

河南省 60 a 来小麦品种株型和光合特性的遗传改良研究

常萍¹, 张煜², 张建周², 胡琳^{2*}

(1. 河南省种子管理站,河南 郑州 450002; 2. 河南省农业科学院 小麦研究所,河南 郑州 450002)

摘要:为了分析河南省 60 a 来小麦品种株型和光合特性的遗传改良进展,对 20 世纪 50 年代以来河南省大面积种植的 20 个小麦品种的株型特征和光合特性进行了研究,并分析这些性状对产量的重要性。结果表明,自 20 世纪 50 年代以来,河南省小麦品种的株型性状得到了显著改良。株高和叶层重心绝对高度都在不断降低,株高由早期品种南大 2419 的 138 cm 降低到矮抗 58 的 67 cm,叶层重心绝对高度由碧蚂 1 号的 69 cm 降低到郑麦 7698 的 29 cm,顶三叶基角和披角也在不断减小,旗叶变得短而宽。逐步回归分析结果表明,株高和叶层重心相对高度的降低、叶片基角的减小和群体叶面积指数的提高对产量的提高有显著的促进作用。河南省小麦品种遗传改良过程中,旗叶的净光合速率由 $20.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增长到 $27.1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光合速率的改良对籽粒产量的提高也具有显著的正效应。近 20 a 河南省小麦品种株型性状的改良进度有所减缓且进一步改良的空间相对较小,因此在今后的小麦品种改良过程中,应更加注重小麦植株单位面积光合效能的改良。

关键词:小麦;株型特征;光合特性;遗传改良

中图分类号: S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2016)12-0020-05

Research on Genetic Improvement of Plant Type and Photosynthetic Traits of Wheat in Henan Province in 60 Years

CHANG Ping¹, ZHANG Yu², ZHANG Jianzhou², HU Lin^{2*}

(1. Seed Administrative Station of Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 2. Wheat Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to evaluate the progress of genetic improvement in plant type and photosynthetic traits of wheat grown in Henan province, plant type and photosynthetic traits of 20 wheat cultivars that had been widely grown in Henan province since 1950s were studied, and the importance of these traits for yield was analyzed. The results indicated that plant type of wheat from Henan province had been significantly improved since 1950s. Plant height significantly decreased from 138 cm (Nanda 2419) to 67 cm (Aikang 58), while the absolute gravity center of leaf layer decreased from 69 cm (Bima No. 1) to 29 cm (Zhengmai 7698). With the improvement of wheat, the basal angle and droop angle of leaves, and the length of flag leaf were continually decreased, while the width of flag leaf was continually increased. The result of stepwise regression analysis indicated that the decrease of plant height, gravity center of leaf layer, basal angle of leaves and the increase of leaf area index had significant effect on the increase of grain yield. In process of wheat improvement, the net photosynthetic rate of flag leaf was increased from $20.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ to $27.1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, which had significant positive effect on the increase of grain yield as well. The improvement rate of plant type was slowed down in recent twenty years, and there were few obvi-

收稿日期:2016-08-20

基金项目:国家小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-9)

作者简介:常萍(1968-),男,河南光山人,高级农艺师,硕士,主要从事农业技术推广工作。E-mail:hnzzcp@163.com

* 通讯作者:胡琳(1961-),女,重庆人,研究员,博士,主要从事小麦育种工作。E-mail:hulin209@163.com

网络出版时间:2016-11-25 14:24:33

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/41.1092.S.20161125.1424.033.html>

ous opportunities for further improvement in plant type of wheat. Therefore, we should pay more attention to the improvement of the photosynthetic rate per unit area of wheat.

Key words: wheat; plant type trait; photosynthetic trait; genetic improvement

株型是特定基因型植株在一定生态条件下的空间存在形式,合理的株型可以提高光能截获量和利用率,有利于提高籽粒产量。1968 年,Donald^[1] 提出“由弱竞争能力的收敛个体组成的纯合基因型群体具有最优群体生产力”的观点,阐明了小麦理想株型的概念,并详细描述了理想株型的特征:独秆、矮秆、大穗、有芒、叶短小而直立。虽然迄今为止人们尚未得到具有这种株型的小麦推广品种,但 Donald 的理论给全世界的小麦育种者带来极大的启示。迄今,人们在小麦株型特征及其遗传改良方面已有大量研究。Green 等^[2] 对 1919—2009 年美国东部种植的软红冬小麦的产量及株型结构的遗传改良进行研究,发现该地区的软红冬小麦品种在遗传改良过程中株高得到显著降低,旗叶由垂披型向直立型转变,叶片的持绿期更长,这些性状的改良对产量的提高都有明显的促进作用。许为钢等^[3] 通过对陕西关中地区 20 世纪 50 年代至 90 年代小麦品种株型结构的遗传改良进行研究,认为增大穗长、叶层重心相对高度和比叶重,减小叶片的基角和披角对品种产量的提高具有正效应。黄淮麦区小麦品种的株型结构在遗传改良过程中也有一定的变化,其中变化最为显著的是株高和冠层叶姿叶态^[4]。小麦植株光合特性的遗传改良也是研究热点之一,但其研究结果不尽相同。一部分研究者认为,在小麦进化过程中,单位叶面积的光合速率降低,其总光合生产能力是靠叶面积增大和叶面积持续期延长来补偿的^[5-7];而大多数研究者认为,小麦的光合速率在品种更替过程中得到了提高。刘莹^[8] 对我国华北地区推广的不同年代冬小麦品种旗叶的解剖结构及光合速率进行研究发现,新品种比老品种旗叶肉细胞环数增多,叶肉厚度逐渐增大;现代品种午睡现象较轻,且抵抗光伤害的能力较强。刘永康等^[9] 研究发现,现代小麦品种开花后具有较长的光合速率高值持续期,王士红^[10]、Zheng 等^[11]、Tian 等^[12] 也都获得了相似的研究结果。为了分析河南省 60 a 来小麦品种株型和光合特性的遗传改良及其对产量的影响,对河南省 20 世纪 50 年代以来大面积栽培小麦品种的株型特征和光合特性的遗传改良情况进行了研究,并进一步分析了这些性状对籽粒产量的影响及两者之间的关系,以期为小麦品种的进一步改良提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验于 2013—2014 年和 2014—2015 年在河南

省农业科学院现代农业科技试验示范基地进行。试验田土壤为砂壤土,其含速效钾 89.24 mg/kg、有效磷 15.31 mg/kg、碱解氮 52.95 mg/kg。

试验材料为河南省 20 世纪 50 年代以来历次小麦品种更换中的主要栽培品种,共 20 个(表 1)。

表 1 供试小麦品种的基本情况

大面积种植年代	品种名称
20 世纪 50 年代	碧蚂 1 号、白火麦、南大 2419
20 世纪 60 年代	阿夫、百泉 41、内乡 5 号
20 世纪 70 年代	博爱 7023、偃师 4 号、郑引 1 号
20 世纪 80 年代	百农 3217、郑州 683、豫麦 2 号
20 世纪 90 年代	豫麦 13、豫麦 18、豫麦 21
21 世纪初(2000—2010 年)	郑麦 9023、周麦 18、新麦 18、矮抗 58、郑麦 7698

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,6 次重复,其中 3 个重复用于测定籽粒产量,另外 3 个重复用于样品的采集以测定相关性状。小区面积 6.67 m²,行长 4.25 m,行宽 1.57 m,6 行区。分别于 2013 年 10 月 6 日和 2014 年 10 月 7 日利用小区条行播种机进行播种,播种量为 180 粒/m²。播种前施牛粪 12 000 kg/hm²、尿素 255 kg/hm²、二胺 375 kg/hm²,在返青拔节期结合灌溉追施尿素 150 kg/hm²。按照当地栽培措施,分别在越冬期、返青拔节期和开花期进行灌溉以确保各品种产量水平的发挥。试验期间适时用药剂防病防虫,并对高秆及易倒伏品种搭架防倒。

1.3 测定项目及方法

群体叶面积指数:于各小麦品种的齐穗期,在每小区采集 0.5 m² 的小麦植株,采用比叶重法测定各品种的群体叶面积指数。

顶三叶夹角:于各小麦品种的齐穗期至开花期分别测定旗叶、倒二叶和倒三叶的基角和披角,平均后得顶三叶基角和披角,每小区测定 5 个主茎。

叶层重心高度:于各小麦品种开花期,采用层切法收集每个植株各叶层的叶片(每 10 cm 高度为一层),用 AM-300 便携式叶面积仪测定各叶层的叶面积,每小区测定 3 株,叶层重心绝对高度为整个冠层叶面积重心离地表的高度,叶层重心相对高度为叶层重心绝对高度占株高的百分率。

株高:于各小麦品种开花后 1 周测定其株高,每小区测定 5 个主茎。

旗叶形状:于各小麦品种开花后 1 周测定其旗叶的长、宽和面积,每小区测定 5 个主茎。

旗叶净光合速率:于各小麦品种齐穗期,选择晴朗无云的天气[光量子通量密度大于 1 500 μmol/

($m^2 \cdot s$)],于 9:30—11:00,采用 CIRAS-2 便携式光合测定仪测定旗叶净光合速率,每个品种测定 5 片旗叶,测定部位为叶片中段。

产量:于各小麦品种的成熟期,对各小区小麦进行机械收获、脱粒、晾晒至含水量 13%,称质量测产。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 统计学软件对测定数据进行多重比较、因子分析、线性逐步回归分析。其中,多重比较采用 LSD 法,置信区间为 95%;因子分析采用主成分最大方差法。

2 结果与分析

2.1 河南省 60 a 来小麦品种株型性状的遗传改良及对产量的重要性分析

2.1.1 株型性状的遗传改良 对河南省 60 a 来 20 个小麦品种的株型性状(表 2)进行分析发现,株高在品种遗传改良过程中不断降低,其中以 20 世纪 50 年代品种南大 2419 株高最高,为 138 cm,以 21 世纪品种矮抗 58 最低,为 67 cm,变异幅度为 51.4%;群体叶面积指数在不同品种间也表现出明

显的差异,以 20 世纪 60 年代品种百泉 41 最小(5.38),以 20 世纪 70 年代品种偃师 4 号最大(7.81);随着品种种植年代的变化,叶层重心绝对高度和相对高度表现出明显的下降,分别从 69 cm(碧蚂 1 号)和 0.64(百泉 41)降低到 29 cm(郑麦 7698)和 0.37 cm(郑州 683),叶层重心高度的降低表明植株中下部的绿叶面积及叶片持绿期在品种演变过程中得到了明显改良。

在品种改良过程中,小麦品种的叶姿叶态的改良主要表现在顶三叶基角、披角和旗叶长度的不断减小,以及旗叶宽度的不断增加。由表 2 可知,河南省 60 a 来小麦品种的顶三叶基角和披角分别从早期品种的 78°(南大 2419)和 58.7°(阿夫)降低到现代品种的 16.3°(周麦 18)和 3.3°(郑麦 7698),顶三叶基角和披角的不断减小表明叶片由垂披型向直立型转变,这有利于增加上部冠层的透光率。旗叶长度从早期品种白火麦的 27.8 cm 降低到现代品种郑麦 9023 的 14.9 cm;而旗叶宽度则以郑州 683 最小(1.2 cm),郑麦 7698 最大(2.3 cm);由于在旗叶长度不断减小的同时,旗叶宽度不断增加,因此旗叶面积在品种演变过程中未表现出明显的变化趋势。

表 2 河南省 60 a 来不同小麦品种的株型、净光合速率及产量

品种名称	株高/cm	群体叶面 积指数	叶层重心高度		顶三叶夹角/°		旗叶			净光合速率/ [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	产量/ (kg/hm^2)
			绝对/cm	相对	基角	披角	长/cm	宽/cm	面积/ cm^2		
碧蚂 1 号	130b	6.29c	69a	0.55b	49.0c	26.7cd	22.5c	1.5e	27.1cd	22.0c	5 968gh
白火麦	134ab	5.96cd	56bc	0.43cd	58.4b	44.6b	27.8a	1.3f	32.4b	21.1cd	5 006i
南大 2419	138a	6.68bc	64ab	0.47c	78.0a	30.1c	26.9ab	1.3f	30.4bc	20.4d	4 468j
阿夫	113c	7.55ab	64ab	0.58ab	45.4c	58.7a	26.5ab	1.7cd	37.8a	21.2cd	6 366g
百泉 41	101de	5.38d	60b	0.64a	33.2de	28.9c	23.4c	1.4ef	28.5c	24.1b	5 832h
内乡 5 号	132ab	7.68ab	59b	0.48bc	45.4c	14.3e	22.3c	1.4ef	26.3cd	23.8bc	5 854gh
博爱 7023	103d	7.16ab	51c	0.51bc	25.0ef	6.3f	18.3e	1.6d	24.4d	23.1bc	6 605fg
偃师 4 号	83fg	7.81a	45cd	0.55b	35.9d	21.6d	22.5c	1.9b	37.2a	24.0b	6 980f
郑引 1 号	97e	6.72bc	56bc	0.60ab	30.2de	39.4b	20.3d	1.8c	30.3bc	22.8bc	7 963e
百农 3217	92ef	6.37bc	36de	0.40cd	27.5e	6.3f	18.7e	1.5e	23.2de	23.0bc	6 706fg
郑州 683	127b	5.99cd	45cd	0.37d	42.5cd	45.7b	26.1b	1.2f	27.2cd	22.4c	6 269gh
豫麦 2 号	88f	6.77bc	33de	0.41cd	25.4ef	4.4f	17.6ef	1.6d	23.3d	23.6bc	8 113de
豫麦 13	83fg	6.96bc	39d	0.50bc	27.0e	5.0f	15.5fg	1.6d	20.1e	23.5bc	8 630d
豫麦 18	80g	6.79bc	32e	0.43cd	27.8e	8.6ef	16.0fg	1.8c	23.3d	24.4b	8 249de
豫麦 21	71h	7.04b	39d	0.54bc	24.3ef	5.6f	17.7ef	1.8c	26.9cd	24.2b	9 511c
郑麦 9023	78g	5.83cd	38de	0.48bc	27.0e	5.6f	14.9g	1.6d	20.0e	25.9ab	8 478de
周麦 18	81fg	7.22ab	39d	0.49bc	16.3f	6.0f	16.7f	1.9b	26.0cd	25.5ab	1 0178b
新麦 18	77g	7.29ab	34de	0.47c	22.8ef	5.0f	15.0g	1.6d	21.6de	25.5ab	9 899bc
矮抗 58	67h	7.16ab	32e	0.48bc	25.9e	9.2ef	18.6e	1.9b	29.1c	25.7ab	10 832a
郑麦 7698	81fg	7.52ab	29e	0.38d	19.0f	3.3f	19.7de	2.3a	37.7a	27.1a	10 934a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 株型性状的主成分分析 对 20 个小麦品种的 9 个株型性状进行主成分分析(表 3)发现,前 3 个主成分的累计变异率达 87.4%,其中第 1 主成分的变异率为 49.8%,主要反映的是株高、叶层重心绝对高度、顶三叶基角和披角以及旗叶长的变异,表明河南地区小麦品种株型性状变化最大的参数是株高、叶层重心绝对高度、叶片垂披度及旗叶长;第

2 主成分的变异率为 22.4%,主要反映的是群体叶面积指数、旗叶宽和面积的变异,说明群体叶面积、旗叶宽和面积在供试材料中也存在一定的变异;第 3 主成分的变异率为 15.2%,主要体现了叶层相对重心高度的变异。

综上,在河南省小麦品种改良过程中株型结构的变化主要发生在株高、叶层重心绝对高度、叶片垂

披度及旗叶长度上,同时群体叶面积和旗叶叶型也都在一定的差异。在主成分分析中,3 个主成分的累计变异率达到了 87.4%,且代表的性状较多,

这说明新中国成立以来河南省小麦品种在株型结构上的变异不仅涉及的性状多,而且各性状的变异较大。

表 3 小麦 9 个株型性状的主成分分析

主成分	株高	群体叶面 积指数	叶层重心高度		顶三叶		旗叶			特征 值	变 异/ %	累计变 异/%
			绝对	相对	基角	披角	长	宽	面积			
1	0.894	-0.153	0.773	0.058	0.891	0.846	0.975	-0.499	0.589	4.478	49.8	49.8
2	-0.318	0.772	-0.206	0.045	-0.218	-0.002	0.051	0.821	0.745	2.020	22.4	72.2
3	-0.410	-0.610	0.531	0.991	-0.024	0.278	0.050	0.037	0.133	1.370	15.2	87.4

2.1.3 株型性状对产量的相对重要性分析 由表 2 和图 1 可知,随着品种种植年代的变化,小麦品种的产量水平不断提高。在搭架防倒和防治病虫草的条件下,产量从 20 世纪 50 年代品种南大 2419 的 4 468 kg/hm² 提高到现代品种郑麦 7698 的 10 934 kg/hm²,增幅为 145% (表 2);60 a 来小麦品种的年遗传改良增长幅度为 96.1 kg/hm² (图 1)。

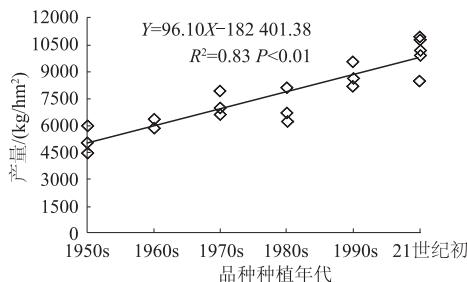


图 1 河南省 60 a 来小麦品种对产量的遗传改良情况

为了评价 9 个株型性状对产量的相对重要性,将 9 个株型性状对产量 (Y) 进行逐步回归分析,获得对产量有显著影响的株型性状与产量的回归模型如下。

$$Y = -0.610 X_1 + 0.167 X_2 - 0.157 X_4 \\ - 0.246 X_5 \quad (R^2 = 0.817, F < F_{0.1})$$

其中, X_1 为株高, X_2 为群体叶面积指数, X_4 为叶层重心相对高度, X_5 为顶三叶基角。

由逐步回归结果可知,株高、群体叶面积指数、叶层重心相对高度和顶三叶基角对产量有显著影响。其中,株高和叶层重心相对高度是高度因子,为负效应,表明株高和叶层重心相对高度的降低对产量的提高有显著效应;群体叶面积指数反映的是植株群体光合叶面积的大小,群体光合叶面积的增大有利于群体光合生产潜力的提高,对产量是正效应;顶三叶基角对产量为负效应,顶三叶基角的减小有利于植株冠层通风透光性的提高,利于群体光合生产潜力的发挥。

2.2 河南省 60 a 来小麦品种旗叶净光合速率的遗传改良及对产量的重要性分析

2.2.1 旗叶净光合速率的遗传改良 随着品种种植年代的变化,旗叶净光合速率表现出明显的递增

趋势(表 2 和图 2)。20 世纪 50 年代品种南大 2419 的旗叶净光合速率为 20.4 μmol/(m² · s),而 21 世纪初品种郑麦 7698 的旗叶净光合速率为 27.1 μmol/(m² · s),较南大 2419 增长了 32.8% (表 2);60 a 来的遗传改良年增长幅度为 0.08 μmol/(m² · s) (图 2)。

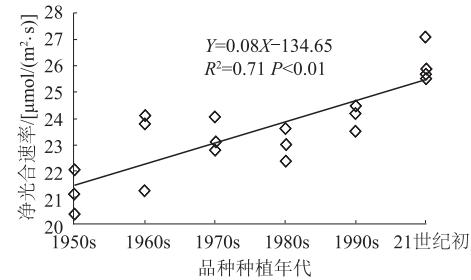


图 2 河南省 60 a 来小麦品种旗叶净光合速率的遗传改良情况

2.2.2 旗叶净光合速率对产量的重要性分析 为了评价旗叶净光合速率对产量的重要性,用株高 (X_1)、群体叶面积指数 (X_2)、叶层重心相对高度 (X_4)、顶三叶基角 (X_5)、净光合速率 (X_{10}) 对产量 (Y) 进行逐步回归分析,获得对产量有显著影响的性状指标与产量的回归模型如下。

$$Y = -0.492 X_1 + 0.150 X_2 + 0.420 X_{10} \\ (R^2 = 0.838, F < F_{0.1})$$

由逐步回归结果可知,株高对产量有较大的负效应,而旗叶净光合速率对产量有较大的正效应,群体叶面积指数对产量有较小的正效应。表明,在河南省小麦品种改良过程中,株高的降低、旗叶净光合速率和群体叶面积的提高对产量的提高有显著的作用。这是因为光合速率和群体叶面积是植株光合生产能力的主要表现形式,其提高对小麦品种产量潜力的发挥有促进作用;株高的降低利于植株抗倒伏能力的提高,进而有助于小麦品种产量潜力的充分发挥。

3 结论与讨论

株型是植株结构、功能和视觉形象的综合描述,受基因型、生长环境及基因与环境互作的共同作用

影响^[13-14]。自 Donald^[1]提出小麦的理想株型以来,已有许多育种家对小麦理想株型及其所涉及的性状进行了探讨,适宜的株高和合理的冠层结构也是育种家在品种选育过程中不断追求的株型性状。在河南省小麦品种改良过程中,株高和叶层重心高度得到了明显的降低,叶片由垂披型逐渐转变为直立型,旗叶变得短而宽。株高和叶层重心高度的降低体现出育种家对植株具有较强抗倒伏能力、较大叶面积及较长持绿期的追求;而叶姿叶态的改良则体现出育种家对品种种植株具有良好通风透光性的期望。

在河南省小麦品种改良过程中,产量得到了明显的提高。产量的提高与株高、叶层重心相对高度、叶面积指数和顶三叶基角的改良密切相关,同时旗叶净光合速率的改良对产量的提高也有显著促进作用。株高的降低有利于植株抗倒伏能力和收获指数的提高;叶层重心高度的降低表明植株中下部的绿叶面积及叶片持绿期在品种演变过程中得到了明显改良;群体叶面积指数反映的是植株群体光合叶面积的大小,群体光合叶面积的增大有利于群体光合生产潜力的提高,进而有利于产量的提高;顶三叶基角的减小有利于增加上部冠层的通风透光性,使植株下部叶片的光合作用得到更充分的发挥;旗叶净光合速率的提高反映出植株光合生产潜力的提高。这些性状的变化均是向着有利于小麦植株群体光合生产能力提高的方向转变,这些性状的改良是河南省小麦品种产量不断提高的主要原因之一。

从 20 世纪 50 年代至 21 世纪初 60 a 间,河南省小麦品种株型结构的改良取得了瞩目的成就,但同时应注意近 20 a 来株型结构的改良进度明显减缓,20 世纪 90 年代品种在株高、群体叶面积指数、叶层重心高度、叶片夹角及旗叶叶型等性状方面与现代品种十分接近。研究表明,现代小麦品种株型结构已接近最优水平,进一步改良的空间较小^[15-17],而植株群体光合生产能力与单位面积光合效能和群体株型特征密切相关^[18]。因此,在今后的小麦品种改良过程中,应更加注重小麦植株单位面积光合效能的改良。目前,人们在小麦高光效育种方面已开展了大量的研究,例如小麦新品系郑麦 1860 的选育[旗叶净光合速率为 $29.4 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],这些研究结果证实了利用高光合速率小麦资源进行高光效育种的可行性,为今后小麦品种产量潜力的进一步发挥提供了新的动力。

参考文献:

- [1] Donald C M. The breeding of crop ideotypes [J]. *Euphytica*, 1968, 17(3): 385-403.
- [2] Green A J, Berger G, Griffey C A, et al. Genetic yield improvement in soft red winter wheat in the Eastern United States from 1919 to 2009 [J]. *Crop Science*, 2012, 52(5): 2097-2108.
- [3] 许为钢,胡琳,姚建华,等. 关中地区小麦品种株型变化的研究[J]. 西北农业大学学报,1996,24(6):20-24.
- [4] 雷振生,林作楫. 黄淮麦区冬小麦合理株型结构研究[J]. 华北农学报,1994,4(4):27-32.
- [5] Austin R B, Wat S G. Flag leaf photosynthesis of *Triticum aestivum* and related diploid and tetraploid species [J]. *Annals of Botany*, 1982, 49(2): 177-189.
- [6] 田笑明. 新疆冬小麦品种更替中农艺性状演变和发展方向的研究[J]. 作物学报,1991,17(4):297-303.
- [7] 张玲丽,王辉,孙道杰,等. 高产小麦品种冠层形态结构及其与产量性状的关系[J]. 西北植物学报,2004,24(7):1211-1215.
- [8] 刘莹. 不同年代冬小麦品种旗叶解剖结构及光合速率日变化的研究[J]. 华北农学报,2002,17(S1):66-70.
- [9] 刘永康,郑和平,徐艳霞,等. 冬小麦品种更替过程中旗叶结构与光合作用的关系研究[J]. 河南农业科学,2013,42(3):10-14.
- [10] 王士红. 不同年代小麦品种产量与光合特性的演变特征[D]. 南京:南京农业大学,2008.
- [11] Zheng T C, Zhang X K, Yin G H, et al. Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan province of China between 1981 and 2008 [J]. *Field Crops Research*, 2011, 122 (3): 225-233.
- [12] Tian Z, Jing Q, Dai T, et al. Effects of genetic improvements on grain yield and agronomic traits of winter wheat in the Yangtze River Basin of China [J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3):417-425.
- [13] 傅兆麟. 小麦超高产基因型的株型结构问题[J]. 云南农业大学学报,2007,22(1):17-22.
- [14] 李万昌. 小麦株型与产量结构间的协调性分析[J]. 江苏农业学报,2009,25(5):966-970.
- [15] Horton P. Prospects for crop improvement through the genetic manipulation of photosynthesis: Morphological and biochemical aspects of light capture [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(S1):475-485.
- [16] Sherman J D, Martin J M, Blake N K, et al. Genetic basis of agronomic differences between a modern and a historical spring wheat cultivar [J]. *Crop Science*, 2014, 54(1):1-13.
- [17] Flintham J E, Börner A, Worland A J, et al. Optimizing wheat grain yield: Effects of *Rht* (gibberellin-insensitive) dwarfing genes [J]. *Journal of Agricultural Science*, 1997, 128(1):11-25.
- [18] Reynolds M, Foulkes M J, Slafer G A, et al. Raising yield potential in wheat [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(7):1899-1918.