

# 不同类型谷子品种(系)光合性能、干物质积累转运和籽粒灌浆特性对产量的影响

宋慧<sup>1</sup> 王涛<sup>2</sup> 闫宏山<sup>1</sup> 邢璐<sup>1</sup> 解慧芳<sup>1</sup> 李龙<sup>1</sup> 王淑君<sup>1</sup> 宋中强<sup>1</sup>  
何庆<sup>1</sup> 刘金荣<sup>1\*</sup> 冯佰利<sup>3\*</sup>

(1. 安阳市农业科学院 谷子研究所,河南 安阳 455000;  
2. 安阳工学院 生物与食品学院,河南 安阳 455000;  
3. 西北农林科技大学 农学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要** 为探究华北夏谷区谷子品种的产量形成特性,以‘豫谷 18’为对照(CK),测定不同类型谷子品种(系)‘S 410’、‘豫谷 35’和‘张杂 13’在不同生育时期的光合性能、干物质积累转运及籽粒灌浆特性。结果表明:1)不同类型谷子品种产量差异显著,弯曲中穗型‘豫谷 35’的产量、千粒重、出谷率和实收穗数比‘豫谷 18’(CK)分别高 0.35%、0.31%、0.80%和 5.40%。2)灌浆期旗叶净光合速率( $P_n$ )由高到低均表现为‘豫谷 35’>‘豫谷 18’(CK)>‘张杂 13’>‘S 410’;灌浆期冠层光合能力以‘豫谷 35’最高,‘豫谷 18’和‘张杂 13’次之,‘S 410’最低。由拔节期至成熟期,‘豫谷 35’、‘豫谷 18’、‘张杂 13’和‘S 410’谷子叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $G_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )均表现为开花期>拔节期>灌浆期>成熟期。3)花后干物质的积累量、转移量、转运率和收获指数均表现为‘豫谷 35’最高,分别比 CK 高 16.45%、17.40%、17.17%和 7.31%。4)不同籽粒部位灌浆持续时间、最大灌浆速率出现的时间和灌浆活跃期持续时间均表现为上部>下部>中部;弯曲中穗型‘豫谷 18’与‘豫谷 35’的平均灌浆速率分别为 0.42 和 0.46 g/(1 000 粒·d),且均高于弯曲大穗型‘张杂 13’(0.29 g/(1 000 粒·d))和直立小穗‘S 410’(0.33 g/(1 000 粒·d))。5)相关分析表明,产量与  $P_n$  显著正相关,与花后干物质积累量及转运率极显著正相关。综上,在华北夏谷区应选育具有较高的花后干物质积累量、干物质转移量和干物质转移率,较高的光合速率和冠层光合能力以及灌浆速率相对较高的弯曲中穗型品种,是实现谷子优质高产的有效途径之一。

**关键词** 谷子; 光合特性; 干物质积累转运; 籽粒灌浆; 产量

中图分类号 S562.03 文章编号 1007-4333(2022)07-0058-15 文献标志码 A

## Study on the relationship between the photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, grain filling parameter and yield of different genotypes foxtail millet cultivars/lines

SONG Hui<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>, YAN Hongshan<sup>1</sup>, XING Lu<sup>1</sup>, XIE Huifang<sup>1</sup>, LI Long<sup>1</sup>, WANG Shujun<sup>1</sup>,  
SONG Zhongqiang<sup>1</sup>, HE Qing<sup>1</sup>, LIU Jinrong<sup>1\*</sup>, FENG Baili<sup>3\*</sup>

(1. Institute of Foxtail Millet Research, Anyang Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, China;  
2. College of Biology and Food Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China;  
3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1000700 和 2019YFD1000702-8);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-06-13.5-B25);河南省青年人才托举工程项目(2021HYTP035);河南省现代农业产业技术体系建设专项(NO.Z2020-14-01)

第一作者: 宋慧,副研究员,主要从事谷子遗传育种与生物学研究,E-mail:837181622@qq.com

通讯作者: 冯佰利,教授,主要从事杂粮优质高产生态生理技术研究,E-mail:fengbaili@nwsuaf.edu.cn;

刘金荣,研究员,主要从事谷子遗传育种与生物学研究,E-mail:liujinrong63@163.com

**Abstract** To explore the yield formation characteristics of foxtail millet in North China's summer valley area, foxtail millet cultivar 'Yugu 18' was used as the control (CK), and the photosynthetic performance, dry matter accumulation and transport, and grain filling characteristics of three different foxtail millet cultivars/lines 'S 410', 'Yugu 35' and 'Zhangza 13' were determined during different reproductive stages. The results showed that: 1) There were significant differences in yield among different genotypes of foxtail millet cultivars. The yield, 1 000-grain weight, grain emergence rate and number of harvested ears of the curved medium-ear type 'Yugu 35' were 0.35%, 0.31%, 0.80% and 5.40% higher than those of 'Yugu 18' (CK), respectively. 2) The net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of flag leaves in the grain-filling stage from high to low is 'Yugu 35' > 'Yugu 18' (CK) > 'Zhangza 13' > 'S 410'; the photosynthetic capacity of canopy at the filling stage was the highest in 'Yugu 35', followed by 'Yugu 18' and 'Zhangza 13', and the lowest in 'S 410'. During jointing stage to the mature stage, the net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) and the transpiration rate ( $T_r$ ) in descending order was flowering > joining > grain > maturity. 3) The accumulation, transfer, transport rate and harvest index of dry matter after flowering were the highest in 'Yugu 35', which were 16.45%, 17.40%, 17.17% and 7.31% higher than CK, respectively. 4) The grain-filling duration, the maximum grain-filling rate and the active grain-filling period in different parts lasted from high to low was upper > lower > middle; The average grain filling rates of curved middle ear cultivars 'Yugu 35' were 0.42 and 0.46 g/(1 000 grains · d), respectively, and both were higher than those of the curved large panicle 'Zhangza 13' (0.29 g/(1 000 grains · d)) and erect spikelet 'S 410' (0.33 g/(1 000 grains · d)). 5) Correlation analysis showed that yield was significantly positively correlated with  $P_n$ , and extremely significantly positively correlated with post-flowering dry matter accumulation and transport rate. In conclusion, foxtail millet breeding in North China should select higher post-anthesis dry matter accumulation, dry matter transfer and dry matter transfer rate, higher photosynthetic rate and canopy photosynthetic capacity, and relatively high grain filling rate bending medium-spike cultivar and it is one of the effective ways to achieve high quality and high yield of foxtail millet.

**Keywords** foxtail millet; photosynthetic characteristics; dry matter accumulation and transport; grain filling; yield

谷子 (*Setaria italica* (L.) Beauv.) 属多花小粒自花授粉作物, 距今已有 6 000 年以上的驯化栽培历史, 具有抗旱、耐瘠薄、营养均衡和粮饲兼用等特点, 在绿色、营养、可持续农业发展需求的引领下焕发出新的活力<sup>[1-2]</sup>。2010—2020 年, 全国谷子常年播种面积维持在 133.3 万  $hm^2$  左右, 呈平稳增长趋势, 总产量增加了 85.7%, 单产提高了 91.4%, 耕种收综合机械化水平提高了 40%<sup>[3]</sup>。华北夏谷区是我国谷子生产优势区, 谷子的生育期间处于全年光、温、水、气充沛的季节, 有较多的增产潜力待挖掘<sup>[4]</sup>。因此, 综合分析生产上的主推谷子品种的干物质生产与分配、冠层光合特点和灌浆特性, 以及产量构成因素形成的差异, 为华北夏谷区谷子乃至杂粮作物的高效育种提供理论依据, 对推动华北夏谷区高效生产具有重要的科学意义。

作物产量是光合能力、光合同化产物的转运和分配、籽粒灌浆特性共同作用的结果。提高作物叶片的净光合速率, 延长其光合有效功能期, 促进光合产物积累及转运, 可提高粒重, 进而增加产量<sup>[5-8]</sup>。已有研究表明, 超高产大穗型水稻品种的 80% 以上籽粒产量来自于抽穗后的光合产物, 干物质生产优

势在中期和后期, 产量随着干物质净积累量的增加而提高<sup>[9]</sup>; 高产潜力玉米品种增产的基础是具有较高的光合效率、花后干物质积累量及较长的灌浆持续期等特性<sup>[10]</sup>; 不同产量类型的小麦品种在开花后表现为高产型品种具有较高的冠层光合有效辐射 (PAR) 截获和利用能力, 旗叶  $^{13}C$  同化物在籽粒的分配量和分配比例高于低产品种<sup>[11]</sup>。虽然, 光合产物是作物籽粒干物质的形成基础, 孕穗至开花前后一段时间的干物质生产及运载能力也很关键, 向幼穗分配的干物质越多越高产<sup>[12]</sup>。Yang 等<sup>[13-14]</sup> 通过研究杂交稻的籽粒灌浆认为, 造成籼粳杂交稻籽粒灌浆差和收获指数低的主要原因是库的活力小和物质转运率低; 不同籽粒之间, 穗上部和中部的籽粒灌浆启动速度快、强度大, 穗下部籽粒灌浆高峰晚, 增重速度迟缓, 引起强势粒和弱势粒之间的差异主要是由植株内部激素水平的差异造成的<sup>[15]</sup>。北方超高产水稻育种中株型改良是核心育种目标之一, 直立穗型水稻品种的植株冠层下部的光照条件得到优化从而提高了产量<sup>[16]</sup>。2005—2019 年, 育成的谷子品种, 谷子的产量随着年份表现出持续增产趋势, 生育期、株高、穗长、单穗重和穗粒重均逐年增加<sup>[17-20]</sup>,

未来谷子高产育种的突破关键是亲本材料的发现、创制和利用,适应全程机械化栽培技术的中矮秆品种是谷子育种的重点方向。在育种过程中,育种者利用抗除草剂基因培育中矮秆、单穗重和穗粒重高、综合抗性好、适合机械化收获的中穗型常规谷子品种<sup>[21]</sup>;也通过增加穗粒数,培育大穗型杂交谷子品种<sup>[22]</sup>;还通过创制理想株型材料,培育叶片紧凑上冲,耐密植穗头直立的品种,提高光能的利用率,多种途径促使谷子向高产优质方向发展。杨延兵等<sup>[23]</sup>研究发现谷子产量受气温和降水影响明显,在谷子生育期籽粒产量随平均气温升高而上升。在灌浆中后期,不同谷子品种的鲜穗含水量逐渐降低,干物质的积累呈逐渐上升趋势,灌浆速率逐渐下降<sup>[24]</sup>。Wang等<sup>[25]</sup>采用全基因组重亚硫酸盐测序及生物信息学方法对谷子籽粒灌浆过程中的所有DNA甲基化进行测序和鉴定,发现在谷子灌浆过程中DNA甲基化的动态变化对基因调控起着至关重要的作用。在谷子开花至成熟阶段,华北夏谷区处于高温、高湿的季节,谷子生殖生长期相对缩短,单株生产潜力受到限制。目前,有关华北夏谷区谷子品种产量潜力的限制因素和机理的系统研究尚未见报道。本研究采用随机区组试验,分析2019—2020年华北夏谷区生产主推品种的光合生产能力、干物质转运分配、籽粒灌浆速率的差异以及与产量构成因素相关关系,旨在探究华北夏谷区谷子品种的产量形成特性,以为谷子高产高效育种提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于2019—2020年在河南省安阳市北关区柏庄镇安阳市农业科学院试验基地进行,该区域位于太行山东南麓(36°18' N, 114°37' E),属暖温带气候,海拔75 m,年平均气温13.6 °C,年平均降水量606.1 mm,无霜期201 d。试验田前茬为小麦,土质为黄壤土,土壤肥力中等,呈弱碱性(pH 7.64),耕层土壤含有有机质7.7 g/kg、全氮0.85 g/kg、有效氮54.6 μg/g、速效磷20.4 μg/g、速效钾212.0 μg/g。

### 1.2 试验材料

以华北夏谷区主推常规谷子品种‘豫谷18’为对照(CK)、抗除草剂简化栽培常规品种‘豫谷35’、杂交谷子品种‘张杂13’和谷子株型育种代表性材料‘S410’为试材;依据品种的穗长和穗姿系统聚类

分析,参试品种‘S410’属于直立小穗型品种,‘豫谷18’和‘豫谷35’属于弯曲中穗型品种,‘张杂13’是弯曲大穗型品种。其中,‘豫谷18’、‘豫谷35’和‘S410’由安阳市农业科学院提供,‘张杂13’由张家口市农业科学院提供。相同播期下除‘张杂13’抽穗期提前7 d左右,其他3个品种抽穗期基本一致。2年均于5月20日播种,9月30日收获。

### 1.3 试验设计

采用60万株/hm<sup>2</sup>的种植密度,6行区,行距40 cm,小区面积20 m<sup>2</sup>,随机区组排列,重复4次。参照高产攻关田的管理,生育期内保证良好的肥水供应,共施用N 544 kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 489 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 77 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.4 测定内容及方法

#### 1.4.1 叶面积指数

分别在谷子开花期和成熟期,小区内选择健康且生长一致的单株5株,用YMJ-CH智能叶面积仪测量单株叶面积。叶面积指数和冠层光合能力见公式<sup>[26]</sup>。

叶面积指数(LAI) =

$$\text{单株叶面积} \times \frac{\text{单位土地面积株数}}{\text{单位土地面积}}$$

冠层光合能力 =

$$\text{净光合速率}(P_n) \times \text{叶面积指数(LAI)}$$

#### 1.4.2 叶片光合速率和气体交换参数

小区内选取长势、穗型一致谷子植株5株挂牌标记,在拔节期、开花期、灌浆期和成熟期用CI 403型光合作用测定系统(英国)测定谷子净光合速率(net photosynthesis rate,  $P_n$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度(intercellular CO<sub>2</sub> concentration,  $C_i$ )、蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ )和气孔导度(stomatal conductance,  $G_s$ )。

#### 1.4.3 干物质积累、分配和转运

分别在谷子抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期,选生长一致单株5株,按茎鞘、叶、穗、粒分别进行处理,105 °C杀青30 min,然后80 °C烘干至恒重,称干重。

花后干物质积累量指成熟期与抽穗期地上部干物质积累量之间的差值;干物质转移量指抽穗期地上部干物质积累量与成熟期地上部除去穗重以外的各器官干物质积累量的差值;干物质转运率指干物质转移量与抽穗期地上部干物质积累量百分比;干物质转移对籽粒的贡献率指干物质转移量与籽粒干

重百分比;收获指数(HI)=籽粒产量与收获时总干物质重之间的比值。

#### 1.4.4 籽粒灌浆动态

于谷子抽穗期选抽穗期一致的穗300个挂牌标记;于花后当天开始每隔7d从标记的穗中取样;按照穗长平均分为上、中、下三部分,然后在烘箱中烘干至恒重,剔除秕粒称重。然后每穗选出10粒最大的种子,每个重复不同取样阶段分别得到了100(10×10)粒种子,对其称重求均值,换算为千粒重。

拟合籽粒生长动态,用 Logistic 方程

$$Y = K/(1 + e^{A+Bx})$$

式中:Y为籽粒质量,g;x为相对灌浆时间,d;K为理论最高粒重,g;A和B分别为方程对不同品种所确定的参数,e为导数,对方程求一、二、三级导数即为籽粒灌浆的参数:快速灌浆起始时间、快速灌浆终止时间、最大相对灌浆速率及出现时间、快速灌浆持续时间。

#### 1.4.5 产量和产量构成因素

成熟期小区内选长势一致20个单株,对穗长、单穗重、穗粒数、出谷率、千粒重等产量构成因素进行考种;剔除边行优势,对小区中间的4行进行脱粒称重,测定小区产量。

$$\text{出谷率} = \frac{\text{穗粒重}}{\text{穗重}} \times 100\%$$

### 1.5 数据处理及统计分析

采用 Microsoft Excel 2019 处理和计算数据,采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析和多重比较(采用 LSD 法),采用 Sigma Plot 10.0 软件作图。2年试验结果趋势一致,以2年数据的平均值进行整理。

## 2 结果与分析

### 2.1 农艺性状和产量构成特点

由表1可知,不同类型谷子品种之间产量构成因素中,小区实收穗数以弯曲大穗型‘张杂13’最高,为 $54.15 \times 10^4$ 个/hm<sup>2</sup>,与其他品种差异均达显著水平;单穗重由高到低表现为‘豫谷35’>‘豫谷18’>‘张杂13’>‘S410’。出谷率以直立小穗‘S410’最高,88.19%,弯曲大穗‘张杂13’最低,74.54%,均显著高于对照。千粒重以弯曲大穗‘张杂13’最高,3.1g,弯曲中穗‘豫谷18’和‘豫谷35’、

弯曲小穗‘S410’分别为2.77、2.81和2.64g;产量由高到低表现为以‘豫谷35’>‘豫谷18’>‘张杂13’>‘S410’,品种间差异达显著水平。

### 2.2 干物质积累、分配及转运特性

由表2可知,不同类型谷子品种在开花期叶片、茎鞘的干物质积累量无显著差异,弯曲大穗‘张杂13’和直立小穗型‘S410’总干物质重分别高于CK,42.48%和20.68%。不同器官之间,以茎鞘干物质质量占比最大、其次是叶片和穗子。随着生育期的延长和干物质的转运,成熟期不同品种叶、茎鞘、穗和总干物质重差异均达到显著水平,‘豫谷35’和‘张杂13’分别比CK高14.56%和7.8%,‘S410’比CK低7.22%;总干物质重由高到低表现为‘豫谷35’>‘豫谷18’>‘张杂13’>‘S410’;不同器官之间干物质质量从重到轻依次是穗>茎鞘>叶。

由表3可知,不同品种干物质的积累量、转移量、转运率以及收获指数由高到低均表现为‘豫谷35’>‘豫谷18’>‘张杂13’>‘S410’。其中,‘豫谷35’的花后干物质积累量、转移量、转运率和收获指数分别比对照高16.45%、17.40%、17.17%和7.31%;‘张杂13’分别比对照低5.28%、37.84%、2.17%和7.14%,该品种在夏谷区生育期短,积温高导致分蘖少,干物质积累量和收获指数偏低,影响高产潜力发挥;‘S410’小穗、库容量小、降低了花后干物质的积累量、干物质转移量,干物质转运率和收获指数均较对照‘豫谷18’低,差异均不显著,但是‘S410’干物质转移对籽粒的贡献率最高,较对照高1.57%。

### 2.3 光合特性

从图2可知,不同类型谷子品种从拔节期至成熟期净光合速率变化呈下降趋势,其中,弯曲中穗型品种‘豫谷35’拔节-开花期 $P_n$ 呈缓慢上升,开花-灌浆期净光合速率出现缓慢下降;直立小穗型‘S410’ $P_n$ 在开花期达到高峰后,呈缓慢下降,弯曲大穗型品种‘张杂13’开花后期 $P_n$ 快速下降,从开花期-成熟期不同穗型谷子品种旗叶的 $P_n$ 由高到低表现为‘豫谷18’( $27.83 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )>‘豫谷35’( $27.33 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )>‘S410’( $22.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )>‘张杂13’( $22.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。

由图3可知,不同类型谷子品种 $G_s$ 随着生育期的推进呈逐渐减少的变化趋势,不同品种之间表现为‘豫谷35’最高,‘豫谷18’和‘张杂13’次之,

表1 不同类型谷子产量及产量构成因素  
Table 1 Yield and yield components of the different foxtail millet genotypes

年份 Year	品种 Cultivar	穗长/cm Ear length	穗型 Ear pose	实收穗数/ ( $\times 10^4$ 个/ $\text{hm}^2$ ) Ears actually harvested	单穗重/g Per ear weight	出谷率/% Grain out rate	千粒重/g 1 000-Grain weight	产量/ ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) Yield
2019	豫谷 18 Yugu 18(CK)	21.18 $\pm$ 0.41 b	弯曲	44.51 $\pm$ 0.30 b	15.19 $\pm$ 0.91 a	85.46 $\pm$ 1.82 a	2.79 $\pm$ 0.07 b	5 987.61 $\pm$ 87.60 b
	S 410	14.36 $\pm$ 0.72 c	直立	44.07 $\pm$ 0.20 b	5.14 $\pm$ 0.72 c	87.45 $\pm$ 1.90 c	2.61 $\pm$ 0.09 b	4 497.64 $\pm$ 56.32 d
	豫谷 35 Yugu 35	20.87 $\pm$ 0.30 b	弯曲	46.39 $\pm$ 0.13 b	14.46 $\pm$ 0.21 a	84.37 $\pm$ 0.93 a	2.83 $\pm$ 0.04 ab	6 048.79 $\pm$ 46.12 a
	张杂 13 Zhangza 13	26.34 $\pm$ 0.30 a	弯曲	54.88 $\pm$ 0.42 a	13.05 $\pm$ 0.50 b	74.89 $\pm$ 1.02 b	3.22 $\pm$ 0.06 a	5 974.00 $\pm$ 54.53 c
	豫谷 18 Yugu18(CK)	21.52 $\pm$ 0.80 b	弯曲	43.69 $\pm$ 0.71 d	14.77 $\pm$ 0.42 b	83.42 $\pm$ 1.74 b	2.75 $\pm$ 0.04 b	6 064.29 $\pm$ 69.42 b
	S 410	16.14 $\pm$ 0.11 c	直立	45.03 $\pm$ 0.43 b	6.64 $\pm$ 0.50 d	88.93 $\pm$ 1.30 a	2.67 $\pm$ 0.05 c	4 514.96 $\pm$ 68.22 d
2020	豫谷 35 Yugu 35	21.03 $\pm$ 0.62 b	弯曲	46.61 $\pm$ 0.50 c	16.28 $\pm$ 0.72 a	87.13 $\pm$ 2.43 a	2.79 $\pm$ 0.06 b	6 157.31 $\pm$ 57.81 a
	张杂 13 Zhangza 13	25.28 $\pm$ 0.61 a	弯曲	53.42 $\pm$ 0.41 a	11.35 $\pm$ 0.33 c	74.19 $\pm$ 1.54 c	3.16 $\pm$ 0.08 a	5 477.66 $\pm$ 55.73 c

注:同一列数字后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ). The same below.

表 2 不同类型谷子品种开花期和成熟期谷子干物质积累量

Table 2 Dry matter accumulation of different foxtail millet genotypes at flowering and maturing stage

时期 Stage	部位 Part	品种 Cultivar			
		豫谷 18(CK) Yugu 18	S 410	豫谷 35 Yugu 35	张杂 13 Zhangza 13
开花期 Flowing	叶 Leaf	3.15±1.30 b	3.95±1.30 ab	2.43±1.51 c	4.1±1.22 a
	茎 Stem	4.62±1.41 c	6.22±2.00 b	3.82±0.92 c	7.45±1.12 a
	穗 Tassel	2.13±1.42 ab	1.79±1.21 b	1.11±0.53 c	2.57±0.73 a
成熟期 Maturing	叶 Leaf	3.91±1.33 a	3.46±1.62 c	4.89±1.44 ab	4.61±1.14 b
	茎 Stem	8.45±1.30 b	6.65±1.73 c	9.83±1.82 a	6.42±2.40 c
	穗 Tassel	20.13±4.70 b	16.82±4.34 d	21.77±5.73 a	19.55±4.91 c

表 3 不同类型谷子品种的干物质积累、分配及转运特性

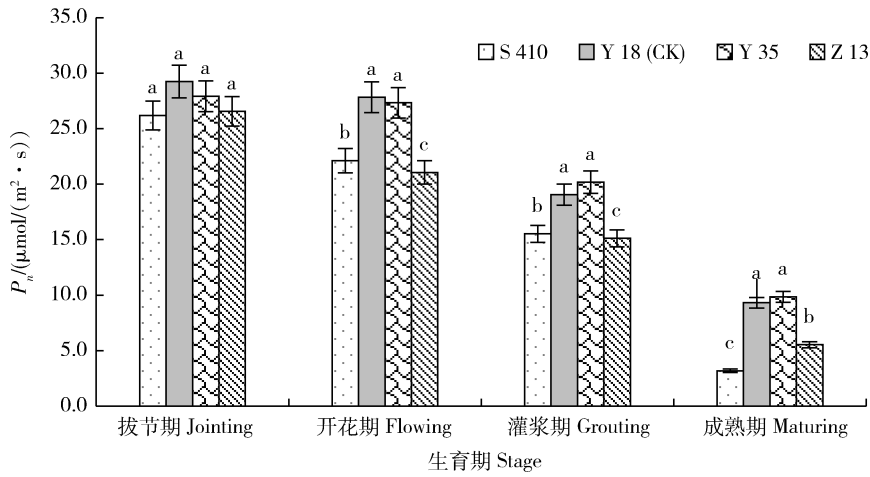
Table 3 Dry matter accumulation distribution and transportation characteristics of the different foxtail millet genotypes

品种 Cultivar	花后干物质积累量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Dry matter accumulation after silking	干物质转移量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Transfer amount of dry matter	干物质转运率/% Transfer rate of dry matter	干物质转移对 籽粒的贡献率/% Contribution to grain of dry matter transportation	收获指数/% Harvest index
豫谷 18(CK) Yugu 18	16.10 b	7.24 a	27.14 b	37.65 a	46.36 b
S 410	13.36 d	5.39 b	25.05 c	38.24 b	40.53 d
豫谷 35 Yugu 35	18.77 a	8.50 a	31.80 a	37.95 a	49.75 a
张杂 13 Zhangza 13	15.25 c	4.50 c	26.55 c	29.69 c	43.05 c

‘S 410’最低。不同类型谷子品种不同生育阶段  $C_i$  由高到低表现为‘豫谷 35’( $100.19 \mu\text{mol/mol}$ ) > ‘豫谷 18’( $92.04 \mu\text{mol/mol}$ ) > ‘张杂 13’( $70.51 \mu\text{mol/mol}$ ) > ‘S 410’( $56.82 \mu\text{mol/mol}$ )(图 4)。不同类型谷子品种开花后旗叶  $T_r$  呈先上升后下降

的变化趋势。其中,弯曲中穗‘豫谷 35’拔节至开花期旗叶  $T_r$  呈快速上升,开花后至灌浆期开始缓慢下降,弯曲大穗品种‘张杂 13’和直立小穗‘S 410’在此阶段  $T_r$  开始快速下降,成熟期‘豫谷 35’和‘豫谷 18’仍然有较高的  $T_r$ ,不同类型品种之间

$T_r$  由高到低表现为‘豫谷 35’( $1.74 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) > ‘豫谷 18’( $1.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) > ‘张杂 13’ ( $1.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) > ‘S 410’( $0.94 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) (图 5)。



S 410, ‘S 410’; Y 35, ‘豫谷 35’; Y 18, ‘豫谷 18’; Z 13, 张杂 13。下同。

S 410, ‘S 410’; Y 35, Yugu 35; Y 18, Yugu 18; Z 13, Zhangza 13. The same below.

图 2 不同类型谷子品种不同生育阶段的  $P_n$  变化

Fig. 2 Comparison of net photosynthetic rate of different genotypes foxtail millet at different growth stages

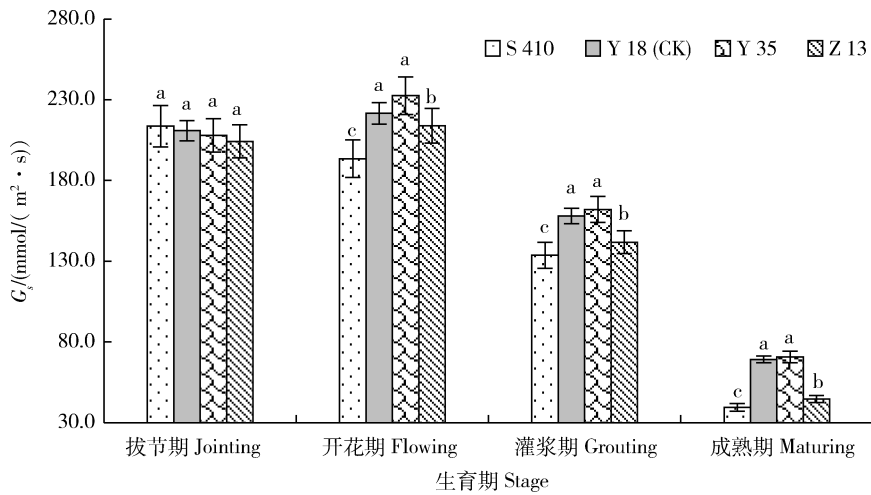


图 3 不同类型谷子品种不同生育阶段的  $G_s$  变化

Fig. 3 Comparison of stomatal conductance of different genotypes foxtail millet at different growth stages

## 2.4 冠层光合性能分析

由图 6 可知,不同穗型谷子品种,随着生育期进程的推进,LAI呈由“小-大-小”的变化趋势;不同穗型品种之间,LAI由高到低为‘豫谷 35’ > ‘豫谷 18’ > ‘张杂 13’ > ‘S 410’,其中开花期‘豫谷 18’的叶面积指数(LAI)较‘张杂 13’和‘S 410’高 38.77%和 40.83%,成熟期分别高 38.41%和 36.49%,差异达显著水平。不同类型

谷子品种冠层光合能力由高到低为‘豫谷 35’ > ‘豫谷 18’ > ‘张杂 13’ > ‘S 410’,不同生育期之间,以开花期和灌浆期冠层光合能力最强,以‘豫谷 18’为例,开花期和灌浆期冠层光合能力占整个生育期的 70.67%,‘豫谷 35’的冠层光合能力比对照略高,差异不显著,‘张杂 13’和‘S 410’冠层光合能力分别比对照低 15.78%和 20.74%,见图 6(b)。

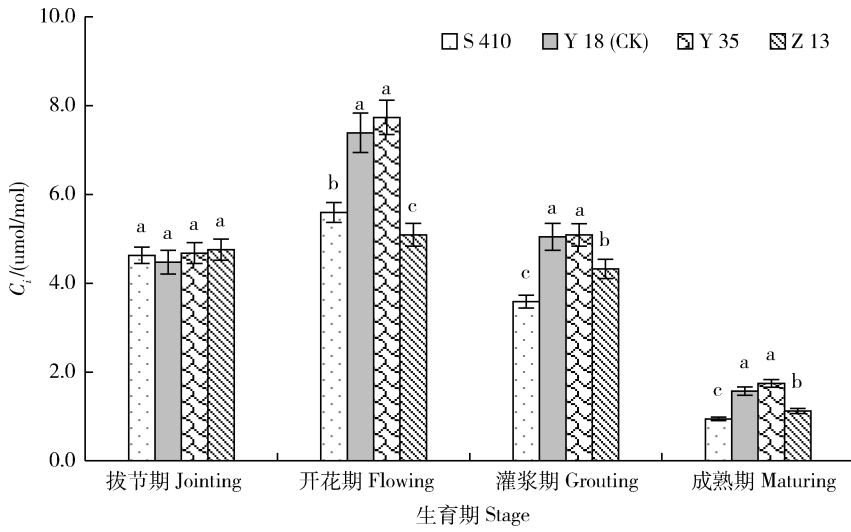


图 4 不同类型谷子品种不同生育阶段的 C<sub>i</sub>

Fig. 4 Comparison of inter cellular CO<sub>2</sub> concentration of different genotypes foxtail millet at different growth stages

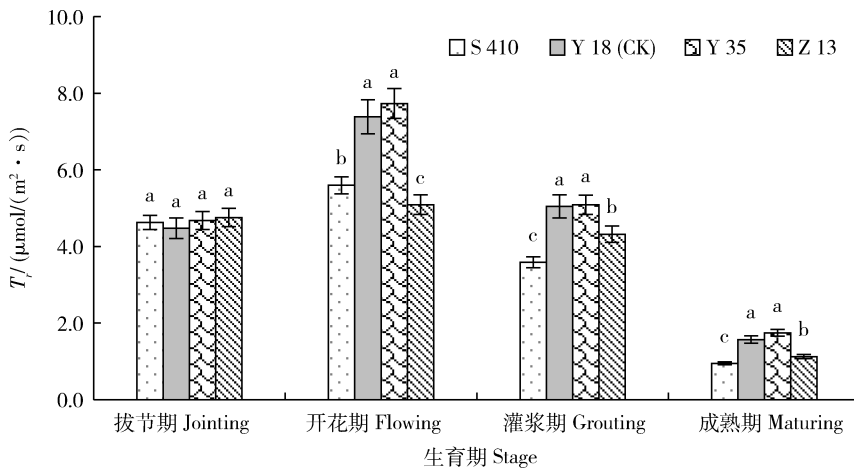


图 5 不同类型谷子品种不同生育阶段的 T<sub>r</sub>

Fig. 5 Comparison of transpiration rate of different genotypes foxtail millet at different growth stages

## 2.5 籽粒灌浆特性

### 2.5.1 不同粒位籽粒增重动态

从图 7 可知,不同类型谷子全穗籽粒粒重增长动态,从抽穗开花当天到开花后 7 d 为渐增阶段,花后 7~28 d 为快速增长阶段,花后 28 d 至成熟期为缓增阶段。渐增阶段直立小穗品种(‘S 410’)籽粒增长的起步快,其余 3 个品种起步较慢;快增阶段弯曲中穗型品种‘豫谷 35’增长最快,其次是‘豫谷 18’和直立小穗‘S 410’,而勾

形大穗品种‘张杂 13’籽粒增长速度最慢,进入缓增阶段籽粒增长减慢,最终全穗籽粒粒重由大到小依次为‘豫谷 35’、‘豫谷 18’、‘张杂 13’、‘S 410’。不同类型谷子品种籽粒增重最快阶段出现时间也不同,‘S 410’籽粒增重从花后第 7 至第 42 天呈缓慢持续增长的过程;‘豫谷 18’和‘豫谷 35’籽粒增重最快时间出现在花后第 7 至第 28 天;‘张杂 13’籽粒增重最快的的时间集中在花后第 7 至第 35 天。



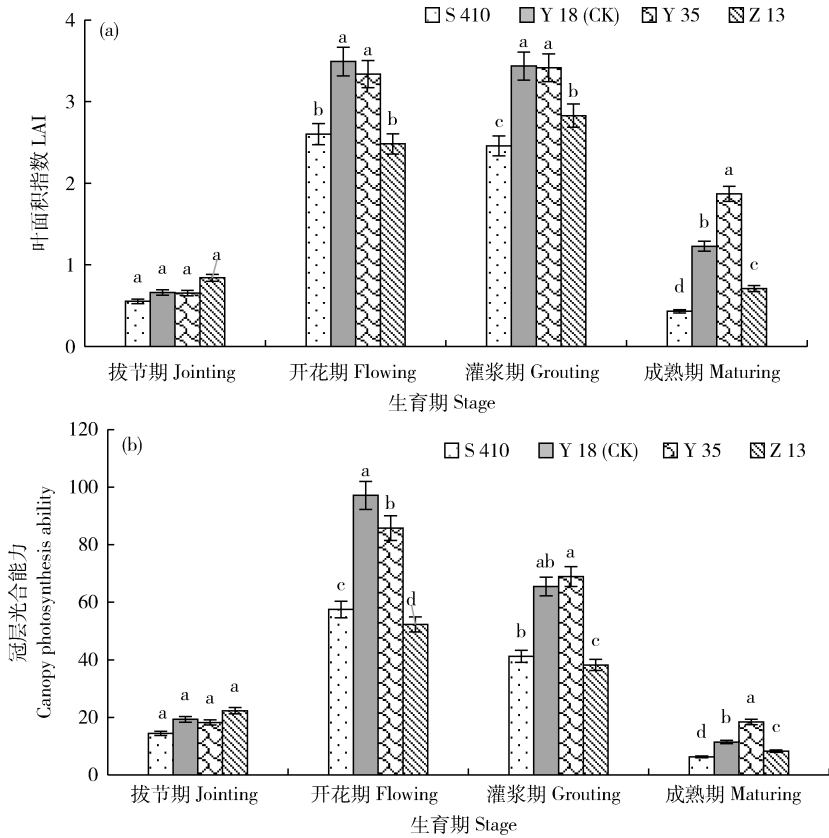


图 6 不同类型品种的和叶面积指数 (a) 和冠层光合能力 (b)

Fig. 6 Leaf area index (a) and canopy photosynthetic ability (b) of with different genotypes foxtail millet

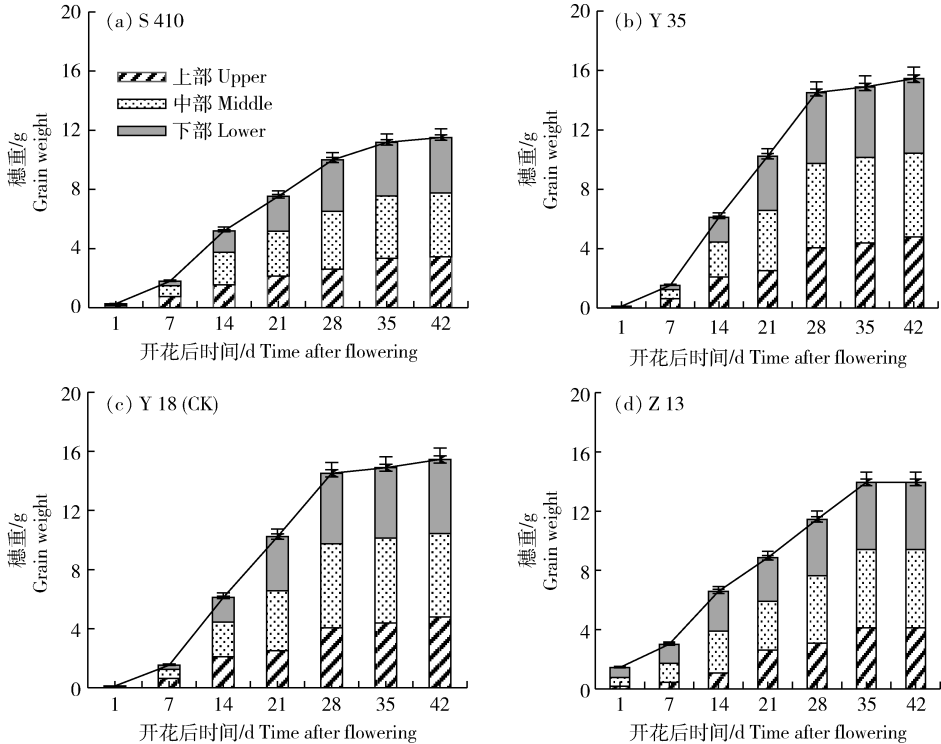


图 7 不同类型品种的籽粒增长动态

Fig. 7 Grain growth dynamics of different types foxtail millet cultivars

不同类型谷子品种的不同籽粒位粒重变化趋势基本一致。以中部籽粒增长起步较快,从开花当天至花后第28天籽粒快速增长;花后第28天至42天籽粒增长缓慢;下部籽粒重增长开始较慢,花后第14天至第28天为快速增长阶段;上部籽粒增长最慢,在花后第28天才进入快速增长阶段,直到成熟期仍然增长较快。

### 2.5.2 灌浆特征参数

由表4可知,不同类型品种籽粒灌浆参数中,弯曲大穗型‘张杂13’灌浆持续期最长,最大灌浆速率出现时间比对照延后7.0 d,灌浆活跃期比对照少11.7 d,平均灌浆速率和最大灌浆速率分别比对照低30.95%和31.74%;直立小穗型(‘S 410’)灌浆持续期最短,最大灌浆速率出现时间和灌浆活跃期分别比对照提前5.4和6.6 d,平均灌浆速率和最大灌浆速率分别比对照低21.43%和20.63%;弯曲中穗型‘豫谷35’的灌浆持续期、最大灌浆速率出现时间和灌浆活跃期均与对照相近,但是平均灌浆速率和最大灌浆速率比对照高9.52%和9.53%。不同类型谷子品种间,上、中、下部籽粒位灌浆参数变化趋势基本一致。不同籽粒位灌浆持续期、最大灌浆速率出现的时间和灌浆活跃期持续时间均表现为上部>下部>中部,平均灌浆速率和最大灌浆速率由高到低也表现为中部>下部>上部。

### 2.6 灌浆参数、干物质转运率和光合特性与产量的相关性分析

由表5可知,不同类型谷子品种产量与净光合速率、叶面积指数均呈极显著正相关;产量与干物质转运量、平均灌浆速率、穗重均呈显著正相关。

## 3 讨论

叶片是作物进行光合作用的主要器官,叶面积大小及光合能力的高低是作物生长发育及产量形成的重要因子<sup>[27]</sup>。段春渊等<sup>[28]</sup>研究认为在水稻灌浆期半直立穗型品种剑叶光合速率比直立穗型品种高,弯曲穗型品种光合速率相对平稳,水稻育种目标在形态指标上设置为选育半直立穗型品种。本研究结果表明,叶片 $P_n$ 与谷子产量呈极显著正相关( $R^2=0.982$ )。从拔节期-成熟期,谷子叶片 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $G_i$ 和 $T_r$ 在不同品种间呈先上升后下降的趋势,在开花期光合能力达到高峰。开花期和成熟期谷子叶片的 $P_n$ 由高到低表现为‘豫谷18’(27.83  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )>‘豫谷35’(27.33  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )>‘S 410’(22.11

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )>‘张杂13’(22.11  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。冠层光合能力是净光合速率与叶面积指数的综合反映。弯曲中穗型‘豫谷35’的冠层光合能力较‘张杂13’和‘S 410’分别高出57.85%和60.51%。在灌浆期,不同类型谷子品种叶面积指数随生育期推进呈下降趋势,且‘S 410’和‘张杂13’叶片衰老进程快,‘豫谷35’和‘豫谷18’生育后期较强的 $P_n$ 与较高的叶面积指数是其获得较高产量和粒重的重要生理基础,这与在水稻<sup>[29]</sup>和小麦<sup>[30]</sup>等作物上的研究结果一致。作物高光效育种包括高光效株型育种和高光效功能育种两部分,‘S 410’是谷子株型育种上突破性的新材料,其具有叶片短而上冲,穗头直立,株型紧凑,抗倒伏,米质优良等优点。由于该品种单穗小、码少,在常规留苗密度下,叶面积指数小引起冠层光合能力低,制约了产量的有效积累。因此,通过扩大群体密度,增加亩穗数是实现该品种高产的有效途径。同时,在株型育种的过程中,增加高光合性状的鉴定指标,应选择光合效率高,幼穗发育进程快,相对码多、码大,单穗结实率高的品种。

作物花后干物质的积累和转运对产量形成有直接的影响,小麦的孕穗至开花前后是产量形成关键期,这一时期分配到幼穗的干物质越多产量越高<sup>[31-32]</sup>。超级杂交稻干物质和养分积累的优势主要是由于快增期持续天数较长,中后期尤其是抽穗后干物质和养分积累速率较快<sup>[33-34]</sup>。本研究结果表明,不同穗型谷子品种花后干物质积累量、干物质转运率与产量之间存在极显著正相关( $R^2$ 分别为0.99和0.96),而不同品种的干物质积累、转运与分配差别各异,表现为花后与花前干物质生产的比例不同,最终表现出产量水平的差异。勾形大穗型品种‘张杂13’的花后干物质积累量、转移量、转运率和收获指数分别比对照低5.28%、37.84%、2.17%和7.14%,在夏谷区‘张杂13’从开花至成熟幼穗分化时间缩短,不具备码多、花多等特点,只能靠单秆大穗夺取高产;‘S 410’属于直立穗型品种,小穗、库容量小、粒重低,干物质转移对籽粒的贡献率较对照高1.57%,但是花后干物质的积累量、干物质转移量、干物质转运率和收获指数均较对照‘豫谷18’低,且差异达显著水平。结合夏谷区气候特点,在品种改良过程中,应该选择具备耐密植、田间成穗率高、光合能力强、经济系数高的品种。

籽粒灌浆期是产量形成的重要阶段。灌浆速率受基因型和环境条件共同影响,灌浆时间和灌浆速

表4 不同类型谷子品种粒位间籽粒灌浆特征参数

Table 4 The filling parameters for grains on different positions of different types foxtail millet cultivars

品种 Cultivar	籽粒部位 Position grains	灌浆持续 时间/d Time of grout duration	最大灌浆速率	灌浆活跃期 持续时间/d Duration of active grouting period	平均灌浆速率/ (g/(1 000 粒·d)) Average grouting rate	最大灌浆速率/ (g/(1 000 粒·d)) Maximum grouting rate
			出现在花后的 时间/d Time of occurrence of maximum grouting rate after flowing			
豫谷 18 Yugu 18 (CK)	上 Upper	41.7	28.0	27.2	0.13	0.20
	中 Middle	40.7	20.4	29.5	0.16	0.25
	下 Lower	35.7	20.0	23.5	0.12	0.19
	合计 Total	39.5	21.0	29.8	0.42	0.63
S 410	上 Upper	43.5	17.6	36.9	0.08	0.11
	中 Middle	28.9	14.8	21.5	0.13	0.20
	下 Lower	26.5	16.1	16.6	0.13	0.19
	合计 Total	31.1	15.6	23.2	0.33	0.50
豫谷 35 Yugu 35	上 Upper	38.1	18.1	29.2	0.12	0.18
	中 Middle	35.2	18.7	24.6	0.18	0.27
	下 Lower	32.4	19.2	20.3	0.17	0.26
	合计 Total	35.4	18.7	24.8	0.46	0.69
张杂 13 Zhangza 13	上 Upper	39.9	28.4	44.2	0.09	0.14
	中 Middle	43.8	28.0	40.8	0.11	0.17
	下 Lower	40.4	24.4	28.0	0.10	0.14
	合计 Total	42.4	28.0	41.5	0.29	0.43

表 5 灌浆参数、干物质转运率和光合特性与产量的相关性分析  
Table 5 Correlation analysis of grain filling parameters dry matter transfer rate and photosynthetic characteristics and yield

指标 Index	穗长 Ear length	出谷率 Grain emergence rate	净光合速率 Net photosynthetic rate	叶面积指数 Leaf area index	干物质积累量 Dry matter accumulation	干物质转运量 Dry matter transport	平均灌浆速率 Average grouting rate	最大灌浆速率 Maximum filling rate	穗重 Ear weight	产量 Yield
穗长	1.000									
出谷率	-0.538	1.000								
净光合速率	0.510	0.447	1.000							
叶面积指数	0.575	0.381	0.992**	1.000						
干物质积累量	0.832	0.009	0.875	0.922	1.000					
干物质转运量	0.441	0.515	0.980*	0.985*	0.862	1.000				
平均灌浆速率	-0.343	0.976*	0.627	0.571	0.224	0.688	1.000			
最大灌浆速率	-0.391	0.962*	0.542	0.507	0.186	0.645	0.975*	1.000		
穗重	0.437	0.507	0.958*	0.973*	0.863	0.996**	0.679	0.656	1.000	
产量	0.548	0.411	0.996**	0.999**	0.907	0.987*	0.957*	0.529	0.973*	1.000

注：\*\* 表示在  $P < 0.01$  水平差异显著，\* 表示在  $P < 0.05$  水平差异显著。

Note: \*\* indicate significantly different at  $P < 0.01$ ; \* indicate significantly different at  $P < 0.05$ .

率决定了玉米籽粒的干物质积累量,灌浆速率和灌浆过程持续天数均与粒重显著相关<sup>[35]</sup>。水稻籽粒充实度与其穗上着生的部位有关,强势粒开花早,灌浆启动快,获得同化物的能力较强,籽粒充实度好,粒重高;弱势粒则相反,穗上部和中部的籽粒灌浆启动速度快、强度大,穗下部籽粒灌浆高峰出现晚,增重速度迟缓<sup>[36]</sup>。本研究结果表明,平均灌浆速率与产量呈显著正相关,不同穗籽粒位平均灌浆速率表现为中部最大,不同穗型品种之间以弯曲穗型‘豫谷35’和‘豫谷18’平均灌浆速率高,灌浆持续期短,不同籽粒位灌浆速率均衡,产量最高;弯曲大穗型‘张杂13’灌浆持续期长,灌浆速率低结合华北夏谷区品种灌浆期昼夜温差小,光合产物积累量少,易引起灌浆不实,秕粒增多,下部穗的灌浆速率低,产量中等,直立小穗型‘S410’灌浆速率高,灌浆持续期短,但是穗小,产量低。由此可见,弯曲中穗型‘豫谷35’和‘豫谷18’在华北夏谷区更易实现高产,表现出干物质转运率较高、光合速率较高、灌浆速率高、活跃灌浆期长,从而促进高产。因此,在谷子新品种改良过程中应选择生育后期根系活力维持时间长,绿叶多不早衰,光合效率高,在温差较小条件下,灌浆速度快,结实性好的育种材料选育。

## 4 结 论

华北夏谷区,‘豫谷35’产量最高,‘豫谷18’和‘张杂13’次之、直立穗型‘S410’最低。籽粒灌浆启动后旗位叶净光合速率和冠层光合能力由高到低表现为‘豫谷35’>‘豫谷18’>‘张杂13’>‘S410’;不同生育期,谷子叶片光合能力由强到弱表现为开花期>拔节期>灌浆期>乳熟期。花后干物质的积累量、转移量、转运率以及收获指数均表现为‘豫谷35’最高,不同籽粒位间灌浆持续期、最大灌浆速率出现的时间和灌浆活跃期出现时间均表现为上部>下部>中部,且产量与净光合速率呈显著正相关,与花后干物质积累量及转运率均呈极显著正相关。不同类型品种的产量与净光合速率、叶面积指数均呈极显著正相关;与干物质转运量、平均灌浆速率、穗重均呈显著正相关关系;与灌浆持续期和灌浆活跃期的持续时间呈负相关,但差异未达到显著水平。综上,在华北夏谷区应选育具有较高的花后干物质积累量、干物质转移量和干物质转移率,较高的光合速率和冠层光合能力以及灌浆速率相对较高的弯曲中穗型品种,是实现谷子优质高产的有效途径之一。

## 参考文献 References

- [1] 刁现民. 基础研究提升传统作物谷子和黍稷的科研创新水平[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3261-3263  
Diao X M. Basic research promoting scientific innovation for traditional Chinese cereals, foxtail millet and common millet[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(17): 3261-3263 (in Chinese)
- [2] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 程汝宏, 夏恩君, 刁现民. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459-470  
Li S G, Liu F, Liu M, Cheng R H, Xia E J, Diao X M. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 459-470 (in Chinese)
- [3] 农业农村部市场与信息化司. 我国谷子市场与产业分析报告(2020)[R]. 北京: 中国农业出版社, 2020  
Department of Market and Information Technology of Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China millet market and industry analysis report (2020)[R]. Beijing: China Agricultural Scientific and Technology Press, 2020 (in Chinese)
- [4] 刁现民, 程汝宏. 十五年区试数据分析展示谷子糜子育种现状[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4469-4474  
Diao X M, Cheng R H. Current breeding situation of foxtail millet and common millet in China as revealed by exploitation of 15 years regional adaptation test data [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4469-4474 (in Chinese)
- [5] 汤永禄, 李朝苏, 吴晓丽, 吴春, 杨武云, 黄钢, 马孝玲. 人工合成小麦衍生品种的物质积累、冠层结构及群体光合特性[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 844-855  
Tang Y L, Li C S, Wu X L, Wu C, Yang W Y, Huang G, Ma X L. Accumulation of dry matter, canopy structure and photosynthesis of synthetic hexaploid wheat-derived high-yielding varieties grown in Sichuan Basin, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(5): 844-855 (in Chinese)
- [6] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 王荣煊, 陈传永, 刘月娥, 刘秀芝, 王元东, 刘春阁. 玉米生产上3个主推品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性[J]. 作物学报, 2018, 44(3): 414-422  
Xu T J, Lv T F, Zhao J R, Wang R H, Chen C Y, Liu Y E, Liu X Z, Wang Y D, Liu C G. Photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and translocation, grain filling parameter of three main maize varieties in production[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3): 414-422 (in Chinese)
- [7] 吕军, 王伯伦, 孟维勃, 赵凤艳. 不同穗型梗稻的光合作用与物质生产特性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(5): 902-908  
Lv J, Wang B L, Meng W R, Zhao F Y. The characteristics of photosynthesis and dry matter production in *Japonica* rice cultivars with different type panicles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5): 902-908 (in Chinese)
- [8] 徐云姬, 许阳东, 李银银, 钱希旸, 王志琴, 杨建昌. 干湿交

- 替灌溉对水稻花后同化物转运和籽粒灌浆的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(4): 554-568
- Xu Y J, Xu Y D, Li Y Y, Qian X Y, Wang Z Q, Yang J C. Effect of alternate wetting and drying irrigation on post-anthesis remobilization of assimilates and grain filling of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 554-568 (in Chinese)
- [9] 魏颖娟, 赵杨, 邹应斌. 不同穗型超级稻品种籽粒灌浆特性[J]. 作物学报, 2016, 42(18): 1516-1529
- Wei Y J, Zhao Y, Zou Y B. Grain-filling characteristics in super rice with different panicle types[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(18): 1516-1529 (in Chinese)
- [10] 王晓慧, 张磊, 刘双利, 曹玉军, 魏雯雯, 刘春光, 王永军, 边少锋, 王立春. 不同熟期春玉米品种的籽粒灌浆特性[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3557-3565
- Wang X H, Zhang L, Liu S L, Cao Y J, Wei W W, Liu C G, Wang Y J, Bian S F, Wang L C. Grain filling characteristics of maize hybrids differing in maturities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3557-3565 (in Chinese)
- [11] 卢小兰, 于振文, 张永丽, 石玉. 不同穗型小麦光能利用和旗叶<sup>13</sup>C同化物分配特性及对补灌水平的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3745-3752
- Lu X L, Yu Z W, Zhang Y L, Shi Y. Light energy utilization and distribution characteristics of flag leaf <sup>13</sup>C assimilate in different spike type wheat varieties and their responses to supplementary irrigation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11): 3745-3752 (in Chinese)
- [12] 王荣焕, 徐田军, 陈传永, 王元东, 吕天放, 刘月娥, 蔡万涛, 刘秀芝, 赵久然. 不同熟期类型玉米品种籽粒灌浆和脱水特性[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 149-158
- Wang R H, Xu T J, Chen C Y, Wang Y D, Lv T F, Liu Y E, Cai W T, Liu X Zh, Zhao J R. Grain filling and dehydrating characteristics of maize hybrids with different maturity[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 149-158 (in Chinese)
- [13] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, Liu K, Wang P. Post-anthesis development of inferior and superior spikelets in rice in relation to abscisic acid and ethylene [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(1): 149-160
- [14] Mao L L, Zhang L Z, Sun X Z, van der Werf W, Evers J B, Zhao X H, Zhang S P, Song X L, Li Z H. Use of the beta growth function to quantitatively characterize the effects of plant density and a growth regulator on growth and biomass partitioning in cotton[J]. *Field Crops Research*, 2018, 224: 28-36
- [15] 武翠, 邵国军, 吕文彦, 马莲菊, 崔鑫福, 曹萍, 侯秀英. 不同发育时期水稻强、弱勢粒灌浆速率的遗传分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1135-1141
- Wu C, Shao G J, Lv W Y, Ma L J, Cui X F, Cao P, Hou X Y. Genetic analysis of grain filling rate in different growth stages of superior and inferior grains in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6): 1135-1141 (in Chinese)
- [16] Fu J, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J, Zhang J H. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice [J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(2): 170-182
- [17] 张婷, 师志刚, 王根平, 高翔, 夏雪岩, 杨伟红, 张喜瑞, 田晓建, 程汝宏, 刁现民. 华北夏谷区 2001-2015 年谷子育种变化分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4475-4489
- Zhang T, Shi Z G, Wang G P, Gao X, Xia X Y, Yang W H, Zhang X R, Tian X J, Cheng R H, Diao X M. The alterations of foxtail millet breeding in North China summer-sowing region from 2001 to 2015 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4475-4489 (in Chinese)
- [18] 张艾英, 刁现民, 郭二虎, 范惠萍, 王丽霞, 李瑜辉, 程丽萍, 吴引生, 张莉. 西北春谷早熟区谷子品种十五年变化趋势及主要性状分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4496-4511
- Zhang A Y, Diao X M, Guo E H, Fan H P, Wang L X, Li Y H, Cheng L P, Wu Y S, Zhang L. Research progress and major traits of foxtail millet cultivars developed in the early-mature spring-sowing region in the past 15 years [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4496-4511 (in Chinese)
- [19] 张艾英, 郭二虎, 刁现民, 范惠萍, 李瑜辉, 王丽霞, 郭红亮, 程丽萍, 吴引生. 2005—2015 年西北春谷中晚熟区谷子育成品种评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4486-4505
- Zhang A Y, Guo E H, Diao X M, Fan H P, Li Y H, Wang L X, Guo H L, Cheng L P, Wu Y S. Evaluation of foxtail millet cultivars developed in the middle and late-maturing spring-sowing region in Northwest China in 2005-2015 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4486-4505 (in Chinese)
- [20] 李志江, 马金丰, 李延东, 李祥羽, 刁现民, 张婷. 东北春谷区近年来谷子育成品种的评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4507-4518
- Li Z J, Ma J F, Li Y D, Li X Y, Diao X M, Zhang T. Evaluation of foxtail millet cultivars developed in northeast China spring-sowing region in recent years [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(23): 4507-4518 (in Chinese)
- [21] 宋慧, 刘金荣, 王素英, 闫宏山, 王涛, 邢晓宁, 邢璐, 付楠. GGE 双标图评价谷子‘豫谷 18’的丰产稳产性和适应性[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(1): 29-38
- Song H, Liu J R, Wang S Y, Yan H S, Wang T, Xing X N, Xing L, Fu N. Evaluation of foxtail millet yield stability and adaptability using GGE-biplot analysis: A case study of ‘Yugu18’ foxtail millet cultivar [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(1): 29-38 (in Chinese)
- [22] 范光宇, 张丽娜, 冯小磊, 杨建勇, 史高雷, 白文杰, 宋国亮, 张晓磊, 赵治海. 张杂谷 13 号的选育及应用[J]. 种子, 2019, 38(3): 120-122
- Fan G Y, Zhao Z H, Feng X L, Yang J Y, Shi G L, Bai W J, Song G L, Zhang X L, Zhao Z H. The breeding and generalizing of zhangzagu No. 13 [J]. *Seed*, 2019, 38(3): 120-122 (in Chinese)
- [23] 杨延兵, 秦岭, 王润丰, 陈二影, 尹秀波, 刘玉芹, 张素梅, 丛

- 新军, 李国瑜, 王乐政, 管延安. 山东省不同生态条件气候因素对谷子产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(7): 1348-1358
- Yang Y B, Qin L, Wang R F, Chen E Y, Yin X B, Liu Y Q, Zhang S M, Cong X J, Li G Y, Wang L Z, Guan Y A. Effects of climatic factors under diverse ecological conditions on foxtail millet (*Setaria italica*) yield in Shandong [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(7): 1348-1358 (in Chinese)
- [24] 陈桂玲, 秦岭, 陈二影, 杨延兵, 管延安, 王海莲, 张华文, 刘宾. 不同夏谷品种中后期籽粒灌浆特点的研究[J]. 山东农业科学, 2014, 46(12): 31-33, 37
- Chen G L, Qin L, Chen E Y, Yang Y B, Guan Y A, Wang H L, Zhang H W, Liu B. Study on grain filling characteristics at mid and late stage of different summer millet cultivars[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2014, 46(12): 31-33, 37 (in Chinese)
- [25] Wang T, Lu Q W, Song H, Hu N, Wei Y Y, Li P T, Liu Y L, Zhao Z L, Liu J R, Zhang B H, Peng R H. DNA methylation and RNA-sequencing analysis show epigenetic function during grain filling in foxtail millet (*Setaria italica* L)[J]. *Frontiers in Plant Science*, [2021-05-26]. DOI: 10.3389/fpls.2021.741415
- [26] 王祥宇, 魏珊珊, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌. 种植密度对熟期不同夏玉米群体光合性能及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(1): 134-138
- Wang X Y, Wei S S, Dong S T, Liu P, Zhang J W, Zhao B. Effects of planting densities on canopy apparent photosynthesis characteristics of summer maize in different maturity periods[J]. *Journal of Maize Sciences* 2015, 23(1): 134-138 (in Chinese)
- [27] Huang L Y, Yang D S, Li X X, Peng S B, Wang F. Coordination of high grain yield and high nitrogen use efficiency through large sink size and high post-heading source capacity in rice[J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 49-58
- [28] 殷春渊, 王书玉, 刘贺梅, 张栩, 孙建权, 胡秀明, 王和乐, 彭东, 邵性宽, 胡胜利, 王东海. 不同穗型水稻品种剑叶光合速率、产量及品质的差异[J]. 中国农学通报, 2016, 32(24): 25-30
- Yin C Y, Wang S Y, Liu H M, Zhang X, Sun J Q, Hu X M, Wang H L, Peng D, Shao X K, Hu S L, Wang D H. Difference of flag leaf photosynthetic rate, yield and quality among different panicle-type rice varieties [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(24): 25-30 (in Chinese)
- [29] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000
- Ling Q H. *Crop Population Quality*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000 (in Chinese)
- [30] 翟虎渠, 曹树青, 万建民, 陆巍, 张荣铨, 李良璧, 匡廷云, 闵绍楷, 朱德峰, 程式华. 超高产杂交稻灌浆期光合功能与产量的关系[J]. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2002, 32(3): 211-217
- Zhai H Q, Chao S Q, Wan J M, Lu W, Zhang R X, Li L B, Kuang T Y, Min S K, Zhu D F, Cheng S H. A study on the relationship between photosynthetic performance of grain filling stage and yield in super high yielding hybrid rice[J]. *Science in China: Series C*, 2002, 32(3): 211-217 (in Chinese)
- [31] 丁位华, 冯素伟, 王丹, 孙海丽, 李婷婷, 茹振钢. 不同穗型小麦籽粒灌浆、干物质积累与转运特性及其与产量的关系[J]. 河南农业科学, 2018, 47(6): 13-17, 97
- Ding W H, Feng S W, Wang D, Sun H L, Li T T, Ru Z G. Grain filling, dry matter accumulation and transport characteristics of different spike types of wheat and their relationship with yield[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(6): 13-17, 97 (in Chinese)
- [32] Fischer R A. Wheat physiology: A review of recent developments[J]. *Crop and Pasture Science*, 2011, 62(2): 95-114
- [33] Foulkes M J, Slafer G A, Davies W J, Berry P M, Sylvester-Bradley R, Martre P, Calderini D F, Griffiths S, Reynolds M P. Raising yield potential of wheat III: Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance[J]. *Journal of Experimental Botany*[J]. 2011, 62(2): 469-486
- [34] 韦还和, 张徐彬, 葛佳琳, 孟天瑶, 陆钰, 李心月, 陶源, 丁恩浩, 陈英龙, 戴其根. 甬优籼粳杂交稻栽后地上部干物质积累动态与特征分析[J]. 作物学报, 2021, 47(3): 546-555
- Wei H H, Zhang X B, Ge J L, Meng T Y, Lu Y, Li X Y, Tao Y, Ding E H, Chen Y L, Dai Q G. Dynamics in above-ground biomass accumulation after transplanting and its characteristic analysis in Yongyou japonica/indica hybrids[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(3): 546-555 (in Chinese)
- [35] 张丽, 张吉旺, 樊昕, 刘鹏, 董树亭. 玉米籽粒比重与灌浆特性的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2327-2334
- Zhang L, Zhang J W, Fan X, Liu P, Dong S T. Study on correlation between specific gravity of maize grains and grain filling characteristics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2327-2334 (in Chinese)
- [36] 杨建昌. 水稻弱勢粒灌浆机理与调控途径[J]. 作物学报, 2010, 36(12): 2011-2019
- Yang J C. Mechanism and regulation in the filling of inferior spikelets of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(12): 2011-2019 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅