25     | 6.07       | 15.66 | 13.22  | 1.51   | 0.00      |
| S2×R4               | 0.53       | -0.42  | 15.52  | 7.43   | 0.00      | 6.14       | 14.43 | 6.24   | -2.68  | 2.53      |
| S3×R1               | -9.32      | -11.63 | -1.86  | -10.40 | 0.00      | 2.23       | -2.10 | -3.11  | -11.10 | -1.27     |
| S3×R2               | 4.43       | 26.35  | 15.67  | -0.67  | 1.28      | 11.30      | 36.94 | 14.20  | -1.44  | 0.00      |
| S3×R3               | 3.32       | 36.37  | 6.18   | -3.80  | -1.25     | 5.06       | 38.92 | 4.83   | -4.55  | 0.00      |
| S3×R4               | -2.45      | 12.71  | -2.27  | -6.21  | -1.23     | -6.06      | 14.82 | -3.52  | -6.93  | 1.27      |
| S4×R1               | -2.09      | 30.16  | 3.77   | 2.64   | 1.27      | 10.38      | 44.19 | -3.21  | -7.48  | 1.27      |
| S4×R2               | -6.39      | 7.69   | -12.65 | -9.93  | 2.53      | -0.23      | 16.70 | -22.69 | -18.81 | 2.53      |
| S4×R3               | -10.60     | 18.01  | -14.10 | -10.83 | 1.25      | -7.43      | 12.29 | -23.97 | -19.63 | 2.53      |
| S4×R4               | -8.45      | 31.24  | 11.42  | 1.88   | -1.23     | -5.21      | 24.87 | -1.38  | -8.17  | 1.27      |

表 4 杂交小麦农艺性状杂种优势表现

Table 4 Performance of heterosis for agronomic traits in hybrid wheat

| 性状<br>Trait   | 超中亲优势 HM/% |              |             | 超高亲优势 HH/% |               |             | 超对照优势 HK/% |              |             |
|---------------|------------|--------------|-------------|------------|---------------|-------------|------------|--------------|-------------|
|               | 均值<br>Mean | 范围<br>Range  | 占比<br>Ratio | 均值<br>Mean | 范围<br>Range   | 占比<br>Ratio | 均值<br>Mean | 范围<br>Range  | 占比<br>Ratio |
| 旗叶面积 FL       | 6.85       | -14.73~26.08 | 81.25       | -8.94      | -31.47~10.17  | 25.00       | 2.71       | -17.71~29.06 | 62.50       |
| 株高 PH         | 14.53      | 8.60~25.84   | 100.00      | -3.92      | -13.04~5.87   | 18.75       | 8.07       | -1.00~16.19  | 87.50       |
| 穗长 SL         | 0.55       | -7.68~8.63   | 50.00       | -4.78      | -17.92~2.58   | 31.25       | 13.34      | -10.14~27.31 | 81.25       |
| 小穗数 SN        | 2.02       | -3.31~6.62   | 68.75       | -2.10      | -9.09~3.76    | 25.00       | 15.29      | 2.26~24.86   | 100.00      |
| 穗粒数 GN        | 6.80       | -13.82~27.80 | 68.75       | -4.54      | -19.96~20.05  | 25.00       | -11.51     | -33.61~9.34  | 18.75       |
| 千粒重 TGW       | 1.96       | -9.79~9.82   | 62.50       | -4.80      | -15.63~4.56   | 25.00       | 4.71       | -10.99~16.07 | 81.25       |
| 每平方米穗数<br>SNM | 10.79      | -26.95~39.54 | 75.00       | -4.27      | -33.03~19.40  | 37.50       | 10.43      | -13.29~43.64 | 62.50       |
| 产量 WY         | 58.31      | 4.87~122.57  | 100.00      | 26.76      | -21.92~108.35 | 75.00       | 2.28       | -16.46~25.66 | 62.50       |

FL: Flag leaf area; PH: Plant height; SL: Spike length; SN: Spikelets number; GN: Grain number per spike; TGW: Thousand grains weight; SNM: Spike number per square meter; WY: Wheat yield. The same in belows.

亲占比 75%,超对照占比 62.5%,说明通过小麦杂种优势利用,可选育出增产优势显著的组合。

从超高亲优势组合(表 5)看,S2×R3 中 6 个农艺性状有超高亲优势,其中 5 个农艺性状超高亲优势值均最高,产量为 108.35%、穗粒数为 20.05%、千粒重为 4.56%、小穗数为 3.76%、穗长为 2.58%;S2×R2 和 S3×R1 中 4 个农艺性状有超高亲优势;S1×R1、S2×R1、S3×R2、S3×R3 和 S4×R3 中 3 个农艺性状有超高亲优势;还有 8 个组合有 1 或 2 个农艺性状有超高亲优势。超高亲优势值较高的组合:S2×R3 产量 108.35%、

S2×R3 穗粒数 20.05%、S3×R3 每平方米穗数 19.40%。从超对照优势组合(表 6)看,S3×R1 为 8 个农艺性状具有超对照优势;S1×R3、S2×R3 和 S3×R2 为 7 个农艺性状指标有超对照优势;S1×R1、S1×R2、S1×R4、S2×R1 和 S2×R2 为 6 个农艺性状指标有超对照优势;还有 7 个组合有 3~5 个农艺性状有超对照优势。超对照优势值较高的组合:S4×R4 每平方米穗数 43.64%,S1×R2 旗叶面积 29.06%,S3×R1 穗长 27.31%,S2×R4 产量 25.66%。综上分析,每平方米穗数和产量的超高亲和超对照优势最显著。

表 5 杂交小麦农艺性状的超高亲优势  
Table 5 Over-high-parent heterosis of agronomic traits in hybrid wheat/%

| 组合名称<br>Combination | 旗叶面积<br>FL | 株高<br>PH | 穗长<br>SL | 小穗数<br>SN | 穗粒数<br>GN | 千粒重<br>TGW | 每平方米穗数<br>SNM | 产量<br>WY |
|---------------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|---------------|----------|
| S1×R1               | 10.17      | 5.87     | -0.67    | -5.34     | -13.51    | -11.39     | -19.16        | 29.95    |
| S1×R2               | 8.84       | -6.16    | 0.54     | -1.41     | -4.36     | -15.63     | -16.09        | -12.91   |
| S1×R3               | -18.87     | -0.65    | 0.00     | -3.83     | -1.73     | -3.99      | -4.05         | 87.79    |
| S1×R4               | -1.78      | 4.72     | -15.85   | -3.63     | -0.62     | -15.34     | -4.39         | -5.40    |
| S2×R1               | 6.92       | 0.26     | 2.02     | 0.00      | -7.53     | -6.26      | -5.91         | 35.13    |
| S2×R2               | -10.60     | -5.19    | 2.25     | 3.76      | -18.69    | 3.67       | -14.72        | 17.35    |
| S2×R3               | -31.47     | -1.70    | 2.58     | 3.76      | 20.05     | 4.56       | 18.02         | 108.35   |
| S2×R4               | -15.43     | -1.79    | -17.92   | -5.63     | 0.85      | -3.82      | -17.07        | 18.76    |
| S3×R1               | 3.11       | -2.09    | 1.56     | -5.83     | -3.67     | -6.14      | 1.56          | 38.03    |
| S3×R2               | -13.56     | -13.04   | 0.10     | -4.23     | -15.25    | 2.08       | -4.91         | 24.48    |
| S3×R3               | -18.64     | -9.67    | -1.56    | -9.09     | 7.43      | -2.46      | 19.40         | 45.98    |
| S3×R4               | -1.46      | -11.48   | -17.53   | -1.63     | 6.42      | -2.46      | -33.03        | -3.87    |
| S4×R1               | -8.37      | -4.57    | -5.39    | 0.00      | -9.85     | 4.08       | -7.80         | 11.57    |
| S4×R2               | -21.29     | -8.94    | -6.55    | 2.82      | -19.96    | -15.43     | 8.22          | -21.92   |
| S4×R3               | -22.13     | -6.14    | -3.42    | 2.83      | -4.46     | -4.81      | 9.19          | 49.10    |
| S4×R4               | -8.53      | -2.17    | -16.65   | -6.13     | -7.78     | -3.55      | 2.50          | 5.74     |

表 6 杂交小麦农艺性状的超对照优势  
Table 6 Over-check heterosis of agronomic traits in hybrid wheat/%

| 组合名称<br>Combination | 旗叶面积<br>FL | 株高<br>PH | 穗长<br>SL | 小穗数<br>SN | 穗粒数<br>GN | 千粒重<br>TGW | 每平方米穗数<br>SNM | 产量<br>WY |
|---------------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|---------------|----------|
| S1×R1               | 13.59      | 16.19    | 16.51    | 10.17     | -7.05     | 7.13       | -7.97         | 2.03     |
| S1×R2               | 29.06      | 11.32    | 21.85    | 18.64     | 9.34      | 2.00       | -4.48         | -14.94   |
| S1×R3               | 11.40      | 8.88     | 17.30    | 13.56     | -17.63    | 16.07      | 9.23          | 7.46     |
| S1×R4               | 1.27       | 17.62    | -1.30    | 5.08      | -33.61    | 2.35       | 33.99         | 0.10     |
| S2×R1               | 8.55       | 10.03    | 18.47    | 20.34     | -0.62     | 4.00       | -4.34         | 6.10     |
| S2×R2               | 6.01       | 12.46    | 23.93    | 24.86     | -7.05     | 15.01      | -13.29        | 14.62    |
| S2×R3               | -5.90      | 7.74     | 19.12    | 24.86     | 0.62      | 16.00      | 20.00         | 19.23    |
| S2×R4               | -17.71     | 10.32    | -4.68    | 13.56     | -25.73    | 6.71       | 16.22         | 25.66    |
| S3×R1               | 4.68       | 7.45     | 27.31    | 9.60      | 3.53      | 0.71       | 18.60         | 8.38     |
| S3×R2               | 2.49       | 3.15     | 25.49    | 15.25     | -3.11     | 9.53       | 11.05         | 21.58    |
| S3×R3               | 11.70      | -1.00    | 23.41    | 7.34      | -9.96     | 4.66       | 39.44         | -16.46   |
| S3×R4               | -4.12      | -0.57    | 3.38     | 2.26      | -27.80    | 4.66       | -6.15         | 1.71     |
| S4×R1               | -6.97      | 4.73     | 9.49     | 19.77     | -3.11     | -1.06      | -7.41         | -12.40   |
| S4×R2               | -6.67      | 8.02     | 13.26    | 23.73     | -8.51     | -10.99     | 8.67          | -23.74   |
| S4×R3               | 6.92       | 2.87     | 10.01    | 23.16     | -19.92    | -3.69      | 9.65          | -14.67   |
| S4×R4               | -10.99     | 9.89     | -10.14   | 12.43     | -33.61    | 2.24       | 43.64         | 11.89    |

2.3 杂交小麦各性状相关性分析

通过对杂交小麦光合特性之间的相关性、农艺性状之间的相关性,以及光合特性和农艺性状之间的相关性进行分析,从不同角度解析二系杂交小麦光合特性、农艺性状及相互关系,为培育高产高光效杂交小麦品种提供理论指导。

2.3.1 杂交小麦光合特性的相关性分析

由杂交小麦光合特性相关性分析(表 7)可知, $P_n$  与  $G_s$ 、 $G_s$  与  $C_i$  呈显著和极显著正相关,相关系数分别为 0.527 和 0.924,其他光合性状之间无显著相关。

杂交小麦与亲本光合特性相关性分析(表 8)显示,杂交小麦  $T_r$  和  $G_s$  与恢复系呈显著负相关,与中亲值呈极显著负相关;杂交小麦  $C_i$  与恢复系呈极显著负相关, $F_v/F_m$  与中亲值呈显著负相关。这表明杂交小麦光合特性部分指标与恢复系和中亲值有负相关,说明光合特性杂种优势不是简单的“高亲值”叠加。

2.3.2 杂交小麦农艺性状的相关性分析

由杂交小麦农艺性状相关性分析(表 9)可知,杂交小麦穗长与旗叶面积的相关系数为 0.633,穗粒数与穗长的相关系数为 0.848,产量与千粒重的相关系数为 0.712,均呈极显著正相关;穗粒数与旗叶面积的相关系数为 0.505,呈显著正相关;其他产量性状之间相关性未达到显著水平。

2.3.3 杂交小麦光合特性与农艺性状的相关性分析

对杂交小麦光合特性与农艺性状的相关性分析(表 10)表明, $P_n$ 、 $G_s$  和  $C_i$  与千粒重呈显著或极显著正相关, $G_s$  和  $C_i$  与产量均呈显著正相关, $T_r$  与旗叶面积呈显著正相关, $F_v/F_m$  与穗长呈极显著负相关。由此可见,多数光合特性指标可通过提高千粒重来提高小麦产量。

表 7 杂交小麦光合特性指标之间的相关系数  
Table 7 Correlation coefficients between photosynthetic characteristics in hybrid wheat

| 性状<br>Trait | $P_n$   | $T_r$  | $G_s$    | $C_i$  |
|-------------|---------|--------|----------|--------|
| $T_r$       | 0.458   |        |          |        |
| $G_s$       | 0.527 * | 0.139  |          |        |
| $C_i$       | 0.495   | 0.225  | 0.924 ** |        |
| $F_v/F_m$   | -0.377  | -0.103 | -0.390   | -0.374 |

表 8 杂交小麦与亲本光合特性的相关系数  
Table 8 Correlation coefficients between photosynthetic characteristics in hybrid wheat and its parents

| 项目<br>Item                     | $P_n$  | $T_r$     | $G_s$     | $C_i$     | $F_v/F_m$ |
|--------------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 与不育系<br>With sterile lines     | -0.292 | -0.701    | -0.049    | 0.206     | -0.514    |
| 与恢复系<br>With restorer lines    | 0.082  | -0.817 *  | -0.795 *  | -0.862 ** | -0.254    |
| 与中亲值<br>With mid parent values | -0.092 | -0.688 ** | -0.407 ** | -0.257    | -0.370 *  |

表 9 杂交小麦农艺性状指标之间的相关系数  
Table 9 Correlation coefficients between agronomic traits in hybrid wheat

| 性状<br>Trait | 旗叶面积<br>FL | 株高<br>PH | 穗长<br>SL | 小穗数<br>SN | 穗粒数<br>GN | 千粒重<br>TGW | 每平方米穗数<br>SNM |
|-------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|---------------|
| 株高 PH       | 0.126      |          |          |           |           |            |               |
| 穗长 SL       | 0.633 **   | -0.172   |          |           |           |            |               |
| 小穗数 SN      | 0.003      | 0.074    | 0.294    |           |           |            |               |
| 穗粒数 GN      | 0.505 *    | -0.053   | 0.848 ** | 0.481     |           |            |               |
| 千粒重 TGW     | 0.115      | 0.142    | 0.253    | -0.014    | 0.065     |            |               |
| 每平方米穗数 SNM  | -0.294     | -0.072   | -0.348   | -0.352    | -0.449    | -0.085     |               |
| 产量 WY       | -0.368     | 0.224    | -0.095   | -0.068    | -0.137    | 0.712 **   | 0.081         |

表 10 杂交小麦光合特性与农艺性状的相关系数  
Table 10 Correlation coefficients between photosynthetic characteristics and agronomic traits in hybrid wheat

| 性状<br>Trait | 旗叶面积<br>FL | 株高<br>PH | 穗长<br>SL  | 小穗数<br>SN | 穗粒数<br>GN | 千粒重<br>TGW | 每平方米穗数<br>SNM | 产量<br>WY |
|-------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------------|----------|
| $P_n$       | 0.055      | 0.171    | 0.456     | 0.190     | 0.420     | 0.555 *    | -0.244        | 0.384    |
| $T_r$       | 0.522 *    | 0.118    | 0.344     | 0.268     | 0.398     | 0.283      | -0.443        | -0.140   |
| $G_s$       | -0.067     | 0.128    | 0.058     | -0.247    | -0.099    | 0.761 **   | 0.290         | 0.621 *  |
| $C_i$       | 0.006      | 0.279    | -0.011    | -0.317    | -0.082    | 0.753 **   | 0.188         | 0.567 *  |
| $F_v/F_m$   | -0.300     | 0.001    | -0.625 ** | 0.215     | -0.471    | -0.463     | -0.045        | -0.319   |

### 3 讨论

本研究系统评估了二系杂交小麦及其亲本的光合特性与农艺性状,分析了其杂种优势及性状间的相关性。主要研究结果证实,二系杂交小麦在光合特性和产量构成上均表现出显著的杂种优势,且部分光合特性与产量性状密切相关。本研究首次在二系杂交小麦体系中对从孕穗到灌浆期的光合特性进行了动态追踪和系统的杂种优势分析,为克服当前二系杂交小麦“籽粒饱满度差”等问题提供了从“源”(光合产物供应)入手的新思路。

杂交小麦光合特性杂种优势的普遍性与特异性:本研究发现,杂交小麦的5个光合特性( $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 和 $F_v/F_m$ )均表现出广泛的杂种优势,超中亲优势组合比例56.25%~93.75%,超高亲优势组合比例31.25%~81.25%,这一结果与李美玲等<sup>[20]</sup>在杂交小麦苗期的研究结论相呼应,表明光合特性杂种优势是杂交小麦的一个重要生理特征。特别值得注意的是, $T_r$ 和 $G_s$ 在超高亲优势和超对照优势上最为显著,这暗示了杂交小麦水分利用和气体交换能力的优势可能比碳同化能力 $P_n$ 的优势更为突出。这种优势可能源于杂交种在气孔调控机制上继承了双亲的优良特性,从而在田间条件下能更有效地协调光合作用和蒸腾作用<sup>[7,13]</sup>。然而,不同光合性状的杂种优势程度存在较大差异,且并非所有组合在所有性状上均表现优势(如组合S3×R1未显示光合特性超高亲优势)。这表明光合特性的杂种优势具有基因型依赖性,其表达受到特定亲本组合的显著影响。因此,在选育高光效组合时,需要对亲本的光合特性进行精确鉴定与配对。

光合特性与产量性状的相关性可指导高产高光效育种理论,本研究通过相关性分析进一步揭示了杂交小麦光合特性与产量性状间的内在联系。 $G_s$ 和 $C_i$ 与产量呈显著正相关,同时, $P_n$ 、 $G_s$ 和 $C_i$ 与千粒重也呈显著正相关。这一结果具有重要的生理学意义,较高的 $G_s$ 意味着 $CO_2$ 供应更充足,从而可能支持更高的 $P_n$ ,最终将更多的光合产物输送至籽粒,体现为千粒重的增加和最终产量的提升<sup>[5-6]</sup>。这为“通过提高光合效率来增加小麦产量”的育种策略提供了直接的数据支持<sup>[2-3]</sup>。此外, $F_v/F_m$ 与穗长呈极显著负相关,这可能预示着在穗部发育与光系统II最大光化学效率之间存在一种此消彼长的资源权衡关系,其内

在机制值得进一步探究。

相关性分析显示,杂交小麦的 $T_r$ 和 $G_s$ 与恢复系及中亲值呈显著负相关,这一结果与李美玲等<sup>[20]</sup>的研究结论基本一致。这一看似矛盾的结果(即亲本值越高,杂交种值可能越低)说明,杂交小麦光合特性优势的形成并非简单的“高亲值”叠加,而可能是一个复杂的显性互补或超显性遗传过程<sup>[18,22]</sup>。因此,在亲本选育中,不应单一追求高光合速率的亲本,而应注重双亲在光合生理机能上的互补性。

综上所述,二系杂交小麦的光合特性和农艺性状均存在显著的杂种优势,其中 $T_r$ 和 $G_s$ 的优势尤为突出。更重要的是,光合特性与产量性状(特别是千粒重)呈显著正相关。这表明,将光合特性作为早期选择指标,用于指导高光效、高产二系杂交小麦亲本选配与组合筛选是可行且必要的。本研究为二系杂交小麦的高产育种实践提供了重要的生理学依据和理论指导。

#### 参考文献:

- [1]赵昌平,汪德州,张凤廷,等.二系杂交小麦研究进展[J].科学通报,2025,70(19):3115.  
ZHAO C P, WANG D Z, ZHANG F T, et al. Research progress of two-line hybrid wheat [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, 70(19): 3115.
- [2]肖媛,牛立元,茹振钢.百农AK58小麦光合特性的研究[J].河南科技学院学报(自然版),2007(3):19.  
XIAO Y, NIU L Y, RU Z G. Studies on photosynthetic characters of wheat cultivar Bainong AK58 [J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007(3): 19.
- [3]MURCHIE E H, PINTO M, HORTON P. Agriculture and the new challenges for photosynthesis research [J]. *The New Phytologist*, 2009, 181(3): 532.
- [4]CHEN X J, MIN D H, AHMAD YASIR T, et al. Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD) [J]. *Field Crops Research*, 2012, 137: 195.
- [5]王丽芳,徐宣斌,王德轩,等.大穗型小麦产量形成过程中光合特性的动态变化[J].应用生态学报,2012,23(7):1846.  
WANG L F, XU X B, WANG D X, et al. Dynamic changes of photosynthetic characteristics in big-spike wheat yield formation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1846.
- [6]曹树青,赵永强,温家立,等.高产小麦旗叶光合作用及与籽粒灌浆进程关系的研究[J].中国农业科学,2000,33(6):19.  
CAO S Q, ZHAO Y Q, WEN J L, et al. Studies on photosynthesis in flag leaves and its relation to grain filling course of high-yield wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33

- (6):19.
- [7] FISCHER R A, REES D, SAYRE K D, *et al.* Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies [J]. *Crop Science*, 1998, 38(6):1467.
- [8] 张黎萍, 荆奇, 戴廷波, 等. 温度和光照强度对不同品质类型小麦旗叶光合特性和衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2):311.
- ZHANG L P, JING Q, DAI T B, *et al.* Effects of temperature and illumination on flag leaf photosynthetic characteristics and senescence of wheat cultivars with different grain quality [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2):311.
- [9] 任德超, 胡新, 陈丹丹, 等. 不同低温处理对小麦光合特性和产量性状的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(21):44.
- REN D C, HU X, CHEN D D, *et al.* Effects of different low temperature treatments on photosynthetic characteristics and yield traits of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(21):44.
- [10] 王瑞霞, 闫长生, 张秀英, 等. 春季低温对小麦产量和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(2):288.
- WANG R X, YAN C S, ZHANG X Y, *et al.* Effect of low temperature in spring on yield and photosynthetic characteristics of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(2):288.
- [11] 吴安昌, 黄正来, 吴延华. 追氮时期对不同小麦品种光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2):342.
- WU A C, HUANG Z L, WU Y H. Effect of nitrogen top-dressing stage on the photosynthesis and yield of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2):342.
- [12] 李晶晶, 尹钧, 李武超, 等. 不同水氮运筹对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(5):27.
- LI J J, YIN J, LI W C, *et al.* Effects of different irrigation and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(5):27.
- [13] 谢枫, 吴跃进, 杨阳, 等. 不同小麦品种籽粒产量对低氮胁迫的响应及其与旗叶光合特性的关系[J]. 生物学杂志, 2018, 35(6):42.
- XIE F, WU Y J, YANG Y, *et al.* Yield response of wheat cultivars to low nitrogen stress and its relationship with photosynthetic traits in flag leaves [J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(6):42.
- [14] 张永强, 雷钧杰, 陈传信, 等. 遮阴程度对小麦旗叶内源激素含量、抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(10):1334.
- ZHANG Y Q, LEI J J, CHEN C X, *et al.* Effects of shading degree on endogenous hormone content, antioxidant enzyme activity and photosynthetic characteristics of wheat flag leaves [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(10):1334.
- [15] 赵竹, 曹承富, 乔玉强, 等. 机播条件下行距与密度对小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4):714.
- ZHAO Z, CAO C F, QIAO Y Q, *et al.* Effects of row space and density on yield and quality of wheat under condition of machine sowing [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(4):714.
- [16] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 等. 播期对优质小麦籽粒灌浆特性及旗叶光合特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1):121.
- PEI X X, WANG J A, DANG J Y, *et al.* Characteristics of grain filling and flag leaf photosynthesis of high quality wheat under different planting dates [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1):121.
- [17] 郭明明, 赵广才, 郭文善, 等. 播期对不同筋力型小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2):192.
- GUO M M, ZHAO G C, GUO W S, *et al.* Effect of different sowing dates on characteristics of flag leaf photosynthesis and grain filling of wheat cultivars with different gluten [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(2):192.
- [18] 靳存旺, 王小兵, 于美玲, 等. 不同春小麦品种光合速率及其后代中遗传规律研究[J]. 北方农业学报, 2016, 44(1):7.
- JIN C W, WANG X B, YU M L, *et al.* Study on photosynthetic rates and genetic laws of hybrid offspring for different spring wheat varieties [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2016, 44(1):7.
- [19] 肖凯, 谷俊涛, 张荣铤, 等. 杂种小麦光合特性的初步研究[J]. 作物学报, 1997, 23(4):425.
- XIAO K, GU J T, ZHANG R X, *et al.* The preliminary study on the leaf photosynthetic characteristics of hybrid wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(4):425.
- [20] 李姜玲, 杨澜, 阮仁武, 等. 杂交小麦苗期光合特性分析及其对强优势组合的早期预测[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23):4996.
- LI J L, YANG L, RUAN R W, *et al.* Analysis of photosynthetic characteristics of hybrid wheat at seedling stage and its use for early prediction of strong heterosis combinations [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(23):4996.
- [21] 赵鹏涛, 赵小光, 马永强, 等. 杂种小麦光合特性杂种优势的日变化研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(15):10.
- ZHAO P T, ZHAO X G, MA Y Q, *et al.* The daily change of photosynthetic characteristics heterosis of hybrid wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(15):10.
- [22] 王秀莉, 胡兆荣, 彭惠茹, 等. 普通小麦光合碳同化与产量性状杂种优势的关系[J]. 作物学报, 2010, 36(6):1003.
- WANG X L, HU Z R, PENG H R, *et al.* Relationship of photosynthetic carbon assimilation related traits of flag leaves with yield heterosis in a wheat diallel cross [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(6):1003.
- [23] 刘红梅, 周新跃, 陈杰, 等. 籼型杂交稻光合特性的杂种优势分析[J]. 华北农学报, 2014, 29(3):122.
- LIU H M, ZHOU X Y, CHEN J, *et al.* Heterosis analysis of photosynthetic characteristics in indica hybrid rice [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(3):122.
- [24] 赵仁杰, 周紫阳. 高粱杂种吉杂319及其亲本叶片光合相关参数的比较[J]. 东北农业科学, 2020, 45(2):9.
- ZHAO R J, ZHOU Z Y. Comparison of photosynthetic parameters of sorghum hybrid Jiza 319 and its parents [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(2):9.
- [25] 王义芹, 杨兴洪, 李滨, 等. 小麦叶面积及光合速率与产量关系的研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(S2):10.
- WANG Y Q, YANG X H, LI B, *et al.* Study on the relation between leaf area, photosynthetic rate and yield of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(S2):10.